Fra Fysikkens Verden

Nr. 2 – 2008
70. årgang

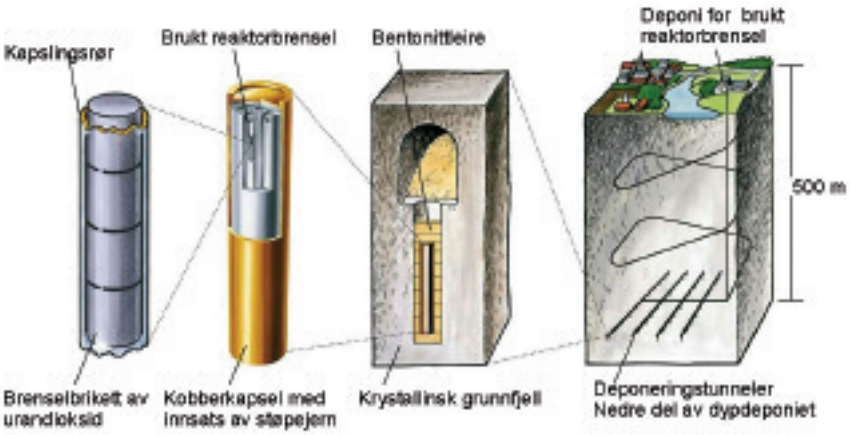
Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øystein Elgarøy
Øyvind Grøn

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Jon Samseth
Thorium – det lovande brenslet . . 45
Per I. Wethe
Radioaktivt avfall fra kjernekraft . 49
Marstein, Foss og Reenaas:
Tredje generasjon solceller 55
Fra Redaktørene 38
FFV Gratulerer 38
Thormod Henriksen
Eivind Osnes
Oddbjørn Engvold
Egil Lillestøl
In Memoriam. 43
Øyvind Hauge
Harald A. Enge
Fysikknytt 61
Ny bekreftelse på relativitetsteorien
Hva skjer 63
Kavliprisen
Fysikkolympiaden
Nordlysobservatoriet på Svalbard
CERN-tur for fysikklærere
Konferanser 65
Biofysikkmøtet 2008
Konferanse om fysikkundervisning
Bokomtale 66
J. Bennett og S. Shostak:
Life in the Universe
Nye Doktorer. 68
Dr. scient. Eirik Aspenes
PhD Bjarte Alsaker Mohn
PhD Jan Petter Morten
PhD Are Raklev
PhD Camilla Sætre
PhD Ola Kristoffer Øye
Trim i FFV 71



Dypdeponering av radioaktivt avfall
(Se artikkel)

ISSN-0015-9247

Fra Redaktørene

Googling på "formidling" gir 907 000 treff. Det som står øverst på denne formidable listen er: *Formidling – en av hovedoppgavene til Universitetet i Oslo.* UiOs akademiske kollegium (styret) vedtok 25. januar 2000 følgende definisjon: "Med forskningsformidling menes at forskere formidler vitenskapelige resultater, arbeidsmåter og holdninger fra et spesialisert forskningsfelt, til personer utenfor feltet samt deltar i samfunnsdebatten med forskningsbasert argumentasjon."

Vi leser videre på Universitetets internettpresentasjon: "Myten om Universitetet som elitens elfenbenstårn har dårlig forankring i virkeligheten: Mange forskere deltar meget aktivt med sine fag i samfunnsdebatten i mediene. Dessuten formidler de gjennom bøker og foredrag – eller på Universitetets forskningssider på web. Universitetet i Oslo har et eget forskningsformidlingstidsskrift, Apollon, som finnes både i papirutgave og på web."

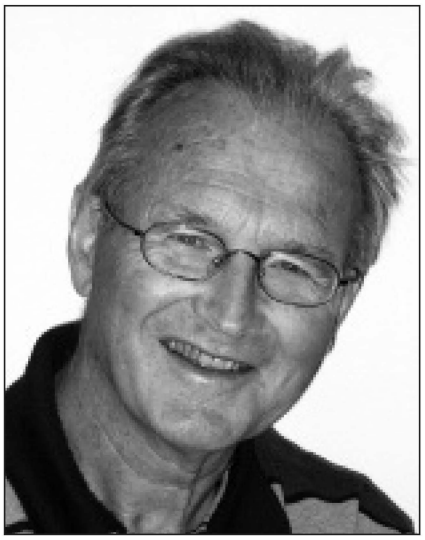
Til tross for alt dette er det et misforhold mellom ressurser som brukes på undervisning og forskning kontra ressurser som går til formidling. Vi så det tydelig da Fra Fysikkens Verden nylig skulle få ny redaksjon. Hvor er de øremerkede midlene som kan sikre kontinuitet og videre drift av tidsskriftene som formidler fra universitetenes ulike fagområder, for eksempel fysikk? Kan man vente at den avgjørende innsatsen som redaksjonssekretær skal ivaretas på idealistisk grunnlag med en symbolsk lønn?

Hvordan stimulerer universitetene til formidlingsinnsats blant fagpersonalet? For to år siden ble det innført en formidlingsordning ved Høgskolen i Oslo. Det ble vedtatt å opprette en sentral formidlingspott som fordeles til avdelingene ut fra antall formidlingspoeng som er rapportert i "Frida". Her teller blant annet populærvitenskapelige artikler, kronikker, anmeldelser, populærvitenskapelige foredrag, lærebøker og rapporter og programdeltagelser. Foruten gleden ved å formidle gir den nye ordningen en ekstra motivasjon til formidlingen ved at hvert formidlingsbidrag også innebærer en liten belønning til den gruppen man hører til. Og ordningen forteller at formidlingen er verdsatt. Det er i tråd med universitetenes formål. Vi utfordrer ledelsene ved universitetene til å innføre tilsvarende formidlingsordninger.

∞

FFV Gratulerer

Thormod Henriksen 80 år



Professor Thormod Henriksen, vår nestor i biofysikk, er nå en ungdom på 80 år. Som regelverket tilsier gikk han av med pensjon for 10 år siden, men han sluttet ikke med sine faglige aktiviteter av den grunn – til stor glede for oss ved forskningsgruppen for biofysikk og medisinsk fysikk ved Universitetet i Oslo, og for mange andre.

Thormod Henriksen ble født 26. februar 1928 og vokste opp på Nøtterøy. Etter eksamen artium ved Tønsberg Gymnas i 1948, begynte han å studere ved Universitetet i Oslo, og ble cand.real. i 1955. Hovedfagsarbeidet utførte han ved Norsk Hydros Institutt for Kreftforskning (NHIK) ved Radiumhospitalet, med Johan Baarli (en annen nestor innen strålingsfysikken) som veileder. Thormod studerte bl.a. hvordan Radiumhospitalets nye 31 MeV betatron best kunne brukes i kreftbehandlingen.

Forskningen gav mersmak, og Thormod fortsatte ved NHIK som stipendiat i Kreftforeningen. Dette arbeidet førte ham over til eksperimentelle studier av biomolekyler i celler og deres respons på ioniserende stråling, og en ny metode skulle bli hans viktigste arbeidsverktøy. I 1957 hadde han fullført byggingen av Nordens første elektronspinnresonans- (ESR-) spektrometer, og ved hjelp av dette instrumentet som utnytter de magnetiske egenskapene til strålingsinduserte frie radikaler, utførte han grunnleggende studier av en rekke viktige prosesser rundt strålevirkning på biomolekyler. Han disputerte for

den filosofiske doktorgraden i 1963 på et arbeid om strålingsbeskyttende stoffer. Hans forskning bidro til at instituttet, og han selv, fikk en vitenskapelig anerkjennelse langt utover landets grenser.

I to perioder på 60-tallet gjorde Thormod Californina til sitt hjem, sammen med ektefellen Målfrid og tre barn. Stasjonert ved de store akseleratoranleggene ved University of California i Berkeley, publiserte han en rekke arbeider om virkningen av tunge ioner og partikkelstråling, samtidig som han perfeksjonerte seg innen ESR-spektroskopi.

I 1970 fikk Thormod Henriksen et nyopprettet dosentur i biofysikk ved Fysisk institutt, UiO, og som velkomstpresang(!) fikk han et nytt ESR-spektrometer. Forskningen tok etter hvert to hovedretninger: studier av strålingsinduserte radikaler i fundamentale biomolekyler (DNA og proteiner), og studier av struktur og dynamikk til biologiske molekyler i celler. Denne aktiviteten var Thormods hovedvirke fram til midten av 1980-tallet, kun avbrutt av en periode som bestyrer ved Fysisk institutt (1978–1980). Hans internasjonale renommé førte til et jevnt tilsig av utenlandske gjesteforskere til biofysikkgruppen ved UiO. Han fikk et personlig professorat i 1980, og i 1981–82 oppholdt han seg igjen i Berkeley, hvor han underviste i strålingsbiofysikk. Mange ideer i dette fagfeltet ble utprøvet på norske studenter i flere av de kursene han underviste i etter at han kom hjem.

26. april 1986 smalt det i Tsjernobyl, og Thormods innsats ble dreiet mot formidling til befolkningen generelt. Først var det ioniserende stråling og helsemessige effekter av lave doser som sto i fokus; men etter hvert utvidet miljøengasjementet hans til også å omfatte ultrafiolett stråling, ozonlag, meteorologiske forhold i atmosfæren og drivhuseffekten. Intervjuer og artikler i media, opprettelsen av et nytt kurs innen miljøfysikk ved Fysisk institutt, og ikke minst produksjon av flere bøker og hefter om de nevnte temaene – i samarbeid med er rekke fagfolk både ved instituttet og andre steder – tok etter hvert all hans tid. Sammen med hovedfags- og doktorgradsstudenter i biofysikkgruppen laget han to store utstillinger på Norsk Teknisk Museum: "Deilig er den himmel blå" og "Vår strålende hverdag". Gjennom sine bøker og temahefter – som fortsatt er i bruk både i grunnskolen og ved universiteter og høgskoler – har han nådd fram til et stort og bredt publikum, også utenfor landets grenser.

Universitetet i Oslo har en tredelt formålsparagraf: forskning, undervisning, og formidling. Sjelden har noen oppfylt denne formålsparagrafen så fullstendig som Thormod Henriksen. Han fikk da også velfortjent *Formidlingsprisen* ved UiO i 1998. Dette usedvanlige engasjementet innen populærvitenskapelig aktivitet for å spre kunnskap om vårt strålingsmiljø, gikk imidlertid ikke uten sverdslag. Enkelte medier, miljøbevegelser og -stiftelser blinket ut Thormod som et sentralt mål og benyttet til dels sterke og ufine midler i sine forsøk på å stigmatisere ham. Dette rokket imidlertid aldri på Thormods utadrettede engasjement og dyptpløyende *ærlighet* og *respekt* for fagkunnskap.

I perioden 1991–1998 var Thormod Henriksen president i Norsk Fysisk Selskap og var i den perioden bl.a. sterkt engasjert i rekrutteringen til fysikk blant skoleelever. I det hele tatt, Thormod har i hele sitt liv vært en meget engasjert og aktiv person – og ikke bare inne faglige spørsmål. Allerede i svært ung alder viste han en enorm interesse for sport og friluftsliv, både som utøver og tilskuer, og hans engasjement på dette området har vært, og er, meget omfattende. Mest kjent er kanskje innsatsen hans i Holmen og Tyrving idrettslag, som aktivt medlem og som oppmann for langrenn og orientering. Med årene er den aktive deltakelsen blitt *noe* redusert, men Thormod holder seg fortsatt i god form ved å sykle om kapp med toppidrettskvinner og -menn; og når spenningen stiger på TV-skjermen øker han tempoet på sin ergometersykkel.

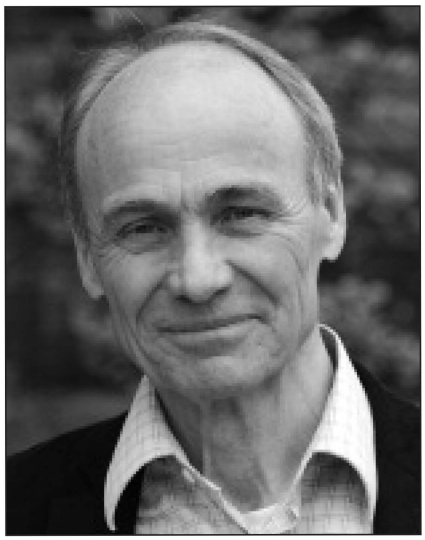
I årene som er gått siden Thormod Henriksen formelt gikk av med pensjon har han engasjert seg som *historiker*. På "hjemmefronten" har han drevet dyptpløyende slektsforskning og har på det viset klart å spore opp mange spennende og tidligere ukjente familiemedlemmer fordelt utover hele kloden. På "universitetsfronten" har han engasjert seg i historien til Fysisk institutt ved UiO, med en spesiell fokus på hoved- og doktorgradsarbeid innen biofysikk, miljøfysikk og medisinsk fysikk gjennom tidene. Dette kunnskapsfylte og underholdende dokumentet på nesten 250 sider, bringer fram minner og gjenkjennende nikk fra svært mange. De som enda ikke har sett det bør absolutt ta en kikk på *http://www.fys.uio.no/biofysikk/norsk/Historikk.pdf*

Vi setter umåtelig stor pris på jubilanten, og er glade og takknemlige for at Thormod fortsatt liker å tilbringe tid sammen med oss på biofysikk!

Einar Sagstuen og Eli Olaug Hole

∞

Eivind Osnes 70 år



11. mai 2008 fylte professor Eivind Osnes 70 år. Med unntak av enkelte midlertidige utenlandsopphold har Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo (UiO) vært hans faste arbeidsplass i 46 år, og han er fremdeles i full virksomhet med sitt vitenskapelige spesialfelt *Kvantemekanisk mange–partikkelsystem.* I tillegg er han instituttleder ved Fysisk institutt, en jobb han har hatt i to omganger. Første periode var 1991–1997 for så å komme tilbake i 2005 etter et solid tillitsvotum fra instituttets ansatte. I den turbulente tiden da den administrative nyordningen ble etablert ved universitetet, ble han oppfattet som en solid støtte for den lokale vitenskapelige forankring.

I 1963 dukket Eivind Osnes som ung, fersk cand.mag.-student opp i Kjernefysikkgruppa ved Fysisk institutt. At han var en spesiell begavelse ble fort synlig. Han fikk tidlig et internasjonalt perspektiv på sitt nye fagfelt og skaffet seg gode kontakter med ledende internasjonale forskere. I samtale med Igal Talmi (Weizmann Institute, Israel) på en konferanse i 1964 i Finland, ble han utfordret med et spennende faglig problem. Dette endte opp i hans første publikasjon i teoretisk kjernefysikk og en etterfølgende Dr.philos.-grad i 1966 uten det normale mellomtrinn gjennom en cand.real.-grad.

Neste trinn startet i 1967 da Eivind kom til Bohr Instituttet og Nordita som post doc, en topp internasjonal institusjon i kjernefysikk. Her møtte han Ben Mottelson og Gerry Brown, begge ansatt ved Nordita og kjente internasjonale forskere i teoretisk kjernefysikk. Dette har preget Eivinds virksomhet siden med en solid faglig bredde i fysikk, og med spesiell vekt på kvantemekaniske mikrosystemer.

Etter en periode som NAVF- og universitetsstipendiat kom Eivind i sin videre karriere til State University of New York, Stony Brook. Her møtte han Tom Kuo, en elev og nær medarbeider av Gerry Brown. Tom Kuo og Eivind Osnes har siden hatt et livslangt samarbeid omkring *effektiv vekselvirkning i kvantemekaniske mange–partikkelsystemer.* De publiserte en grunnbok i feltet i 1990, og som stadig er i bruk.

Eivinds videre nasjonale karriere førte til en dosentstilling i 1977 og professorstilling i 1985.

Sammen med kollegaer på Fysisk institutt har Eivind Osnes bygd opp en solid og internasjonalt anerkjent aktivitet i kvantemekanisk mange-legemeteori, med hovedfokus på *ab initio*-beregninger i kjernestruktur og kjerneastrofysikk. Aktiviteten har forgreininger til mange andre fagfelt i teoretisk fysikk, hvor mange-legemeeffekter og korrelasjoner er viktige.

Som lærer og veileder ved UiO har Eivind Osnes med stor iver og innsats deltatt i alle typer universitetsundervisning og veiledning. Han har hatt spesiell interesse for begynnerundervisningen i fysikk (FYS 111 Mekanikk, 1988–95), treningskurs for studenter til fysikkolympiadene og instituttets felleskolokvium. Det er også blitt tid til populærvitenskapelig virksomhet med en serie artikler, radio- og avisintervjuer og foredrag på universitetets åpne pedagogiske dager.

I tillegg har Eivind utviklet et omfattende program i mange- -legemeteori, og hans kurs i mange–partikkelteori har vært et basiskurs som har dannet skole for mange kommende fysikere og kvantekjemikere. Flere av Eivinds doktorgradsstudenter har endt opp i faste vitenskapelige stillinger ved universiteter og høgskoler.

Parallelt med sin store vitenskapelige aktivitet har Eivind Osnes en omfattende innsats i norske og internasjonale fysikkorganisasjoner bak seg. Vi har allerede nevnt hans sentrale posisjon ved Fysisk institutt. Hans ledelse av instituttet i en tid med store endringer har hatt stor betydning for norsk fysikk. Han har også vært medlem av fakultetsrådet ved Det Matematisk– naturvitenskapelige fakultet, og har vært medlem av Universitetets kollegium (styre) i en periode. Gjennom denne aktiviteten har han bidratt betydelig til debatten om norsk forskningsog universitetspolitikk.

I 1979 overtok Eivind Osnes som president i Norsk Fysisk Selskap etter Tormod Riste, og ledet selskapets virksomhet med fast hånd de neste 11 årene. Mye arbeid ble gjort for å etablere Selskapet som en solid felles plattform for fysikere ved uni-

versiteter og høgskoler i Norge. Videre etablerte han Selskapet som en solid medspiller i europeiske fysikkorganisasjoner og deltok selv aktivt i oppbygging av *European Physical Society*, en parallell til *American Physical Society*. I 1992–97 satt han i Rådsforsamlingen og eksekutivkomiteen som *vice treasurer*. I samme periode var han formann i styret for tidsskriftet *Europhysics Letter* og var et aktivt medlem i *Nuclear Physics European Collaboration Commitee*.

Som takk for sin innsats i *Norsk Fysisk Selskap* ble Eivind i 1992 utnevnt til æresmedlem. Han er også medlem av Det Norske Videnskaps-Akademi fra 1992, og i Det Kongelige Norske Vitenskabers Selskap.

For Norge har Eivind Osnes spilt en meget viktig rolle gjennom deltakelse i styring og ledelse ved CERN (Centre Europeen de la Recherce Nucleaire). Dette vervet er særlig viktig ved at det legger premisser i to retninger, både med hensyn til bruk og kontroll av de betydelige ressursene Norge investerer i CERN-aktiviteter, og med den sterke faglige profilering og innflytelse som vedtakene i CERN har på innretningen av store deler av norsk fysikkforskning. Eivind Osnes er meget respektert internasjonalt for sine bidrag i CERNs forskjellige styrende organer. Utover dette har han bidratt med forskningsledelse på såvel nordisk (styremedlem i NORDITA) som på nasjonalt nivå (diverse komitedeltakelser for NAVF/Forskningsrådet).

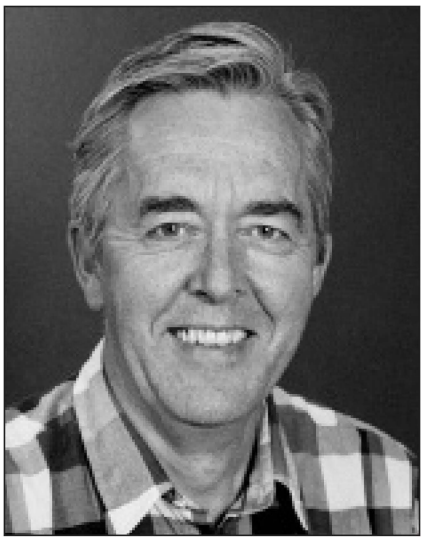
Sist, men ikke minst, har Eivind Osnes brukt sin naturvitenskapelige kompetanse og kunnskap i fysikk i det offentlige rom ved å være leder i det regjeringsoppnevnte teknologirådet i to perioder (8 år). Dette er en viktig utfordring i dagens samfunn hvor naturvitenskapelig forskning og utvikling er avgjørende for samfunnet.

Vi gratulerer, og ønsker Eivind mange gode utfordringer i tiden som kommer!

