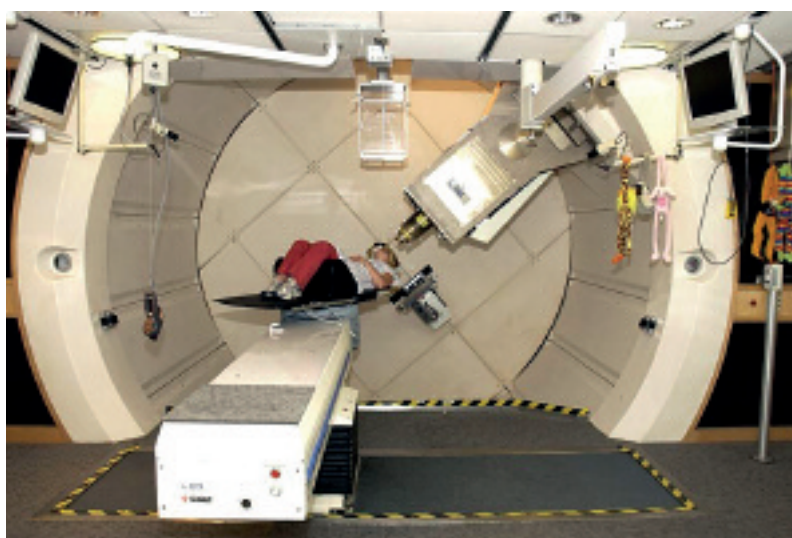


Fra Fysikkens Verden



«Gantry» for protonbehandling av kreft
(Se artikkel: Helsebringende protoner)

Nr. 1 – 2011
73. årgang

Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øyvind Grøn
Marit Sandstad

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Jan Folkvard Evensen:	
Helsebringende protoner	6
I. Kanestrøm og T. Henriksen:	
Atmosfærens drivhuseffekt	12
J.-E. Solheim og O. Humlum:	
Astronomi og klima - Del I	21
Ø. Elgarøy og Ø. Grøn:	
Nøytrinoer og galakser	27
Fra Redaktørene	2
FFV Gratulerer	2
Tor Jacobsen 80 år	
Jan Trulsen 70 år	
Beynon-medaljen til Asgeir Brekke	
In Memoriam	4
Jan Frøyland	
Nytt fra NFS	5
Fysikermøtet 2011	
Indeks 2010	17
Hva skjer	29
Vellyket år for LHC	
Bokomtaler	30
G. Farmelo: Paul Dirac	
R. Penrose: Cycles of Time	
Hawking og Mlodinow:	
The Grand Design	
Nytt fra NFS	33
Nye medlemmer	
Trim i FFV	34

Fra Redaktørene

Globalt klima er forskjellig fra lokalt klima, og klimaendringer på en tidsskala over noen få tiår er forskjellige fra endringer over skalaer på tusener eller hundretusener av år. Vi har hatt noen kalde vintre tre år på rad i sydlige deler av Norge, men globalt har det vært uvanlig varmt. Den globale gjennomsnittstemperaturen har steget de siste ti-årene, men om ti tusen år kommer trolig en ny istid.

De fysiske mekanismene som styrer de ulike typene klimaforandringer er forskjellige globalt og lokalt, og de avhenger av hvilken tidsskala vi snakker om. Om det blir kald eller varm vinter i Norge avhenger blant annet av hvilken breddegrad jetstrømmen befinner seg på. Den er en østgående luftstrøm om vinteren i omtrent 10 km høyde, der varm tropisk luft møter kald polarluft på ca. 60 grader bredde. Her dannes ofte lavtrykk. Meteorologene vet ikke helt hva som forårsaker forflytninger av jetstrømmen i nord-syd retning.

At drivhuseffekten har økt de siste ti-årene på grunn av utslipp av drivhusgasser, er de fleste klimaforskere enige om. Det er enkle fysiske prinsipper bak drivhuseffekten som det vil være nyttig at flest mulig har kjennskap til. Disse forklares i dette nummeret av FFV.

Vi presenterer også første del av en lengre artikkel om astronomi og klima. Den dreier seg om sammenhenger mellom periodiske klimaendringer og periodiske endringer i jordas bevegelse og i solaktiviteten. Her inngår mange fenomener med ulike perioder som virker sammen. Ved resonans kan det oppstå forsterkninger, slik at fenomener som er ubetydelige dersom de hadde virket alene, kan ha merkbare virkninger når de opptrer sammen.

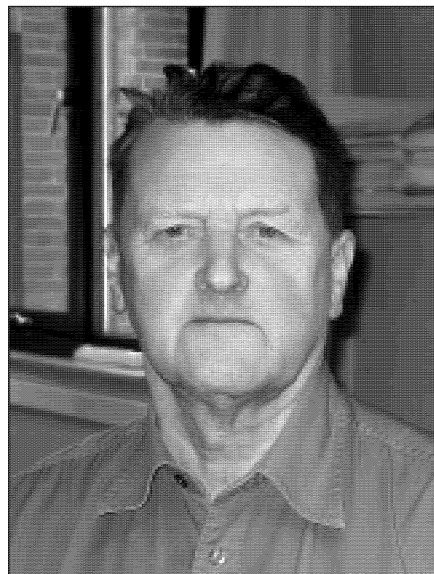
I disse astronomiske klimamodellene forklares mesteparten av de observerte klimavariasjonene uten å trekke inn endringer i drivhuseffekten. Man kan spekulere på om dette betyr at virkningen av økt drivhuseffekt på klimaet overdrives blant fagfolk og i mediene. Vi håper klimaartiklene i dette nummeret av FFV kan stimulere til debatt om hvilke fysiske mekanismer som er de viktigste for endringer i jordas klima på ulike tidsskalaer, slik at flest mulig årsakssammenhenger kan bli belyst.

Øyvind G. Grøn

∞

FFV Gratulerer

Tor Jacobsen 80 år



Professor emeritus Tor Jacobsen fylte 80 år 17. januar. Han trådte sine barnesko i Harstad og viste etter hvert stor interesse for sjakk. Han ble nordnorsk sjakkmeister i 1953 og 1954, og var med på det norske firemannslaget som vant VM i sjakk for studenter i Brussel i 1953.

Tor Jacobsen begynte på realfagsstudier ved Universitetet i Oslo i 1951. Etter studiene arbeidet han ved Fysisk institutt på Blindern, i første omgang til begynnelsen på 60-tallet, avbrutt av et kort opphold som lærervikar i Harstad. Så fulgte en to-treårs periode ved CERN, det store internasjonale forskningssentret for elementærpartikkel- og kjernefysikk utenfor Genève.

På midten av 1960-tallet var Tor Jacobsen igjen tilbake på Blindern, og han har siden arbeidet med elementærpartikkelfysikk (EPF) der. Deltakelsen i det store nordiske samarbeidsprosjektet angående pp- og pd-reaksjoner ved 19 GeV/c, utført i boblekammer ved CERN, ble et hovedarbeidsområde for ham fra siste halvdel av 60-tallet fram til begynnelsen på 1980-tallet, da han var vitenskapelig leder for den norske delen av prosjektet. I tillegg deltok han i analyse av proton- og antiproton-reaksjoner i fotografisk emulsjon. Han var også gruppeleder for EPF-gruppen ved instituttet i perioden 1972–1976.

Senere på 1980-tallet var Tor Jacobsen aktivt med på å gjøre det mulig for norske grupper

av fysikere å bli med på et italiensk-russisk eksperiment med antiprotoner mot lette atomkjerner, utført ved Lav Energi Antiproton Ringen (LEAR) ved CERN.

Under siste halvdel av 1990-tallet var Jacobsen prosjektleder for den norske deltakelsen i 450 GeV/c pp-eksperimentet WA102 ved CERN.

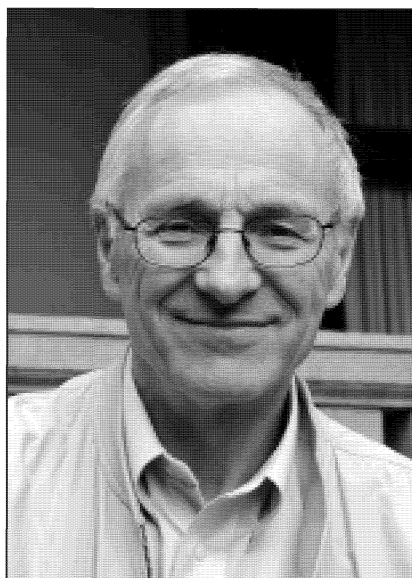
Tor Jacobsen er samfunnsengasjert og er stadig å finne i avisene med sine synspunkter. Han markerer seg ved sin initiativrike, søkende og humoristiske holdning enten det er fag eller livet generelt.

Vi gratulerer Tor og ønsker ham fortsatt mange lykkelige år med god fysikk og stor sjakkglede.

S. O. Sørensen og K. M. Danielsen

∞

Jan Trulsen 70 år



Professor Jan Karsten Trulsen fylte 70 år den 26. november 2010 og ble pensjonist fra 1. desember. I vel 40 år har han virket som universitetslærer, ved Universitetet i Tromsø fra 1970 til 1990, og fra 1991 har han arbeidet ved Institutt for teoretisk astrofysikk ved Universitetet i Oslo.

Etter sin universitetsutdannelse i Norge fikk Jan Trulsen sin PhD ved University of California, San Diego, i 1970. Allerede her ble hans interesse for numeriske simuleringer vakt. Hans studier av dannelsen av planetsystem fra støvskyer som komprimeres under påvirkning av gravitasjon og strålingstrykk fra en sentral stjerne, var "state of the art" den gangen.

Høsten 1970 kom Jan Trulsen til det ny-

startede Universitetet i Tromsø der hans faglige virksomhet ble vidtrekkende. Ved Nordlysobservatoriet medvirket han til oppbyggingen av en dobbelt-plasmamaskin som i en årrekke ble benyttet til grunnleggende undersøkelser av plasmabølger. Dette eksperimentet ble integrert i undervisningen, og det trakk også en rekke utenlandske forskere til Tromsø. Som den første i Norge utarbeidet Jan Trulsen en såkalt "particle in cell" simuleringskode for studier av lavfrekvente plasmafluktuasjoner. I tillegg til dette arbeidet han med teoretiske studier av plasmafenomener og bidro bl.a. til utviklingen av analyseverktøy til bruk på EISCAT-radaren. Han tok initiativ til bygging av den toroidale magnetiske plasmamaskinen "Blaumann", en maskin som var fullt på høyde med de beste maskinene i verden av denne type. Ut over de plasmafysiske anvendelser ga dette eksperimentet studentene en innføring i avansert vakuumteknologi. Han studerte også havbølger og forhold i sjøen. Ved siden av sin forskningsinnsats, deltok Jan Trulsen aktivt i planlegging og gjennomføring av undervisningen, og sivilingeniørutdannelsen i Tromsø står i stor gjeld til ham.

Etter ansettelsen ved Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo, i august 1991, ble Jan Trulsens forskningsaktivitet orientert mot romplasmafenomen, hvor hans arbeid også omfattet analyse av data fra raketter og satellitter. Hans seneste innsats har vært rettet mot en kombinert teoretisk og numerisk analyse av plasmaturbulens, en forskningsinnsats som vil ha stor betydning for tolkningen av satellittdata fra vårt nære verdensrom. Disse studiene omfatter forhold omkring turbulent transport og turbulent, eller anomal, termisk ledningsevne på tvers av magnetfeltlinjer. I de senere årene har han også arbeidet med turbulens i marinbiologisk sammenheng.

Jan Trulsen har samarbeidet tett med kollegaer på Fysisk institutt i Oslo. Dette samarbeidet, på tvers av instituttgrenser, har vært svært vellykket. Han har publisert en lang rekke artikler i internasjonale fagtidsskrifter og har vært bidragsyter ved et stort antall internasjonale konferanser.

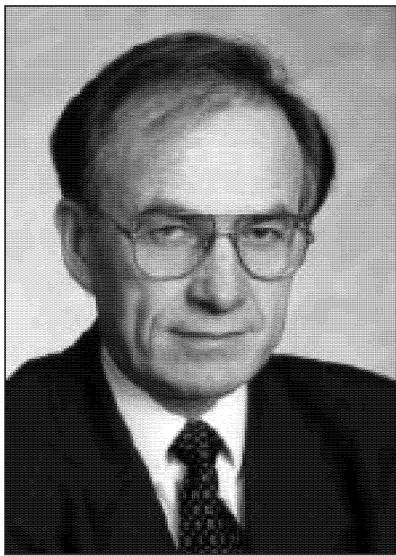
Sommeren 1997 ble Jan Trulsen valgt, og senere gjenvalgt, til dekan for det Matematisk-naturvitenskapelige fakultetet ved Universitetet i Oslo. Han var dekan i alt seks år og gjorde en stor innsats for fakultetet i en vanskelig omstillingsperiode. Også etter sin tid som dekan har Jan Trulsen ytet en solid forskningsinnsats og har veiledet mange master- og PhD-studenter.

Kolleger og venner gratulerer Jan på det hjerteligste og ønsker ham alt godt videre!

Hans Pécseli og Egil Leer

∞

Beynon-medaljen til Asgeir Brekke



EISCAT Council tildelte i 2010 Beynon-medaljen til professor Asgeir Brekke ved Universitetet i Tromsø. Siden den ble innstiftet i 2002 er medaljen delt ut årlig til personer som har gjort betydningsfull innsats innen atmosfæreforskning generelt, og for EISCAT spesielt. I begrunnelsen for tildelingen legges det spesielt vekt på hans pionerinnsats i undersøkelser av den øvre polare atmosfære og ionosfære med Incoherent Scatter Radar-målinger, og hans innsats over lang tid for å fremme EISCAT-forskning verden over.

Asgeir Brekke deltok i organiseringen av EISCAT fra begynnelsen av 1970-årene. Han har vært medlem av EISCAT Scientific Advisory Committee (SAC) og er medlem av EISCAT Council, hvor han også i flere perioder har vært leder. Han bidro i vesentlig grad til utvidelsen av EISCAT med Japan, Kina og Russland som nye medlemmer. I sin forskning har Brekke jobbet blant annet med nordlys, joulsk oppvarming og nøytrale vinder i den polare atmosfæren. *Vi gratulerer!*

*Romfysikk-gruppa,
Institutt for fysikk og teknologi,
Universitetet i Tromsø.*

∞

In Memoriam

Jan Frøyland (1940–2011)



Den 24. januar fekk vi den triste meldinga at professor emeritus Jan Frøyland ved Universitetet i Oslo, hadde gått bort dagen før, etter meir enn 40 års sjukdom. Han vart 71 år gamal. Men det er på ingen måte som ein mann med helseplager vi minnest han, og vil minnast han. Tvert imot hugsar vi Jan som ein psykisk sterk person som ikkje klaga over eiga helse, men som var fylt av undring, pågangsmot og originalitet. Vi såg sjølvstekt korleis helsa sette klåre grenser for verketrongen hans, serleg dei siste åra før han måtte gjeva seg i stillinga som professor på Blindern, i 2004. Då hadde han vore innom dei fleste av dei sentrale områda i teoretisk fysikk: elektromagnetisk, sterk, veik og gravitasjonell vekselverknad.

Jan Frøyland vart fødd 15. januar 1940. I oppveksten budde han fleire plassar i Farsund-området. Han tok artium som privatist i 1958, og vart cand.real. i 1964 med Erik Eriksen som hovudfagsrettileiar. Med hovudfagsoppgåve om Peierls kvantiseringsmetode vende han seg naturleg mot elementærpartikkelteori.

Jan starta den vitenskaplege karrieren sin som vitenskapleg assistent i 1963, og var etter dette tilsett i ymse mellombels stillingar som amanuensisvikar, universitetsstipendiat og etter kvart forskar, finansiert av Norges Almenvitenskapelige Forskningsråd (NAVF), med arbeidsplass ved Fysisk institutt i Oslo. Han var tilsett i NAVF fram til 1. mars 1991, då han vart førsteamanuensis, og han fekk opprykk

til professor den 1. januar 1993.

Som partikkelfysikar hadde Jan Frøyland forskningsopphald ved MIT (1966–67) og ved CERN (1970–72). Hovudinteressa hans i denne tida var fotoproduksjon av pion, og han viste (delvis saman med andre) at reggeteori med konspirerande polar og kutt kunne forklare dei eksperimentelle data.

Saman med Jørgen Løvseth laga han ein studie i nøytrinofysikk, om korleis hypotesen om partialkonserverte aksialstraumar påverkar høgenergetisk nøytrino-verknadstverrsnitt.