Heidi Bruvoll, Torgeir Engeland
og *Morten Hjorth-Jensen*

∞

Oddbjørn Engvold 70 år



Professor Oddbjørn Engvold ved Institutt for teoretisk astrofysikk fylte 70 år den 7. april, selv om det er vanskelig å tro det! Like sprek og like sterk i replikken virker han. Fra 1. januar 2008 trådte han over i emeritienes rekker etter over 40 år som forsker ved instituttet. Overgangen så langt er fra en aktiv professor til en svært aktiv emeritus! Oddbjørn ble født i Askim, men vokste opp i Nord-Østerdalen. Etter artium fra Orkdal landsgymnas og befalsskole, kom han til Oslo for å studere realfag og ble cand.mag. i 1963. I 1966 ble han cand.real. med hovedoppgaven "De sentrale deler av H og K-linjen i solspektret", basert på observasjoner ved solobservatoriet på Harestua, der han var ansatt som observasjonsassistent mens han var hovedfagsstudent.

Straks etter at han var ferdig med hovedfag ble han ansatt som vitenskapelig assistent, og året etter ble han fast ansatt som amanuensis ved instituttet. Vår "grand old man" har vært tilknyttet instituttet hele tiden siden, fra 1973 som førsteamanuensis og fra 1989 som professor. I 1979 disputerte han for den filosofiske doktorgraden med avhandlingen "The fine structure of prominences – constraints on prominence models". I 1968–69 var han gjesteforsker i ett år ved Kitt Peak National Observatories i Arizona, og det samme var han ved Sacramento Peak Observatory i New Mexico 1973–74. I 1978–79 var han gjesteforsker et halvt år ved universitetet i Göttingen.

Oddbjørn har publisert over 200 vitenskapelige arbeider, hvorav ca. 70 i internasjonale tidsskrifter med referee. Hans forskning har vært innom mange temaer, bl.a. ultrafiolette- og røntgenobservasjoner

av stjerner og studier av stjerners overflatestrukturer ved "Doppler imaging", men det store volumet har dreid seg om forståelse av fysikken i atmosfæren til den nærmeste stjernen, vår egen sol. Fra 1970 til i dag har hans største interesse vært å forstå protuberansene, de store lysende skyene som kan sees over randen til solen under solformørkelser, og som med spesielle instrumenter kan sees også ellers, både på solranden og inne på solskiven. I det siste tilfellet kalles de filamenter. Oddbjørn er forfatter av over 30 vitenskapelige artikler om protuberanser og filamenter, både teoretiske og basert på rom- og bakkeobservasjoner. To spesielt mye siterte artikler er en studie av finstruktur i protuberanser som han publiserte i 1976, og en studie av hastighetsfelter i protuberanser som ble publisert i *Nature* i 1998.

Oddbjørns store innsikt i bakkebaserte solobservasjoner gjorde at han ble leder for LEST Foundation, en internasjonal organisasjon opprettet i begynnelsen av 1980-årene for å bygge et nytt stort internasjonalt solteleskop, langt bedre enn noe eksisterende. Oddbjørn la ned et enormt arbeid i dette, men dessverre ble det utover på 1990-tallet klart at det ble umulig å skaffe finansiering. Men i dag er det igjen nytt håp om å kunne finansiere et felles europeisk solteleskop, større og bedre enn de eksisterende, denne gangen foreløpig kalt EST.

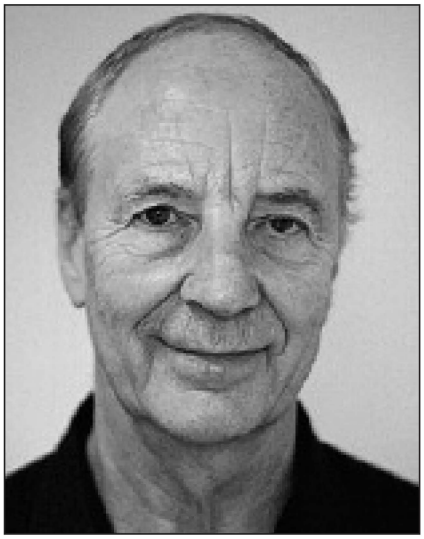
Også ellers har Oddbjørn vært en stor forkjemper for internasjonalt samarbeid i astronomi og astrofysikk, spesielt i tilknytning til den internasjonale astronomiske union IAU. Unionen har 12 vitenskapelige divisjoner, 37 kommisjoner og mer enn 90 arbeidsgrupper som dekker hele det internasjonale spektrum av astronomi og astrofysikk. IAU ble opprettet i 1919 og har fra da til i dag vokst fra 19 medlemsland til 64. Norge har vært medlemsland siden begynnelsen. IAU har i dag 9789 individuelle medlemmer som alle er fagastronomer. IAU er en av de største medlemsorganisasjonene i ICSU, International Council for Science, og samarbeider dessuten tett med UNESCO. Ved generalforsamlingen i 2000 ble Oddbjørn valgt til assisterende generalsekretær i IAU for perioden 2000 til 2003, og ved generalforsamlingen i 2003 ble han valgt til generalsekretær for perioden 2003 til 2006. Fra 2006 til 2009 er han rådgiver for eksekutivkomiteen. Oddbjørn er den første nordmann som har vært medlem av IAUs eksekutivkomité i unionens nesten 90-årige historie. Han hadde denne ledende rollen blant verdens astronomer i treårsperioden 2003–2006 som i allmennheten kanskje er mest kjent for at Pluto ble fratatt verdigheten som planet, men som innad er mer kjent for de enorme vitenskapelige fremskritt som det internasjonale samarbeidet har ført til. I tillegg til innsatsen som leder for LEST Foundation, og som IAUs generalsekretær og medlem av eksekutivkomiteen, har Oddbjørn arbeidet for internasjonalt samarbeid innen astronomi som sjefsredaktør av det internasjonale fagtidsskriftet "Solar Physics" fra 1996 til 2005, og som leder av og deltager i en rekke komiteer og utvalg. I dag er Oddbjørn leder for komiteen for den internasjonale Kavliprisen i astrofysikk.

Her ved Institutt for teoretisk astrofysikk har Oddbjørn alltid vært sterkt engasjert i instituttets ve og vel, og han var bestyrer fra 1993 til 1997. Han har vært en engasjert foreleser og veileder for en lang rekke hovedfags- og doktorgradsstudenter. Undervisningen førte til at han sammen med Eberhart Jensen skrev en lærebok i solfysikk. Både i forskning og ellers særpreges Oddbjørn av rettskaffenhet og strenge krav til vitenskapelighet. Lettvinte slutninger uten basis i skikkelig empiri ligger ham meget fjernt. Kolleger og venner gratulerer Oddbjørn på det hjerteligste og ønsker ham alt godt for fremtiden!

Per B. Lilje

∞

Egil Lillestøl 70 år



Professor Egil Lillestøl ved Institutt for fysikk og teknologi ved Universitetet i Bergen, fylte 70 år 19. mars. Med dette slutter instituttets i særklasse

mest medieprofilerte professor sitt regulære virke som underviser, formidler og forsker.

Bergensgutten Egil Lillestøl tok eksamen artium ved Tanks gymnas i 1956, og ble cand.real. ved Universitet i Bergen (UiB) i 1964 under veiledning av Anders Haatuft, med en hovedoppgave der han ved hjelp av boblekammerbilder studerte betadesintegrasjon av Lambda-hyperonet. Han reiste deretter til CERN som stipendiat. Gjennom samarbeid med franske forskere fikk han i 1967 fast jobb som forsker ved College de France i Paris. Han forlot imidlertid denne flotte stillingen allerede i 1969 til fordel for fast ansettelse som amanuensis ved UiB! Den filosofiske doktorgrad ble avlagt her i 1970, på studier av antiproton- protonannihilasjoner i ro, der vinkelfordelinger og spinn analyse var spesielt behandlet. Egil har vært professor ved UiB siden 1984.

Egil Lillestøl har gjennom hele sin karrire arbeidet med partikkelfysikk, med deltakelse i PLUTO-eksperimentet i DESY, Tyskland, og fram for alt i eksperimenter ved CERN. Han var bl.a. med i DELPHI-eksperimentet helt fra det ble foreslått i 1982. Her fikk Bergen sammen med Oslo blant annert ansvar for konstruksjon og drift av SAT-detektoren (Small Angle Tagger). Egil har hatt ledende posisjoner innen DELPHI og andre eksperimentelle samarbeid, men gikk i 1990 ut av dette for gå inn i CERNs forskningsledelse som nestleder ved CERNs fysikkdivisjon. Siden 1992 har han vært direktør for CERNs fysikkskoler, som nå også omfatter fysikkskoler i Latin-Amerika. Fra 1994 til nå har han ledet Norges forskningsråds programkomiteer for subatomær og CERN-relatert fysikk, i litt forskjellige organisatoriske former.

Egil er en tvers igjennom *engasjert* og humørfylt person. Å dele bord med ham til lunsj eller kaffepause fører alltid til stimulerende og interessante samtaler, spesielt på områder innen naturvitenskap. Dette engasjementet kombinert med hans solide kompetanse, har gjort ham til en svært populær formidler av partikkelfysikk og kosmologi, med tallrike innslag i aviser, radio og fjernsyn. Han har vunnet flere prestisjetunge priser for denne aktiviteten, deriblant Meltzerfondets og UiBs formidlingspris i 2002, og Norges forskningsråds formidlingspris i 2007. I samarbeid med journalistene Inge Sellevåg og Gordon Fraser har han også skrevet en populærvitenskapelig bok som er gitt ut på 12 språk.

Egil har alltid vært en av instituttets mest inspirerende og populære forelesere. Hans sprudlende engasjement kombinert med stor faglig innsikt, har gjort ham til en helt unik inspirasjonskilde for studentene, som kåret ham til årets beste foreleser ved Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet i 1998. Som lesere av FFV sannsynligvis vet, har Egil gjennom en lang rekke foredrag og artikler tatt til orde for at Norge burde ta initiativ til å utvikle teknologi som gjør det mulig å bruke grunnstoffet thorium som brensel i kjernekraftverk. Denne aktiviteten er den direkte foranledningen til at regjeringen nedsatte et utvalg for å utrede mulighetene for dette i Norge.

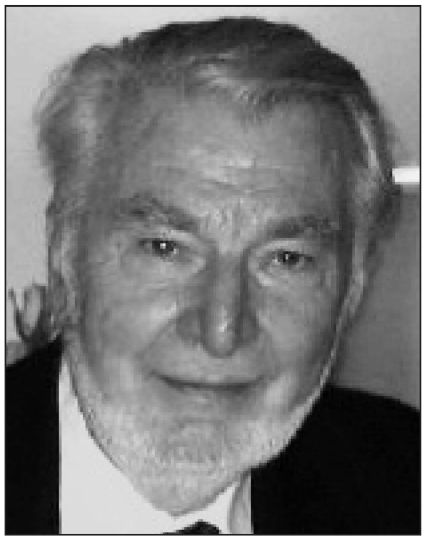
Det blir svært vanskelig, for ikke å si umulig, å finne en erstatter for Egil Lillestøl når han nå går av for aldersgrensen. En liten trøst får være at det er vanskelig å forestille seg at en person som ham vil trekke seg helt ut av forskning og formidling etter endt yrkesliv. Vi gratulerer Egil med dagen, og ønsker ham hjertelig velkommen til sitt nye liv som emeritus ved instituttet!

Bjarne Stugu

∞

In Memoriam

Øyvind Hauge (1925–2008)



Vår gode venn og kollega Øivind Hauge døde uventet den 23. april, nesten 83 år gammel. Øivind Hauge tok sin cand.real.-eksamen i fysikk ved Universitetet i Oslo i 1951. Etter noen år som lektor i skolen, kom han i 1961 tilbake til universitetet der han ble ansatt i stilling som universitetslektor i

fysikk. Fra 1964 til 1990 var han først universitetslektor og senere førsteamanuensis ved Institutt for teoretisk astrofysikk.

Hauge gjorde en rekke studier av forekomsten av forskjellige metaller i Solens atmosfære. For å skaffe et bedre innblikk i hvordan tyngre grunnstoffer fordelte seg i solsystemet studerte han solare isotopforhold. I 1972 forsvarte han dr.philos.-graden på arbeider om solare isotoper av utvalgte metaller, som i ettertid er blitt hyppig sitert i faglitteraturen. Hans publikasjonsliste inneholder også arbeider om Solens radiostråling samt en lang rekke populærvitenskapelige artikler. I 1974 skrev han læreboken "Planetsystemet" som var pensum i et av førsteavdelingskursene i astronomi i en årrekke, og i 1998 forfattet han sammen med sin gode kollega, Øystein Elgarøy, boken "Fra strålende objekter til sorte hull", som i mange år ble benyttet i instituttets introduksjonskurs i astronomi. Til 100 årsjublileet i 1994 for instituttets grunnlegger, professor Svein Rosseland, skrev han og Elgarøy boken om Rosselands liv og virke.

Vi vil gjerne fremheve Øivind Hauges villighet til å påta seg viktige, arbeidskrevende oppgaver. Han var instituttbestyrer i flere år, og etter at han formelt ble pensjonist i 1990 var han i 5 år generalsekretær i det internasjonale prosjektet Large European Solar Telescope (LEST), med lønn som seniorforsker fra Norges forskningsråd. Øivind Hauges brede interessefelt illustreres også av at han i 1999 forfattet boken "1899- -1999 Aktieselskabet Stangeskovene", som er en særdeles vakkert utstyrt jubileumsbok.

Øivind Hauge var et dedikert friluftsmenneske. Han likte seg godt i skogen, på fjellet og ved sjøen. Han var en skattet kokk og tilbereder av vilt og fisk som han brakte hjem til kjøkkenet. Kolleger og venner tenker med stor glede tilbake på de mange kulinariske måltider hjemme hos ham og Mary, hans kjære ektefelle gjennom 52 år. Den høyt respekterte fagperson, kollega og stimulerende samtalepartner, var en stor humørspreder. Vi vil sterkt savne hans lune, trygge vennskap og hans jevnlige besøk ved instituttet. Våre tanker går til Mary, Sven, Anne og de øvrige familiemedlemmer som har mistet en kjær ektefelle, far, svigerfar, bestefar og oldefar.

Kaare Aksnes, Oddbjørn Engvold og Per B. Lilje

∞

Harald A. Enge (1920–2008)



Med sorg mottok fysikere i Bergen meldingen om at vår kollega ved MIT (Massachusetts Institute of Technology) i USA, Harald A. Enge, døde nylig i en alder av 87 år. Han var av særdeles stor betydning for kjernefysikkens og teknologiens utvikling i Bergen, både som ung mann ansatt ved et ungt universitet, og senere som utenlandsk samarbeidspartner. Enge fikk sin doktorgrad fra Universitetet i Bergen i 1954, som den første i fysikk, og drøye tretti år senere ble han også æresdoktor.

Om Enges betydning for Bergens-fysikken var stor, var den også stor for USA, og enda større for verdens kjernefysikkutvikling. Enge ble derfor også i 1984 hedret av American Physical Society med den prestisjetunge Tom W. Bonner-prisen i kjernefysikk: "For hans framragende bidrag til grunnprinsipper og design av magnetiske spektrometre og stråleoptikk i fagfeltet kjernefysikk." Bergensere kan fremdeles iaktta byens historiske Van de Graaff-akselerator på høyden ved den gamle Geofysen. Ved MIT i Boston, fikk Enge R.J. Van de Graaff selv som kollega, også han mottaker av Bonner-prisen.

Harald A. Enge var født i 1920 og vokste opp på Fauske i Nordland. Med støtte fra foreldre med teknisk fagskole som levevei, lyktes det en elektronikkbegeistret ungdom å komme inn på NTH i Trondheim. Selv om krigs- og etterkrigsår gjorde "seilasen" sjansebetont også for NTH-kandidater, brakte personforbindelser Enge til Bergen og det framvoksende fysikkmiljøet rundt Van de Graaff-en i 1948. Få år senere ble han motivert for MIT av professor Buechner, lederen av MITs Van de Graaff-gruppe, etter å ha vist dyktighet under et stipendopphold i 1950, knyttet til MITs "Foreign

Students Summer Project". Bergens internasjonale forbindelser innebar altså også risiko for tap av talenter. Enges karriere er imidlertid et eksempel på hvordan Bergen fikk rikelig igjen, ved å fornye kontakten med et sterkere miljø ved MIT, etter en tid å ha slitt med hjemlige forhold, bl.a. forårsaket av brann i Van de Graaff-en.

Hovedfagsstudenter i kjernefysikk i Bergen kunne for førti år siden stolt bemerke at den mest moderne boken i feltet, "Introduction to Nuclear Physics" (1966), var skrevet av en utvandret nordmann, Harald Enge. Ikke bare leste de Enges bok; flere titalls studenter fikk på 60og 70-tallet data produsert ved hjelp av MITs Enge- multigapspektrograf, som grunnlag for sine hovedfags oppgaver. Gode forbindelser, og da spesielt med professor Arnfinn Graue og førsteamanuensis Jan R. Lien, gjorde dette mulig.

Enge var, som Van de Graaff, teknologiskaper og oppfinner mer enn vi vanligvis forbinder med akademiske professorer i fysikk. Her tilhører Enge en stolt norsk linje, med framragende norske og norskættede representanter. Sporene etter ham er langt fra visket ut. Verdens kjernefysikklaboratorier har Enge-spektrografer som del av sin husholdning, og under mange navn: split-poles, Q3D, QMG2, multigaps osv. Enges lærebok, oppdatert i 1998, er fremdeles egnet til å veilede i atomenes ABC. Enges livsverk lever videre.

Jan S. Vaagen

∞

Thorium - det lovande brenslet i 50 år

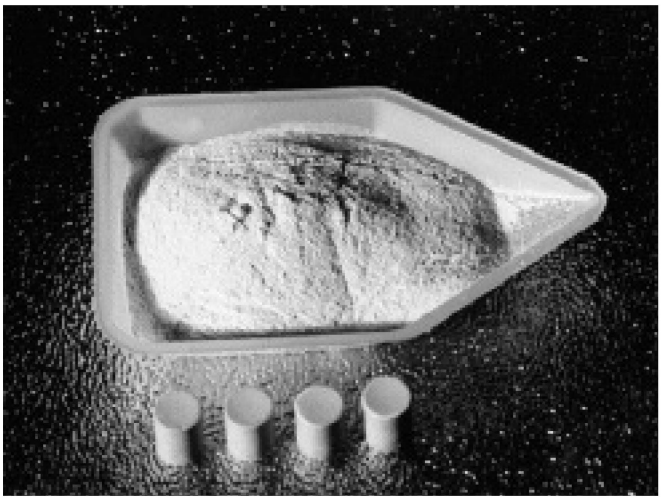
Jon Samseth *

Heilt sidan kjernekraftas barndom har ein vore klar over thorium sitt potensiale som reaktorbrensel. I om lag 50 år har thorium vore testa ut i ulike reaktortypar. Spesielt var aktiviteten stor på 60-talet der òg Institutt for atomenergi på Kjeller var involvert i det såkalla Dragonprosjektet i England. I dag har det komme på kartet igjen. Vil det klare å slå igjennom denne gongen? I denne artikkelen skal vi sjå på eigenskapane til thorium, kva som gjer det interessant som reaktorbrensel og kva som gjer det komplisert å bruke. Fleire reaktorar har vore kjørt på thorium som brensel, mest kjent er reaktoren i Shippingport i Pennsylvania i USA.

I åras løp har det vore gjort fleire forsøk på å kommersialisere thorium som brensel både i USA, Brasil, India og Tyskland. Men det har aldri klart å slå igjennom. Det var Tyskland som dreiv dette lengst på 1980-talet, men Tsjernobyl-ulykka sette ein effektiv stoppar for det tyske thoriumprogrammet. I dag har India eit omfattande thoriumprogram, men på grunn av at India ikkje har underskrive ikkjespreiingsavtalen er teknologisk samarbeid med India på det nukleære området ikkje mogeleg.