Jan skreiv fleire artiklar om kollisjonar der nukleon og pion var involverte. I 1972 disputerte han for graden Dr.philos. ved Universitetet i Oslo, på ei avhandling med tittelen: *"Studies in High Energy Phenomenology of Two-Body Processes."* Avhandlinga var basert på artiklar der han var eineforfattar, samt på arbeid han gjorde i lag med G.V. Dass, D. Gordon, og G.A. Winbow.

Etter kvart vart Jan, som andre partikkelfysikarar, sterkt interessert i justérteoriar. Og det var truleg dei ikkje-lineære eigenskapane til gravitasjonsteori og Yang-Mills justérteori, som han studerte, som førde til at han vart interessert i *kaos-teori*. Ikkje-lineære fenomen i naturen vart frå no av (ca. 1982) hovudinteressa hans. Jan vart ein pioner i Norge på dette området, og i 1992 skreiv han boka *"Introduction to Chaos and Coherence"*, som framleis er i handelen og i bruk ved mange utdanningsinstitusjonar. Jan heldt mange foredrag om ikkje-lineære fenomen og kaos med spissformuleringar som: "Kan sommerfugler påvirke været?"

Jan likte å leike seg med fysikk og matematikk. Verdsmeisteren i padling, Einar Rasmussen, var hovudfagstudent på teorigruppa, og Jan hjalp han med å utvikla ei god padleåre.

Jan syntest at det var moro å generere musikk med PC-en sin. På 1980-talet hadde han ei forelesing om dette i Store fysiske auditorium. Seinare var han invitert i Komponistforeningen. Rolf Wallin, som var festivalkomponist under Trondheim Kammermusikkfestival i 2008, fortel at Jan hadde med seg ein algoritme som han meinte at ein kunne lage musikk med – og han hadde rett.

Jan var interessert i mange ting, ikkje berre innan naturvitskap, men òg i samfunnet elles. Han skreiv t.d. avisartiklar om alternativ medisin i lag med Kristoffer Gjøtterud og Martin Ystenes. Han kunne ha sterke meiningar om ymse tema. Alternativ medisin, New Age, jordstråling, sosiologi, LO og liknande, hadde han ingen ting til overs for.

Det var vondt å sjå korleis sjukdomen braut ned skjelettet til Jan. I 2004 måtte han seia opp stillinga si ved Universitetet. Men likevel: Ved hytta si i skjergarden ved Farsund heldt han fram med å lirke på store steinblokker med ein liten jekk til han fekk dei dit han ville. Han hadde tolmod og gav seg ikkje.

Jan Frøyland etterlet seg kone og tre døtrer med familiar. I desse dagar går tankane våre til dei. Vi er takknemlege for det Jan gjorde ved Fysisk institutt og lyser fred over minnet hans.

Hallstein Høgåsen og Jan Olav Eeg

∞

Nytt fra NFS

Fysikermøtet 2011

Vi har gleden av å invitere FFVs lesere til Fysikermøtet 2011. Møtet avholdes ved Universitetet i Oslo, 20-22. juni, med Fysisk institutt som vertskap. Hovedtemaet for møtet er beregninger i naturvitenskap og naturvitenskapelig utdanning. I tillegg vil det være parallellsesjoner for de ulike faggruppene, samt årsmøter for Norsk Fysisk Selskap og Norsk Fysikklærforening, og ulike prisutdelinger. Vi oppfordrer dere til å melde på foredrag til parallellsesjonene.

Registreringen er åpen fra og med 1. mars til og med 31. mai. Møtet har ei webside på <http://www.fys.uio.no/compphys/cp/events/nfs2011/>. Denne siden inneholder all vesentlig informasjon om hotellmuligheter, hvordan finne fram til Fysisk institutt, program osv. Møtet faller sammen med markeringa av 200-årsjubileet for Universitetet i Oslo.

Plenumsforedraga gjenspeiler de fleste fagfelt og er samtidig meint å vise eksempler på hvordan ny innsikt bare kan nås via simuleringer. Noen av foredraga tar også opp bruk og integrering av numeriske oppgaver i undervisning fra videregående skole til avanserte universitetskurs. Møtet starter mandag 20. juni kl 14. Plenumsforedragene er:

- David J. Dean (Department of Energy, Washington and Oak Ridge National Lab, USA): *Scientific and Technological Innovations via Computations.*

David jobber ved Obamas stab i Energidepartementet og er ansvarlig for strategisk planlegging av tungrekning i forskning og industriell innovasjon.

- Anders Malthe-Sørenssen (Fysisk institutt, UiO): *Computers in Science Education, a new way to teach Science*.

Anders har vært sentral i *Computers in Science Education*-prosjektet ved UiO. Dette prosjektet integrerer numeriske metoder og beregninger i de fleste realfagskurs ved matematikktunge studier.

- Conrad Wolfram (Wolfram Ltd. [Ikke bekreftet]): *Computational Science*.

Conrad er direktør for Wolfram Research i Europa, og er en drivende foredragsholder.

- Tom Luu (Lawrence Livermore National Laboratory, USA): *Nuclear Physics from Lattice QCD, petascale computing and beyond*.

Tom er en ung og meget lovende fysiker med hovedvekt av sin forskning på gitterkvantekromodynamikk rekninger.

- Trygve Helgaker (Center for Theoretical and Computational Chemistry, UiO): *Electronic Structure Theory: Yesterday, Today and Tomorrow*.

Trygve er en verdensledende kvantekjemiker og blei nylig tildelt et prestisjefylt ERC-seniorstipend. Han er en av Norges mest siterte forskere.

- Markus J. Buehler (Massachusetts Institute of Technology, USA): *Multiscale science of biological protein materials in extreme conditions and disease*.

Markus er en verdensledende forsker i multiskalaprosesser med anvendelser både mot materialer og biologiske systemer.

- Hans Kristian Eriksen (Institutt for teoretisk astrofysikk, UiO): *Computational Cosmology: Understanding the Origins of the Universe*.

Hans Kristian blei nylig tildelt et prestisjefylt ERC-stipend for yngre forskere.

- Andrew McCulloch (University of California San Diego, USA): *Multiscale modeling of biomedical systems*.

Andrew har jobba i ei årrekke med multiskalaprosesser avendt på biologiske og medisinske systemer.

Vel møtt!

Morten Hjorth-Jensen

Leder av arrangementskomiteen

∞

Helsebringende protoner

Jan Folkvard Evensen *

I 2008 ble det registrert 26 121 nye tilfeller av kreft i Norge, 14 000 tilfeller hos menn og 12 121 tilfeller hos kvinner. Den vanligste kreftform hos menn er prostatakreft (30 %), hos kvinner brystkreft (23 %). I 2020 er antall krefttilfeller estimert til 28 000. Den største delen av økningen skyldes at befolkningen blir eldre, men noe skyldes også en reell økt risiko for å få kreft. Livsstils-

faktorer som overvekt, lav fysisk aktivitet og røyking, bidrar i høy grad. Per 31. desember 2008 var det mer enn 190 000 personer i Norge som levde med en kreftdiagnose.⁽¹⁾

Behandling

Behandling av kreft er tradisjonelt tuftet på tre behandlingsformer: kirurgi, strålebehandling og cellegift, evt. kombinasjoner av disse. Ved behandling av kreft ønsker man å påføre det syke vev mest mulig

* Klinikk for kreft og kirurgi, Oslo universitetssykehus.

skade, det friske vev minst mulig skade. Dette kalles *det terapeutiske ratio*. Denne brøken kan optimaliseres ved å øke telleren, eller å redusere nevneren. Dette er ledestjernen i all klinisk (pasientrettet) kreftforskning. Nettopp dette ligger bak begrepet *målrettet behandling*. Med dette forstår vi anvendelse av medikamenter som blokkerer vekst og spredning av kreft ved å angripe spesifikke molekyler i kreftcellene som er involvert i svulstens vekst og progresjon.

En annen form for målrettet behandling er teknologibasert. I 1960–70-årene var det store gjennombrudd i cellegiftbehandling, og på et tidspunkt antok man at strålebehandling hadde utspilt sin rolle. På bakgrunn av kreftsykdommenes tendens til spredning ble alle lokale behandlingsprinsipper ansett for å være inadekvate. Forventningene til medisinsk kreftbehandling er imidlertid ikke helt innfridd. Selv om cellegiftbehandling har revolusjonert behandlingen av enkelte relativt sjeldne kreftsykdommer (lymfekreft, testikkelkreft), er det fremdeles begrenset hva en kan hente ved de hyppigst forekommende kreftsykdommer hva gjelder helbredelse, kanskje med unntak av brystkreft og mage-/tarm-kreft. Strålebehandlingen var imidlertid ikke "død". Ved hjelp av teknologiske fremskritt er den blitt mer og mer målrettet.⁽²⁾ Dette kalles "*konformal (tilpasset) terapi*" og er motstykket til målrettet terapi i medisinsk kreftbehandling. Strålebehandling med protoner er nettopp en slik form for *konformal terapi*.

Elementærpartikler

På 1960-tallet var det en mengde partikler man trodde var såkalte elementærpartikler. En elementærpartikkel ble opprinnelig definert som en partikkel som ikke kunne betraktes som en bunden tilstand av andre partikler. Senere viste det seg at noen av de partiklene man opprinnelig antok var elementærpartikler kunne henfalle (f.eks. frie nøytroner). Dette nødvendiggjorde en ny klassifisering. Partiklene ble så klassifisert som *hadroner* og *leptoner*. Hadroner er partikler sammensatt av kvarker og føler sterk kjernekraft. Leptonene har ingen indre struktur og føler ikke sterk kjernekraft. Hadronene er videre gruppert i *baryoner* og *mesoner*; baryoner er gruppert i *hyperoner* og *nukleoner*. Partikler som er aktuelle for strålebehandling er protoner og nøytroner (*nukleoner*), π -mesoner (*mesoner*) og elektroner (*leptoner*). I det følgende skal vi omtale egenskaper ved

protoner som gjør dem egnet for strålebehandling. Karbonioner (hadroner) er også egnet, men vil ikke bli omtalt nærmere her.

Protoner

På bakgrunn av at hydrogenkjernen er et proton, hadde man lenge en forestilling om at også andre atomer kunne inneholde hydrogenliknende partikler. Forestillingen var simpelthen basert på atomvekter som ofte var et tilnærmet multiplum av hydrogens. I 1911 oppdaget Rutherford atomkjernen. I 1919 viste han at hydrogenkjernen også var til stede i andre kjerner, et forhold som gjerne beskrives som protonets oppdagelse. Navnet proton er det greske ord for "først", *πρωτον*.

Protonet er et såkalt baryon (undergruppe av hadroner) og er sammensatt av 3 kvarker (uud) som holdes sammen av en såkalt fargekraft. En måte å betrakte et proton på er som to oppkvarker og en nedkvark i et kraftfelt av gluoner (limpartikler).

Protonets ladning og baryontall er +1. Hvilemassen/hvileenergien er 938,3 MeV. Protonet er en meget stabil partikkel med levetid på minst 10^{20} ganger universets alder. Teorien åpner likevel for en viss sannsynlighet for henfall ("decay").⁽³⁾ Med tanke på konservering av baryontall er det i så fall et problem at protonet er det letteste baryonet. Det er da så langt heller ingen eksperimentelle holdepunkter for protonhenfall.

Som følge av naturens iboende symmetri har protonet, som alle andre partikler, en antipartikkel, antiprotonet. Antiprotonet har ladning og baryontall -1.

Lineær energioverføring (LET)

Stråling er transport av energi, enten i form av elektromagnetiske bølger (fotoner) eller i form av uladete eller ladete partikler. Protonstråling er eksempel på sistnevnte. Strålingen utøver sin effekt ved å avgi energi til det bestrålte vev i form av ioniseringer. Partiklene mister gradvis sin energi ved gjentatte vekselvirkninger med vevets biomolekyler, hvorav det viktigste er DNA (deoksyribonukleinsyre). DNA består av 2 tråder holdt sammen av hydrogenbindinger mellom basepar.⁽⁴⁾ For at en celle skal drepes må det deponeres nok energi i cellens DNA til å lage ett eller flere dobbelte trådbrudd. Hvis 2 enkle trådbrudd oppstår tilstrekkelig nær hverandre (mindre enn 3–4 basepar), kan resultatet bli et dobbelt trådbrudd med celleinaktiver-

ing som resultat. Strålingen kan enten deponere energi direkte i DNA, eller indirekte ved å danne frie radikaler i vann i nanometers (nm) avstand fra DNA, dvs. innen radikalenes diffusjonsavstand.

LET (Linear Energy Transfer) er et mål for hvor tett energien avgis langs et partikkelspor, dvs. hvor mye energi som avgis per lengdeenhet. Dette omtales ofte som "strålekvaliteten". Den angis gjerne i $\text{keV}/\mu\text{m}$. Stråling betegnes gjerne som "low-LET" og "high-LET". Eksempel på "low-LET" er konvensjonell strålebehandling som gis med 4–15 MeV fotoner ($\text{LET} = 0,3 \text{ keV}/\mu\text{m}$). Alfapartikler har en LET på ca. $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$ og er eksempel på "high-LET"-stråling. For protoner vil LET variere langs partikkelsporet fra $0,5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ til et teoretisk maksimum på $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$ over noen få μm like før partikkelen stopper (se nedenfor).

Evnen til inaktivering av biologisk materiale er nært knyttet til LET. Optimal LET med tanke på induksjon av dobbelt tråddrudd i DNA, er $100 \text{ keV}/\mu\text{m}$.

Relativ biologisk effekt (RBE)

Den biologiske effekten av stråling er avhengig av strålekvaliteten (LET). Den fysiske dosen måles som energi absorbert per masseenhed og angis i gray (Gy): $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. Én "fysisk" Gy er imidlertid ikke nødvendigvis lik én "biologisk" Gy. For å kunne sammenlikne strålingens biologiske virkning har man derfor innført begrepet *relativ biologisk effekt* (RBE). Denne er definert som: *RBE = dose av referansestråling/dose av test-stråling som gir samme biologiske effekt*. Som referansestråling brukes gjerne Co 60 gammastråling som per definisjon har $\text{RBE} = 1,0$. Protoner har $\text{RBE} = 1,1$. Det betyr at en gitt fysisk dose deponert av protoner har en noe større effekt enn samme fysiske dose deponert av fotoner. Man skal ellers være klar over at RBE er avhengig av hvilken biologisk effekt man studerer.

Vekselvirkning med materie (Bragg peak)

Elektromagnetiske bølger og ladete partikler vekselvirker med materie ved å overføre sin energi til elektroner, dog er selve mekanismen for vekselvirkning forskjellig. Mens fotoner vekselvirker ved fotoelektrisk effekt, comptonspredning og pardannelse, så vil protoner (og andre ladete partikler)

vekselvirke med elektronene via sitt coulombfelt. Resultatet er imidlertid det samme, nemlig dannelse av elektroner med energi nok til å ionisere nye atomer/molekyler (δ -partikler). Selv om protoner kan ionisere DNA direkte, vil det som oftest være de sekundære elektronene som gjør det. I likhet med fotoner er derfor protoner sekundært ioniserende. Det er derfor ikke overraskende at den relative biologiske effekt (RBE) for fotoner og modulerte protoner (se nedenfor) er praktisk talt den samme (1,0 og 1,1–1,2). Dog øker ionisasjonstettheten ettersom protonenes hastighet reduseres, med et potensiale for større biologisk effekt i selve Bragg-peaken (se nedenfor). Protonenes største fortrinn ligger imidlertid først og fremst i den overlegne dosefordeling i vev sammenliknet med fotoner og elektroner.

Det skal nevnes at protoner i tillegg til å vekselvirke med elektroner, også vekselvirker med atomkjerne (multippel coulombspredning). Det tapes relativt lite energi ved denne vekselvirkningen, men den endrer protonenes bevegelsesretning og bidrar til spredning. Likevel er den laterale (sideveis) spredningen av protoner liten, hvilket gir en gunstig penumbra (halvskygge) som dog forringes i dybden. Med penumbra forstås det området i kanten av strålebuntens hvor dosen avtar sterkt som funksjon av avstand fra strålebuntens akse. Penumbra oppgis ofte som avstanden mellom 80 % og 20 % dose ($P_{80/20}$), som typisk er 7–9 mm for 4–15 MeV fotoner. For en 150 MeV protonstråle er $P_{90/10}$ 1 og 7 mm på hhv. 4 og 15 cm dybde i vann. For protoner vil penumbraen variere fra maskin til maskin, avhengig av hvordan strålen genereres/moduleres (se nedenfor).

For energioverføring fra ladete partikler til materiens molekyler, gjelder følgende: 1) vekselvirkningen er større for langsomme partikler enn for hurtige (lengre tid til å vekselvirke), 2) energioverføringen øker med partiklens ladning og 3) energioverføringen er uavhengig av partiklens masse. Kvantitativt kan dette uttrykkes i den såkalte Bethe-Bloch-likningen:

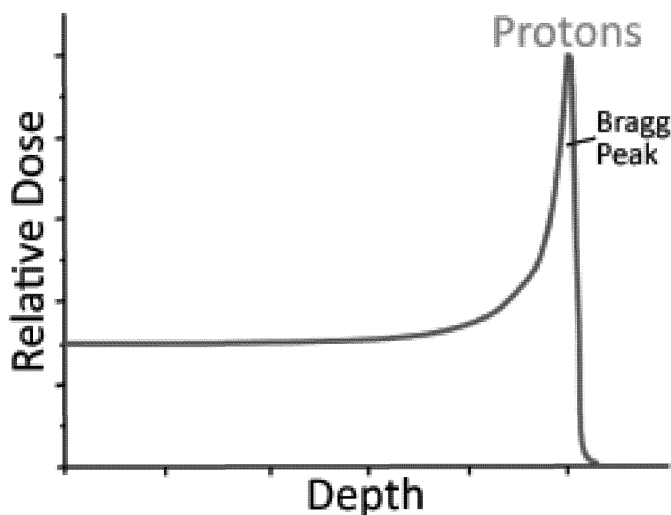
$$-(dE/dx) = [4\pi e^2 (ze)^2 / mv^2] nZ [\ln(2mv^2/I) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2]$$

hvor $-(dE/dx)$ er partikkelens differensielle energitap per lengdeenhet, ze og v er dens ladning og hastighet, m er elektronets hvilemasse, n er antall atomer per cm^3 , Z er effektivt atomnummer for det absorberende materiale, I er midlere ionisasjonspotensial og $\beta = v/c$. Vi ser at likningen er i ov-

erenstemmelse med punktene 1) til 3), omvendt proporsjonal med hastighetens kvadrat, proporsjonal med ladningens kvadrat og uavhengig av protonmassen. Dette resulterer i den karakteristiske *Bragg peak* (etter W.H. Bragg (1862–1942) som oppdaget fenomenet i 1904): Energiavsetningen er relativt konstant inntil den øker kraftig når partikkelen bremses ned og til slutt stopper opp. Formelen skulle tilsi uendelig energiavsetning når $v \rightarrow 0$. Når dette ikke skjer er det fordi protonet rekombinerer med et elektron og danner et nøytralt hydrogenatom, og på den måten blir ute av stand til å vekselvirke via sitt coulombfelt. Dette kan beskrives matematisk ved å introdusere en hastighetsavhengig partikkelladning:

$$z^* = z[1 - \exp(-125\beta z^{-2/3})]$$

hvor z^* erstatter z i Bethe-Bloch-likningen. Ved lav hastighet ($\beta = v/c \rightarrow 0$) vil z^* , og dermed dE/dx , gå mot 0. Dette gir opphav til vendepunktet og det bratte fallet i Bragg-peaken (se figur 1). Protonet blir til hydrogen, for så å inngå i vann.



Figur 1. Dybde-doseforløp av protoner i vann. Kurven er karakterisert ved en konstant inngangsdose (horisontal linje) som bygger seg opp til et maksimum for så å avta raskt til null (Bragg peak).

Bragg-peaken for et proton er relativt smal, av størrelsesorden 1 mm., men bredden økes ved at det store antall protoner i en stråle fremviser en statistisk fordeling av rekkevidde, men ikke nok til å kunne inngå i kreftbehandling (se nedenfor).

En 160 MeV protonstråle har en midlere rekkevidde på 17 cm i vann. Ved å redusere energien blir Bragg-peaken skarpere, og forholdet mellom peak- og inngangsdose blir høyere, og dermed gunstigere.

Protonbestrålingens historie

Forutsetningen for å kunne anvende protoner til behandling er at protonene har tilstrekkelig energi. Utviklingen har derfor gått hånd i hånd med utviklingen av akseleratorer. Etter å ha lest en artikkel av nordmannen *Rolf Widerøe* (1902–1996) om høyenergiakseleratorer, unnfanget *Ernest O. Lawrence* (1902–1958) ideen om syklotronen i 1929. Widerøe hadde nedfelt prinsippet for betatronen allerede i 1923. I 1930 konstruerte Lawrence sammen med sine studenter, en syklotron som akselererte protoner til en energi på 80 keV. Den første som foreslo bruk av protoner til kreftbehandling var *Robert R. Wilson* (1914–2000). Wilson var student hos Lawrence og J. Robert Oppenheimer (1904–1967) ved Berkeley. Etter å ha tjenestegjort ved Manhattan-prosjektet skrev han i 1946 en artikkel med tittelen "*Radiological Use of Fast Protons*". Åtte år senere, i 1954, ble den første pasient behandlet på Berkeley.

I Europa ble protonbestråling først tatt i bruk i 1957 i Uppsala, hvor de hadde en 185 MeV synkrocyklotron. I Uppsala er det nå et nytt protonsentre under oppføring, *Skandionklinikken*, som etter planen vil stå ferdig i 2014. I dag er det ca. 20 protonsentre i verden og ca. 10 er under oppføring. Globalt er mer enn 40 000 pasienter behandlet med protoner til nå.

Generering av protoner

For at protoner skal kunne brukes til behandling må de akselereres til passende energier. Når trykket i et lukket rom reduseres tilstrekkelig, øker en ladet partikkels midlere frie veilengde betraktelig. Dens bevegelse kan kontrolleres ved å anvende et elektrisk ($\mathbf{E}$) og et magnetisk felt ($\mathbf{B}$). Kraftloven som gjelder er: $\mathbf{F} = Q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ (Lorentz kraftformel). Det elektriske feltet øker partikkelens energi, og det magnetiske feltet endrer dens bevegelsesretning. Formelen ligger til grunn for all akseleratorteknologi. Det skal dog nevnes at i en betatron tilføres elektronene energi ved magnetisk induksjon.

Protoner for kreftbehandling kan genereres i syklotroner og synkrotroner med sine respektive fordeler og ulemper. Innledningsvis var de fleste protonbestrålingsanlegg knyttet til laboratorier for høyenergi- og partikkelfysikk. Den senere tid har imidlertid akseleratorer mer egnet for klinisk bruk, blitt kommersielt tilgjengelige.

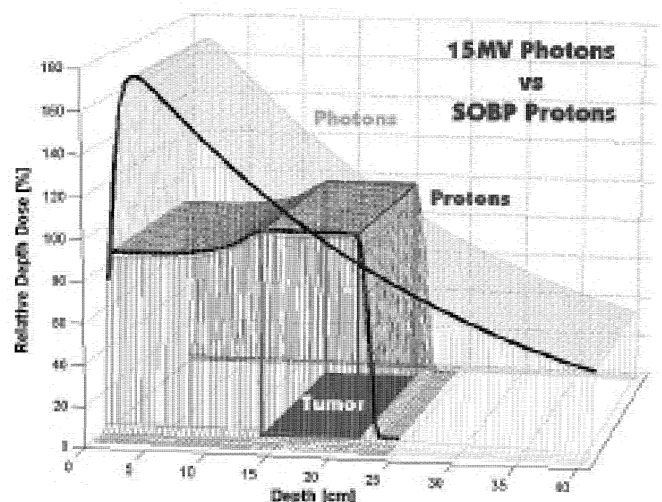
Syklotronen består av en evakuert rund boks delt på midten. Mellom de to halvdelar (D-er med "ryggen" mot hverandre) er der en spalte der protonene akselereres i et alternerende potensial mellom D-ene. Protonenes bevegelse styres av et konstant magnetfelt over begge D-ene. Protonene injiseres sentralt og beveger seg i spiraler ut mot periferien hvor de tas ut. Magneter som opererer ved romtemperatur kan generere feltstyrker på opp til 3 tesla. De er svært tunge. Ved supraleidning kan vekten reduseres, og feltstyrke og brukervennlighet økes. De fleste leverandører kan levere magneter både med og uten supraleidning. For akselerasjon av karbonatomer kreves en supraleidende syklotron eller en synkrotron.

Synkrotronen er i likhet med syklotronen en syklisk partikkelakselerator. Den består av en evakuert torus ("smultring"), eventuelt med innskutte rette seksjoner. Protonene tilføres energi fra en resonanskavitet (RF-felt). Dipolmagneter holder protonstrålen i en tilnærmet sirkulær bane. Etter hvert som protonenes energi/hastighet øker må magnetfeltene øke synkront for å holde protonene i konstant bane, derav navnet synkrotron. Dette i motsetning til syklotronen hvor magnetfeltet er konstant.

Når protonene har nådd ønsket energi (70–250 MeV) tas de ut og ledes til de respektive behandlingsrom, optimalt til et isosentrisk montert "gantry".⁽²⁾ Forsidebildet viser "gantry" for protonbehandling med pasient på behandlingsbord. Bordet har mange frihetsgrader og kan roteres og forskyves i lengderetning. Dette muliggjør bestråling fra alle vinkler. At gantry er isosentrisk montert vil si at sentralstrålen går gjennom et fast punkt i rommet, isosenter. Svulsten som ønskes bestrålt ligger vanligvis i isosenter. Protongantries er store (typisk diameter 10 m) og tunge, og krever mye plass. Alternativt kan man redusere frihetsgraden og ta ut en fast rettet stråle. Denne kan brukes i de enkleste tilfeller, som ved ondartede svulster i øyet. Én akselerator kan betjene opp til flere behandlingsrom.

Protonstrålen som ledes i "beamlines" til behandlingsrommene er fokusert og for tynn til å kunne anvendes til behandling direkte; den må spres over et større areal. Videre må Bragg-peaken økes i bredde slik at den får større utstrekning i strålenes retning. Det er prinsipielt to måter å gjøre dette på. Den enkleste og eldste måten er å plassere et spredende materiale (f.eks. 0,25 cm bly for 160 MeV

protoner) i en avstand på 1 m fra målvolumet (*passiv spredning*). Da oppnår man jevn dose ($\pm 2,5\%$) over et areal på ca. 2 cm i diameter. Braggpeakens dybde vil være avhengig av protonenes energi. Høydoseområdet kan "smøres utover" (*Spread Out Bragg Peak (SOBP)*) ved å addere dosene fra etterfølgende protonstråler med stadig mindre intensitet og kortere rekkevidde. Dette kan gjøres med en såkalt "chopper" (en slags propell), eller ved å plassere materiale av forskjellig tykkelse i strålegangen. Typisk for en modulert protonstråle er: 1) forholdsvis lav dose foran målvolumet, 2) jevn dose over målvolumet, 3) gunstig penumbra og 4) ingen dose bak målvolumet. Typiske doseforløp er gitt i figur 2. Endelig formes feltet til målvolumets ytre kontur vha. en individuelt tilpasset apertur/kollimator av metall og en vevsekvivalent kompensator for tilpassing i dybde.



Figur 2. Dybdedoseforløp for 15 MeV fotoner sammenliknet med SOBP (*Spread Out Bragg Peak*)-protoner. Foran svulsten (tumor) er der en moderat dose for protoner, bak svulsten er der tilnærmet ingen dose. Fotoner gir høyere dose både foran og bak svulsten.

En adskillig mer avansert måte å gjøre dette på er å styre den tynne protonstrålen med et magnetfelt, som i et katodestrålerør. Protonets ladning muliggjør dette. Ved hjelp av magnetfeltet kan protonstrålen "males" over det ønskede volum (*scanning*). Ved samtidig å variere energi og strøm i protonstrålen har man full kontroll over dosen i hvert punkt av målvolumet. Dette eliminerer behovet for pasientspesifikt utstyr. Protoninteraksjon med slike innretninger gir sekundære nøytroner, og enhver reduksjon av disse er gunstig. På den måten går heller ingen protoner til spille.

Andre akselerasjonsprinsipper er under utredning. Nevnes kan laserakselererte protoner⁽⁵⁾ og "dielectric wall accelerators".⁽⁶⁾ Prototyper er laget, og Monte Carlo-beregninger viser at IMPT (*Intensity Modulated Proton Therapy*) med laserakselererte protoner gir overlegen dosedekning til målvolument og reduserte doser til kritiske organer, samt redusert integraldose (dose til hele kroppen), i forhold til foton-IMRT (*Intensity Modulated Radio Therapy*).^(2, 5)

Som en kuriositet skal det nevnes at det ved CERN, i Genève, er gjort bestrålingsforsøk med *antiprotoner*. Antiprotoner har tilnærmet samme fysiske og biologiske egenskaper før Bragg-peaken som protoner. Når antiprotoner kommer til hvile i Bragg-peaken, vil de annihilere med protoner og frigjøre nesten 2 GeV per antiproton-proton annihilasjon. Det meste av denne energien transporteres bort som energirike π -mesoner, men det deponeres 20–30 MeV per antiproton lokalt i Bragg-peaken. I tillegg til økt fysisk dose får man også en økt biologisk effekt ved at enkelte av sekundærpartiklene fra annihilasjonene fremviser "high-LET"-egenskaper.⁽⁷⁾ Ulempen er imidlertid at sekundærpartiklene forringer i betydelig grad den fysiske dosefordelingen med bl.a. økt penumbra.

Anvendelsesområde

Fordelen med protonbestråling er den uovertrufne dosefordelingen som særlig kommer til anvendelse ved svulster som ligger i nærheten av kritiske strukturer i kroppen. I hodet er det mange kritiske strukturer. Protonbestråling kan derfor med fordel anvendes ved svulster utgående fra hørenerven (akustikusnevrinom), hypofysesvulster, medfødt kortslutning mellom vener og arterier (arteriovenøse malformasjoner), hjernesvulster hos barn, isolerte spredningssvulster til hjernen (hjernermetastaser), godartede svulster i hjernehinner (meningiomer) og svulster i øye og øyehule. Protoner anvendes også til behandling av øre-nese-hals-kreft og prostatakreft, samt til enkelte andre krefttyper.

Kostnader og drift

Et protonanlegg (bygningssmasse og infrastruktur) er anslått til å koste ca. 750 mill. kr. Årlige driftsutgifter er satt til 197 mill. kr, og pris per behandling 5 900 kr. Tilsvarende beløp for et fotonanlegg er hhv. 185 mill. kr, 76 mill. kr og 1850 kr.

Prisene må sees i forhold til anleggets kompleksitet. Men det er også en annen side her, nemlig driftsstabilitet. Denne vil være dårligere for et protonanlegg enn for et fotonanlegg, idet service og eventuelle reparasjoner tar lengre tid. Dessuten når en lineærakselerator havarerer vil man som regel kunne flytte pasientene over til en annen maskin innen samme institusjon. Det er ikke mulig ved protonterapi, idet protonkilden er felles for alle behandlingseenhetene. De fleste protonsentre er dessuten bare utstyrt med ett isosentrisk gantry.

Protonterapi i Norge?

Det er laget to utredninger om protonterapi i Norge; én i regi av Nasjonalt kunnskapssenter for helsetjenesten⁽⁸⁾ og én i regi av Helsedirektoratet.⁽⁹⁾ Den første konkluderer med at protonbehandling tillater høyere doser til kreftsvulstene med mindre strålebelastning av omliggende normalt vev, men etterlyser randomiserte kliniske studier. Den andre konkluderer med at vi i Norge snarest mulig bør starte forpliktende samarbeid om pasientbehandling med Skandionklinikken i Uppsala, og at vi planlegger egen kompetanseutvikling knyttet til protonterapi. Ved Oslo universitetssykehus går man inn for kompetanseutvikling ved bl.a. anskaffelse av doseplanleggingsutstyr for protonterapi. Ledelsen har imidlertid gitt signaler om at et eventuelt protonanlegg ikke vil bli aktuelt før tidligst i 2020. Man må regne med en 5-års planleggingsperiode. Kanskje er det verdt å vente på ny teknologi?

Figurene er velvilligst utlånt av Bill Hansen, Director of Global Marketing, IBA Particle therapy.