Thorium er eit av dei mest vanlege grunnstoffa i naturen og ein rekner med at det er om lag like vanleg som bly. Det finst i fleire bergartar og i ulike former. Dei mest vanlege er monasitt (fosfat), thoritt ($ThSiO_4$) og thorianitt (ThO_2). Den norske forekomsten på Fen-feltet på Ulefoss er i form av thoritt. Kommersiell utvinning av thorium finn ikkje stad i dag. Thorium er eit biprodukt av annan produksjon. Ofte er det utvinning av sjeldne jordartar som er hovudproduksjonen og thorium biproduktet. Det har hittil skjedd på grunnlag av lett tilgjengeleg monasitt. Thoriumoksid var mykje etterspurt i siste halvdel av 1800 talet då det vart brukt i gasslampemantlar. Oppvarming av thoriumoksid fører til at det avgir kvitt lys. I dei siste åra

* Høgskolen i Akershus/NTNU



Figur 1. Thorium i ein vasskjølt reaktor er på forma ThO_2. Det kvite pulveret (over) blir pressa saman og sintra (oppvarma slik at overflata på pulverpartiklane smeltar) til ein kompakt sylindrisk pellet med diameter på 8-10 mm (under). Den butte enden av sylinderen er konkav slik at pelleten kan ekspandere når fisjonsgassar blir danna inne i pelleten. Desse pelletane blir plasserte inne i lange rør av zirkoniumlegeringar. Til saman utgjer dette ein brenselstav.

har ein prøvd å erstatte thorium til dette formålet så langt som råd er på grunn av den svake radioaktiviteten. Sidan thorium er så vanleg i jordskorpa, blir det tatt opp av planter. Dagleg får vi i oss rundt 3 mg gjennom den maten vi spiser, men heldigvis blir nesten ingenting absorbert i kroppen.

I naturen er isotopsamansettinga av uran i hovudsak ^{238}U med 0,7 % ^{235}U. For thorium derimot er nesten alt i form av ^{232}Th med mikroskopiske innslag av ^{230}Th og ^{228}Th. Den siste isotopen er både eit nedbrytingsprodukt frå ^{232}Th og frå ^{232}U, som er problematisk med tanke på brukt brensel.

Kjemisk er thorium 4-verdig medan uran kan både vere 4- og 6-verdig. I dagens kjernekraft nyttar ein ikkje metallet, men metalloksidet som brensel. Grunnen til dette er som det går fram av tabell 1, at metalloksida har mykje høgare smeltepunkt enn det reine metallet, og at det ikkje endrar krystallstruktur og dermed volum, når temperaturen aukar. I dei fleste reaktorane er brenslet plassert inne i lange rør av zirkonium som blir kjølte med lett- eller tungtvatn. Vatnet bremser òg ned nøytrona til den rette farten, eller energien om ein vil, slik at kjernene lettare blir spalta. Brenselstavane i dagens reaktorar inneheld UO_2, eller ei blanding av UO_2 og PuO_2 dersom reaktoren nyttar MOX-brensel (mixed oxides). I ein reaktor som går på thorium vil det meste vere ThO_2 med litt iblanding av UO_2 eller PuO_2. Eit problem med uran som brensel er at i kontakt med vatn så vil det gå over til U_3O_8 sidan uran både er 4- og 6-verdig. Altså vil det endre volum dersom det skulle komme vatn eller fukt inn i ein brenselstav. ThO_2 derimot er inert og er vanskeleg løyseleg i vatn. ThO_2 vil la seg løyse i ei blanding av flussyre og salpetersyre.

Fysiske eigenskapar

I tabell 1 er det lista opp ulike fysiske eigenskapar for uran, plutonium og thorium og deira oksid. Desse tala varierer litt frå kjelde til kjelde, men dette er dei verdiane som IAEA (International Atomic Energy Agency) opererer med.

Tabell 1. Fysiske eigenskapar til uran, plutonium og thorium på metallisk og oksidform.

	U	**Pu**	**Th**
Smeltepunkt (°C)	1132	640	1752
Teoretisk tettleik (g/cm^3)	19,05	19,86	11,68
Varmeleiingsevne ved 500 °C (W/m K)	30	30	43,1
Varmeutvidingskoeff. (K^{-1})	$14,2 \cdot 10^{-6}$	$56 \cdot 10^{-6}$	$11,9 \cdot 10^{-6}$

	UO_2	**PuO_2**	**ThO_2**
Smeltepunkt (°C)	≈2850	≈2250	≈3370
Teoretisk tettleik (g/cm^3)	10,96	11,46	10,00
Varmeleiing ved 500 °C (W/m K)	4,80	4,48	6,20
Varmeleiing ved 1500 °C (W/m K)	2,40	1,97	2,40
Varmeutvidingskoeff. (K^{-1})	$10 \cdot 10^{-6}$	$11,4 \cdot 10^{-6}$	$9,67 \cdot 10^{-6}$

Smeltepunkta er ein god del høgare for oksida enn for tilsvarande reint metall. Når det gjeld ThO_2, så har det det høgste smeltepunktet som er kjent for noko oksid. Det er på 3370 °C, som er meir enn 500°C høgare enn smeltepunktet for UO_2.

Ein annan viktig eigenskap ved thorium er varmeleiingsevna som er lista opp i tabell 1 for to temperaturar for oksida. Den første temperaturen på 500 °C er litt høgare enn temperaturen på utsida av brenselstaven der vatnet har 300–350 °C. Den andre temperaturen, 1500 °C, er typisk for det ein kan ha i senterlinja i ein brenselstav. ThO_2 er det oksidet som har dei høgaste varmeleiingskoeffientane. Ved 1500 °C er imidlertid varmeleiingskoeffisienten til UO_2 like høg.

Sidan ein i reaktorar ønskjer å leie bort varmen så hurtig som råd, så har ThO_2 betre termiske eigenskapar enn UO_2. Generelt seier ein at ThO_2 er meir termisk robust som brensel enn UO_2. I reelle tilfelle kjem også pakkegraden (kor mykje tomrom det er i brenslet) inn, og om det er sprekker eller andre feil i brenslet.

Den teoretiske tettleiken er den tettleiken ein har når ein har eit kompakt materiale utan tomrom. For brenselstavar er pakkinga normalt langt over 90 %, litt avhengig av reaktortypen. Når ein uran- eller plutoniumkjerne blir spalta i to mindre kjernar, kan det hende at den eine kjernen er ein gass (Kr eller Xe). Denne gassen kan føre til at brenselpelletane kan svelle og eventuelt sprekke. Derfor har ikkje pelletane flate endar, men har groper i endane. Ein legg merke til at eigenvekta er høg, i overkant av 10 g/cm^3. Det gjer at voluma blir ganske små.

Fertilt – fissilt

Eit problem med thorium i kjernekraftsamanheng er at ^{232}Th ikkje er direkte spaltbart i dagens reaktorar, og det kallast derfor fertilt. Det vil seie at dersom ein ^{232}Th-kjerne fangar inn eit nøytron så vil han kunne omdannast til ein spaltbar kjerne. Ein spaltbar kjerne blir omtalt som fissil. For å kunne nyttast i dagens reaktorar må ^{232}Th gjerast om til den spaltbare isotopen ^{233}U. Det skjer ved nøytroninnfanging med to etterfølgjande β-desintegrasjonar. Halveringstida for denne reaksjonen er 27 dagar:

$$^{232}Th \xrightarrow{n} {}^{232}Th \xrightarrow{\beta} {}^{233}Pa \xrightarrow{\beta} {}^{233}U$$

Prosessen er analog til danning (breeding) av ^{239}Pu frå ^{238}U. Men denne prosessen er hurtigare med bare 2–3 dagars halveringstid, noko som gjer han lettare å implementere i reaktorar:

$$^{238}U \xrightarrow{n} {}^{239}U \xrightarrow{\beta} {}^{239}Np \xrightarrow{\beta} {}^{239}Pu$$

Ved bruk av thorium i reaktorar må ein altså gjere thoriumet om til isotopen ^{233}U, som blir spalta og ved det frigjer energi. ^{233}U er altså den fissile isotopen på same måten som ^{235}U er den fissile isotopen i ein tradisjonell reaktor. ^{232}Th opptrer derfor på same måten som ^{238}U, som ved nøytroninnfanging kan gå over til den fissile isotopen ^{239}Pu. Begge isotopane kan inngå i ein "breedingprosess". For praktisk reaktorbruk er thorium best eigna for breeding i ein termisk reaktor (sjå nedanfor), medan uran er best i ein reaktor med hurtige nøytronar. Det betyr at dagens andre- og tredjegenerasjonsreaktorar kan vere breederreaktorar for thoriumbrensel. Dette har vore testa ut i mange land, m.a. i Tyskland og USA, der den første reaktoren gjekk på thorium i 1957.

Sidan ^{232}Th ikkje er fissilt, kan ein ikkje starte ein reaktor med reint thoriumbrensel. Den første tida, ein månad eller meir, må reaktoren anten gå på uran- og/eller plutoniumbrensel slik at thoriumet først vil ta til å "brenne" når ein har fått danna nok ^{233}U. Mengdeforholda mellom thorium og uran er mellom anna avhengig av reaktortype, brenselgeometri og utforming av kjernen. Det betyr at ein må velje brenslet etter det ein ønsker å oppnå, slik som lite transuranar i avfallet, brenning av mest mogleg thorium, mest mogleg brenning av plutonium eller utbrenning av heile brenslet. Det er lettare å drive ein reaktor på blandingsbrensel av thorium med eit lite innslag av uran eller plutonium, enn å prøve på å kjøre ein reaktor på reint thorium. I prinsippet kan ein truleg drive ein tungtvassreaktor på reint thorium etter at ein har passert den kritiske oppstartsfasen, men det er i dag ingen som har demonstrert dette i praksis.

Mellom fjerdegenerasjonsreaktorane, sjå FFV 1/2008, er saltsmeltereaktoren (MSR) spesielt godt eigna til å nytte thorium som brensel. I dette tilfellet nyttar ein ThF_4 i ei saltblanding som i hovudsak består av LiF. Thorium kan òg nyttast i den blykjølte reaktoren som er ein viktig komponent av ein ADS, sjå FFV 1/2007. I begge desse konsepta er det lattare å kunne kjøre på reint thorium etter oppstarten.

Nøytrondata

I tabell 2 er dei nuklære data i det vi kallar det termiske området for ein del isotopar som er aktuelle i kjernekraftsamanheng. Med det termiske området meiner vi den energien som nøytrona har etter å ha blitt bremsa ned av vatnet i reaktoren. Det tilsvarar ein energi på 25 meV (eller at nøytronet har farten 2200 m/s). Tverrsnitta representerer sannsynet for ei hending, og blir målt i *barn* (1 barn = 10^{-24} cm^2). For kommersielle termiske reaktorar er det 3 spaltbare isotopar som er av interesse: ^{233}U, ^{235}U og ^{239}Pu. Tverrsnitta er som sagt for det termiske området, men det er viktig å vere klar over at det i open litteratur er relativt stor uvisse i desse tverrsnitta både når det gjeld thorium og uran. IAEA har databasar over nukleære data

som stadig blir oppdaterte. Tala i tabellane ovanfor stammar frå den japanske databasen som er lettare å finne fram i enn databasen til IAEA. Tala er frå 2004.

Tabell 2. Tverrsnitt for fissile isotopar for termiske nøytron (25,3 meV). Her er σ_f fisjonstverrsnitt (barn), σ_γ er innfangingstverrsnitt (barn), $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$ er absorpsjonstverrsnitt (barn), ν_t er talet på nøytron emittert pr. fisjon, $\alpha = \sigma_\gamma/\sigma_f$ er alfakonstanten og $\eta = \nu_t\sigma_f/\sigma_a$ er talet på nøytron emittert pr. nøytron absorbert.

	^{233}U	^{235}Pu	^{239}Th
σ_f	531	585	747
σ_γ	45	99	270
$\alpha = \sigma_\gamma/\sigma_f$	0,085	0,172	0,362
ν_t	2,498	2,43	2,880
$\eta = \nu_t\,\sigma_f/\sigma_a$	2,30	2,08	2,11

η er ein parameter som gir talet på nøytronar som blir sende ut for kvart nøytron som blir absorbert av ein kjerne. Med absorpsjon meiner vi i denne samanheng både dei kjernane som i brøkdelen av eit sekund blir spalta (fisjon) og dei kjernane som ikkje blir spalta, men blir omdanna til tyngre isotopar ved innfanging. Når det gjeld thorium, ^{233}U, så legg ein merke til at overskottet i nøytronproduksjonen er ein god del større enn for både ^{235}U og ^{239}Pu. Nøytronmessig er derfor ^{233}U den fissile isotopen som er best eigna til å kjøre ein reaktor på.

Når det gjeld innfanging av nøytron i det termiske området, så ser ein i tabell 3 at ^{232}Th absorberer nesten 3 gonger så mange nøytron som ^{239}Pu. I det termiske området er det derfor større avkasting på ^{232}Th-omforming (breeding) til ^{233}U enn for ^{238}U omforming til ^{239}Pu. Det er derfor ein kan seie at termiske reaktorar i prinsippet kan nyttast som thorium-breederreaktorar.

Tabell 3. Tverrsnitt for fertile isotopar for termiske nøytron i barn.

	^{232}Th	^{238}U
σ_f	0	0
σ_γ	7,40	2,72
Fissionsbarriere (MeV)	≈1,3	≈0,8

Avfall

I avfallsamanheng er høvet mellom tverrsnitta for innfanging og fisjon (α) viktig. Det er innfanging av nøytron som gjer at ein får oppbygging av langliva isotopar som gjer at krava til lagring av avfallet blir ekstra store dersom ein ikkje startar med gjenvinning av avfallet. Sidan det er den første innfanginga i kjeda som er viktig med tanke på kor mykje vi får danna totalt av langliva avfall, så ser vi at det er klart mindre for ^{233}U enn for ^{235}U, og ikkje minst for ^{239}Pu som er kjelda for det meste av dei tyngre isotopane. I praksis reknar ein med at etter 8 nøytroninnfangingar er sannsynet for vidare oppbygging av tunge isotopar null. Frå reint thorium rekner ein med at følgjande langliva isotopar er viktige i radiotoksisk (strålingsgiftig) samanheng etter 1000 år: ^{229}Th, ^{230}Th og ^{231}Pa; og for uran, ^{239}Pu, ^{240}Pu og ^{231}Am.

Dersom ein tar med fisjonsprodukta så vil både thorium og uran gi målbare mengder av ^{99}Tc og ^{129}I etter 1000 år. Totalt er det rundt 30 isotopar som ein tar omsyn til ved lagring. I tillegg til dei nemnde kjem ein del mindre fisjonsprodukt, ein del aktiveringsprodukt (frå reaktordelane) og desintegrasjon av langliva isotopar. Sjølv om thorium gir mindre langliva avfall, så vil isotopen ^{232}U bli danna. Denne er vanskeleg å skilje frå ^{233}U. Gjennom desintegrasjon av ^{232}U vil det bli danna eit par isotopar som sender ut sterk γ-stråling. I utgangspunktet er ^{233}U eit betre atombombemateriale enn ^{235}U, men denne γ-strålinga er så sterk at det ikkje blir laga ^{233}U-bomber. Til bruk i våpen kan ^{233}U ikkje innehalde meir enn 5 ppm ^{232}U, noko som bare kan skaffast gjennom dedikert produksjon, og ikkje frå brukt thoriumbrensel som inneheld 1000 ppm eller meir. Det er mykje lettare å lage ^{235}U-bomber, som ein kan lage ved oppriking av naturleg uran utan bruk av reaktor, eller satse på plutonium som bombemateriale.

Som vi har sett, så har thorium mange eigenskapar som gjer det veleigna til brensel i dagens reaktorar. Men sidan thorium ikkje er direkte spaltbart, må det blandast med ein spaltbar isotop for å kunne starte og drive reaktoren. For ein kjernekraftprodusent er det til sjuande og sist økonomien, og at teknologien er utprøvd og robust, som tel. Det er dette som er den store hindringa for å bruke thorium som brensel. Men dersom ein klarer å etablere denne teknologien, vil thorium lett kunne vinne innpass i dagens kjernekraftverk, spesielt i

nasjonar som ikkje er låst til ein uran-infrastruktur. Det er ein ting alle innafor kjernekraft er samde om: Thorium vil bli eit viktig kjernekraftbrensel. Spørsmålet er berre når.

Nyttige kjelder og databasar

1. J. Emsley: *Nature's Building Blocks.* Oxford University Press (2003)
2. *http://wwwndc.tokai-sc.jaea.go.jp/NuC/*
3. *http://www-nds.jaea.org/*

Radioaktivt avfall fra kjernekraft

Per I. Wethe *

Behandling, lagring og deponering av rdioaktivt avfall fra kjernekraftvirksomhet er en høyst aktuell problemstilling. Denne artikkelen redegjør for hvordan slikt avfall klassifiseres og behandles etter kriterier for aktivitet og levetid, og tar i særlig grad for seg spørsmålet om hvordan brukt reaktorbrensel planlegges sikret og deponert i Finland og Sverige. Til slutt berøres de beslutninger som avfallets ekstreme langsiktighet reiser.

Innledning

Radioaktivt avfall oppstår ved bruk av radioaktive materialer i industri, forskning og medisin. Behandling, lagring og deponering av slikt avfall skjer etter internasjonalt aksepterte krav og retningslinjer, og får som regel liten oppmerksomhet.

Når det gjelder radioaktivt avfall fra kjernekraftindustrien er situasjonen imidlertid en helt annen. Her er radioaktivt avfall blitt et hovedtema. Dette har flere årsaker der de viktigste synes å være at deler av avfallet har høy radioaktivitet, høy strålingsrisiko og ekstremt lang levetid. I tillegg produseres det relativt store volumer med avfall som må behandles, sikres og lagres/deponeres etter et omfattende regelverk.

Dagens kjernekraft er basert på uran som energimateriale, men det er en ny og økende interesse for thorium som reaktorbrensel. At det i en thorium-/uransyklus bygges opp vesentlig mindre mengder av plutonium, americium, neptunium og curium i det brukte brenselet enn i brukt brensel fra en uran-/plutoniumsyklus, er en vesentlig fordel når det gjelder deponering av høyaktivt, langlivet radioaktivt avfall. I de nærmeste ti-år vil imidlertid kjernekraft fortsatt være basert på uran, og metodene for sikring og deponering av høyaktivt avfall fra uranbrensel vil således være styrende for sikring og deponering av brenselsavfall fra en eventuell fremtidig thorium-/uransyklus.

Hva er radioaktivt avfall?

Det internasjonale atomenergibyrået IAEA (International Atomic Energy Agency) definerer radioaktivt avfall som:

" ... materiale som inneholder, eller er forurenset med radioaktive nuklider i konsentrasjoner eller aktivitetsnivåer som overstiger de friklassingsgrenser myndighetene har satt, og som ikke kan nyttiggjøres."(1)

Dette er en rent administrativ definisjon. Materialer med aktivitetskonsentrasjoner lik eller mindre enn friklassingsgrensene kan fortsatt være radioaktive i fysikalsk forstand, selv om den aktuelle radiologiske risikoen er neglisjerbar. (Friklassingsgrenser angir nukleærspesifikke grenseverdier for materialer som skal fritas fra strålevernmyndighetenes kontrollregime.)

*Institutt for energiteknikk, Kjeller

Hvor oppstår radioaktivt avfall?

Radioaktivt avfall oppstår fra ulike ledd i prosesskjeden for kjernekraft. Dette er radioaktive restprodukter som ikke kan nyttiggjøres eller unntas fra tilsyn og kontroll, men må behandles, sikres og isoleres fra omgivelsene i kortere eller lengre tid. Behandling og lagring av radioaktivt avfall er forankret i internasjonalt aksepterte krav og prinsipper.[2] Målsettingen med behandling, lagring og deponering er å beskytte mennesker og miljø i dag og i fremtiden, uten å påføre kommende generasjoner urimelige byrder. Radioaktivt avfall fra de ulike trinn i prosesskjeden for kjernekraft kan deles inn i klasser og kategorier etter avfallsmengder, aktivitetsnivå og fysikalsk/kjemisk form. Tabell 1 gir en oversikt, basert på relative karakteristikker, over avfall fra prosesskjeden for kjernekraft inkludert reaktordrift og nedlegging av anlegg.[3]

Klassifisering av radioaktivt avfall

Fra et håndteringssynspunkt er det praktisk å dele det radioaktive avfallet inn i kategoriene høyaktivt avfall og lav- og mellomaktivt avfall.

Fra et lagrings- og deponeringssynspunkt er det levetiden av de dominerende radioaktive elementene som får stor betydning, og det skilles derfor mellom avfall med kort og lang levetid.

Dagens klassifiseringssystem tar utgangspunkt i de kvalitative egenskapene ved avfallet som bestemmer avfallets situasjon på lang sikt, og hvordan avfallet blir transportert, behandlet og lagret. Tabell 2 viser de tre kategoriene som beskriver radioaktivt avfall fra kjernekraftvirksomheten. Disse kategoriene er definert og beskrevet av IAEA.[1]

Tabell 1. Karakteristikker av radioaktivt avfall.