Referanser

1. Internett: *Kreftregisteret.no*
2. J. F. Evensen: *Fysikk i diagnostikk og behandling av kreft*. Fra Fysikkens Verden, **68**, 89–94 (2006)
3. S. Weinberg: *The Decay of the Proton*. Scientific American, **244**, 52–63 (June 1981)
4. T. Henriksen: *Molekylær biofysikk*. Fra Fysikkens Verden, **30**, 1–10 (1968)
5. Internett: <http://www.springerlink.com/content/j77812k7t2n4037n/fulltext.pdf>
6. Internett: <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/353844.pdf>
7. Internett: <http://cerncourier.com/cws/article/cern/29763>

8. *Protonterapi* – Rapport fra Kunnskapssenteret Nr 11-2006, Medisinsk metodeutvikling.

9. *Protonterapi som behandlingsstilbud til norske pasienter*. Rapport fra arbeidsgruppe nedsatt av Helsedirektoratet

∞

Atmosfærens drivhuseffekt – enkel modell

Ingolf Kanestrøm og Thormod Henriksen *

I denne artikkelen skal vi vise en enkel modell for atmosfærens drivhuseffekt basert på at vi betrakter både sola og jorda som "svarte legemer" slik at vi kan benytte de fysiske lovene som gjelder for disse. Vi skal videre forklare hvorfor noen gasser er drivhusgasser, mens andre gasser i atmosfæren ikke har noen drivhuseffekt. Men først skal vi repetere noen viktige begreper og fysiske lover som vi vil støtte på i denne artikkelen.

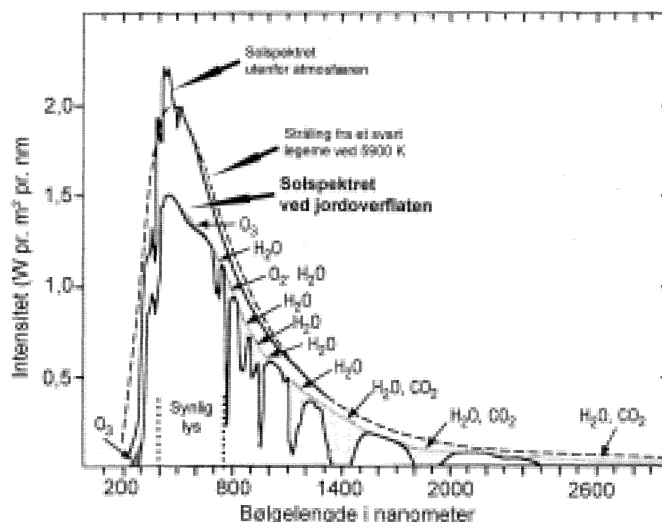
Miljøfysikkens svarte legemer

Strålingen fra sola og jorda ligner på strålingen fra svarte legemer med temperaturer på henholdsvis 5900 K og 255 K (grader kelvin). Dette er vist i figur 1 for solspektret.

Et svart legeme absorberer all stråling som treffer det. Et lite hull i et kullsvart hulrom kan representere et svart legeme.

Svarte legemer sender ut stråling som er bestemt av legemets temperatur. Det er tre fysiske lover som karakteriserer denne strålingen: Plancks lov, Stefan-Boltzmanns lov og Wiens forskyvningslov.

Plancks lov angir spektret til den utsendte strålingsintensiteten som funksjon av bølgelengden. I figur 1 er dette vist for sola. Solspektret utenfor atmosfæren er meget likt det som er gitt ved Plancks lov (stiplet i figuren). I denne figuren er bølgelengdeaksen lineær, mens den i figurene 4 og 5 er logaritmisk fordi vi ønsker å ha begge spektrene presentert sammen.



Figur 1. Solspektret slik det ser ut ved atmosfærens ytterkant og slik det ser ut ved jordoverflata. Det er sammenlignet med strålingen fra et svart legeme med temperatur 5900 K. I spektret ved jordoverflata er det en del "søkk" som skyldes at gasser i atmosfæren (stort sett vanndamp) absorberer stråling, spesielt i det infrarøde området. Den synlige delen av spektret er området fra 400 til 750 nm.

Stefan-Boltzmanns lov angir energimengden for strålingen som sendes ut fra et svart legeme per sekund, $E = \sigma T^4$, der $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ er Stefan-Boltzmanns konstant.

Wiens forskyvningslov angir hvordan bølgelengden (λ) for størst intensitet avhenger av temperaturen. Den er gitt ved formelen: $\lambda T = 2,88 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$.

Wiens forskyvningslov kan enkelt illustreres dersom vi har en elektrisk komfyr med støpejernsplater. Vi kan slå på en plate og holde hånden over plata.

* Universitetet i Oslo

Vi vil ikke se noen forandring på plata til å begynne med, men etter hvert vil vi merke at plata sender ut varmemstråling, eller det vi kaller infrarød stråling. Lar vi plata stå på noe lenger, vil plata blir rødglødende. Wiens forskyvningslov sier da at bølgelengden blir kortere, og strålingen har nå nådd bølgelengdeområdet for synlig lys.

Gartnerens drivhus

Vi kan beskrive drivhuseffekten ved å sammenligne atmosfæren med et drivhus uten ekstra varme. De fleste har sikkert vært inne i et drivhus eller et moderne gatetorg med glasstak, og kjent at det er varmere der inne enn ute. Det er glasstaket som utgjør forskjellen.

Glasstaket i drivhuset vil slippe solstrålingen gjennom, men samtidig absorbere varmemstrålingen fra bakken. Uten glasstak ville denne strålingen unnsnippe, og lufttemperaturen inne ville bli lavere.

Hvis denne analogien skal være fruktbar, må atmosfæren ha optiske egenskaper som ligner på dem drivhusets glasstak har. Det betyr at atmosfæren må slippe gjennom solstrålingen, men samtidig fange opp strålingen fra jorda. Basert på denne enkle modellen kan vi beskrive drivhuseffekten på følgende måte.

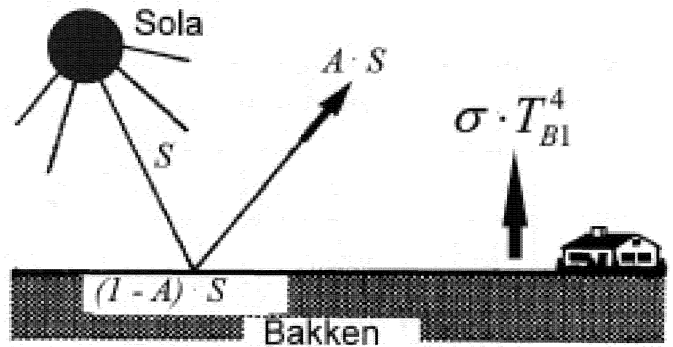
Illustrasjon av drivhusmodellen

Modellen er basert på figurene 2 og 3 og de kjente lovene for stråling fra svarte legemer. Figur 2 beskriver forholdene uten atmosfære, og i figur 3 har vi lagt til en atmosfære som ligner et glasstak som fanger opp en del av varmemstrålingen fra jorda.

Jord uten atmosfære

Først antar vi at jorda ikke har noen atmosfære, slik en ser det i figur 2.

Jorda blir truffet at solstråling med en intensitet gitt ved solarkonstanten, $S = 1367 \text{ Wm}^{-2}$. (Solarkonstanten angir innstrålt energi per sekund og m^2 normalt på stråleretningen ved atmosfærens yttergrense ved jordas midlere avstand fra sola). Målinger viser at solarkonstanten varierer gjennom en solfleksyklus fra 1365,8 til 1367,9 Wm^{-2} , med de største verdier når solflekaktiviteten er størst. A er jordas *albedo*, som er den delen av solstrålingen som reflekteres. Jorda reflekterer ca. 30 % av den innkommende solstrålingen, dvs. $A = 0,3$. Vi kjenner ikke albedoen for jordoverflata alene og bruker



Figur 2. En enkel fremstilling av strålingsbalansen hvis det ikke var noen atmosfære rundt jorda. S står for solarkonstanten og A angir jordas albedo, T_{B1} er bakktemperaturen uten atmosfære, og σ er Stefan-Boltzmanns konstant.

derfor verdien 0,3 både for jordoverflata og for jorda med atmosfære. Videre antar vi at jorda stråler som et svart legeme slik at varmemstrålingen fra jorda er gitt ved Stefan-Boltzmanns lov, og antar at vi har energibalanse ved jordas overflate. Da kan vi sette opp følgende ligning:

$$\frac{(1 - A)}{4} \cdot S = \sigma \cdot T_{B1}^4$$

Faktoren 4 i nevneren har en enkel forklaring. Den absorberte solenergien er proporsjonal med jordas tverrsnitt, men på grunn av jordrotasjonen fordeles den absorberte energien over hele jordoverflata. I middel over døgnet er det derfor bare 1/4 av innstrålt energi som treffer en flateenhet ved bakken (vi sammenligner en kules tverrsnitt med overflaten).

Setter vi inn verdiene for S , A og σ , får vi:

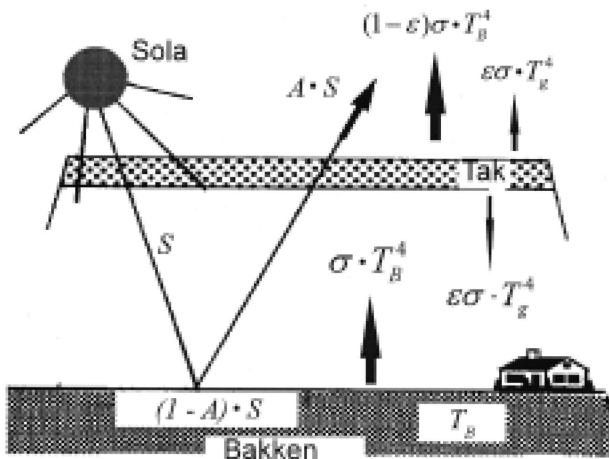
$$T_{B1} = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$$

Dette samsvarer med den midlere temperaturen på månen, noe en kunne forvente da jordas og månens midlere avstander fra sola er like store. Riktig nok er månens albedo noe forskjellig fra jordas albedo, men det betyr lite i denne sammenhengen.

Jord med atmosfære

Vi forutsetter nå at jorda er omgitt av en atmosfære, eller et "tak". Strålingsforholdene forandres da som vist i figur 3.

Vi antar at atmosfæren rundt jorda slipper gjennom stråling fra sola på samme måte som glasstaket i gartnerens drivhus. Atmosfæren absorberer derimot det meste (brøkdelen ε) av varmemstrålingen fra bakken. Videre antar vi at atmosfæren selv sender ut varmemstråling både ned mot bakken og ut i verdensrommet.



Figur 3. Energibalansen for jorda med en atmosfære som er komprimert og ligner et drivhustak. Drivhustaket har en temperatur T_g , og bakketemperatur er nå T_B mens ϵ er den brøkdelen av varmestrålingen fra bakken som absorberes av drivhustaket. Det er denne størrelsen som forandres når mengden av drivhusgasser i atmosfæren øker.

Hvis atmosfæren absorberer brøkdelen ϵ av strålingen fra bakken, vil den også sende ut brøkdelen ϵ av svartlegemestrålingen gitt ved atmosfærens temperatur, T_g . Atmosfæren må derfor betraktes som et "grått" legeme.

Med disse forutsetningene kan vi sette opp et uttrykk for energibalansen både for bakken og for "drivhustaket".

Bakken

$$\frac{(1-A)}{4} \cdot S + \epsilon \sigma \cdot T_g^4 = \sigma \cdot T_B^4$$

Atmosfæren

$$\epsilon \sigma \cdot T_B^4 = 2\epsilon \sigma \cdot T_g^4$$

Her kjenner vi A , S og σ (Stefan-Boltzmanns konstant). Størrelsen ϵ må vi velge, mens T_B og T_g er ukjente. Vi eliminerer T_g samt bruker likningen uten drivhuseffekt, og får da følgende uttrykk for bakketemperatur, T_B :

$$T_B = T_{B1} \cdot \left(\frac{2}{2-\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}} = 255 \cdot \left(\frac{2}{2-\epsilon} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Vi ser at for $\epsilon = 0$ er vi tilbake til forholdene uten atmosfære. Vi kan imidlertid velge forskjellige verdier for ϵ . Verdien øker dess mer drivhusgasser vi slipper ut, og "taket" blir tettere. Globale middeltemperaturer kan beregnes fra likningen ovenfor for forskjellige verdier av ϵ , som vist i tabell 1.

Tabell 1. Sammenhengen mellom ϵ og global temperatur.

ϵ	K	°C
0	255,0	-18,0
0,75	286,8	13,8
0,77	288,0	15,0
0,80	289,7	16,7
0,85	292,8	19,8
0,90	296,1	23,1
1,00	303,2	30,2

Tabellen viser at uten atmosfære, dvs. $\epsilon = 0$, får vi som før temperaturen 255 K. For alle andre verdier av ϵ har vi en drivhuseffekt.

Denne enkle modellen hvor all energitransport skjer ved stråling, viser at dagens atmosfære hindrer ca. 77 % av strålingen fra bakken i å nå verdensrommet. Hvis ϵ øker med 1 %, vil den globale temperaturen øke med godt og vel en halv grad. Denne modellen viser det basale ved drivhuseffekten. *Atmosfæren slipper gjennom solstrålingen, men absorberer det meste av varmestrålingen fra jorda.*

Vi vil nå se om stråling og absorpsjon i atmosfæren også kan beskrives ved denne modellen.

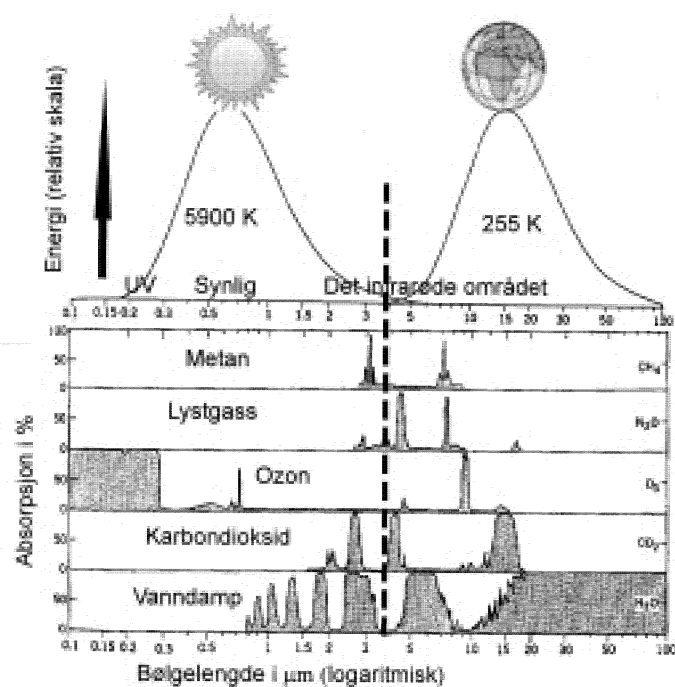
Stråling og absorpsjon i atmosfæren

Når vi skal anvende denne modellen er det gunstig å se det hele i relasjon til figurene 4 og 5.

Jorda stråler som et svart legeme med en "effektiv" temperatur på 255 K. Formen på strålingsspektret er gitt ved Plancks strålingslov. I figur 4 er spektrene for sola og jorda forskjøvet i forhold til hverandre fordi temperaturen er forskjellig. Solspektret har sitt maksimum ved 500 nm (0,5 μm) svarende til en temperatur på 5900 K, mens spektret fra jorda har sitt maksimum ved 11 300 nm (11,3 μm) når temperaturen er 255 K. Hvis temperaturen på jorda øker til 288 K, vil maksimum forskyves til 10 μm .

Alle gasser absorberer stråling. Betingelsen er at kvanteenergien er lik energiforskjellen mellom to tilstander for gassmolekylene. Det er i første rekke energisprang mellom molekylenes vibrasjons- og rotasjonsenergien som vil gi absorpsjon i det aktuelle energiområdet.

Et molekyls absorpsjonsspektrum er bestemt av tillatte overganger mellom energinivåene. Overganger betinger at molekylene har tilstrekkelig sterke elektriske eller magnetiske dipolmomenter



Figur 4. Øverste del av figuren viser strålingsspektret til sola og jorda som funksjon av bølgelengden. De har samme form (Plancks lov), men er forskjøvet i bølgelengde (Wiens forskyvningslov). Energiskalaen for de to spektrene er forskjellig (Stefan-Boltzmanns lov), slik at de på figuren ser identiske ut. Den nedste delen viser hvordan gasser i atmosfæren absorberer stråling. For at en gass skal ha drivhusegenskaper må den absorbere stråling til høyre for den stiplede vertikale linjen på figuren, dvs. i det området der jorda har sitt emisjonsspektrum.