Prosesstrinn	**Volum**	**Aktivitet**	**Toksisitet**
Urangruve	Meget stort	Lav	Lav
Uranbehandling	Lite	Lav	Lav
Konvertering og anrikning	Lite	Lav	Lav
Brenselfabrikasjon, nytt brensel	Lite	Lav	Lav
Brenselfabrikasjon, gjenbruk av uran og plutonium	Lite	Lav/Middels	Middels
Drift av kjernekraftverk	Sort	Middels	Lav
Brukt brensel, opparbeiding	Lite/Middels	Høy/Meget høy	Høy
Brukt brensel, deponering	Middels	Høy	Høy
Nedlegging av kjernekraftverk	Meget stort	Lav	Meget lav

Tabell 2. Avfallskategorier, IAEA, og behandling.

Kategori	**Høyaktivt avfall (dyp geologisk deponering)**	**Lav- og mellomaktivt/ langlivet avfall (geologisk deponering)**	**Lav- og mellomaktivt/ kortlivet avfall (overflate- eller geologisk deponering)**
Karakteristikk	Høyaktivt avfall. Inneholder spenningsprodukter og noe aktinider fra opparbeiding av brukt brensel.	Avfall med aktivitetsinnhold som krever skjerming. Få eller ingen spesielle tiltak for kjøling under behandling og transport.	Avfall som på grunn av lavt aktivitetsinnhold ikke krever skjerming under regulær behandling og transport.
Varmeutvikling	Andre typer avfall med så høyt aktivitetsnivå at varmeutviklingen er $\gg 2$ kW[3]	< 2 kW/m^3	< 2 kW/m^3
Halveringstid		> 30 år	< 30 år
Andre egenskaper			Innhold < 400 Bq/g av langlivede α-aktive nuklider.

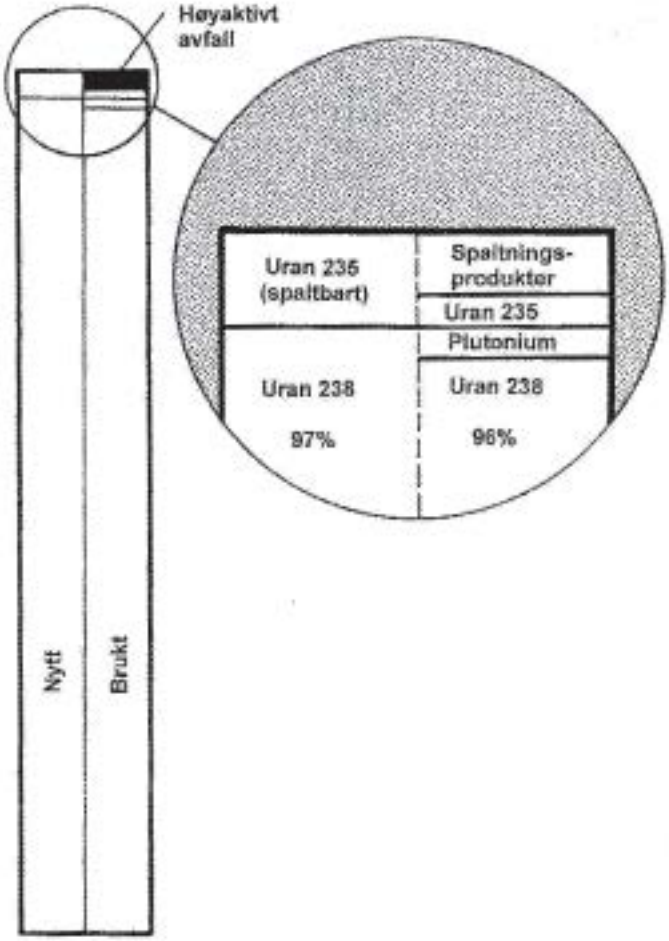
- **Høyaktivt avfall** oppstår ved opparbeiding av brukt brensel, og inneholder store konsentrasjoner av kort- og langlivede nuklider (spaltningsprodukter og transuraner). Fra ett års drift av et 1000 MW kjernekraftverk utgjør volumet av fast avfall fra opparbeiding av brukt brensel 3-5 m^3, eller 25–50 m^3 innkapslet brukt brensel hvis dette skal deponeres direkte. Høyaktivt avfall utgjør mer enn 95 % av den totale radioaktiviteten, men bare rundt 5 % av volumet av alt radioaktivt avfall fra prosesskjeden til et kjernekraftverk.

- Det praktiseres i dag to hovedstrategier for viderebehandling av brukt reaktorbrensel, en såkalt "åpen" syklus og en "lukket" syklus. I en "åpen" syklus betraktes brukt brensel som avfall som skal sikres og deponeres. I en "lukket" syklus blir brukt brensel opparbeidet. Her utgjør de radioaktive spaltningsproduktene, samt restmengdene av uran og plutonium og de øvrige transuranene americium, curium og neptunium, det høyaktive avfallet.

- **Lav- og mellomaktivt avfall** oppstår både ved kjernekraftverk og opparbeidingsanlegg. Dette driftsavfallet utgjør noen hundre m^3 pr. år. Lavaktivt avfall består i hovedsak av papir, plast, tekstiler, glass og verktøy. Dette omfatter også materialer som har vært benyttet i områder som er klassifisert som radioaktive, dvs. der radioaktivitet kan forekomme. Mellomaktivt avfall består bl.a. av inndampingsrester, brukte filtre og ionebyttermasser fra rensekretser for prosessvann, kjemisk prosessavfall og kapslingsrester. Lav- og mellomaktivt avfall utgjør rundt 5 % av den totale radioaktiviteten, men over 95 % av volumet av alt radioaktivt avfall fra prosesskjeden til et kjernekraftverk.

Opparbeiding av brukt brensel

Under drift produserer uran-235 i brenselet energi som omdannes til spaltningsprodukter. En mindre del av isotopen uran-238 omdannes til plutonium som også produserer energi. Ca. 30–40 % av energiproduksjonen i en reaktor skyldes spaltning av plutonium. I brukt brensel finnes det, avhengig av anrikningsgrad og utbrenning, ca. 96 % uran, hvorav det meste er uran-238, ca. 3 % spaltningsprodukter, og drøyt 1 % spaltbart uran og plutonium, se figur 1.



Figur 1. Sammensetning av brukt brensel fra en lettvannsreaktor. 95,6 % er uran som kan deponeres som lavaktivt avfall eller resirkuleres til gjenbruk. 3 % er stabile eller kortlivede fisjonsprodukter som ikke innebærer noe deponeringsproblem. 0,3 % er cesium og strontium som omdannes til stabile elementer i løpet av noen hundre år. 0,1 % er langlivet jod og technetium som kan omdannes til stabile elementer ved transmutasjon. 0,9 % er plutonium som kan brukes som reaktorbrensel. 0,1 % er langlivede aktinider som kan spaltes i hurtige reaktorer eller akselerator-drevne systemer.

Ved opparbeiding av brukt brensel gjenvinnes spaltbart uran og plutonium. Plutonium kan ved innblanding med naturlig uran brukes til nytt reaktorbrensel, såkalt blandingsbrensel, MOX (Mixed Oxide Fuel). Uran kan videre anrikes og brukes som nytt brensel. I MOX-brenselet brukes 57 % plutonium i stedet for uran-235. I dag bruker et 40-talls kjernekraftverk MOX-brensel på regulær basis, bl.a. kjernekraftverk i Belgia, Frankrike, Japan, Sveits og Tyskland. Mange land har altså valgt en strategi der brukt brensel opparbeides, og utskilt uran og plutonium inngår i nytt brensel. Andre land som Finland, Sverige og USA, har derimot valgt en strategi med direkte deponering av

brukt brensel. Begge strategiene har sine fordeler og ulemper. Opparbeiding av brukt brensel er ressurs effektivt, reduserer behovet for nytt uran med 25-30 %, og reduserer mengden av høyaktivt avfall. Opparbeiding har imidlertid en kostnadsside som er vanskelig å forsvare ved lave uranpriser og lav gjenbruksverdi for plutonium. Til gjengjeld har opparbeiding en plussside ved at varmebelastning og lagringsvolum av et deponi for høyaktivt avfall blir lavere enn ved direkte deponering av brukt brensel.

Økende uranpriser kan motivere flere land til å endre strategi. USA er allerede på vei til å gjenopplive opparbeidingsalternativet. Det er imidlertid lite sannsynlig at små land skal omvurdere sin bruktbrenselstrategi der det også ofte er et krav at alt avfall skal håndteres og deponeres i eget land.

Sikring av radioaktivt avfall

Langtidsperspektivet

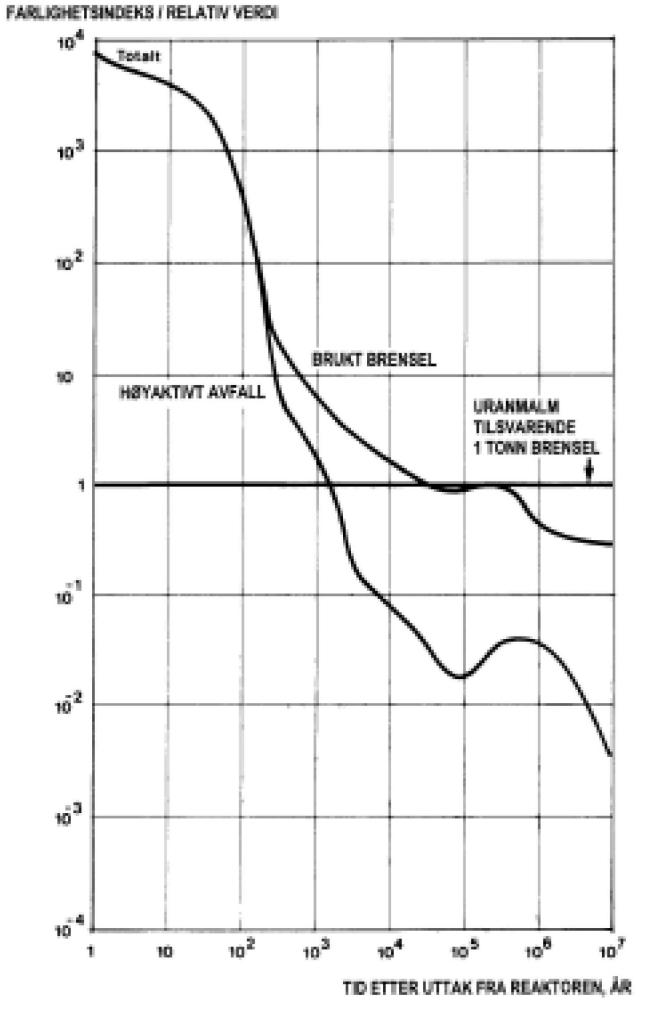
Et grunnprinsipp ved behandling, sikring og lagring/deponering av radioaktivt avfall er at avfallet skal bringes over på en form som egner seg for, og som isolerer avfallet fra omgivelsene i en tilstrekkelig lang periode. Det er bl.a. et hovedkrav at radioaktivt avfall skal isoleres fra mennesker og miljø i så lang tid at eventuelle utslipp av radioaktive stoffer i en fjern fremtid ikke skal utgjøre noen risiko utover det som dagens samfunn vil akseptere. Det er altså dagens krav som er aktuelle når det gjelder utforming av radiologisk sikre løsninger.

Hvilke tidsrom de ulike avfallskategoriene må holdes isolert fra naturmiljøet avhenger bl.a. av konsentrasjon og levetid for de radiologisk viktigste isotopene i avfallet. I lavaktivt avfall vil det meste av aktiviteten være dødd ut etter 10–100 år, og 50 år regnes ofte som en rimelig lagringstid. Etter noen hundre år kan også mellomaktivt avfall betraktes som ikke- aktivt, selv om det fortsatt kan være enkelte langlivede nuklider tilbake i avfallet.

Når det gjelder **høyaktivt avfall** dreier det seg om helt andre tidsrom. I utgangspunktet bør det være klart at radioaktive isotoper med svært korte og ekstremt lange halveringstider, dvs. mindre enn 1 år og lengre enn 10 millioner år, ikke vil representere noe reelt radiologisk problem. De kortlivede isotopene dør i hovedsak ut etter 3–5 år, mens de ekstremt langlivede brytes så langsomt ned at de på grunn av ekstrem lav spesifikk aktivitet ikke vil representere noen reell risiko. Det er således radioaktive isotoper med halveringstider mellom disse ytterpunktene som styrer aktiviteten i avfallet og derved dominerer den radiologiske risikoen.

Når det gjelder **fisjonsproduktene** er de fleste dødd ut etter 3–5 år, og etter 10 år domineres aktiviteten i avfallet av strontium-90 og cesium-137 med halveringstider rundt 30 år. Etter 500–600 år blir fisjonsproduktenes betydning relativt liten, og aktiviteten domineres nå av et antall tunge og langlivede isotoper, de såkalte *transuranene*, som selv etter 100 000 år representerer en viss aktivitet. Både i høyaktivt opparbeidingsavfall og i brukt brensel er det uran og de langlivede transurane som på lang sikt dominerer strålingsrisikoen og derved i prinsippet bestemmer kravene til sikker deponering.

Figur 2 illustrerer hvordan farligheten i brukt reaktorbrensel/høyaktivt avfall fra opparbeiding avtar med tiden. I løpet av 1000 år har det meste av



Figur 2. Farlighetsindeks for høyaktivt avfall og brukt brensel. Farlighetsindeksen er et relativt mål for avfallets farlighetsgrad som er regnet ut på grunnlag av de vannmengder avfallet i teorien må fortynnes med for å oppnå drikkevannskvalitet. Farligheten for naturlig uran er brukt som referanse.

farligheten avtatt pga. desintegrasjon. Det tar noe under 10 000 år før farligheten er nede på samme nivå som farligheten av den uranmalmen brenselet er laget av.[3] Farlighetsindeksen er en relativ størrelse.

Transmutasjon

Transmutasjon innebærer å omdanne et grunnstoff til et annet grunnstoff. Ved nøytronbestråling kan langlivede radioaktive elementer omdannes til kortlivede eller stabile elementer. Metoden krever at de farligste elementene skilles ut fra avfallet og behandles separat, noe som forutsetter at brukt brensel blir opparbeidet, gjerne i flere omganger. Teoretisk skulle transmutasjon innebære at den langsiktige farligheten av høyaktivt avfall blir eliminert, men selv med en ekstrem grad av separasjon vil det likevel produseres avfall med mindre mengder langlivede radioaktive elementer slik at behovet for deponering fortsatt vil være til stede. Derimot kan transmutasjon redusere kravene til de tekniske barrierene og volumet av et geologisk deponi. Når det gjelder transmutasjon av minoritetsaktinidene americium, curium og neptunium, synes "underkritiske systemer", som akseleratordrevne systemer ADS, å ha interessante egenskaper. Transmutasjon og gjenbruk kan imidlertid representere en økt yrkesmessig strålingsrisiko siden strategien forutsetter tilvirkning og håndtering av betydelige mengder tidligere bestrålte materialer og radioaktive restprodukter. Et viktig spørsmål bør derfor være om en mulig økt strålingsrisiko i dag kan oppveies av en mulig redusert strålingsrisiko en eller annen gang i fremtiden. Gjenbruk vil også innebære økte kostnader siden prosessene krever skjerming og fjernstyring langt utover det som i dag gjelder for konvensjonell opparbeiding.

Når det gjelder transmutasjon som et mulig ledd i en fremtidig avfallsbehandling, viser kjernekraftindustrien i dag svært liten interesse. Mye tyder derfor på at en strategi basert på separasjon og transmutasjon av de farligste elementene i høyaktivt avfall først og fremst vil være et konsept for fremtiden, og ikke noe realistisk alternativ til det arbeidet som i dag drives for å sikre og deponere høyaktivt avfall.[4]

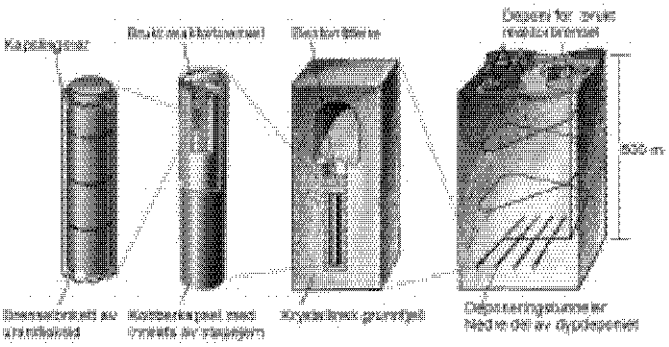
Deponering av radioaktivt avfall

Lav- og mellomaktivt avfall

De fleste land med reaktorer i drift har i dag anlegg for deponering av lavaktivt og mellomaktivt, kortlivet avfall. Disse anleggene er gjerne bygget nær terrengoverflaten eller i relativt grunne geologiske formasjoner 50–100 m under terrengoverflaten. Både Finland og Sverige har i flere år hatt slike anlegg i drift.

Høyaktivt avfall

Deponering av høyaktivt avfall er ennå ikke gjennomført i noe land, men det foreligger klare spesifiserte krav om hva som skal forstås med "akseptabel risiko", og i flere land foreligger det godkjente metoder for sikring og deponering av avfallet. Finland og Sverige er de land som har kommet lengst når det gjelder å etablere de nødvendige tekniske løsningene. I Sverige ble den såkalte KBS-3 metoden godkjent av regjeringen i 1984. I Finland ble denne metoden godkjent av regjeringen i 2000, og av riksdagen i 2002. Basisalternativet i den finske og den svenske løsningen, er at det brukte reaktorbrenselet kapsles inn i tette metallbeholdere og plasseres på 400–700 m dyp i en stabil fjellgrunn.[5] Deponering av brukt brensel skal etter planene starte i Finland rundt år 2020 og i Sverige rundt 2025, se figur 3.



Figur 3. Geologisk dypdeponering etter KBS-3 metoden. Internasjonalt er det faglig enighet om at deponering av brukt høyaktivt brensel/høyaktivt avfall i en stabil geologisk struktur som granitt, salt eller leire, vil ivareta alle rimelige krav til sikkerhet. Finland har valgt deponering i granitt. Sverige arbeider med en tilsvarende løsning for et svensk deponi.

Det er i dag en internasjonalt akseptert teknisk løsning at deponering av høyaktivt og langlivet radioaktivt avfall kan skje på en sikker og trygg måte i dype og stabile geologiske formasjoner som salt, leire og granitt 500–1000 m under terrengoverflaten.[5] Den viktigste begrunnelsen ligger i at selve berget vil gi avfallet en effektiv beskyttelse mot ytre påkjenninger, samt virke som bar-

riere mot spredning av radioaktive elementer via grunnvann. Integriteten av et slikt dyptliggende fjellanlegg vil være uavhengig av tenkbare forandringer på overflaten, som for eksempel en ny istid. Under slike forutsetninger vil den risiko som avfallet representerer ligge på samme nivå som risikoen fra naturlig forekommende radioaktiv malm i berggrunnen. I realiteten vil risikoen være betydelig lavere fordi avfallet i motsetning til malmen er bragt over på en tungt løselig form, og i tillegg vil være omgitt av et system av tekniske (konstruerte) og naturlige barrierer som bidrar til å begrense og forsinke en eventuell kontakt mellom avfall og grunnvann. Sikkerhetsanalysene viser at en eventuell stråledose til befolkningen vil utgjøre en brøkdel av den strålingsdosen som skriver seg fra naturlige strålekilder i miljøet, og vil dessuten ligge langt innenfor variasjonene i den naturlige bakgrunnsstrålingen.[5,7] I de fleste kjernekraftland er det også etablert finansieringssystemer som skal ta hånd om kostnadene ved lagring og sikring av radioaktivt avfall fra kjernekraftindustrien, også kostnadene ved riving av anlegg. Myndighetene beregner hvert år en avgift, regnet pr. produsert kWh, som legges inn i produksjonskostnadene, og som akkumuleres i et statlig fond. For svenske og finske kjernekraftverk ligger denne avgiften i dag rundt 1 øre pr. kWh, dvs. noen få prosent av produksjonskostnadene for ny kjernekraft.