(permanente eller tidsinduserte) slik at de kan vekselvirke med strålingsfeltet. Det fører til absorpsjonslinjer og bånd. Vi skal ikke gå nærmere inn på fysikken i dette, men konsentrere oss om gassene i atmosfæren. Det er gjort i figur 4.

La oss først slå fast at gassene N_2 , O_2 og Ar ikke absorberer i det området vi er opptatt av. De er da uten direkte interesse når det gjelder drivhuseffekten.

De gassene som bidrar til drivhuseffekten er i første rekke vann (H_2O), karbondioksid (CO_2), metan (CH_4), lystgass (N_2O) og ozon (O_3). Det som gjør disse gassene til drivhusgasser er deres absorpsjonsegenskaper. De absorberer alle infrarød stråling i et bølgelengdeområde der vi finner strålingen fra jorda.

Vi ser først på ozon (figur 4). Ozon absorberer stråling i UV-området. Den absorberer all stråling i atmosfæren med bølgelengde mindre enn ca. 300 nm ($0,3 \mu m$). Det gir seg uttrykk i figur 4 ved at absorpsjonen når 100 %. Vi bruker absorpsjonen i området 305–325 nm til å bestemme mengden av ozon i stratosfæren.

Denne UV-absorpsjonen har ikke noe med drivhuseffekten å gjøre, men, som en ser av figur 4, har ozon en absorpsjonslinje ved $9,6 \mu m$, nær den bølgelengden hvor jordstrålingen har sitt maksimum. Derfor er ozon en drivhusgass.

Karbondioksid (CO_2) har tre absorpsjonsbånd ved 2,7, 4,3 og $15 \mu m$. Det er særlig det siste som er viktig for drivhuseffekten.

Vann (H_2O) har et permanent dipolmoment og en lang rekke absorpsjonslinjer og bånd i det energi-området som er i fokus for drivhuseffekten. Vann-damp er den viktigste drivhusgassen og absorberer all langbølget stråling i atmosfæren.

Det samlede resultat av drivhusgassene er vist i figur 5, både slik forholdene er i en høyde på 11 km i atmosfæren og ved bakkenivå.

I bølgelengdeområdet fra ca. 8 til $16 \mu m$ slipper en betydelig del av strålingen fra jorda ut i verdensrommet. Dette området kalles for "atmosfærens vindu". Vi ser at det er noe absorpsjon i "kantene" siden lystgass og metan absorberer ved 7–8 μm , og CO_2 absorberer ved 12–16 μm . Ozon absorberer midt i atmosfærens vindu.

Konklusjon

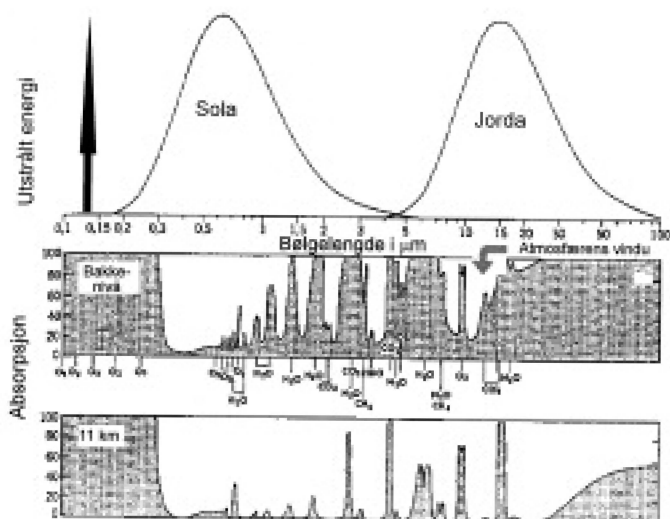
Denne enkle modellen kan brukes til å forklare drivhuseffekten. I modellen brukte vi størrelsen ϵ for å beskrive hvor tett jordas "atmosfæretak" er. Vi slo fast at med dagens globale temperatur passer det med en ϵ -størrelse på ca. 0,77. Det betyr at ca. 23–25 % av strålingen fra jorda passerer "atmosfæretaket" og slipper ut i verdensrommet. Mer kompliserte modeller viser at andelen er noe mindre.

Samlet absorberer gassene i atmosfæren lite solstråling (bare UV og langbølget). Dette passer med vår enkle modell som sier at drivhustaket slipper gjennom all solstrålingen.

Figur 5 viser at det er lite klimagasser over en høyde på 11 km, dvs. over troposfæren. Men det er her vi finner det meste av ozonen som absorberer UV-strålingen fra sola.

Utenom det atmosfæriske vindu absorberes strålingen fra jorda ganske effektivt av de naturlige forekommende gassene: vanndamp, karbondioksid, ozon, lystgass og metan.

I nyere tid er det kommet til andre gasser som også har drivhusegenskaper, det vil si at de absorberer varmestråling. Vi kan nevne klorfluor-karbon-gassene (KFK) som menneskene har sluppet ut i atmosfæren i de siste 50–60 årene. Det som er særlig betenkelig ved KFK-gassene er at de ab-



Figur 5. Den øverste delen av figuren er lik den i figur 4. Nederst er vist den totale absorpsjonen av alle gassene som forekommer naturlig i atmosfæren. De enkelte gassenes bidrag er angitt. Figuren viser absorpsjonen ved bakkenivå og i en høyde på 11 km. Når absorpsjonen når 100 % betyr det at all stråling i dette bølglengdeområdet er absorbert.

sorberer stråling i området omkring 11 μm , dvs. i "atmosfærens vindu", noe som gjør disse gassene til svært effektive drivhusgasser.

KFK-gassene ble forbudt ved Montrealtraktaten i 1987, der hovedhensikten var å stoppe nedbrytningen av ozon. Denne internasjonale traktaten, som er undertegnet av 196 land, er kanskje mest betydningsfull når det gjelder drivhuseffekten.

Menneskelig aktivitet har som nevnt ført til økning av drivhusgasser, og det er virkningen av dette som mange kaller for drivhuseffekten, men som mer korrekt burde betegnes som "økt drivhuseffekt".

Oppsummering

Vi har skissert en enkel fysisk modell for atmosfærens drivhuseffekt. Den er basert på prinsippene og de fysiske lovene som gjelder for svarte legemer, og vi betrakter sola og jorda som miljøfysikkens svarte legemer. En slik enkel modell kan brukes til å illustrere drivhuseffekten.

Mange er sikkert opptatt av om det er mulig å gi noen nærmere sammenheng mellom ε og mengden av drivhusgasser. Det har vi ingen muligheter for, og vi kan ikke si noe sikkert om betydningen av en CO_2 -øking i atmosfæren.

I perioden 1960–2010 økte CO_2 -mengden i atmosfæren fra 310 til 390 ppm. Det skulle gi en øking i ε , og dermed en temperaturøking, men noe mer

konkret kan vi ikke si. Det samme vil gjelde hvis for eksempel mengden av vann i atmosfæren skulle øke.

I IPCC-rapporten blir det slått fast at atmosfærens innhold av klimagasser stadig øker, og at dette i hovedsak skyldes menneskelig aktivitet. Dette er forståelig fordi de globale utslippene har økt kontinuerlig siden før-industriell tid i takt med energiforbruket. Men mengden av CO_2 i atmosfæren øker ikke i samme grad som økingen i utslipp, noe som innebærer at også opptakene av CO_2 øker.

Vi har ingen målinger som forteller om endringer i H_2O -mengden i atmosfæren. Siden vann er så viktig for drivhuseffekten, er dette et interessant område.

Mange er opptatt av å begrense utslippene slik at den globale temperaturen ikke skal øke med mer enn en gitt verdi (2 $^\circ\text{C}$). Hvilke reduksjoner det her er snakk om er umulig å beregne med vår enkle klimamodell. Men det er det heller ikke med de store globale modeller. Det har skjedd en oppvarming gjennom de siste 50 årene midlet over alle kontinenter unntatt Antarktis. I IPCC-rapporten fra 2007, hevdes det at det er en lineær 100-års trend i temperaturstigningen fra 1906 til 2005, på 0,74 $^\circ\text{C}$.

Litteratur

1. T. Henriksen og I. Kanestrøm: *Klima - Drivhuseffekt - Energi*. Gyldendal (2001)
2. T. Henriksen og I. Kanestrøm: *Klima - Drivhuseffekt - Energi*. Internett: www.fys.uio.no/publikum/temahefter/Klima.pdf
3. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC: *The Fourth Assessment Report* (2007)
4. Ingolf Kanestrøm: *Drivhuseffekten – myte eller virkelighet?* Fra Fysikkens Verden, **62**, Nr. 1, 10-14 (2000)
5. Ingolf Kanestrøm: *Drivhuseffekten – Liten tue kan velte stort lass!* Fra Fysikkens Verden, **65**, Nr. 1, 22-25 (2003)
6. Ingolf Kanestrøm: *Klimaforandringer og press på miljøet*. Fra Fysikkens Verden, **69**, Nr. 1, 24-27 (2007)
7. Ingolf Kanestrøm: *Globale klimaforandringer – Hva vet vi?* Fra Fysikkens Verden, **69**, Nr. 2, 50-53 (2007)

Fra Fysikkens Verden

72. årgang
2010

Norsk Fysisk Selskap
Oslo 2010

ISSN-0015-9247

Innhold FFV 2010

Nr. 1:

Fra Redaktørene	2
Hva brakte 2009 av ny fysikk?	
<i>Øyvind Grøn</i>	
Nytt fra NFS	2
Endringer i NFS og FFV fra 2010	
<i>Per Osland</i>	
In Memoriam	3
Ragnvald Høier (1938–2009)	
<i>Randi Holmestad og Knut Marthinsen</i>	
FFV Gratulerer	4
Jakob Sandstad 90 år	
<i>S. Bergsmark, T. Jønvik, T. Lindem og O. Søråsen</i>	
Tidevannet – Et mangfoldig og komplekst fenomen	
<i>Bjørn Gjevik</i>	6
Spallasjonskilden ESS –	
Et storskala europeisk forskningsverktøy	
<i>Kenneth D. Knudsen og Olav Steinsvoll</i>	
Indeks FFV 2009	17
Eksperimenter av gigantiske dimensjoner –	
er de gunsige?	
<i>Lillian Smestad</i>	21
Fysikknytt	24
Når elektrisk isolerende materiale blir supraleiende	
<i>Emil J. Samuelsen</i>	
Bokomtale	27
Walter Isaacson: Einstein. Hans liv og univers.	
Cappelen Damm, 2010.	
<i>Henning Knutsen</i>	
Hva skjer	28
NORDITA er flyttet til Stockholm	
<i>Susanne Vifers</i>	
Kr. Birkeland hedret av Norwegian	
<i>Alv Egeland</i>	
Landskonferanse om fysikkundervisning 2010	
<i>Morten Trudeng</i>	
Nye Doktorer	31
PhD Sebastian R. Bablok	
PhD Amund Brautaset	
PhD Lucio Calise	
PhD Geir Ersland	
PhD June Lunde	
Phd Rachid Maad	
PhD Raymond Nepstad	
Trim i FFV	34
Retting	35
Kvinneandelen i fysikk ved universitetene	
Nytt fra NFS	35
Nye medlemmer	

Nr. 2:

Fra Redaktørene	38
<i>Marit Sandstad</i>	
FFV Gratulerer	38
Nansenbelønning til Hans Kristian Eriksen	
<i>Per B. Lilje</i>	
In Memoriam	39
Alexis C. Pappas (1915–2010)	
<i>Jorolf Alstad</i>	
Er mørk materie nå identifisert?	
<i>Nils-Erik Bomark</i>	40
Jordiske gammaglimt	
<i>Gjesteland, Østgaard, Hansen og Stadsnes</i>	45
Magnetiske monopolar – finst dei?	
<i>Emil J. Samuelsen</i>	49
Fra Fysikkens Historie	52
Henrik Lund portretterte fysikere	
<i>Nils Voje Johansen</i>	
Hva skjer:	55
Fysikkevalueringen 2009	
<i>Per Osland</i>	
Respons på evalueringen: Fysisk institutt, UiO	
<i>Einar Sagstuen</i>	
Institutt for teoretisk astrofysikk, UiO	
<i>Per Barth Lilje</i>	
Institutt for fysikk og teknologi, UiB	
<i>Geir Anton Johansen</i>	
Institutt for matematiske realfag og teknologi, UMB	
<i>Espen Olsen</i>	
Institutt for fysikk og teknologi, UiT	
<i>Alfred Hansen</i>	
Institutt for matematikk og naturvitenskap, UiS	
<i>Bjørn Helge Hjertager</i>	
Universitetssenteret på Svalbard (UNIS)	
<i>Gunnar Sand</i>	
Institutt for fysikk, NTNU	
<i>Asle Sudbø</i>	
Fysikkolympiaden 2010	
<i>Carl Angell</i>	
Nordisk fysikermøte i Helsinki	
<i>Per Osland</i>	
Bokomtale	60
J. Griffiths og J. Podolský: Exact Space-Times	
in Einstein's General Relativity.	
Cambridge Univ. Press, 2010.	
<i>Henning Knutsen</i>	
Nytt fra NFS	61
Nye medlemmer	
Nettverk i fysikkhistorie og filosofi	
<i>Reidun Renstrøm</i>	
Trim i FFV	61
Nye Doktorer	62
PhD Tore Birkeland	
PhD Ketil Røed	
PhD Lene Sælen	

Nr. 3:

Fra Redaktørene	66
<i>Øyvind G. Grøn</i>	
FFV Gratulerer	66
Forskningspris til Johan Moan	
<i>Erik Olai Pettersen</i>	
In Memoriam	67
Endre Lillethun (1928–2010)	
<i>Göran Jarlskog, Per Osland og Bjarne Stugu</i>	
Nytt fra NFS	68
Professor Haakon Olsen er død	
<i>Per Osland</i>	
J. Robert Oppenheimer (1904–67), Lederen for Los Alamos-prosjektet – Del I	
<i>Sven Oluf Sørensen</i>	69
Underkjøling av væsker:	
Grenseflata spelar ei rolle	
<i>Emil J. Samuelsen</i>	75
Detektering av vulkanske askeskyer fra fly	
<i>Fred Prata og Tove Svendby</i>	78
Universets ekspansjon og mørke energi	
Del I: Tolkning av supernovaobservasjoner	
<i>Øyvind Grøn</i>	81
Hva skjer	85
Fysikkolympiaden 2010 – i Zagreb	
<i>Carl Angell</i>	
Landskonferansen om fysikkundervisning på Gol	
<i>Angell, Grimenes, Hetland og Trudeng</i>	
Bokomtale	87
P. C. Hemmer, A. Johnsson, K. Mork og I. Svare:	
Fysikk i Trondheim gjennom 100 år.	
Institutt for fysikk, NTNU, 2010.	
<i>Hallstein Høgåsen</i>	
Nye Doktorer	88
PhD Nicolaas Ervik Groeneboom	
PhD Jarle Husebø	
PhD Wojciech Jacek Miloch	
PhD Øystein Rudjord	
PhD Lars Erik Walle	
Trim i FFV	91
De 10 språkvettreglene	91

Nr. 4:

Fra Redaktørene	94
<i>Marit Sandstad</i>	
FFV Gratulerer	94
Sven Oluf Sørensen 90 år	
<i>Bugge, Buran, Danielsen, Jacobsen og Osnes</i>	
NTNU – NTH 100 år	
<i>Per Osland</i>	
Birkelandprisen til Jacob Linder	
<i>Per Amund Amundsen</i>	
In Memoriam	97
Haakon A. Olsen (1923–2010)	
<i>Johnsson, Mork, Olaussen og Osland</i>	
J. Robert Oppenheimer (1904–67) - Del 2	
Fra respektert leder til spionmistenkt	
<i>Sven Oluf Sørensen</i>	99
Målinger av vulkanaske ved ALOMAR på Andøya	
<i>M. Gausa, S. Blindheim og E. Thrane</i>	106
Universets ekspansjon og mørke energi	
Del II: Mørk energi og materie	
<i>Øyvind Grøn</i>	112
Nobelprisen i fysikk 2010	
<i>Asle Sudbø og Jacob Linder</i>	117
Kavliprisen i astrofysikk 2010	
<i>Oddbjørn Engvold</i>	120
Kavliprisen i nanofysikk 2010	
<i>Arne T. Skjeltorp</i>	123
Hva skjer	125
Gammadetektor for Romstasjonen bygges ved UiB	
Fra Fysikkens Historie	126
Ulugh Beg	
<i>Henning Knutsen</i>	
Nye Doktorer	127
PhD Glenn Tørå	
Trim i FFV	127