Avslutning

Når det gjelder sikring, lagring og deponering av radioaktivt avfall er det i dag et hovedkrav at avfallet skal isoleres fra mennesker og miljø i så lang tid at eventuelle fremtidige utslipp av radioaktive elementer ikke skal utgjøre noen risiko utover den som samfunnet i dag aksepterer. Det er ingen unike egenskaper ved det radioaktive avfallet som tvinger oss til å planlegge for ekstremt lange tidsperioder. Derimot er det en unik egenskap at farligheten avtar med tiden. Det som er nytt er at sikringsproblematikken er knyttet til levetiden for enkelte grupper av radioaktive elementer i avfallet. Dette synliggjør de langsiktige risikoaspektene, men er ikke noe bevis for at radioaktivt avfall som behandles og lagres etter etablerte internasjonale retningslinjer og god industriell praksis, utgjør en større risiko for mennesker og miljø enn avfall fra konvensjonell industriell virksomhet.

Samfunnet står i dag også overfor andre avfallsproblemer enn de som er knyttet til kjernekraft. Hvordan erkjennelsen av avfallsproblemene knyttet til de fossile energikildene vil påvirke synet på kjernekraftavfall, gjenstår å se. Det er imidlertid interessant å observere at analoge løsninger til kjernekraftindustriens geologiske dypdeponering diskuteres når det gjelder sikring og deponering av de store mengdene av CO_2 som den fossilbaserte energiindustrien slipper ut. Så langt synes de planlagte tekniske løsningene for deponering av CO_2 å være minst like utfordrende som det er å deponere relativt beskjedne mengder av innkapslet radioaktivt avfall noen hundre meter nede i stabilt grunnfjell.

Våre kunnskaper om brukt reaktorbrensel og høyaktivt avfall, hviler på et vitenskapelig grunnlag. Det gjelder også våre kunnskaper om hvordan vi på ulike måter kan beskytte mennesker og miljø mot den ioniserende strålingens skadevirkninger. Omfattende forskningsprogrammer, bl.a. i Sverige og Finland, har i stor utstrekning klarlagt spørsmålet om hvordan en kombinasjon av fysiske barrierer kan forhindre, begrense og forsinke utslipp av radioaktive stoffer til biosfæren. Vi kan også utforme et deponi slik at det kan forutsettes å beholde sin evne til å inneslutte det brukte brenselet/ høyaktive avfallet under en lang rekke fysike påkjenninger.

Den vedvarende strålingen og farligheten av det radioaktive avfallet langt inn i fremtiden er et uttrykk for den utfordringen dette avfallspørsmålet utgjør for vår generasjon. I bunn og grunn er dette en etisk og moralsk utfordring. Fremtidige generasjoners ve og vel lenger inn i fremtiden enn vi kan forestille oss, kan påvirkes av våre beslutninger i dag. Dette er ikke noe fundamentalt dilemma, men selve avfallets natur knytter en direkte linje mellom dagens beslutninger og mulige konsekvenser en eller annen gang i en ekstremt fjern fremtid.

Den ekstreme langsiktigheten må imidlertid ikke føre til beslutningsvegring. Fravær av beslutninger har også konsekvenser som kan innebære risiko, og kanskje større risiko enn den som det aktuelle alternativet innebærer.

Referanser

1. *Classification of Radioactive Waste.* IAEA Safety Series No. 111-G - 1.1, Vienna (1994)
2. *The principles of Radioactive Waste Management.* IAEA Safety Series No. 111 - F, Vienna (1995)
3. *Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management.* NEA No. 5990, OECD (2006)

4. *Partitioning and transmutation. Current developments - 2007.* Technical Report TR-07-04, June 2007, Svensk Kärnbränslehantering AB (2007)
5. *Djupförvar för anvnt kärnbränsle SR 97 Säkerheten efter förslutning,* November 1999, SKB AB (1999)
6. *Progress towards geologic disposal of radioactive waste: Where do we stand?* NEA/OECD (1999)
7. *Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara.* TILA-99, Vieno, T. & Nordman, H. Helsinki, Posiva Oy. POSIVA 99 07 (1999)

∞

Tredje generasjon solceller

Erik Stensrud Marstein *, *Sean Erik Foss* * *og Turid Worren Reenaas* * *

Sollyset utgjør en enorm energiressurs. I løpet av ett år tilfører sollyset jordoverflaten mer enn 10 000 ganger den mengden energi som i dag hentes fra alle andre energikilder til sammen. Solceller kan omdanne sollyset direkte til elektrisk energi og anses derfor som en av teknologiene som vil kunne stå for en betydelig andel av fremtidens strømproduksjon. Til tross for dette potensialet er det først i de siste årene at en betydelig solcelleindustri har begynt å vokse frem. Den viktigste utfordringen industrien står overfor er de relativt høye kostnadene som er forbundet med elektrisitet produsert ved hjelp av solceller. I det følgende gjennomgås en rekke spenstige solcellekonsepter som kan muliggjøre fremstilling av solceller med langt høyere effektivitet, og følgelig en langt lavere strømpris, enn den som er oppnåelig med dagens teknologi. Slike solceller blir ofte kalt tredje generasjon solceller.[1]

Innledning

En solcelle er en komponent som er i stand til å konvertere energien i sollyset direkte til utnyttbar elektrisk energi. Enkelt fortalt fungerer en solcelle ved at fotonene i sollyset absorberes i halvledermaterialene solcellene er laget av. Som en følge av absorpsjonen blir det generert eksiterte, mobile ladningsbærere. Disse ladningsbærerne styres mot solcellens kontakter av et elektrisk felt i solcellen. Ved kontaktene blir ladningsbærerne ført ut i en ekstern krets der de kan utføre arbeid.

Effektiviteten (η) til en solcelle er et mål på hvor stor andel av solenergien solcellen mottar, som blir omdannet til elektrisk energi. Den er gitt ved

$$\eta = P_m/P_{Sol} = I_m \cdot V_m/P_{Sol}$$

hvor P_{Sol} er effekten i sollyset og P_m den maksimale elektriske effekten solcellen kan produsere. P_m er igjen gitt som produktet av den maksimale strømmen I_m og spenningen V_m som solcellen kan levere når den får mest mulig effekt ut av sollyset.

Selv om bruk av solceller allerede i dag i mange tilfeller vil være et godt alternativ til andre energikilder vil den høye strømprisen kunne være et hinder for den sterke veksten av bruk av solceller som må til dersom solceller virkelig skal bidra til den glo bale produksjonen av elektrisitet. Det pågår derfor en betydelig innsats både i forskningsmiljøer og i industrien for å gjøre solceller til et stadig billigere alternativ.

Det er to faktorer som bestemmer prisen på elektrisitet produsert av en solcelle. Den ene er kostnadene forbundet med å fremstille og installere et ferdig energisystem basert på solceller. Her er blant

* Institutt for energiteknikk, Kjeller;

** Institutt for fysikk, NTNU

annet produksjons- og materialkostnader svært viktige. Den andre faktoren er hvor mye elektrisk energi det totale solenergisystemet leverer. Dette er til en stor grad bestemt av hvor effektivt selve solcellen omdanner energien fra sollyset til elektrisk energi.

Effektiviteten til en solcelle er også med på å bestemme den såkalte energitilbakebetalingstiden, tiden solcellepanelet må produsere strøm for å betale tilbake all energi som er brukt under fremstillingen av det ferdige solcellebaserte energisystemet.

De mest utbredte kommersielt tilgjengelige solcellene er i dag basert på silisium (Si). Disse har en effektivitet på mellom 14 og 22 %, avhengig av hvilken teknologi som er basis for fremstillingen. Energitilbakebetalingstiden for hele energisystemer basert på slike solceller har også falt dramatisk i forhold til tidligere år, og ligger i dag typisk på mellom 2 og 3 år, en liten del av solcellepanelenes totale forventede levetid på 25 år eller mer.

I det følgende skal vi se nærmere på opphavet til den ovennevnte effektivitetsbegrensningen. Deretter skal vi gå inn på ulike tredje generasjon solcellekonsepter som, i hvert fall på tegnebrettet og i laboratoriet, er i stand til å nå betydelig høyere verdier av effektivitet enn de solcellene som nå er i bruk. I denne terminologien refererer for øvrig begrepet første generasjon solceller til solceller laget av relativt tykke, krystallinske substrater av aktive materialer, som dagens solceller laget av Si. Andre generasjon solceller er framstilt med metoder som gir billige solceller, men oftest med langt lavere effektivitet enn første generasjon solceller. Eksempler på sistnevnte er såkalte tynnfilmsolceller av materialer som amorft sisilium eller andre halvledermaterialer, polymerbaserte solceller og elektrokjemiske solceller.

Dagens solcelleindustri

I fjor ble det produsert solcellepaneler som til sammen vil bli i stand til å levere 4,3 GW_p av elektrisk effekt. Som mål for effekten til solceller bruker man oftest den elektriske effekten et panel produserer under standardbetingelser W_p i stedet for den effekten panelet faktisk produserer, som til en stor grad vil være bestemt av hvor i verden solcellen brukes. W_p er et mål på effekten et solcellepanel produserer når den innstrålte effekten er 1 kW/m^2 og solcelletemperaturen er 25 °C. Produksjonen på 4,3 GW_p representerte en økning på over 60 % fra året før, og en videreføring av en svært sterk årlig vekstrate gjennom mer enn et tiår.[2] Totalt har det hittil blitt fremstilt solceller med en total produksjonskapasitet på vel over 10 GW_p. Norge er godt representert i solcelleindustrien med profilerte selskaper som Renewable Energy Corporation, Elkem Solar og Norsun.

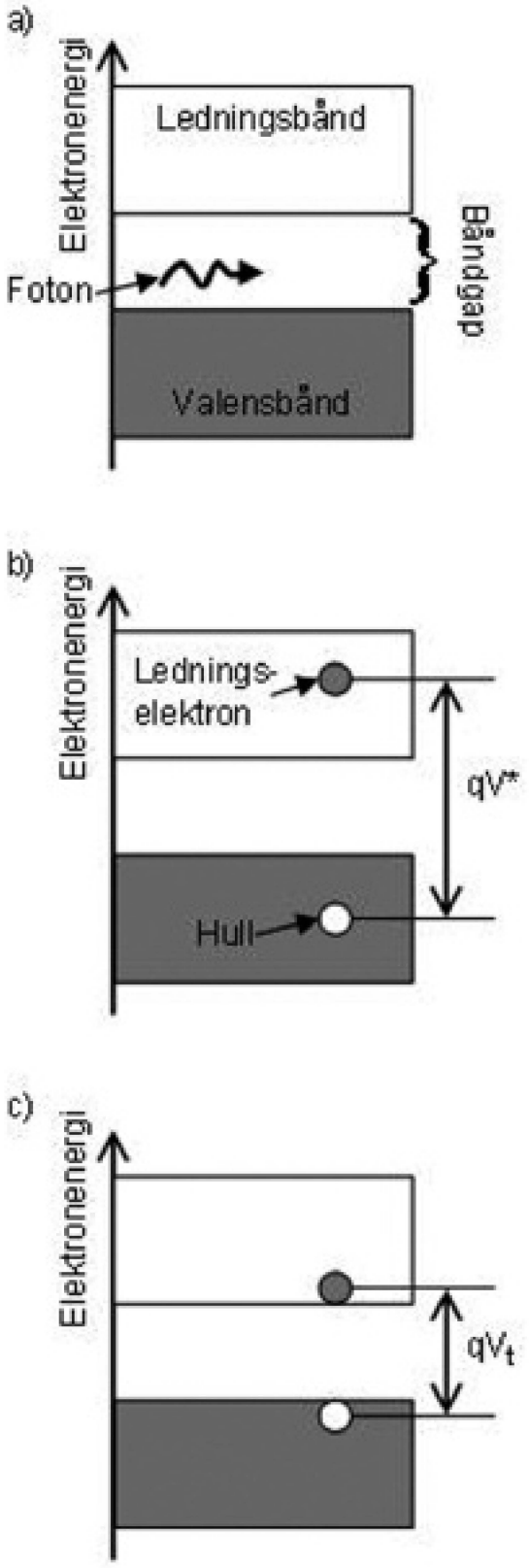
Alle industrielt viktige solceller som lages i dag baserer seg i hovedsak på å bruke ett enkelt materiale til å absorbere sollyset. I omlag 95 % av solcellene som ble produsert i 2007 var materialet en eller annen form av halvledermaterialet silisium (Si). Det meste av de resterende 5 % brukte andre sammensatte halvledermaterialer, hovedsakelig kadmiumtellurid (CdTe) og ulike variasjoner av kobber (indium, gallium) diselenid ($CuIn_xGa_{1-x}Se_2$, "CIGS").[2]. Felles for de nevnte solcellene er at de har en veldefinert øvre grense for oppnåelig effektivitet på omtrent 30 %. Denne grensen er bestemt av virkemåten til solcellen og er med på å sette klare begrensninger for mulig kostnadsreduksjon. Vi vil komme tilbake til opphavet for denne grensen.

Hvordan fungerer en solcelle?

For å forstå hvor begrensningene i effektiviteten kommer fra må vi først forstå hvordan en solcelle fungerer i mer detalj. Figur 1 illustrerer solcellens virkemåte ved hjelp av såkalte energidiagram for elektronene i solcellen. I slike diagrammer vises elektronenes energi langs y-aksen, mens x-aksen viser posisjonen innover i solcellematerialet. I tilfellene under er vi kun interessert i energien.

I en halvleder finnes det kontinuerlige bånd av tilstander elektronene kan inneha. Disse er skilt av energiområder uten tillatte tilstander. I figur 1 kan elektronene ha en hvilken som helst energi innen *valensbåndet* eller *ledningsbåndet*, men ikke i energiområdet mellom disse båndene.

Strømmen fra solcellen oppstår når fotonene i sollyset absorberes i halvledermaterialet solcellen er bygget opp av. Energien fra fotonene gis til et elektron i valensbåndet. I utgangspunktet kan man anta at de aller fleste elektronene i halvlederen er å finne her. Slike elektroner deltar i bindingen av atomene i halvledermaterialet og de forflytter seg svært lite. Når *valenselektronet* tilføres tilstrekkelig energi fra fotonet, det vil si at fotonenergien er større enn *båndgapet*, den energien som skiller de to båndene, vil det imidlertid kunne rives løs fra de atomære bindingene. Når det gjelder energi er det da løftet opp i ledningsbåndet. Her kan elektronet lett flytte seg rundt og bidra til elektrisk strøm. Elektronet kalles da et *ledningselektron*. Dette er illustrert i



Figur 1. Skjematisk fremstilling av en solcelles virkemåte. Se forklaring i teksten.

figur 1a. Fotoner med energier lavere enn båndgapet blir ikke absorbert og går tvers gjennom halvledermaterialet eller reflekteres, uten å bidra til elektrisitetsproduksjonen.

Som en følge av prosessen beskrevet over etterlates det også en tom elektrontilstand i valensbåndet. Andre valenselektroner kan nå forflytte seg til denne ledige posisjonen, slik at valenselektronene vil bidra til strømmen i solcellen. I stedet for å se på hvordan mengden av valenselektroner beveger seg er det enklere å betrakte den tomme tilstanden som en tenkt partikkel som beveger seg i motsatt retning. Den tomme tilstanden kalles et *hull* og representerer en positiv ladning av samme størrelse som elektronets.

Ledningselektronet og hullet kan i utgangspunktet bevege seg fritt omkring i alle retninger. For at man skal få en netto strøm fra solcellen kreves det imidlertid at det er en drivkraft til stede for å styre strømmen i en bestemt retning. Slike drivkrefter kan for eksempel være elektriske felt i solcellen.

Solcellen leverer mest strøm når den er kortsluttet ved at kontaktene med positiv og negativ polaritet på solcellen kobles sammen. Denne maksimale strømmen kalles *kortslutningsstrømmen.* Strømmen solcellen leverer når den er koblet til en ytre last vil alltid være lavere enn kortslutningsstrømmen.

Som nevnt må fotonenergien overstige båndgapet for at valenselektronene skal kunne bli til ledningselektroner. Enhver halvleder har én bestemt verdi for dette båndgapet. Dersom båndgapet er lite vil selv fotoner med liten energi kunne bidra til å omdanne valenselektroner til ledningselektroner, og en får da mange ledningselektroner og mye strøm fra solcellen.

Dessverre setter båndgapet E_g en øvre grense for hvor stor spenning solcellen kan gi. Denne spenningen kalles åpenkretsspenningen, og er den spenningen man vil måle dersom man lar være å koble solcellens to kontakter til noe som helst. Spenningen solcellen vil levere når den er koblet til en ytre last vil alltid være lavere enn åpenkretsspenningen. I figur 1b er denne situasjonen illustrert. Elektronet og hullet som er dannet på grunn av fotonabsorpsjonen, kan i prinsippet gjøre et arbeid i en ekstern krets av en størrelse kalt qV^* i figuren.

Et materiale med et lite båndgap vil gi liten spenning fra solcellen. Man må dermed gjøre et kompromiss mellom mye strøm eller høy spenning fra solcellen. For å oppnå høyest effektivitet velger man ofte å bruke et materiale med et båndgap som maksimerer den totale effekten produsert av solcellen. Denne er, som nevnt over, gitt ved produktet av strømmen og spenningen.

Tapsmekanismer

Hvor kommer så effektivitetsbegrensningen til en typisk solcelle fra? I solcellen beskrevet over vil enkelte fundamentale tapsmekanismer gi uunngåelige tap av energi. Disse er transmisjon av lavenergetiske fotoner (dvs. mesteparten av den infrarøde delen av solspektret), termalisering av energetiske ladningsbærere og rekombinering av ladningsbærere. De to førstnevnte gir de største begrensningene i solcellenes effektivitet, og er begge forårsaket av at solceller med kun ett båndgap ikke er i stand til å nyttiggjøre seg av hele solspekteret på en effektiv måte. Disse to mekanismene forårsaker at mindre enn 50 % av energien i sollyset kan omdannes til elektrisk energi i solcellen. Vi vil nå beskrive de tre tapsmekanismene mer i detalj.

Sollyset består som kjent av fotoner med energier (E_{foton}) bestemt av deres bølgelengder (λ) på følgende måte:

$$E_{foton} = hc/\lambda$$

hvor h er Plancks konstant og c lyshastigheten. Jo kortere bølgelengden til et foton er, desto mer energi har det. Sollyset som treffer jordens overflate inneholder fotoner med et stort spenn i E_{foton}, fra ca. 0,4 til 4 eV. En stor reduksjon i oppnåelig effektivitet skyldes at sollyset inneholder en stor mengde fotoner med en energi som er lavere enn E_g og dermed for lav til å generere mobile ladningsbærere i halvlederen. Fotoner med $E_{foton} < E_g$ vil derfor ikke absorberes og bidrar derfor ikke til å lage strøm. For silisiumsolceller vil fotoner med energi mindre enn båndgapet på 1,1 eV ikke absorberes. Dette utgjør ca. 20 % av tilgjengelig energi i sollyset.

Den andre viktige tapsmekanismen er forårsaket av at de fotonene i sollyset som *kan* absorberes, stort sett vil ha en fotonenergi som er større enn det som trengs for å føre et elektron opp i ledningsbåndet ($E_{foton} > E_g$). I dette tilfellet vil man umiddelbart etter absorpsjonen av fotonene kunne finne ledningselektroner langt oppe i ledningsbåndet (og hull langt nede i valensbåndet). Overskuddsenergien til ledningselektronene og hullene tapes svært raskt, typisk i løpet av bare $10^{-15} - 10^{-12}$ s gjennom kollisjoner med andre ladningsbærere og med atomene i halvledermaterialet. Dette kalles *termalisering*, og er illustrert i figur 1c. I dette tilfellet har den energien som umiddelbart etter absorpsjonen av fotonet var qV^* blitt redusert til qV_t, der V_t er spenningen som svarer til båndgapet. I solcellen vil tilgjengelig arbeid reduseres ytterligere på grunn av det innebygde elektriske felt som er drivkraften for strømmen, og vi ender opp med et maksimalt tilgjengelig arbeid lik qV_{oc}, hvor V_{oc} er åpenkretsspenningen. Termalisering resulterer i et tap på ca. 32 % av energien i sollyset. Den overskytende energien utover E_g vil resultere i oppvarming av solcellen.

Den tredje, uunngåelige tapsmekanismen skyldes at ledningselektronene, som nevnt, vil kunne falle tilbake til valensbåndet før de rekker å komme frem til kontaktene som forbinder solcellen med den ytre kretsen. Energien som frigis på denne måten overføres enten til fotoner som stråles ut fra solcellen eller til ytterligere oppvarming. Disse prosessene kalles *rekombinering*. De vil ikke gi så store tap som de to forrige prosessene i en ideell solcelle, men må alltid regnes med.

Totalt er det disse tre tapsmekanismene som sammen bestemmer den øvre teoretisk oppnåelige grensen for η i en for øvrig ideell solcelle med to energibånd separert av ett energigap. Denne teoretiske grensen kalles ofte Shockley-Queissergrensen etter sine opphavsmenn.[3] Størrelsen av Shockley-Queisser-grensen vil nødvendigvis avhenge av verdien til E_g, men ligger typisk rundt 30 %. Disse verdiene antar at kun de tre ovennevnte tapsmekanismene finner sted, men rekombinering via oppvarming av solcellen er ikke tatt med. Solcellen antas dermed å være ideell, og følgelig upåvirket av tapsmekanismer som for eksempel refleksjon i overflaten, elektriske motstander eller økt rekombinering forårsaket av defekter i solcellematerialet. Slike faktorer er selvsagt også svært viktige i en reell solcelle.

Det er imidlertid flere måter å lage solceller på som vil unngå disse fundamentale begrensningene. Dette er de såkalte tredjegenerasjonssolcellene. Grunnprinsippene for disse, og flere eksempler på slike, vil bli gitt i det følgende.

Tredje generasjon solceller

Det er fire hovedretninger man kan følge dersom man ønsker å lage solceller som utnytter fotonenergiene i sollyset bedre, og på den måten overkommer Shockley Queisser-grensen. Disse er:

- Å lage solceller som baserer seg på bruk av mer enn ett båndgap.
- Å redusere eller unngå effekten av termalisering.

- Å endre energifordelingen til fotonene i solspekteret før de absorberes av solcellen.
- Å lage solcellen av en halvleder med et så lite båndgap at flere ladningselektroner dannes ved hjelp av såkalt kollisjonsgenerering.

De to førstnevnte innebærer helt nye oppbygningsmåter av solcellene, mens de to siste i prinsipp kan bruke dagens design på selve solcellen.

Flere båndgap

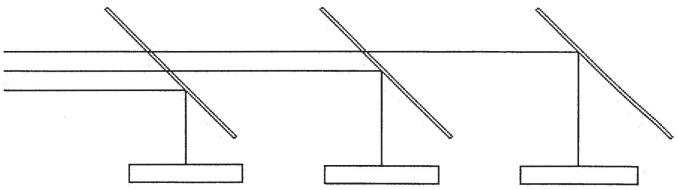
Den første retningen kan realiseres på flere ulike måter, hvor den enkleste er å lage et helt sett av solceller som har hvert sitt båndgap, E_g. Hver solcelle i settet er optimalisert med hensyn til en begrenset del av solspekteret, noe som resulterer i en økt utnyttelse av den totale energien i sollyset. Figur 2 viser et eksempel på dette hvor optiske filtre sender ulike energiintervall i sollyset mot solceller som er optimalisert med hensyn til hvert av disse intervallene.

I praksis er det mest vanlig å rett og slett stable solceller med forskjellige verdier av E_g oppå hverandre, som illustrert i figur 3. Det mest energetiske lyset fanges i den øverste solcellen. Fotoner med lavere energi går gjennom denne og fanges opp av en eller flere underliggende solceller. Jo flere solceller som settes sammen, desto bedre kan de utnytte sollyset. Slike solceller kalles *tandemsolceller* og er per dags dato den eneste typen tredje generasjons solcelle som har demonstrert høye verdier av effektiviteten i praksis. Belyst med standard sollys har verdier på 32 % blitt målt på en tandemsolcelle bestående av tre solceller koblet optisk og elektrisk i serie.[4] Under mer intens belysning, noe som for eksempel kan oppnås gjennom bruk av linser og speil, har det nylig blitt rapportert målte verdier på over 40 %.[5]

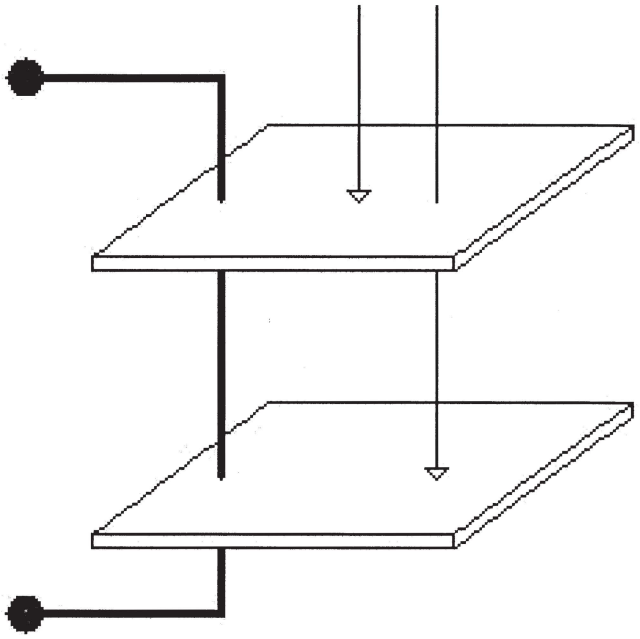
Solcellekonsepter som er basert på bruk av avanserte materialer som har flere energigap med ulike verdier av E_g har også blitt lansert. Ved å bruke slike materialer slipper man å lage mange solceller oppå hverandre, og unngår problemer som oppstår på grunn av den elektriske sammenkoblingen av disse. Slike materialer er imidlertid mer komplisert å framstille.

Redusert termalisering

Flere løsninger for den andre retningen, å redusere tap forårsaket av termaliseringsprosessene på, har også blitt presentert. En idé er å bremse hastigheten



Figur 2. Prinsippskisse av en solcellestruktur med optiske filtre som deler opp sollyset i ulike energiintervall og sender disse til solceller med ulike båndgap.



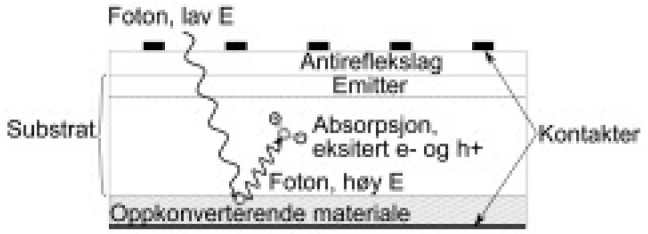
Figur 3. Prinsippskisse av en tandemsolcelle hvor to solceller med forskjellig båndgap er koblet både optisk og elektrisk i serie.

til disse prosessene og deretter trekke ut ladningsbærere med høyere energi enn E_g gjennom egnede kontakter. Dette er i prinsippet mulig i avanserte materialer, for eksempel i ulike nanostrukturerte materialer. På denne måten kan den høye spenningen tilgjengelig i energirike fotoner bevares uten at man samtidig må øke E_g, noe som på sin side ville ha redusert solcellens effektivitet.

Fotonenergikonvertering

Den tredje retningen, å omdanne/konvertere fotonenergier før de treffer solcellen, kan realiseres på ulike måter. Den ene er å bruke materialer som omdanner høyenergetiske fotoner ($E_{foton} > 2E_g$) til mer enn ett foton med lavere energi, men som fortsatt har tilstrekkelig energi til å bli absorbert i solcellen. Denne prosessen kalles *nedkonvertering* og vil føre til at energetiske fotoner kan bidra til en større solcellestrøm enn den man ellers ville

ha oppnådd. Den andre er å bruke materialer som omdanner to eller flere fotoner med for lav energi ($E_{foton} < E_g$) til ett eller flere fotoner med tilstrekkelig energi til å bli absorbert i solcellen og på den måten bidra til økt solcellestrøm, såkalt *oppkonvertering*. Det har blitt publisert mange spennende arbeider om disse to konseptene. Blant annet har nanopartikler av blysulfid inkorporert i tynne filmer brukt som konverteringsmateriale. Solceller basert på oppkonvertering er kanskje ett av de konseptene som medfører minst krav til endringer og derfor lettest kan få innpass i konvensjonell teknologi for fremstilling av silisiumbaserte solceller. Som skissert i figur 4, kan et egnet materiale relativt enkelt innføres mellom solcellens substrat og en heldekkende baksidekontakt som også fungerer som et speil. Til tross for at flere forskningsgrupper har klart å demonstrere solcellerespons ved lavere fotonenergier enn det solcellen ellers kunne ha utnyttet ved å innføre slike strukturer, har ingen dramatiske økninger i virkningsgrad hittil blitt rapportert.



Figur 4. Skjematisk fremstilling av en konvensjonell silisiumsolcelle som er modifisert for å kunne utnytte lavenergetiske fotoner gjennom innføringen av et egnet oppkonverterende materiale.

Termofotovoltaiske solceller

En siste måte å endre solsprektret på før det entrer solcellen er å bygge solceller rundt legemer som absorberer sollyset, varmes opp og deretter sender ut varmestråling. Varmestrålingen fra dette legemet sendes så mot dertil egnede solceller. Alternativt kan man bruke andre varmekilder, f.eks. en gassflamme. Slike solceller kalles termofotovoltaiske celler.

Kollisjonsgenerasjon

Den siste tredjegenerasjonsretningen er å lage solceller av en halvleder med et så lite båndgap at flere ledningselektroner dannes ved hjelp av såkalt kollisjonsgenerasjon. Etter absorpsjon av fotoner vil det i slike materialer først dannes svært energetiske ladningsbærere. Disse kan raskt slå løs kaskader av nye ladningsbærere fra atomer i materialet ved ioniserende kollisjoner, noe som vil gi økt solcellestrøm.

Norsk innsats

Ved NTNU jobber man med å framstille materialer til bruk i solceller med flere båndgap. Materialene har nanometersmå lag eller partikler i seg og har egenskaper som til dels bestemmes av valget av materialer og av størrelsen på nanostrukturene. Institutt for energiteknikk (IFE) har nylig fått innvilget midler til å starte opp et større forskningsprosjekt knyttet til silisiumbaserte, tredje generasjon solceller. Her vil flere av konseptene, inklusive tandemsolceller og energikonvertering bli studert i detalj. Ved Universitetet i Oslo er det også en aktivitet knyttet til solceller som utnytter energikonvertering.

Hva vil fremtiden bringe?

Som det bør fremkomme av teksten over har det blitt foreslått en rekke kreative konsepter som i teorien skal kunne overkomme Shockley-Queissergrensen for oppnåelig virkningsgrad fra en solcelle. Flere av disse har et teoretisk potensial for å øke virkningsgraden nært opp mot en termodynamisk virkningsgradsgrense på hele 93 %.[2] Dersom solceller med betraktelig høyere virkningsgrader enn de man i dag produserer kan realiseres uten for store kostnader, kan dette få enorme konsekvenser for prisen for solstrøm og solcellers konkurransedyktighet, så vel som for strømprisen forøvrig. Det er derfor en stor internasjonal interesse rundt tredjegenerasjonssolceller.

Til tross for at virkningsgradsrekorden fra en solcelle holdes av en tandemsolcelle, er det allikevel per dags dato ingen tredje generasjons solcelle som konkurrerer på strømpris med de beste av de etablerte solcelleteknologiene. For de øvrige solcellekonseptene synes veien frem mot industriell realisering av kostnadseffektive solceller med høye virkningsgrader fortsatt svært lang. Det er dermed rikelig plass for mange gode ideer og mye god forskning på dette potensielt svært viktige feltet godt inn i fremtiden.

Referanser

1. M.A. Green: *Third generation photovoltaics.* Springer-Verlag (2003)
2. W.P. Hirschman et al.: *The Q factor. Sharp and the market.* Photon International **3**, 140–174 (2008)
3. W. Shockley and H.J. Queisser: *Detailed balance limit of efficiency of P-N junction solar cells.* J. Appl. Phys. **32**, 510 (1961)
4. M.A. Green et al.: *Solar cell efficiency tables (version 29)* Prog. in Photovolt.: Res. and Appl. **15**, 35 (2007)
5. Internett: *http://www.doe.gov/news/4503 .htm*

∞

Fysikknytt

Ny bekreftelse på relativitetsteorien

Et finsk forskerteam har i Nature 17. april 2008 rapportert at objektet OJ287 består av to supermassive svarte hull. Det ene har hele 18 milliarder solmasser, og det andre har 100 millioner solmasser. De beveger seg rundt hverandre på en måte som stemmer med relativitetsteorien.

Hva slags objekt er OJ287?

OJ287 er et såkalt *BL Lac objekt* og ble observert allerede i 1891. De er karakterisert ved raske og store variasjoner i lysstyrken og ved at lyset fra dem er polarisert. Denne typen objekter ble senere oppkalt etter prototypen BL Lacertae som ble oppdaget i 1929. Da trodde man at dette var en variabel stjerne i Melkeveien. Men etter at dens rødforskyvning ble målt i 1974 og viste at BL Lacertae har en hastighet på hele 21 000 km/s vekk fra jorda, skjønte man at det dreide seg om en aktiv galaksekjerne langt fra Melkeveien.

Objektet OJ287 har en rødforskyvning på 0,307. Denne kosmiske rødforskyvningen kommer av at bølgelengene til lyset er strukket på grunn av universets ekspansjon mens lyset beveget seg fra objektet til jorda. Ifølge Hubbles lov er hastigheten til et fjernt objekt proporsjonal med dets avstand fra oss. Ved å bruke denne loven finner man at en rødforskyvning på 0,307 svarer til at OJ287 er 3,5 milliarder lysår fra Melkeveien.

BL Lac-objekter er nå klassifisert som en undergruppe av *blazarene* som er aktive kjerner i gigantiske elliptiske galakser med en jetstråle som peker mot jorda. Det er to typer blazarer: BL Lac objekter og variable kvasarer (som er i minoritet blant kvasarene). Betegnelsen blazar ble innført i 1978 av astronomen Ed Spiegel som en kombinasjon av navnene på disse to klassene av objekter.

Gigantiske svarte hull

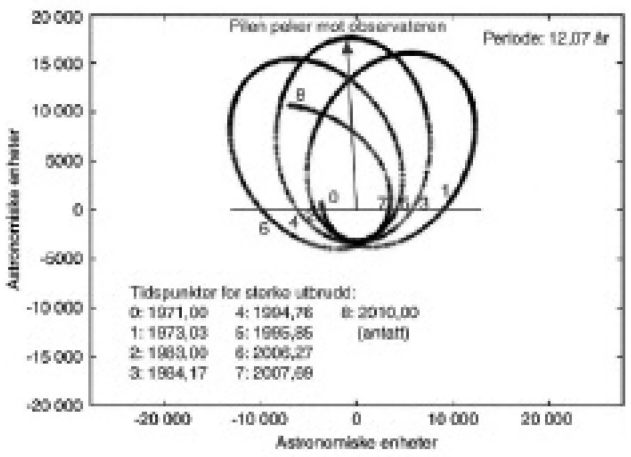
Finske astronomer under ledelse av dr. Maori Valtonen, har studert OJ287 de siste tre årene. De merket seg at OJ287 var det eneste objektet utenfor Melkeveien som hadde tydelige *periodiske* forandringer i den optiske utstrålingen. Den over hundre år lange rekken av observasjoner av dette objektet viser også at det har hatt mange store utbrudd.

Den modellen av strålingskilden som passer best med alle observasjonene, er at den er et system av to svarte hull i tett bane om et felles massesenter. De finske astronomene har vist at det ene, Ha, har en masse på hele 18 milliarder solmasser, over seks ganger så stor masse som det nest mest masserike svarte hullet man kjenner. Det andre, Hb, har 100 millioner solmasser. De befinner seg i sentrum av en enorm elliptisk galakse.

Siden Ha har 180 ganger så stor masse som Hb, er massesenteret svært nær Ha. Man kan derfor si at Hb går i bane rundt Ha. Banen er ganske avlang. Avstanden mellom de svarte hullene er bare 0,2 lysår. I denne avstanden er gravitasjonsfeltet til Ha så sterkt at det ikke duger å bruke Newtons mekanikk til å beskrive Hb sin bevegelse. Einsteins relativitetsteori må benyttes. En relativistisk effekt er at banen til Hb ikke er en fast ellipse i rommet. Den dreier litt for hvert omløp. Dette kalles *presesjon.*

I solsystemet er presesjonsbevegelsen til Merkurs banebevegelse berømt. Newtonske beregninger viste at de andre planetene påvirker banebevegelsen til Merkur og gir den en presesjon, men det var en uoverensstemmelse på 43 buesekunder i løpet av hundre år mellom beregningsresultatene og observasjonene. I desember 1915 viste Einstein at relativistiske effekter bidro med akkurat disse 43 buesekundene per hundre år.

I binære pulsarer, der to nøytronstjerner roterer rundt hverandre, fører det sterke tyngdefeltet til at presesjonsvinkelen kan være opp til noen få grader per hundre år (en grad er 3600 buesekunder). Men presesjonen til OJ287 er enda større, hele 325 grader per hundre år (Figur 1).



Figur 1. Beregnet bevegelse for det minste svarte hullet i bane rundt det største for dobbelthullsystemet OJ287 i perioden 1971–2010. Banen er formet som en roterende ellipse. På disse 39 årene har det minste hullet tilbakelagt 3,23 omløp rundt det største. Det betyr at det bruker 12 år per omløp. Presesjonsvinkelen er omtrent 39 grader per omløp, eller 3,25 grader per år. I posisjonene 1 og 7 startet store utbrudd fra OJ287.

Test av relativitetsteorien

Objektet OJ287 er ekstremt relativistisk. Det gir mulighet til å teste relativitetsteorien i et ultrasterkt gravitasjonsfelt.

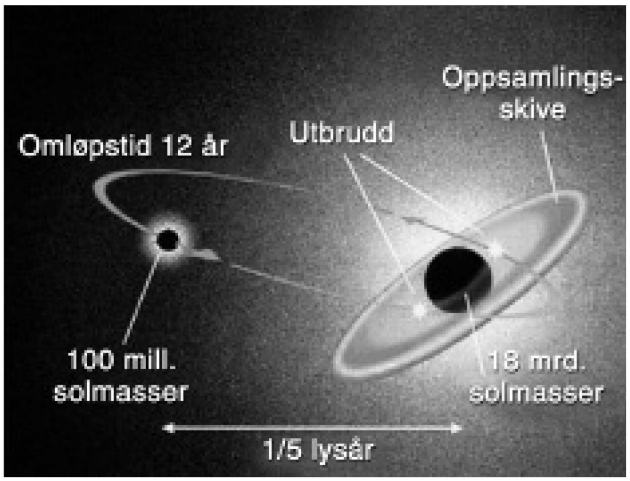
I løpet av hver 12-årsperiode observerer man to optiske utbrudd fra OJ287. Perioden til Hb sin banebevegelse er 12 år. Hb beveger seg langs en avlang bane med en gjennomsnittsavstand til Ha på bare 0,2 lysår. Rundt Ha er det en stor ring av støv og gass. Ha treffer denne materieringen to ganger i løpet av hver runde. Det utløser de observerte optiske utbruddene.

Ut fra sin modell av det binære systemet og de observerte dataene, kunne astronomene bruke relativitetsteorien til å forutsi tidspunktene for nye utbrudd. I 2005 hadde man beregnet at det skulle starte et nytt utbrudd 13. september 2007.

Men det var ikke lett å observere OJ287 i september. Dette objektet er da forholdsvis nær sola og stiger opp over horisonten bare en halv time før sola kommer til syne. For å utnytte observasjonsforholdene globalt så godt som mulig, ble det arrangert et samarbeid mellom 25 astronomer fra 10 land som benyttet de beste teleskopene som var til rådighet der OJ287 kunne observeres. Arrangementet ble en stor suksess. Over 100 målinger av OJ287 ble gjort i september 2007 og i begynnelsen av oktober.

Forutsigelsen slo til. Utbruddet kom som ventet. Dette var en solid bekreftelse både av modellen for objektet (Figur 2) og av relativitetsteorien. Hvis man hadde brukt Newtons mekanikk i beregningene, ville konklusjonen ha vært at banen var en fast ellipse i rommet, uten noen presesjon. Dette ville ha ført til andre forutsagte tidspunkter for utbruddene. Observasjonene stemte med de relativistiske beregningene med ti prosents nøyaktighet.

Ifølge relativitetsteorien sender det binære systemet ut gravitasjonsbølger. Dette fører til et energitap for systemet. Ikke noe annet kjent system har tilnærmelsesvis så sterk utstråling av gravitasjonsbølger som dette. Det taper nesten like mye energi på å sende ut gravitasjonsstråling som elektromagnetisk stråling. Ifølge beregningene skal den rombaserte gravitasjonsbølgedetektoren LISA, som etter planen skal være operativ fra 2016, kunne detektere gravitasjonsbølger fra OJ287. Utstrålingen av gravitasjonsbølger påvirker bevegelsen til Hb. De nye observasjonene viste at OJ287 taper akkurat så mye energi som relativitetsteorien sier at det skal sende ut.