Forfatterregister 2010

- Alstad, Jorolf:*
In Memoriam: Alexis C. Pappas (1915–2010)39
- Amundsen, Per Amund:*
FFV Gratulerer: Birkelandprisen til Jacob Linder96
- Angell, Carl:*
Hva skjer: Fysikkolympiaden 2010 58
- Angell, Carl:*
Hva skjer: Fysikkolympiaden 2010 – i Zagreb 85
- Angell, C., Grimenes, Hetland og Trudeng:*
Hva skjer: Landskonferansen om fysikkundervisning ..87
- Bergsmark, Stein, T. Jønviik, T. Lindem og O. Søråsen:*
FFV Gratulerer: Jakob Sandstad 90 år4
- Bemark, Nils-Erik:*
Er mørk materie nå identifisert? 40
- Bugge, L., Buran, Danielsens, Jacobsen og Osnes:*
FFV Gratulerer: Sven Oluf Sørensen 90 år 94
- Egeland, Alv:*
Hva skjer: Kr. Birkeland hedret av Norwegian29
- Engvold, Oddbjørn:*
Kavliprisen i astrofysikk 2010120
- Gausa, M., S. Blindheim og E. Thrane:*
Målinger av vulkanaske ved ALOMAR106
- Gjesteland, T., Østgaard, Hansen og Stadsnes:*
Jordiske gammaglimt 45
- Gjevik, Bjørn:*
Tidevannet – Et mangfoldig og komplekst fenomen 6
- Grøn, Øyvind:*
Fra Redaktørene: Hva brakte 2009 av ny fysikk? 2
- Grøn, Øyvind G.:*
Fra Redaktørene 66
- Grøn, Øyvind:*
Universets ekspansjon og mørke energi.
Del I: Tolkning av supernovaobservasjoner 81
- Grøn, Øyvind:*
Universets ekspansjon og mørke energi.
Del II: Mørk energi og materie112
- Holmestad, Randi og Knut Marthinsen:*
In Memoriam: Ragnvald Høier (1938–2009) 3
- Hansen, Alfred:*
Hva skjer: Evaluering, Inst. fys. og teknologi, UiT57
- Hjertager, Bjørn Helge:*
Hva skjer: Evaluering, Inst. matem. og natur, UiS ... 58
- Høgåsen, Hallstein:*
Bokomtale: Hemmer, Johnsson, Mork og Svare:
Fysikk i Trondheim gjennom 100 år.
Institutt for fysikk, NTNU, 2010.87
- Jarlskog, Göran, Per Osland og Bjarne Stugu:*
In Memoriam: Endre Lillethun (1928–2010) 67
- Johansen, Geir Anton:*
Hva skjer: Fysikkevaluering, Inst. fys. og tekn., UiB ..57
- Johansen, Nils Voje:*
Fra Fysikkens Historie:
Henrik Lund portretterte fysikere 52
- Johnsson, A., K. Mork, K. Olaussen og P. Osland:*
In Memoriam: Haakon A. Olsen (1923–2010)97
- Knudsen, Kenneth D. og Olav Steinsvoll:*
Spallasjonskilden ESS – Et storskala forskningsverktøy 12
- Knutsen, Henning:*
Bokomtale: Isaacson: Einstein. Hans liv og univers.
Cappelen, Damm, 2010 27
- Knutsen, Henning:*
Bokomtale: Griffiths og Podolský: Exact Space-Times
in Einstein's General Relativity. Cambridge, 2010 ..60
- Knutsen, Henning:*
Fra Fysikkens Historie: Ulagh Beg126
- Lilje, Per B.:*
FFV Gratulerer: Nansenbelønning til H. K. Erikasen .38
- Lilje, Per B.:*
Hva sker: Evaluering, Inst. teoretisk astrofysikk, UiO .56
- Olsen, Espen:*
Hva skjer: Evaluering, Inst. mat. realf. og tek., UMB .57
- Osland, Per:*
Nytt fra NFS: Endringer i NFS og FFV fra 2010 2
- Osland, Per:*
Hva skjer: Fysikkevalueringen 2009 55
- Osland, Per:*
Hva skjer: Nordisk fysikermøte i Helsinki59
- Osland, Per:*
Nytt fra NFS: Professor Haakon Olsen er død 68
- Osland, Per:*
FFV Gratulerer: NTNU – NTH 100 år96
- Pettersen, Erik Olai*
FFV Gratulerer: Forskningspris til Johan Moan66
- Prada, Fred og Tove Svendby:*
Detektering av vulkanske askeskyer fra fly78
- Renstrøm, Reidun:*
Nytt fra NFS: Nettverk i fysikkhistorie og filosofi61
- Sagstuen, Einar:*
Hva skjer: Evaluering, Fysisk institutt, UiO 56
- Samuelsen, Emil J.:*
Fysikknytt: Når isolerende materiale blir supraleidende 24
- Samuelsen, Emil J.:*
Magnetiske monopolar – fins dei? 49
- Samuelsen, Emil J.:*
Underkjøling av væsker: Grenseflata spelar ei rolle ... 75
- Sand, Gunnar:*
Hva skjer: Evaluering, Univ.sentr. Svalbard (UNIS) .. 58
- Sandstad, Marit:*
Fra Redaktørene 38
- Sandstad, Marit:*
Fra redaktørene94
- Skjeltorp, Arne T.:*
Kavliprisen i nanofysikk 2010123
- Smestad, Lillian:*
Eksperimenter av gigantiske dimensjoner – gunstige? .21
- Sudbø, Asle:*
Hva skjer: Evaluering, Inst. for fysikk, NTNU 58
- Sudbø, Asle og Jacob Linder:*
Nobelprisen i fysikk 2010 117
- Sørensen, Sven Oluf:*
J. Robert Oppenheimer (1904–67) – Del I
Lederen for Los Alamos-prosjektet 69
- Sørensen, Sven Oluf:*
J. Robert Oppenheimer (1904–67) – Del II
Fra respektert leder til spionmistenkt 99
- Trudeng, Morten:*
Hva skjer: Landskonferanse om fysikkundervisning ... 30
- Vifers, Susanne:*
Hva skjer: NORDITA er flyttet til Stockholm 28

Astronomi og klima – Del I

Planetene og månen dirigerer jordas klima

Jan-Erik Solheim * og Ole Humlum * *

Det er jordas plass i verdensrommet som bestemmer vårt klima. Sola med planetene er på reise gjennom en galakse, Melkeveien, og passerer gjennom galaksearmen med støvskyer og magnetfelt. Dette gir klimavariasjoner over geologiske tidsskalaer. Nære og fjerne eksploderende stjerner sender skurer av partikler (kosmisk stråling) inn mot solsystemet. Lavenergetiske partikler blir stoppet av solas og jordas magnetfelt, mens partikler av høyere energier kolliderer med partikler i vår atmosfære og produserer datterpartikler som kan føre til økt skydannelse. Effekten merkes i løpet av få dager etter en kraftig skur med kosmiske partikler. Også variasjoner i jordas bane og jordaksens helning fører til klimavariasjoner – da med perioder fra 20 000 år og oppover. I denne artikkelen skal vi se på klimavariasjoner med perioder fra 5 til 100 år, som kan ha sin årsak i banebevegelsene til månen og planetene. I en senere artikkel skal vi fortelle hvordan sola som en variabel stjerne, påvirker jordas klima.

Nyere forskning viser at det eksisterer en rekke periodiske eller kvasi-periodiske klimasvingninger som kan ha astronomiske årsaker.^(1,2) Disse kommer i tillegg til, eller forsterker, naturlige svingninger i klimasystemet. Vi kan skille disse fra drivhuseffekten^(3,4,5) som antas å være monotont økende, og derfor ikke fører til periodiske variasjoner.

Forsterkning av naturlige svingninger skjer ved et fenomen som vi kaller *synkronisering av koplede oscillatorer ved tvungne svingninger*. Kollektiv

synkronisering av naturlige klimaoscillatorer fører til periodiske klimavariasjoner i fase med periodiske variasjoner som skyldes bevegelsene til sol, måne og planeter. Vi skal merke oss at det er ubetydelig energi som overføres fra planetene til vårt klima. Det jorda mottar er *informasjon* om hvilke svingninger (frekvenser) som passer til planetenes baner. En nær analogi er et orkester hvor alle instrumentene spiller i hver sin takt. Men så svinger dirigenten sin taktstokk, og lyden fra instrumentene blir synkronisert. Musikantenes energi brukes til å produsere lyd. Dirigenten viser ved tegn hvilken takt som er ønsket. Den astronomiske påvirkningen er uhyre svak, men varer over lang tid.

Synkronisering av koplede oscillatorer

En av de mest berømte fysikere til alle tider er Christiaan Huygens (1629–1695). Han er også kjent som matematiker, astronom, urmaker og *science fiction*-forfatter. Blant annet studerte han Saturns ringer, oppdaget dens måne Titan, og fant opp pendeluret som skulle få stor betydning for presis tidsmåling. I fysikken er han berømt for antakelsen om at lys består av bølger – noe som åpnet for forståelsen av partikkel-bølge dualiteten som er fundamental i moderne fysikk. Han var den første som fant formelen for svingeperioden, P , for en matematisk pendel:

$$P = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (1)$$

hvor l er pendelens lengde og g er tyngdens akselerasjon.

Under sitt arbeid med pendelur hadde Huygens montert to pendler på samme stang. En dag han lå i sengen og kikket på sine to pendler, oppdaget han at de svingte – ikke bare med samme periode, men også at de langsomt arbeidet seg inn i samme

* Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo,

** Institutt for geofag, Universitetet i Oslo.

fase – eller retttere sagt i motfase, uansett hvordan de ble startet opp. Dette beskrev han i et brev til Royal Society i London og kalte det ”*odd sympathy*” eller ”*odd kind of sympathy*”. Huygens trodde først det var lufttrykket, eller trykkbølger, mellom de to pendlene som førte til synkronisering, men kom senere til at det var ørsmå bevegelser i stanga som ble overført til pendlene og synkroniserte dem i motfase. Han var ikke i stand til å måle disse bevegelsene, men hans antakelse er i moderne tid bekreftet med instrumenter som kan måle små bevegelser, noe som ikke var mulig i Huygens’ tid. Denne synkroniseringseffekten er en egenskap vi nå tillegger *koplete oscillatorer*.

I det følgende skal vi beskrive hvordan planetene påvirker solas bevegelse rundt det felles tyngdepunktet i solsystemet, *barysenteret*, og hvordan naturlige svingninger i sola og på jorda blir synkronisert av disse bevegelsene, noe som vi opplever som periodiske eller nesten-periodiske klimavariasjoner. Vi skal også vise at månens bevegelse fører til periodiske klimavariasjoner.

Månenbanen og tidevannsbølgen

Gravitasjonspåvirkning fra sol og måne fører til døgnlige variasjoner i havenes vannstand. To tidevannsbølger vandrer rundt jorda og gir oss tidevann.⁽⁶⁾ Også jordskorpen og atmosfæren reagerer på tidevannsbølgene.

Månen beveger seg i et plan som danner en vinkel på ca. 5 grader med ekliptikken. Dette fører til at månens posisjon endrer seg med ± 5 grader i forhold til ekliptikken på et omløp. Deres fullmånen eller nymånen, inntreffer når månen er på det høyeste eller laveste, får vi en ekstra høy tidevannsbølge som kan bringe mer varmt vann nordover langs norskekysten. Skjæringen mellom månebanens plan og ekliptikken kaller vi *knutelinjen*. Denne beveger seg rundt i baneplanet med en periode på $P_M = 18,61$ år. Dette er en periode som finnes igjen i klimadata. Maksimal tidevannsbølge i nordlige farvann inntraff ved årsskiftet 2006/2007. Sommeren 2007 var det minimalt med is i Arktis. Neppe en tilfeldighet.

Månebanen er elliptisk med en akse som beveger seg i baneplanet med en periode på $P_R = 8,85$ år. Vi ser at denne er svært nær halve perioden til knutelinjen. Middelverdien av disse to periodene blir $P_{MR} = 9,1$ år. Vi kan regne ut hvor ofte disse periodene er i samme fase (resonans) ved følgende formel

Kollektiv synkronisering av koplete oscillatorer

Vi antar at vi har et system med N oscillatorer. Dette kan være klimasystemet med naturlige svingninger vi finner i temperatur- eller nedbørdata. Hver oscillator vil uten ytre påvirkning produsere et signal $X_i(t) = A_i \sin[\theta_i(t)]$, med en naturlig frekvens ω_i og amplitude A_i . Uten kopling vil hver oscillator svinge med fase $\theta_i(t) = \omega_i t + \theta_i(0)$.

Dersom disse N oscillatorer er koplet sammen i et nettverk med koplingskoeffisienter K_{ij} mellom oscillator i og oscillator j , og i tillegg er påvirket av et ytre periodisk påtrykk med frekvens ω og fase $\theta(t) = \omega t + \theta(0)$ og koplingskoeffisienter K_i , kan vi beskrive systemet med et sett med koplete likninger:

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) + K_i \sin(\omega t - \theta_i), \quad (1)$$

hvor $i = 1, 2, \dots, N$. Systemet kan startes ved $t = 0$ i en tilfeldig fase $\theta_i(t = 0)$. Hvis det ikke er en ytre påvirkning ($K_i = 0$), vil alle oscillatorene i systemet gradvis synkronisere seg til en *midlere feltfrekvens* som er karakteristisk for nettverket. Hvis alle koplingskoeffisientene er like, vil den *midlere feltfrekvens* være et gjennomsnitt av alle naturlige frekvenser.

Uten noen koplinger ($K_i = K_{ij} = 0$) vil systemet variere på denne måten:

$$X(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \sin[\theta_i(t)] \quad (2)$$

Amplituden av $X(t)$ blir relativt liten, fordi hvert signal X_i er ute av fase.

Et koplet system av oscillatorer vil svinge på følgende måte:

$$X(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N A_i \right) \sin(\omega t + \alpha) \quad (3)$$

hvor α er en felles fase og ω er en frekvens som har blitt *adoptert* av de N oscillatorer i systemet. Resultatet er at systemet vil svinge i fase med samme frekvens med en vesentlig forsterket amplitude.

Denne modellen er bistabil idet det er to mulige synkroniseringsfrekvenser, enten den *påtrykte* frekvensen eller den *naturlige* (*midlere felt-*) *frekvensen*. Hvis disse er forskjellige, kan systemet hoppe fra en svingemode til en annen avhengig av styrken på koplingskoeffisientene.

Dette er en enkel modell som forutsetter at svingningene er svake og kan adderes lineært, noe som ganske sikkert er tilfelle med påvirkning fra planetene.

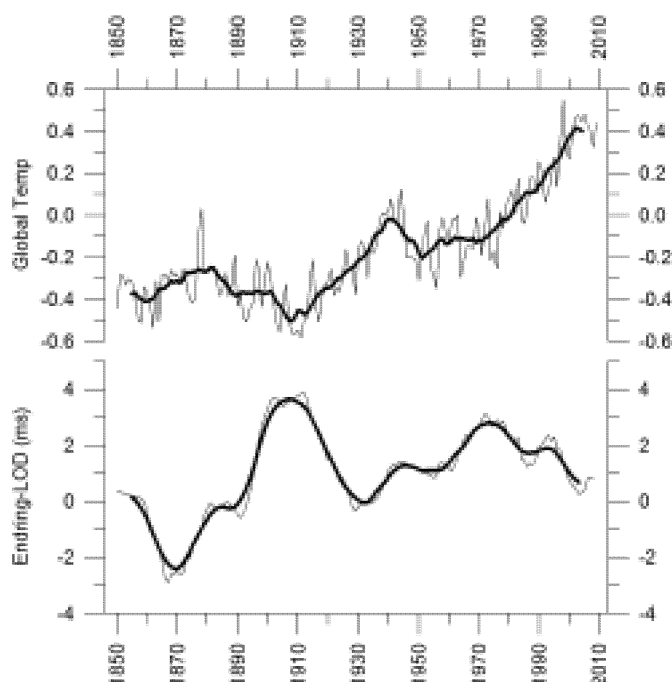
$$P(\text{resonans}) = (P_1^{-1} - P_2^{-1})^{-1} \quad (2)$$

hvor $P_1 < P_2$. Setter vi $P_1 = P_R = 8,85$ år og $P_2 = P_M/2 = 9,30$ år inn i formel (2), får vi $P_{12} = 183$ år, som også viser seg å være en interessant klimaperiode.