Figur 2. Modell av objektet OJ 287. Det består av to svarte hull, Ha med 18 milliarder solmasser og Hb med 100 millioner solmasser. Ha er omgitt av en skive med støv og gass. Baneplanet til Hb ligger på skrå i forhold til materieskiven rundt Ha, slik at Hb treffer støvskiven to ganger per omløp.

Det minste av hullene beveger seg med en banehastighet på 20 000 km/s rundt det største. På grunn av gravitasjonsstrålingen og friksjonskraften når det passerer gjennom støvskiven rundt Ha, mister det litt energi på hver runde, og beregninger av dets fremtidige bevegelse viser at det minste hullet trolig vil bli trukket inn i det største om mellom 10 og 20 tusen år. Da vil det oppstå en enorm kollisjon, dvs. kollisjonen har i virkeligheten skjedd for 3,5 milliarder år siden, men lyset fra den vil først komme frem til oss om 10 til 20 tusen år.

Øyvind Grøn

Hva skjer

Kavliprisen 2008 – Viktige datoer

28. mai: Kunngjøring av prisvinnerne

Preses i Det Norske Videnskaps-Akademi, professor Ole Didrik Lærum, vil kunngjøre navnene på de første kavliprisvinnerne i astrofysikk, nanovitenskap og neurovitenskap, kl. 15:00 i Akademiets hus.

Annonseringen vil bli overført til Columbia University i New York, og vil være en del av den offisielle åpningen av World Science Festival.

8. september: Prissymposier

Populærvitenskapelige foredrag innen hvert av fag områdene astrofysikk, nanovitenskap og neurovitenskap vil bli holdt på formiddagen.

Faglige symposier beregnet på forskere innen de samme fagområdene vil bli holdt på ettermiddagen.

9. september: Prisutdeling i Oslo Konserthus

HKH Kronprinsen vil dele ut Kavliprisen i astrofysikk, nanovitenskap og neurovitenskap i Oslo Konserthus, kl 14:00. Senere på dagen vil Regjeringen være vertskap for en bankett i Oslo Rådhus for inviterte gjester.

10. september: Prisforedrag

Prisvinnernes foredrag vil bli holdt i Universitetsbiblioteket i Oslo.

11. september: Prisvinnerne til Stavanger og Trondheim

Prisvinneren i astrofysikk vil besøke kulturbyhovedstaden Stavanger, Vitensenteret i Sandnes og Universitetet i Stavanger.

Prisvinnerne i nanovitenskap og neurovitenskap vil være gjester ved NTNU i Trondheim.

Flere opplysninger på: *www.kavliprize.no*

Det Norske Videnskaps-Akademi ønsker alle velkommen til Kavliprisutdelingen 9. september samt til de populærvitenskapelige foredragene 8. september og til prisforedragene 11. september.

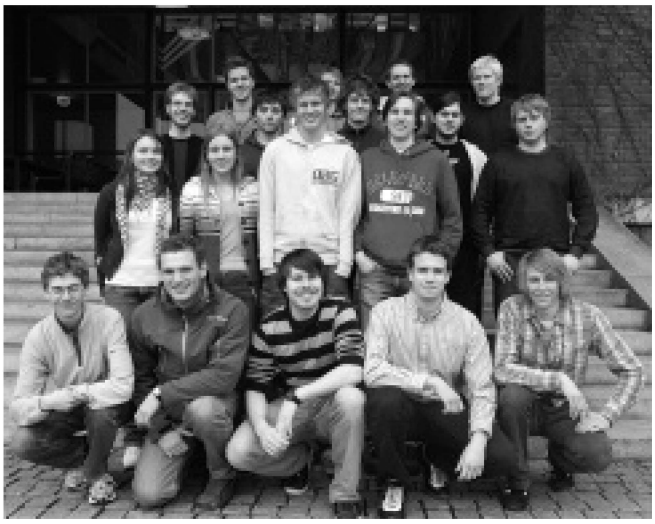
Øyvind Sørensen

∞

Fysikkolympiaden 2008

Dette året satte vi ny rekord når det gjelder antall deltakere i første runde av fysikkolympiaden. Det deltok 684 elever fra 92 skoler. Det er faktisk en økning på 37 % i forhold til i fjor. Resultatene tyder på at oppgavene i første runde ikke var altfor vanskelige, men utfordrende nok! 68 elever fikk 16 poeng eller mer av 24 mulige, og de fikk være med i andre runde. Av disse ble 18 elever tatt ut til kurs ved Fysisk institutt ved UiO og norsk finale.

Kurset ble arrangert i uken 31. mars – 4. april, og den norske finalen fant sted 4. april. Kurset er svært omfattende og intenst. Her gjennomgår vi i rask rekkefølge en rekke temaer som ikke er med i norsk skolefysikk. Det gjelder først og fremst rotasjonsmekanikk, elektromagnetisme med vekselstrøm og termofysikk. På programmet sto imidlertid ikke bare forelesninger, laboratorieøvelser og oppgaveløsning, men også populærforedrag, sosiale tilstelninger, omvisning og orienteringer om studier ved UiO.



Deltakerne på treningskurset for fysikkolympiaden

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

- *Jeg likte også at dere varierte undervisningen med noen populærforelesninger slik at vi fikk innblikk i noe av den uhyre spennende forskningen som foregår hos dere og ellers innen fysikkfaget ... Uken hos dere har inspirert meg til å jobbe grundig med faget videre, og jeg synes det er viktig at dere gir dette tilbudet til fysikkinteresserte, slik at flere blir stimulerte til å fortsette med fysikk.*
- *Jeg syns uka der nede var utrolig lærerik og er glad for å ha opplevd det.*

- *Populærforelesningene var veldig bra, de var både spennende og interessante, det var kult.*

Jørgen Vold Rennemo fra Lillehammer vgs. er den eneste som noen gang har deltatt tre ganger i den norske finalen i Fysikk-OL. Han var med første gang i 2005. Da gikk han egentlig i 10. klasse, men hadde delvis begynt på Lillehammer vgs. Det året ble han nummer to i den norske finalen. Året etter vant han. I 2007 stod han over konkurransen, og i år vant han igjen. Og ikke bare vant han, – han hadde, som den eneste, alt riktig! Jørgen er imidlertid enda mer opptatt av matematikk enn fysikk, og han har derfor aldri deltatt i Den internasjonale fysikkolympiaden. Men vi gratulerer uansett!

På de neste plassene i årets norske finale kom *Ola Liabøtrø* fra Oslo katedralskole, *Anders Johan Adreassen* fra Gausdal vgs., *Stein-Olav Davidsen* fra Sandsli vgs. og *Stian Valle* fra Hammerfest vgs. Heller ikke alle disse vil være med til den internasjonale fysikkfinalen fordi de har valgt å være med i matematikk eller kjemi.

Årets internasjonale fysikkolympiade blir holdt i Hanoi i Vietnam, fra 29. juli til 2. august, og vi har med fem håpefulle gutter som kan se frem til et meget begivenhetsrikt opphold. Det er *Anders J. Andreassen* fra Gausdal vgs., *Håkon Risbakk* fra Os vgs., *Grunde H. Wesenberg* fra Ås vgs., *Julius Asplin* fra Oslo Handelsgymnasium og *Tim Bjerkelund* fra Nadderud vgs. I Hanoi vil de møte fysikkinteresserte skolelever fra 83 land!

Den internasjonale 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. Vi har stor tro på at fysikkolympiaden er ett av en rekke tiltak som kan være med å stimulere skoleelever med interesse og anlegg for fysikk og realfag til å fortsette arbeidet med og ha glede av fagene. Den norske deltagelsen er støttet av Forskningsrådet og Kunnskapsdepartementet.

Mer om fysikkolympiaden med oppgaver og resultater finnes på våre nettsider:
http://www.fys.uio.no/skolelab/fysikkol/

Carl Angell

∞

Det nye nordlysobservatoriet på Svalbard åpnet

Den 18. februar 2008 ble Kjell Henriksen Observatoriet (KHO) på Svalbard åpnet av forskningsminister Tora Aasland. Astronauten Christer Fuglesang kastet glans over åpninga sammen med Henriksenfamilien. Åpninga ble feiret 2 dager til ende med stor festivitas.



Figur 1. Instrumentseksjonen til KHO (Foto: F. Sigernes)

Observatoriet (se FFV 2/06, side 99) har nå vært gjennom en testfase hvor instrumenter fra 16 forskjellige institusjoner fra 7 land har vært operative. "Eksamen" ble SCIFER 2-kampanjen en måned tidligere. Da ble en langtrekkende rakett, SKIFER 2 (Sounding of the Cusp Ion Fountain Energization Region), skutt opp fra Andøya for å måle utstømningen av ioner i den magnetiske kløften over Svalbard ved dagnordlys, og KHO ble brukt som vitenskapelig base under kampanjen. Alt fungerte som planlagt, og dataene fra KHO vil føre til flere publikasjoner om hvorfor ionisert luft akselereres i store mengder ut av den magnetiske polarkløfta når det er dagnordlys. Dette vil bidra til en bedre forståelse av samspillet mellom sola, magnetosfæren og den øvre atmosfæren relatert helt ned til bakkenivå.

KHO er nå fullt operativt med 50 % av instrumenteringa på plass. Instrumentparken er i hovedsak optiske instrumenter i "norlysklassen", bestående av sveipende fotometre, spektrometre, interferometre og kamerasystemer. En beskrivelse av instrumentene finnes på hjemmesiden til observatoriet: *http://kho.unis.no/*

Legg merke til at KHO har god plass til flere instrumenter for nye brukere som ønsker å komme til Svalbard for å gjøre nordlysrelaterte studier. En standard instrumentmodul med kuppel og kontroll-

rom kan leies for en symbolsk pris. Observatoriet er også tilrettelagt for en fordobling av instrumentarealet med tanke på en fremtidlig ekspansjon. Vi er svært stolte av KHO som er verdens største nordlysobservatorium. I størrelse og antall instrumenter utfordrer vi selv astrofysikkmiljøet med sine teleskopsystem, men vi ønsker dem selvsagt velkommen til et eventuelt samarbeid.

Samlokaliseringa med forskningsradarene EISCAT, SOUSY og SPEAR er også svært spennende. Disse radarene gir oss data om viktige parametre som tetthet, vind og temperatur opp til 1000 km, som kan sammenlignes med våre optiske målinger. I tillegg gir SVALSAT oss data fra alle polare forkningssatellitter. All informasjon deles og sendes ut i verden via fiberkabelen til fastlandet. Vi håper at KHO vil bidra til en ny giv for romfysikk i Norge.

Fred Sigernes
UNIS

∞

Tur til CERN for fysikklærere

32 fysikklærere besøkte CERN 11–16. november 2007. Tidligere leder av Fysikklærerforeningen, Rolf Vegard Olsen, fikk ordnet det slik at Utdanningsdirektoratet finansierte turen.

Kurset startet mandag 11. november med velkomsttale av generalsekretæren på CERN, Maximilian Metzger. Utover i uken var det forelesninger av høy faglig kvalitet om partikkelfysikk, detektorer, eksperimentene i den nye LHC-ringen ved CERN, kosmologi, antimaterie, praktiske anvendelser av resultatene fra CERN, samt om datanettverket som trengs til eksperimenter og bearbeiding av data i ettertid, The Grid. I tillegg var det besøk på to av detektorene på LHC-ringen, Atlas og Alice. Atlasdetektoren er arbeidsplassen til de fleste norske fysikere og ingeniører ved CERN.

CERN planlegger å bygge en ny akselerator som skal være ferdigstilt innen 2025. Akseleratoren har fått navnet Clic (compact linear collider). Clic skal bli en lineærakselerator med lengde over 30 km, og i denne akseleratoren skal elektroner og positroner kollidere.

Tilbakemeldingene fra deltakerne er uten unntak positive, noe som tyder på at kurset har vært vellykket og nyttig både faglig og sosialt. Alle som underviser i fysikk i norsk skole burde fått anledning til å delta på en ukes kurs ved CERN. Hvis Fysikklærerforeningen kan skaffe penger som kan finansiere flere kurs, er vi alltid velkomne der.

Representanter fra CERN presiserte i flere sammenhenger betydningen av at lærere deltar på kurs arrangert av dem, først og fremst fordi elevene som blir undervist av fysikklærere kan få kunnskaper om hva som foregår ved CERN, og muligens bli inspirert til å studere fysikk.

CERN arrangerer også en til to dagers kurs for elever. Dette tilbudet burde fysikklærere sammen med sine elever, i større grad benytte seg av.

En stor takk til Jan Finnby som var reiseleder, og til Mick Storr som var vår kontaktperson på CERN, for det arbeidet de gjorde slik at vi alle fikk en innholdsrik tur.

På hjemmesiden til CERN kan dere under "education" studere forelesningene som vi hadde under vårt opphold ved CERN.

Morten Trudeng
Leder av Norsk Fysikklærerforening

∞

Konferanser

Biofysikkmøtet 2008

Styret i Faggruppe for biofysikk og medisinsk fysikk i Norsk Fysisk Selskap (NFS) arrangerte årets biofysikkmøte på Kongsvold Fjeldstue i perioden 27. til 29. februar 2008. Dette møtet avholdes annet hvert år i takt med de "små" fysikermøtene til NFS. Formatet på møtet var som tidligere: Start midt på dagen onsdag 27. (etter at morgentogene fra Oslo og Trondheim var kommet vel fram og lunsjen var fortært), og avslutning før lunsj på fredag 29.

Det var en blanding av inviterte og påmeldte foredrag samt postersesjoner. Det var også satt av tid til skitur på fjellet. Den hygge og lunhet som Kongsvold Fjeldstue representerer ble komplettert av fabelaktig mat og nydelig natur. Dette ga som vanlig en perfekt ramme for en hyggelig og uformell sammenkomst for biofysikerne i Norge med mange muligheter for å knytte kontakter både på det personlige og det faglige plan.

Møtet samlet denne gangen 33 deltakere, hvorav 10 master- /sivilingeniørstudenter, 12 stipendiater/post.docs og 11 faste ansatte fra de fire in-

stitusjonene NTNU, UMB, UiO og DNR, Rikshospitalet HF. I tillegg deltok en invitert foredragsholder fra Algeta ASA. Det var i alt 5 inviterte foredrag og 18 påmeldte 15-minutters foredrag. Det var dessuten 7 postere som dels ble kortpresentert i plenum (3-4 minutter pr. poster) og dels ble gjenstand for gjennomlesing og diskusjoner i en dedikert postersesjon. I tillegg til dette holdt Johan Moan et populærvitenskapelig foredrag om hudfarger og menneskenes utvikling i sola, i peisestua etter festmiddagen torsdag kveld. Interesserte kan finne det fullstendige programmet samt abstraktsamling på møtets hjemmeside: *www.fys.uio.no/biofysikk/kongsvold_2008/Program_Abstracts_2008.pdf*

Været var blandet, men under fritidspausen torsdag formiddag var det fantastisk sol, nysnø og perfekte skiforhold. Svært mange av deltakerne benyttet anledningen til å gå på ski og å speide etter moskus, men dessverre uten hell denne gangen! Festmiddagen torsdag kveld ble avsluttet med naturens eget fyrverkeri – et fabelaktig nordlys som spilte opp på nordvesthimmelen og fikk mange deltakere til å forsøke å fange det inn med kamera, med mer eller mindre hell.

Det ble valgt nytt styre for Biofysikkseksjonen av Norsk Fysisk Selskap. Det nye styret er:

Cecilia Futsæther, UMB
Eli Olaug Hole, UiO
Eirik Malinen (leder), DNR, Rikshospitalet HF
Pawel Sikorski, NTNU

Det gamle styret som har fungert i 4 år, har bestått av Tore Lindmo, NTNU, Unni Oxaal, UMB, Dag Rune Olsen, DNR, Rikshospitalet HF og Einar Sagstuen (leder), UiO. Vi takker for oss og ønsker det påtroppende styret lykke til!

Vertskapet ved Kongsvold Fjeldstue, Ellen og Knut Nyhus, takkes for et særdeles hyggelig opphold, og vi takker også for økonomisk støtte til møtet fra Norsk Fysisk Selskap.

Einar Sagstuen

∞

Husk Landskonferansen om fysikkundervisning

Fysikklærerforeningens landskonferanse holdes på Gol 10. til 13. august 2008 (se FFV 1/08 side 27).

Du kan lese mer om konferansen og melde deg på, på nettstedet *www.fysikkonferansen.no*

Vi legger opp et program som skal være faglig lærerikt, nyttig og sosialt for fysikklærere på alle trinn.

På vegne av arrangementskomiteen
Morten Trudeng
leder av NFL

∞

Bokomtale

Jeffrey Bennett og Seth Shostak: Life in the Universe. Pearson, Addison Wesley, 2007. ISBN 0-8053-4753-4 (538 sider) $ 105,60.

Jeg spørger helst. Mitt kall er ej at svare.

"Den evige stillheten fra rommet skremmer meg", erklærte den franske matematiker og filosof Blaise Pascal. Andre hevder derimot at eventuelle signaler fra rommet bør gjøre oss meget redde. "For Guds skyld, ikke svar!" er deres bud. Ukjente vesener som er oss uendelig teknisk overlegne, vil gjerne ikke vise vår sivilisasjon noen respekt. Vår erfaring i så henseende er sørgelig. Jordiske erobrere ødela kulturskatter, tilranet seg alle rikdommer og slavebandt fremmede folkeslag. Vi velger likevel å tro at de mest aggressive raser ødelegger seg selv før de er i stand til å kolonisere stjerneverdenen.

Jeg har nå lest ei særdeles grundig og ryddig bok som tar for seg dette spennende spørsmålet. Boka heter "Life in the Universe", og den er skrevet av Jeffrey Bennett og Seth Shostak. Forfatterne tar ikke for gitt at leseren har greie på all mulig naturvitenskap, men bygger selv opp denne viten mens de stadig gir hint om sammenhenger der denne kunnskapen vil bli nyttig. Vi møter en usedvanlig klar og enkel framstilling der det kompliserte blir forståelig uten at en fortaper seg i alskens uvesentlige og subtile detaljer. Det mest sentrale blir overbevisende framlagt, og forfatterne taper

aldri målet av sikte: Er vi alene, eller finnes det andre livsformer der ute i dypet av det fjerne kosmos? Forarbeidet som gjøres for å svare på denne evige gåten, er så solid at leseren får med seg mengder av grunnleggende astronomi, fysikk, kjemi, geologi og biologi, men under én forutsetning: En må lese oppmerksomt, legge seg ting på minnet og ta seg tid til å lære underveis.

Den eneste innvendingen jeg har, er at formatet på boka er lite hendig. Når ei bok med så store sider attpåtil er heftet, blir en faktisk avhengig av å legge boka på et solid underlag når en leser.

Bennet og Shostak nevner tidlig tre ting av stor betydning om en vil være optimist på livets vegne: 1) Det ser ut til at naturlovene tillater at organiske molekyler danner seg lett og naturlig. 2) Det virker som om livet etablerte seg på Jorda så snart forholdene var noenlunde akseptable. 3) Livet som sådant synes å være særdeles robust og greier seg under temmelig harde vilkår.

Når en gir seg meningsfylt til å drøfte muligheten for liv andre steder i universet, er det viktig å forstå livet her på Jorda. Dessuten må vi tøyle fantasien. Alle livsformer må adlyde naturlovene. Livet trenger tre ting: byggemateriale, energi og flytende vann. Vann må til for å frakte byggesteiner og kvitte seg med avfall. Hydrogen, oksygen, karbon og nitrogen utmerker seg ved sine kjemiske egenskaper, og det er særdeles mye av disse elementene i kosmos. Men flere andre grunnstoffer er også nødvendige for livet. Bare hydrogen er opprinnelig. Alle disse andre stoffene blir dannet i stjernenes hete indre. Således er vi alle dannet av stjernestøv og er barn av stjernene.

Forskerne har slett ikke greidd å lage kunstig liv. Men en og en er på sett og vis ikke alltid to. Hvis vitenskapen finner selv primitive livsformer et annet sted i vårt eget solsystem, vil det tyde på et univers som vrimler av liv. Så drøfter da også forfatterne de stedene i solsystemet der enkle livsformer muligens har bitt seg fast. Finnes det kanskje is der bakterier trives under overflata på planeten Mars? Det er godt mulig at det under isen på månen Europa til Jupiter finnes et dypt hav av saltvann. Kanskje livet liker seg der? Saturn har to måner der en ikke uten videre bør avskrive muligheten for at livet lever. Men det er rett nok uhyggelig kaldt på Titan og Enceladus. Så kjemiske prosesser og livsutfoldelsen vil måtte foregå som i sakte film.

Nå skal det villig innrømmes at det ikke er beint fram å vite hva dette livet vi leter etter, egentlig er. Det er ikke trivielt å gi en dekkende definisjon. Men Bennett og Shostak framhever seks egenskaper som bør være til stede hos et levende objekt: 1) Levende organismer viser en stor grad av *orden* i sin struktur. Denne orden går sannelig tapt når livet opphører og støv blandes med støv. 2) Organismene har en merkelig evne til å lage *kopier* av seg selv. Men selv om virus greier dette, må de snylte, for de mangler neste egenskap. 3) Levende vesener greier å benytte *energi* i en eller annen form til aktiviteten sin. 4) Livet gjennomgår også en slags syklus fra fødsel til død. Fra sine forgjengere arver livet den egenskap at det *vokser og utvikler seg.* 5) Livet *reagerer* på sine omgivelser når disse forandres. 6) Livet utvikler seg ved at nye generasjoner vil være bedre *tilpasset* omgivelsene. Det skjer ved at de likeste greier seg best i kampen for tilværelsen og etterlater seg mest avkom.

Men om vi er selskapssyke og ønsker kommunikasjon med fremmede på andre kloder, gir *Drakelikningen* antydning om vi kan forvente svar på tiltale. Den likningen forteller hvor mange naboer vi har i vår egen galakse som bedriver vitenskap. Da multipliserer vi antallet stjerner som er blitt dannet i Melkevegen med den brøkdelen av disse stjernene som likner Sola. Så får vi gange med den brøkdelen som har planeter. Deretter multipliserer vi med sannsynligheten for at planeten skal ligge i livssonen der vi finner flytende vann. Så følger sannsynligheten for at livet skal oppstå. Så må livet utvikle kompliserte vesener. Men vi krever også at livet skal lage redskap og ha språk. Dernest må disse vesener besitte ordentlig vitenskap. Dessverre tyder vår erfaring på at den tiden en avansert sivilisasjon har til rådighet kan være meget begrenset. Nesten alle faktorene i Drakelikningen er særdeles usikre, men likningen gir god oversikt over problemet. Vi minner om visdommen: Å vite hva man ikke vet, er og en slags allvitenhet.

Til slutt vil vi slå følge med Enrico Fermi. Han mente nemlig at en eller annen sivilisasjon som ønsker å utforske og ekspandere ville hatt flust med tid til å kolonisere vår galakse. Hvorfor er de ikke allerede her, hvis det finnes noen der?

Henning Knutsen

∞

Nye Doktorer

Eirik Aspenes



Eirik Aspenes forsvarte 2. februar 2007 sin av handling *Wettability effects on oil recovery mechanisms in fractured chalk* for dr.scient.-graden ved UiB.

I de fleste oljereservoarene i den sørlige delen av norsk kontinentalsokkel er reservoarbergarten kalk. Kalk har stor lagringskapasitet for olje, men har ofte dårlige strømningsegenskaper og er svært oppsprukket. For å øke oljeutvinningen fra slike felt injiseres ofte vann. Bergartens vætingsegenskaper bestemmer bergartens evne til å suge til seg vann og avgi olje. Men vætingsegenskapene til bergartsprøver kan endres når prøvene blir brakt opp. Det er viktig at målinger på prøver i laboratoriet reflekterer tilstanden i reservoaret, alternativt kan det etableres vætingsforhold for prøven i laboratoriet som gjenspeiler reservoartilstanden.

Doktorarbeidet viser at etablerte metoder for gjenskaping av reservoarbergartens vætingsegenskaper i laboratoriet ikke nødvendigvis gir egenskaper som er likt fordelt gjennom hele prøven. Det presenteres en forbedret metode som er raskere og gir en jevnere fordeling av fuktegenskapene, og det introduseres en metode som gjør det mulig å måle egenskapene i tre dimensjoner i prøven. Videre vises det at på tross av mindre gunstige vætingsegenskaper for spontan vannoppsuging kan det dannes en hydraulisk kontinuerlig vannfase over sprekkene som kan gi økt oljeutvinning.

Arbeidet er utført ved Institutt for fysikk og teknologi, UiB. Veileder har vært professor Arne Graue. Aspenes arbeider nå som produksjonsingeniør i StatoilHydro.

∞

Bjarte Alsaker Mohn



Cand.scient. Bjarte Alsaker Mohn disputerte 21. juni 2007 for PhD-graden ved Universitet i Bergen med avhandlingen *Charged Higgs boson searches and SemiConductor Tracker commissioning for the ATLAS experiment.*

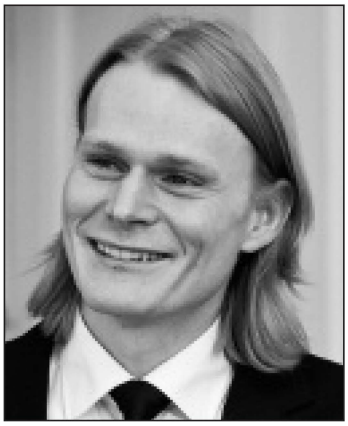
Mulighetene for å oppdage en ladd higgspartikkel i proton–proton kollisjoner ved 14 TeV med ATLAS-detektoren ved CERN er studert. Det presenteres detaljerte simuleringsstudier av hvordan disse vil kunne identifiseres. Forbedrede algoritmer for identifikasjon av ladde higgspartikler er utviklet, og gjennom dette er ATLAS sine muligheter for oppdagelse av disse partiklene økt. Det er benyttet svært detaljerte og realistiske simuleringer av ATLAS-detektoren, og noen av prosessene er studert for første gang på denne måten. Simuleringene har krevd store dataressurser som er stilt til disposisjon gjennom Nordugrid-samarbeidet.

Avhandlingen presenterer også resultater fra bygging og ferdigstilling av en del av ATLAS' SemiConductor Tracker (SCT). SCT er bygd opp av moduler med silisiumsdetektorer med hurtig forsterkerelektronikk og strenge krav til robusthet. Her har Universitetene i Bergen, Oslo og Uppsala konstruert, testet og levert 320 detektormoduler som skal tilfredsstille strenge kvalitetskrav. Testresultatene viser at de leverte modulene tilfredsstiller kravene med god margin. Mohn presenterer også arbeid med utvikling av PC- baserte systemer for kontroll og monitorering av detektormodulene.

Arbeidet er finansiert av Forskningsrådet og er utført med professor Bjarne Stugu som hovedveileder. Mohn har hatt lange opphold ved CERN og i Uppsala, og professor Tord Ekelf i Uppsala har fungert som medveileder.

∞

Jan Petter Morten



Siv.ing. Jan Petter Morten forsvarte 28. mars 2008 sin avhandling *Coherent and correlated spin transport in nanoscale superconductors* for PhD-graden ved NTNU.

Nanoelektronikk er fagfeltet der man søker å utnytte kvanteeffekter i elektroniske kretser. Noen eksempler på slike teknologier er *giant magneto resistance* (GMR) (Nobelprisen i fysikk 2007) og følsomme superleder-magnetfeltsensorer (SQUID).

I dette doktorarbeidet har vi studert transportegenskaper og korrelasjonseffekter i kretser på nanoskala der strømmer flyter mellom superledende metaller, ferromagneter og normale metaller. Vi har benyttet moderne formuleringer av den kvasiklassiske teorien for Keldysh– Greenfunksjoner, slik som kretsteorien for kvantetransport og full tellestatistikk. Transport og relaksasjon av spinn polarisert strøm i superledere er bestemt av energiavhengige transportkoeffisienter. Vi har regnet ut transportegenskaper til ulike superleder-ferromagnetheterostrukturer, og finner samsvar med eksperimenter. Videre har vi studert krysset Andreev-refleksjon, der to elektroner fra *ulike* normalmetall eller ferromagnetiske kontakter flyter inn i en superleder og danner et Cooper-par, eller omvendt. Denne prosessen er interessant fordi den gir opphav til romlig separerte elektroner i kvantemekanisk sammenfiltrede tilstander.

Arbeidet er utført ved Institutt for fysikk, NTNU. Professor Arne Brataas har vært veileder. I tillegg har forskere fra KTH (Sverige), TU Delft (Nederland), Universitetet i Konstanz (Tyskland) og UCLA (USA), vært viktige bidragsytere.

∞

Are Raklev



Cand.scient. Are Raklev forsvarte den 4. juni 2007 avhandlingen *Supersymmetric Cascade Decays at the LHC*, for PhD-graden ved UiB.

Gjennom de banebrytende målingene til NASAs WMAP-satelitt har man kunnet fastslå at ukjente elementærpartikler, kalt mørk materie, må utgjøre omlag 85 % av massen i universet. Blant forslagene til hva mørk materie består av er supersymmetri: En teori som forutsier at det finnes en tyngre superpartner til alle elementærpartiklene vi kjenner. For tiden ferdigstilles Large Hadron Collider (LHC) ved CERN. Dette eksperimentet skal studere protonkollisjoner ved svært høye energier, og har potensiale til å oppdage supersymmetriske partikler.

Raklev presenterer arbeid med å forbedre eksisterende teknikker og utvikle nye, for å kunne finne supersymmetriske partikler ved LHC og kunne måle deres masser, deriblant kandidater til mørk materie som ikke kan observeres direkte. Gjennom datasimuleringer av protonkollisjoner og teoretiske beregninger har han vært med på å videreutvikle en metode basert på fordelinger av såkalt invariant masse, som er mer presis og robust mot systematiske feilkilder. Videre har Raklev jobbet med å utvide bruksområdet for slike fordelinger til flere typer supersymmetriske modeller.

Raklev har hatt doktorstipend fra Forskningsrådet og et Marie Curie Early Research Training Fellowship ved CERN. Professor Per Osland har vært hovedveileder, og professor Anna Lipniacka biveileder for arbeidet. Raklev er nå post.doc. ved Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics ved University of Cambridge.

∞

Camilla Sætre



Cand.scient. Camilla Sætre disputerte 9. februar 2007, for PhD-graden ved Universitetet i Bergen med avhandlingen *The effect of energetic electron precipitation on the nitric oxide density in the lower thermosphere.* Hun studerte med andre ord kjemiske endringer i atmosfæren når det er nordlys.

Nordlys oppstår når elektroner og protoner fra solvinden fanges inn av magnetfeltet rundt jorden og ledes ned i atmosfæren hvor de kolliderer med atmosfæriske atomer og molekyler. Ved disse kollisjonene får atomene og molekylene i atmosfæren tilført ekstra energi. Noe av denne energien sendes ut igjen som fotoner, og vi får nordlys. Slike kollisjoner vil også medføre kjemiske reaksjoner i atmosfæren. En av endringene man ser etter et sterkt nordlysutbrudd er en kraftig økning i konsentrasjonen av nitrogenoksid, som det kan ta flere dager å bryte ned igjen. Nitrogenoksid har stor innvirkning på temperaturen i den øvre delen av atmosfæren, og kan bryte ned ozon uten å brytes ned selv. Avhandlingen tar for seg en direkte sammenlikning og modellering av effekten de nordlysdannende partiklene har på mengden av nitrogenoksid. Studiet omfattet målinger fra røntgenkameraet PIXIE om bord på satellitten Polar, og fra studentsatellitten SNOE. Modellering av de kjemiske endringene er gjort i nært samarbeid med Universitetet i Colorado.

Camilla Sætre arbeidet med doktorgraden ved Institutt for fysikk og teknologi, UiB, med professor Johan Stadsnes som veileder. Hun er nå ansatt som postdoc i målevitenskap samme sted. Postdocprosjektet omfatter flerfasemålinger i oljerør ved hjelp av ioniserende stråling.

∞

Ola Kristoffer Øye



Cand.scient. Ola Kristoffer Øye forsvarte 17. januar 2007 sin avhandling *Preparing the ATLAS experiment – SemiConductor Tracker commissioning and simulation of SUSY models,* for PhD-graden ved Universitetet i Bergen.

Avhandlingen omfatter studier i forbindelse med det forestående ATLAS-eksperimentet ved CERN. Det presenteres simuleringsstudier av tre ulike modeller, alle tilhørende en klasse modeller basert på SuperSymmetry (SUSY). SUSY forutsier at for hver av de kjente partikkeltypene finnes det en ny partikkeltype. Disse partiklene vil være tyngre enn de kjente og ha et annet spinn, men de vil ellers være like. SUSY gir blant annet en mulig forklaring på den mørke materien i universet. De tre signaturene som er studert er events med mye manglende energi, events med minst to lavenergetiske tau- leptoner og events med tunge supersymmetriske partikler som lever så lenge at de kan betraktes som stabile, langsomme partikler i ATLAS.

Avhandlingen presenterer også resultater fra bygging og ferdigstilling av en av deldetektorene i ATLAS, SemiConductor Tracker (SCT), et prosjekt der UiB i flere år har hatt forpliktelser. Øye har bygd opp et system for å teste modulene, og har hatt en sentral rolle i testingene av ferdigstilte detektormoduler. SCT vil spille en svært viktig rolle i målingen av ladde partiklers bevegelsesmengde i ATLAS, og vil utføre posisjonsmålinger med en presisjon på 23 μm. Resultater fra hvordan detektorer kan brukes sammen for å rekonstruere spor etter kosmisk stråling, er også presentert.

Arbeidet er finansiert av Forskningsrådet, og professorene Bjarne Stugu og Anna Lipniacka har vært veiledere.

∞

Trim i FFV

FFVT 2/08

Kokosnøttene

Tre turister fant en haug kokosnøtter på stranden.

Turist nr. 1 tok halvparten av nøttene pluss en halv nøtt.

Turist nr. 2 tok halvparten av de gjenværende nøttene pluss en halv nøtt.

Turist nr. 3 tok halvparten av de nøttene som nå var igjen pluss en halv nøtt.

Da var det akkurat én nøtt igjen som de ga til en apekatt som sto og så på dem. Hvor mange nøtter var det i den opprinnelige haugen?

Løsning FFVT 1/08

Med robåt på Sirkelsjøen

Hvis damens mål er å komme i land så fort som mulig, må hun sørge for alltid å ha sjøens sentrum (den forankrede flåten) mellom seg og mannen. Så lenge hun, flåten og mannen er på en rett linje, bruker hun resten av farten sin til å ro mot land. Mannens optimale strategi er å løpe samme vei rundt sjøen med fire ganger robåtens fart. Damen klarer å holde den rette linjen inntil hennes avstand fra sentrum blir $r/4$, hvor r er sjøens radius. Hvis mannen fortsetter å løpe langs sjøen (uansett hvilken vei), må hun bruke all farten sin på å holde linjen rett, og robåten beveger seg i en sirkel med radius $r/4$ rundt flåten.

Når damen har nådd frem til sirkelen med radius lik $r/4$, skifter hun kurs og ror rett mot nærmeste punkt på land. Avstanden til land er $3/4\,r$, mens mannen har en avstand til samme punkt på $\pi\, r$. Når damen er i land, har mannen tilbakelagt $3r$, og damen får et forsprang på $0,14 \cdot r$.

Damen kan velge en annen strategi etter at avstanden til land er blitt $3/4\,r$. Hvis hennes mål er å få så stort forsprang som mulig ved landing, bør hun følge tangenten til sirkelen med radius $r/4$, i retning bort fra mannen.

Se Richard K. Gay: "The Jewel Thief", MABLA, Vol. 8, Sept., 1961, s 149–150. Gay regnet også ut at damen kan unnslippe selv om mannen løper 4,6 ganger så fort som hun ror.

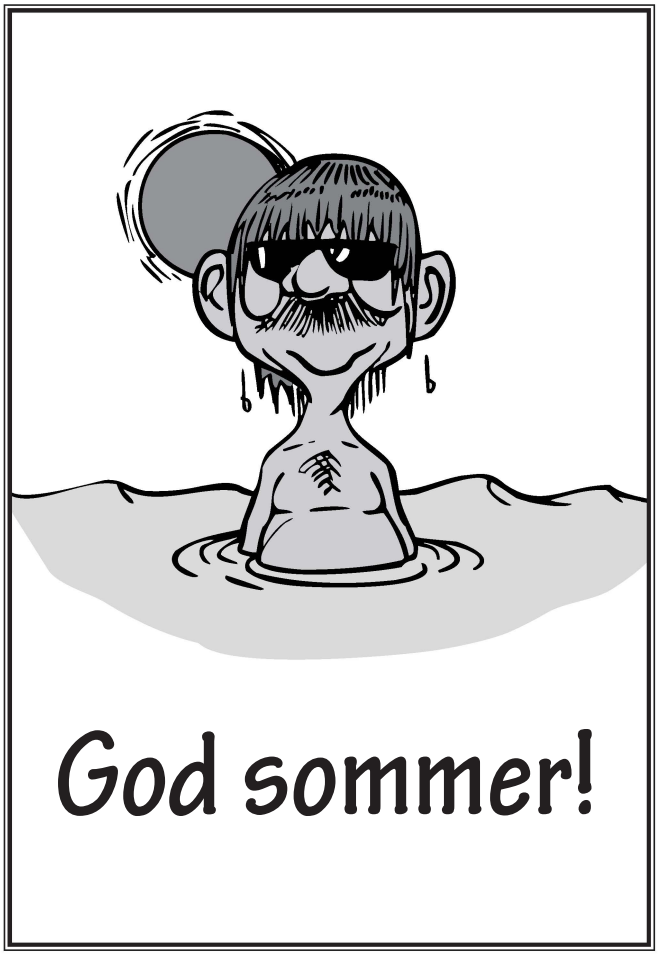
∞

Løsning av påskenøtt

En rakett i stor høyde antas å ha motoren på slik at gass skytes loddrett nedover, og motoren kan justeres slik at raketten er i ro i forhold til jordoverflaten. Utfordringen var å gjøre rede for bevegelsesmengderegnskapet i denne situasjonen.

Her er det ikke nok å betrakte systemet rakett og forbrenningsgasser. Man må også ta jorda med. Hele tiden flytter rakettens og forbrenningsproduktenes felles tyngdepunkt seg nedover, men raketten har konstant avstand fra jorda. Dette betyr at tyngdepunktet til systemet rakett–jord flyttes like mye oppover som forbrenningsgassenes tyngdepunkt flyttes nedover. Mekanismen bak denne ørlille forflytningen oppover er gravitasjonskraften fra raketten som trekker på jorda. Siden jordas masse er svært stor er denne forflytningen helt umerkelig, men likevel ikke neglisjerbar i regnskapet for bevegelsesmengden.

∞



B-BLAD

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

Retningslinjer for forfattere

FRA FYSIKKENS VERDEN utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og 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

Norsk Fysisk Selskap

STYRE

President:
Professor Gunnar Løvhøiden
Fysisk institutt, UiO.
e-post: gunnar.lovhoiden@fys.uio.no

Visepresident:
Førsteaman. Øyvind Frette
Inst. for fysikk og teknologi, UiB.
e-post: oyvind.frette@ift.uib.no

Styremedlemmer:
Professor Øystein Elgarøy
Inst. for teoretisk astrofysikk, UiO
Professor Ulf Kristiansen
Inst. for elekronikkk og telekom. NTNU
Forsker Ole Martin Løvvik
Senter for materialvitenskap og nanoteknologi, UiO
Førsteaman. Kjartan Olafsson
Inst. for fysikk og teknologi, UiB
Professor Einar Sagstuen
Fysisk institutt, UiO
Professor Jon Samseth
Høgskolen i Akershus, Lillestrøm
Lektor Morten Trudvang
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 Øystein Elgarøy
Inst. for teoretisk astrofysikk, UiO
Professor Øyvind Grøn
Høgskolen i Oslo og Fysisk inst. UiO

Redaksjonssekretær:
Overingeniør Karl Måseide
Fysisk institutt, UiO

Redaksjonskomité:
Professor Åshild Fredriksen
Institutt for fysikk, UiT
Professor Per Chr. Hemmer
Institutt for fysikk, NTNU
Førstelektor Ellen K. Henriksen,
Fysisk institutt, UiO
Professor Per Osland
Institutt 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: oystein.elgaroy@astro.uio.no
e-post: oyvind.gron@iu.hio.no
e-post: k.a.maseide@fys.uio.no
Bankgiro: 6094.05.40227

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 g. årlig.
Abonnement kan tegnes fra ekspedisjonen.
Årsabonnement 120 kr. (Studenter 60 kr.)
Løssalg 40 kr. pr. nummer.