Hvordan tidevannseffektene virker på klimaet i vår del av verden, er undersøkt av Harald Yndestad.⁽⁷⁾ Han finner at temperaturen i nord-atlantisk vann som strømmer inn i Norskehavet, viser perioder som er korrelert med måneperiodene på 9,3 og 18,64 år, modulert med en lengre periode på 74,4 år, som er $4 \times 18,6$ år, som er en subharmonisk periode av P_M . Disse periodene finnes igjen i klimavariasjoner og i biomasseproduksjon. Dette er et eksempel på synkronisering av oscillerende systemer hvor enkelte harmoniske perioder forsterkes ved resonans.

Jordrotasjonen og global temperatur: 60-70-årsperioder

Jorda roterer gradvis saktere som følge av friksjon med tidevannsbølgen. Men vi ser også i figur 1 at den periodevis roterer forttere, dvs. at daglengden minker. I denne figuren har vi også tegnet inn en global temperaturkurve. Sammenligner vi de to kurvene, ser vi at når daglengden er på et minimum,



Figur 1. Øverst: Årsverdier for global temperatur glattet over en 11-årsperiode (tykk strek). Nederst: Endring i daglengden (LOD), også glattet over en 11-årsperiode (www.climate4you.com).

inntreffer et temperaturmaksimum ca. 5 år senere. Det hendte i 1875, 1935 og muligens i 2004, dvs. med en periode på 60–70 år. Årsaken til denne periodiske variasjonen av jordas rotasjon antas å være en kopling mellom jordas kjerne og mantel, enten ved magnetisk, turbulent eller laminær kopling (friksjon) mellom forskjellige lag i jordas indre.

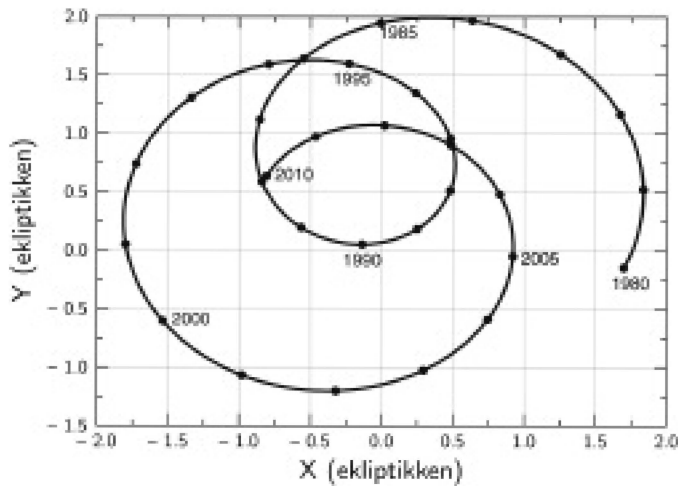
Variasjoner i jordrotasjonen er korrelert både med temperaturvariasjoner og atmosfæriske trykkfordelinger over jorda, med tidsforsinkelser på 5–15 år. Når daglengden øker, får vi flere blokkerings-situasjoner med vind langs lengdegradene istedenfor langs breddegradene, og det gir kalde vintre i store deler av Europa. I et arbeid fra 1976⁽⁸⁾ gjennomgås forskjellige hypoteser for mulige årsaker til 60-årsperioden. En hypotese er at et periodisk påtrykk utenfra styrer prosesser i jordas indre. Akselerasjon av jordrotasjonen omkring 1972 ble brukt til å varsle en kommende temperaturstigning fra omkring 1980. Og slik ble det. Akselerasjonen omkring 2004 varslers på samme måte som i 1935, en kaldere periode med start 5–10 år senere. Den ser vi nå begynnelsen av.

Planetenes perioder

I tillegg til måneperiodene finner vi også igjen perioder fra solsystemets planeter i temperaturdata. Den tyngste planeten er Jupiter. Den har en masse på 318 jordmasser og en periode på $P_J = 11,86$ år. Neste planet er Saturn med en masse på 95 jordmasser og en periode på $P_S = 29,5$ år. Tiden mellom hver gang disse to planetene står i samme retning sett fra sola, kaller vi planetenes *synodiske perioder*. Regner vi ut synodiske perioder med formel (2) for Jupiter-Saturn, får vi $P_{JS} = 19,8$ år. Vi merker oss at $2P_S \approx 3P_{JS} \approx 60$ år. Dette kan være styringssignalet for 60-årsperioden i jordrotasjonen og i den globale temperaturen. Den neste av de store planetene er Uranus, med en omløpstid på 84 år, og til slutt Neptun, med 165 år.

Virkning av planetenes bevegelser på sola og jorda

Når vi kjenner planetenes baner, kan virkningen på sola beregnes. Den er vist i figur 2 hvor solsensenterets bane er tegnet i forhold til massesenteret for planetsystemet, barysenteret. Figuren er tegnet i x, y -koordinater med enhet én solradius. Vi ser at solas massesenter periodevis ligger mer enn



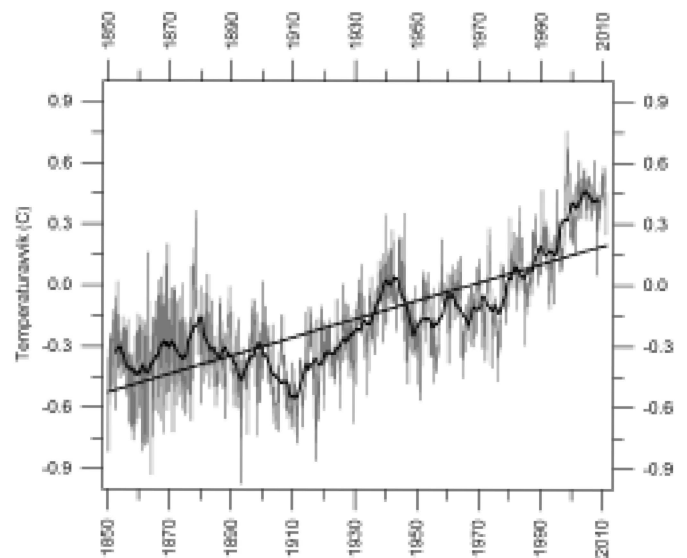
Figur 2. Solas bane relativt til solsystemets barysenter 1980–2010, projisert ned på ekliptikkplanet. Enheten for x- og y-aksen er én solradius (Scafetta, 2010, figur 4, med tillatelse.)⁽⁹⁾

én solradius utenfor barysenteret. Nicola Scafetta har analysert solsenterets hastighet om barysenteret (SCMSS) og jordas temperaturkurve for periodiske variasjoner.⁽⁹⁾ Resultatet er vist i figur 4.

Periodiske variasjoner i jordas temperatur

Fra omkring 1850 er det over hele verden blitt målt temperaturer med termometre. Disse temperaturmålingene er satt sammen til en såkalt *global temperatur*. Selv om store deler av jorda ikke er dekket med temperaturmålinger, anses dette som en rimelig framstilling av det globale klimaet. Dog er det en viss tvil om korrektheten i nyere tid, da flere av målestasjonene befinner seg i byer hvor lufta varmes opp i forhold til omgivelsene (urbaniseringseffekt). Mange stasjoner ble nedlagt etter 1990 som følge av Sovjetunionens fall og innsparinger verden over.

I figur 3 er det vist en global temperaturkurve fra det britiske *Hadley Centre for Climate Prediction and Research* and the *University of East Anglia's Climatic Research Unit (CRU)*. Vi ser at den globale temperaturen stiger jevnt gjennom hele måleperioden med $+0,0045\text{ }^{\circ}\text{C}$ per år. Dette kan skyldes en langperiodisk svingning med en periode på ca. 1000 år, som har gitt oss 4 varmeperioder ekstra i historisk tid. Forut for den nåværende varmeperioden har vi hatt en kald periode som varte omkring 500 år, og som vi kaller *den lille istid* (1350–1850). I tillegg til denne trenden ser vi en kvasi-periodisk variasjon med en periode på 60–65 år.



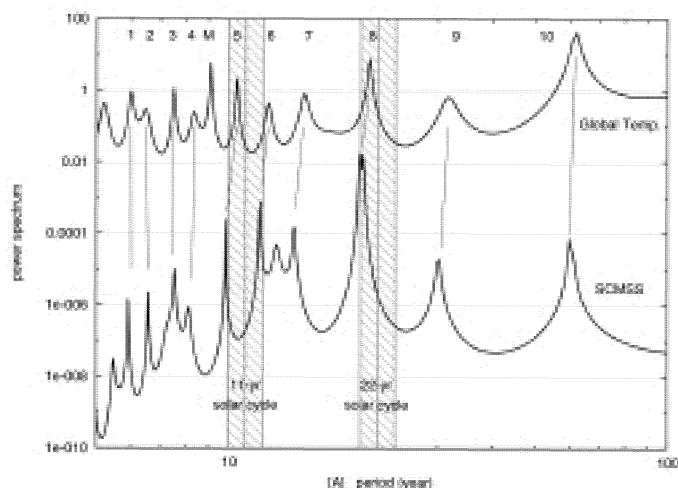
Figur 3. Global temperaturutvikling fra januar 1850 til og med desember 2010. Svakt grått viser månedlige verdier, mens tykk kurve er et glidende 61-måneders gjennomsnitt. Grafen viser avvik fra gjennomsnittet av den såkalte "normalperioden" 1961–1990 og antyder periodiske varmeperioder (omkring 1875, 1940, og 2005) med 60–65-års intervall. For temperaturkurven er det beregnet en trend på $+0,0045\text{ }^{\circ}\text{C}$ per år, vist som en rett linje. Omkring denne har vi svingninger med periode 60–65 år og utslag på omkring $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Data beregnet av det engelske Hadley Centre og University of East Anglia (HadCRU).)

Denne variasjonen fører til en temperaturkurve som ligger opp til $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ over eller under den rette linjen.

De månedlige temperaturer viser store variasjoner. Det skyldes værsystemets kaotiske natur. Ser vi nøyer på denne temperaturkurven, finner vi detaljer som gjentar seg; for eksempel er stigningen fra 1910 til 1940 svært lik stigningen fra 1975 til 2005. Det er derfor nærliggende å anta at de har samme årsak.

En frekvensanalyse av jordas temperatur og solsenterets hastighet fra 1850 til 2009, er vist i figur 4. I begge kurver er det topper som er nummerert fra 1 til 10. Sammenfallende topper kan ha samme årsak. I tillegg finnes det i den globale temperaturkurven en topp merket *M*. Den tilsvarende en periode på 9,1 år, som svarer til måneperioden (P_{MR}).

De 11 periodene som er funnet i tidsseriene er vist i tabell 1. Vi ser at 10 av 11 tidsserieperioder finnes igjen i solsenterets hastighetsspektrum (SCMSS), og den 11. stemmer som nevnt med måneperioden. Periodene nr. 5 og 8 er i nærheten av solas egne aktivitetsperioder på omkring 11 og 22 år. Tabellen viser at periodene i SCMSS og i jordas temperatur, ligger svært nær perioder fra planeter



Figur 4. Effektspektrum for perioder fra 1 til 100 år for den globale temperaturkurven øverst, og hastigheten til solsenteret i forhold til solsystemets barysenter (SCMSS) nederst. Signifikante perioder er nummerert fra 1 til 10, samt *M*. To aktivitetsperioder for sola på 11 og 22 år, er skraverte. Tidsseriene er for perioden 1850 til 2009 (Scafetta, 2010, figur 6A, med tillatelse.)⁽⁹⁾.

Tabell 1. Perioder i år: Globale temperaturer (*T*) og solsenterets hastighet (SCMSS) sammenlignet med perioder for månen, Jupiter og Saturn. Tallene i de tre første kolonner er fra Scafetta (2010).⁽⁹⁾ Indeksene *J* og *S* står for planetene Jupiter og Saturn. Indeksen *M* står for månens knutelinjeperiode. *MR* er gjennomsnitt av månens halve knutelinjeperiode og rotasjonsperioden for månebanens store halvakse.

Periode nr	Temperatur P_T	Solsenter P_{SCMSS}	Planeter og måne P
1	$6,02 \pm 0,13$	$5,91 \pm 0,07$	$P_J/2 = 5,93$
2	$6,53 \pm 0,17$	$6,56 \pm 0,07$	$P_{JS}/3 = 6,62$
3	$7,48 \pm 0,16$	$7,52 \pm 0,08$	$P_S/4 = 7,36$
4	$8,2 \pm 0,3$	$8,07 \pm 0,08$	
<i>M</i>	$9,07 \pm 0,19$		$P_{MR} = 9,1$
5	$10,4 \pm 0,3$	$9,84 \pm 0,12$	$P_S/3 = 9,81$
6	$12,0 \pm 0,9$	$11,8 \pm 0,18$	$P_J/11,86$
7	$14,9 \pm 0,9$	$14,2 \pm 0,4$	$P_S/2 = 14,73$
-			$P_M = 18,61$
8	$21,0 \pm 1,4$	$20,2 \pm 0,7$	$P_{JS} = 19,85$
9	30 ± 3	$30,5 \pm 1$	$P_S = 29,46$
10	62 ± 5	60 ± 2	$3P_{JS} \approx 2P_S \approx 59$

og måne. Det er svært liten sannsynlighet for at dette kan være tilfeldig. En statistisk signifikanstest (χ^2 -test) gir 96 % signifikans, sammenlignet med en klimamodell (GISS-modell E) som gir 16 %.⁽⁹⁾ Klimamodellen viser heller ikke 60-årsperioden, som er den dominerende i jordas temperaturoscillasjon (figur 3).

Diskusjon

Fremstillingen ovenfor viser at den globale temperaturen varierer med samme perioder som solas hastighet varierer om planetsystemets barysenter, og med perioder vi finner i månebanen og planetene Jupiters og Saturns baner. Tilsvarende periodiske variasjoner er funnet i klimadata for mange regioner på jorda.

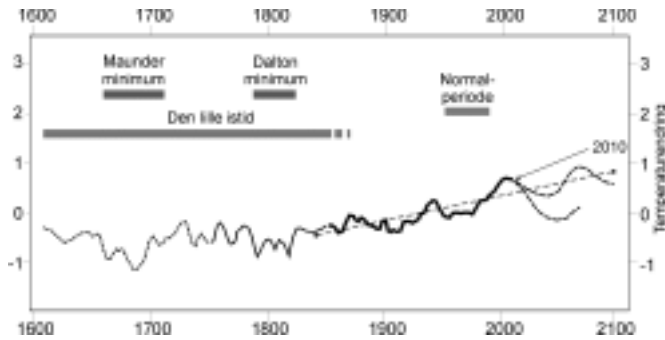
I figur 3 ser vi at det har vært en global temperaturstigning på ca. $0,6^\circ\text{C}$ fra 1979 til 2010. Ved å bruke en linjal finner vi at temperaturkurven i hele intervallet 1850–2010 ligger innenfor $\pm 0,2^\circ\text{C}$ fra den rette linja med stigning $0,0045^\circ\text{C}$ per år. Siden 1979 er nær bunnen, og 2005 er nær toppen i 60-årsperioden, betyr det at $0,4^\circ\text{C}$ stammer fra den periodiske variasjonen. I tillegg kommer den lineære økningen som utgjør $0,15^\circ\text{C}$. Dette forklarer $0,55$ av de $0,6$ grader temperaturstigning som er målt. Resten kan tilskrives støy og måleusikkerhet. Dermed har vi en alternativ forklaring på temperaturstigningen fra 1979 til 2010, som også forklarer stigningen fra 1910 til 1940. Klimamodellene er tilpasset stigningen fra 1979 til 2005, men forklarer ikke stigningen fra 1910 til 1940.

Vi finner igjen 60-årsperioden som variasjon i jordrotasjonen (døgnlengden) og i mange klimaserier. Vi har undersøkt klimadata for Norge, og der finner vi også denne perioden, men i tillegg finner vi flere måneperioder. Dette er ikke uventet da mange havområder nær oss har svingeperioder som synkroniserer seg med harmoniske månefrekvenser.

Vi kan nå konstruere en enkel "klimamodell" som er gjengitt i figur 5. Den består av en rett linje med stigning på omkring $0,005^\circ\text{C}$ per år med tillegg av en 60-års periodisk variasjon med amplitude $0,2^\circ\text{C}$. Dersom stigningen fortsetter dette hundreåret ut med samme stigningskoeffisient, vil det i år 2100 gi en global temperatur omtrent som i dag.

Analyse av eksisterende globale temperaturserier viser at det ikke har vært signifikant stigning i den globale temperaturen de siste 15 år, noe som taler i favør av denne enkle modellen. Dersom sola blir svakere i dette hundreåret, kan vi vente en lavere temperatur. Det skal vi skrive om i Del II.

Vår enkle modell vist i figur 5, gir i løpet av få år en temperaturutvikling som er ganske forskjellig fra scenarier fra gjeldende klimamodeller. Deres prognose er en temperaturstigning gjennom hele dette hundreåret med $+4,0^\circ\text{C}$ som den mest sannsynlige, hvis vi ikke stopper utslippet av klimagasser.⁽⁴⁾ Dersom koblingskoeffisientene i oscillatornettver-



Figur 5. En enkel modell for jordas temperaturutvikling siden 1600. Den kraftige kurven viser målte temperaturer siden 1850 (se figur 3), mens den svakere kurven viser estimerer lengre tilbake i tid, av gradvis minskende nøyaktighet. Etter 2010 ser vi for oss to muligheter, enten at den jevne stigningen fortsetter med 60-årsperioden overlageret, eller at vi går inn i en periode med lav solaktivitet slik at det blir kaldere. Alle temperaturer refererer til en såkalt "normaltemperatur" beregnet som gjennomsnitt for perioden 1961 til 1990. To perioder med liten solaktivitet og lav temperatur, er markert sammen med "den lille istid" som varte fra ca. 1350 til ca. 1850.

ket mellom planeter, måne, sol og klima kunne bestemmes, kan dette gi mulighet for å konstruere mer realistiske klimamodeller, som også frembringer de observerte periodiske variasjoner.

Takk til Edmund Meištas, Vilnius, for hjelp med figurer!

Referanser

1. Ole Humlum: <http://www.climate4you.com/> (Gir informasjon om klimavariasjoner og klimarelaterte forhold. Oppdateres jevnlig.)
2. Ole Humlum: *Det ustyrilige klima*. ISBN 978-87-92417-08-4, e-bok fra Trykkefrihedsselskabets Bibliotek (2009). (Gir eksempler på hvordan klimavariasjoner har påvirket Europas historie.)
3. Ingolf Kanestrøm: *Drivhuseffekten – Liten tue kan velte stort lass!* Fra Fysikkens Verden, **65**, Nr. 1, 22–25 (2003)
4. Ingolf Kanestrøm: *Globale Klimaendringer*. Fra Fysikkens Verden, **69**, Nr. 2, 50–53 (2009). (Om klimapanelets konklusjoner.)
5. Ingolf Kanestrøm og Thormod Henriksen: *Atmosfærens drivhuseffekt - En enkel modell*. Fra Fysikkens Verden, dette nummer (2011)
6. Bjørn Gjevik: *Tidevannet – Et mangfoldig og komplekst fenomen*. Fra Fysikkens Verden, **72**, Nr. 1, 6–11 (2010)
7. Harald Yndestad: *The influence of the lunar nodal cycle on Arctic climate*. ICES Journal of Marine Science, **63**: 401–420 (2006)
8. Kurt Lambeck og Anny Cazenave: *Long Term Variations in the Length of Day and Climatic Change*. Geophysical Journal of Royal Astronomical Society, **46**, 555–573 (1976)
9. Niclola Scafetta: *Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, **72**, 951–970 (2010), doi: 10.1016/j.jastp.2010.04.015

∞

**HUSK Å BETALE
KONTINGENTEN!**

Nøytrinoer og galakser

Øystein Elgarøy * og Øyvind Grøn * *

En sammenlikning av tetthetsfordelingen i universet slik den er nå og fordelingen slik den var for noen milliarder år siden, har gitt en ny øvre grense for nøytrinomassene. Summen av massene til et elektronnøytrino, et myonnøytrino og et taunøytrino er ikke større enn 0,28 eV (se ramme), dvs. ikke større enn halvparten av en milliondel av elektronets masse.

Nøytrinomasse og nøytrino-oscillasjoner

Inntil 1998 ble nøytrinoene oppfattet som masseløse partikler i den såkalte standardmodellen for elementærpartiklene. Ved hjelp av den japanske detektoren Super Kamiokande ble det da oppdaget at nøytrinoene skifter identitet mellom de tre typene av nøytrinoer, elektronnøytrinoet med masse m_e , myonnøytrinoet, m_μ , og taunøytrinoet, m_τ , på vei fra sola til detektoren.^(1,2,3)

Nøytrinooscillasjoner er en kvantemekanisk effekt som inntreffer dersom nøytrinoene har ulike hvilemasser. Et elektronnøytrino produsert i solas indre vil på ferdien til jorda veksle mellom de ulike nøytrinotypene, og vil kunne detekteres her som et myonnøytrino.

Målingene av slike oscillasjoner mellom nøytrinotyper gir en nedre grense for verdiene av differansene mellom kvadratene av massene til de tre typene nøytrinoer: $(m_\mu^2 - m_e^2)c^4 > 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ og $(m_\tau^2 - m_e^2)c^4 > 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$. Ut fra dette kan man estimere at det tyngste nøytrinoet må ha en masse $\geq 0,05 \text{ eV}$.

Nøytrinomasse og kosmisk bakgrunnsstråling

Kosmologiske observasjoner gir uavhengige begrensninger på nøytrinomassen. Årsaken til dette er at det ble produsert så mange nøytrinoer like etter Big Bang-eksplosjonen. Til tross for den enorme uttynningen av nøytrinogassen på grunn av universets ekspansjon, er det nå 339 nøytrinoer per cm^3 i universet. Hvis alle nøytrinoene hadde en masse på 0,05 eV, ville de i dag utgjøre 1 % av all massen i universet.

Temperaturen til den kosmiske bakgrunnsgassen av nøytrinoer har sunket fra over 10^6 K da nøytrinogassen oppsto, 2 s etter Big Bang, til bare 2 K nå. Omtrent 6 millioner år etter Big Bang var den termiske energien per nøytrino med masse 0,05 eV i den kosmiske nøytrinogassen like stor som nøytrinoets hvilemasseenergi (se ramme). Omkring denne tiden gikk nøytrinogassen over fra å være "varm" til å bli "kald". Tidspunktet for overgangen fra varm til kald nøytrinogass avhenger av nøytrinoets masse, og overgangen setter et spor i temperaturfluktuasjonene i den kosmiske mikrobølgebakgrunnsstrålingen, som avhenger av når overgangen skjedde. Følgelig inneholder målingene av disse temperaturvariasjonene informasjon om nøytrinomassen. Fra de beste slike data i kombinasjon med andre typer kosmiske data, kan man ut fra den skisserte sammenhengen slutte at massen til det tyngste nøytrinoet må være $< 0,58 \text{ eV}$.

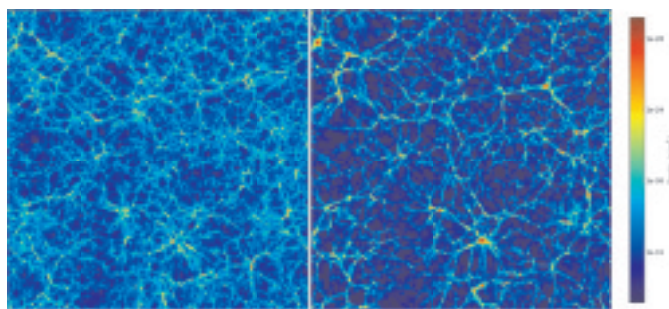
Nøytrinomasse og galaksedannelse

Nøytrinomasser setter sine tydeligste spor i dannelsen av kosmiske strukturer. De store strukturene vi ser i universet i dag ble dannet ved at områder med høyere massetetthet enn universets midlere tetthet trakk seg sammen og kollapset. For enkelhets skyld kan du tenke på en kuleformet massefordeling som trekker seg sammen. Tiden det tar

* Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i Oslo,

** Høgskolen i Oslo og Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

for den å kollapse til en gravitasjonelt bundet struktur er bestemt av tettheten: jo høyere tetthet, desto raskere går det. Dersom nøytrinoene utgjør en høy andel av massen i fordelingen, vil de, fordi de er lette og har høye termiske hastigheter, kunne bevege seg ut av fordelingen før den har kollapset. Da frakter de også masse ut av området og motvirker kollaps. Dette kan vi se i simuleringer av virkningen av nøytrinogass på kosmisk strukturdannelse. Et eksempel er vist i figur 1. Nøytrinoene beveger seg så raskt at de hindrer gravitasjonskollaps selv etter at nøytrinogassen er blitt ikke-relativistisk. Derfor bidrar en gass av massive nøytrinoer til å minske tetthetskontrastene. Virkningen avhenger av nøytrinoenes masse. Følgelig kan studier av hvordan massefordelingen i universet utvikler seg i løpet av noen milliarder år gi informasjon om nøytrinomassene.



Figur 1. Sammenlikning av tetthetsfordelingen i universet med (til venstre) og uten (til høyre) massive nøytrinoer.⁽⁴⁾ Sidekanalene på figuren representerer en kosmisk avstand på flere milliarder lysår. Figuren er et resultat av simuleringer. Mønsteret viser tettheten av vanlig (baryonisk) materie etter noen milliarder år med samme begynnelsesbetingelser, til venstre med er nøytrinomasse på $1,9 \text{ eV}$ og til høyre uten massive nøytrinoer. Den urealistisk store nøytrinomassen ble valgt for å gjøre virkningen av nøytrinomassen tydeligere. Det er større tetthetskontraster uten nøytrinoer enn med.

Nye resultater

Den 12. juli 2010 hadde S. A. Thomas, F. B. Abdalla og O. Lahav en artikkel i *Physical Review Letters* der de rapporterte resultater av nye undersøkelser hvor slike studier er gjort med bedre observasjonsdata enn tidligere.⁽⁴⁾ Dataene ble hentet fra *Sloan Digital Sky Survey* som er et observasjonsprogram der det ble laget tredimensjonale kart med over 930 000 galakser. Disse ble brukt til å bestemme den kosmiske tetthetsfordelingens utvikling de siste

milliarder årene. Dette er mulig på grunn av den gunstige omstendighet at når vi ser utover i universet, ser vi bakover i tid. Årsaken er at vi ser et objekt slik det var da det sendte ut lyset vi mottar, og sendertidspunktet er tidligere jo lenger vekk objektet er.

Analysene av disse dataene ga en øvre grense for nøytrinomassen på $0,28 \text{ eV}$ med 95 % sikkerhet. Dette resultatet er et oppmuntrende skritt i retning av å bestemme nøytrinoets masse – ikke bare øvre og nedre grense for hvor stor den er. Med forbedret observasjonsutstyr håper forskerne i løpet av ti år å vite hvor stor masse nøytrinoene har.

Energi og temperatur

Benevnningen eV (elektronvolt) er en energienhet. Det er endringen i potensiell energi for en partikkel (for eksempel et elektron) med en elementærladning $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ i et elektrisk felt når elektronet forflytter seg mellom to punkter med en spenning på 1 V mellom dem. Følgelig er $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Dersom en oppgir massen til en partikkel i eV, tenker en på energien gitt ved Einsteins formel, $E = mc^2$. Den termiske energien til en ikke-relativistisk partikkel i en gass med temperatur T er $E = (3/2) kT$, der $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ er boltzmannkonstanten. Energien per grad er følgelig $E_1 = 1,5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} = 12,9 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$. Dette betyr at i en gass av nøytrinoer med "masse" lik $0,05 \text{ eV}$, er den termiske energien lik nøytrinoets "hvilemasse-energi" dersom temperaturen er $T_m = (0,05/12,9 \cdot 10^{-5}) \text{ K} = 387 \text{ K}$. Hvis $T \gg T_m$ er den termiske energien mye større enn "hvilemasse-energien". Gassen sies da å være relativistisk og har omtrent samme gravitasjonsvirkning som elektromagnetisk stråling. Hvis $T \ll T_m$, er gassen ikke-relativistisk, eller kald, og har omtrent samme gravitasjonsvirkning som støv, der en kan se bort fra trykket.

Den kosmiske nøytrinogassen har nå en temperatur på bare $1,95 \text{ K}$. Mens universet ble gjennom-siktig for den kosmiske mikrobølgestrålingen omtrent 380 000 år etter Big Bang, ble det gjennomsiktig for nøytrinogassen allerede 2 s etter Big Bang. Da var nøytrinogassen relativistisk. Observasjoner tyder på at vi bor i et såkalt "flatt" univers med omtrent 30 % kald materie og 70 % vakuumenergi. I et slikt univers var temperaturen til nøytrinogassen sunket til 387 K omtrent 6 millioner år etter Big Bang.

Referanser

1. Per Osland og Geir Vigdel: *Har nøytrinoene likevel masse?* FFV 60. årg. Nr. 4, 99–102 (1998)

2. Øyvind Grøn: *Det solare nøytrinoproblemet løst*. FFV 63. årg. Nr. 4, 111–112 (2001)
3. Øystein Elgarøy: *Universet som nøytrinovekt: En ny øvre grense for nøytrinomassen*. FFV 64. årg. Nr. 2, 48–51 (2002)
4. J. Lesgourgues: *Galaxies weigh in on neutrinos*. Physics 3, 57 (2010)

∞

Hva skjer

Vellykket år for LHC

De fleste av FFVs lesere har kanskje fått med seg at den meget medieomtalte og lovende oppstarten av LHC (*Large Hadron Collider*) ved CERN den 10. september 2008, ikke førte til annet enn en nærmest eksplosjonsartet ulykke i det supraledeende magnet-systemet ni dager senere.^(1,2) Med denne notisen ønsker jeg både å kommentere ulykken og informere om den svært vellykkede gjenoppstarten av LHC. Dette har i løpet av 2010 ført til resultater som har generert mye entusiasme.

Ulykken i LHC inntraff i akseleratortunnelen, et område som selvsagt alltid er avstengt under kjøring av maskinen. De enorme elektriske strømmene i LHCs avbøyningsmagneter transporteres i supraledeende kabler. Flytende helium benyttes for å kjøle ned kablene i magnetene. Temperaturen skal holde 1,9 K når maskinen kjører. Hvis temperaturen stiger over superledernes kritiske temperatur, så vil kablene hurtig gå over til å ha normal ohmsk resistans, med en varmeutvikling som ikke kan håndteres av kjølesystemet. Det flytende heliumet vil ved 4,2 K gå over i gassform og ekspandere voldsomt.

Magnetene og alle andre elementer i systemet, var selvsagt utformet for å forhindre en slik oppvarming. Alt utstyr hadde gjennomgått omfattende tester for å etterprøve spesifikasjonene. Dessuten fantes også sikkerhetssystemer for å oppdage og gjennomføre tiltak dersom noe uforutsett skulle inntruffe.

Likevel fikk man en oppvarming til over kritisk temperatur i en sveis i kablingen mellom to dipolmagneter. Ekspansjonen av heliumgassen var så rask at de installerte sikkerhetsventilene ikke hadde kapasitet til å avlaste trykkutviklingen i tilstrekke-

lig grad. Isteden fikk man forrykninger av en hel rekke dipolmagneter, hull på kjølerør og mange andre skader. Dermed var omfattende reparasjoner nødvendige for å få LHC opp å gå igjen.

Undersøkelsene etter ulykken viste at sveisene mellom de 1232 dipolmagnetene er svake punkter i LHC. Omfattende arbeid vil være nødvendig for å få forbedret alle disse. Imidlertid har man lært å overvåke temperaturen i systemet så godt at man kan se farlige irregulariteter tidnok for å hindre at det oppstår ukontrollert oppvarming. Man følte seg trygg på at LHC kunne operere ved halvparten av maksimalenergien uten fare for sikkerheten. Derfor ble strategien å få LHC opp å kjøre ved en massesenterenergi på 7 TeV ($7 \cdot 10^{12}$ eV) så raskt som mulig, og vente noen år med oppgraderingen av sveisepunktene.

LHC startet opp igjen 8. november 2009, og har operert ved en massesenterenergi på 7 TeV siden 30. mars 2010.

Siden da har LHC levert proton–protonkollisjoner med stadig økende intensitet. På slutten av 2010 ble det også levert kollisjoner mellom blykjerner ved en energi på 2,76 TeV pr. nukleonpar.

Resultatene som hittil har vakt mest oppsikt har kommet i bly–blykollisjoner. Her har alle de tre store LHC-eksperimentene (ALICE, ATLAS og CMS) funnet signaturer for kvark–gluonplasma som i kjerne- og partikkelfysikernes øyne kan kalles spektakulære! LHC-data vil altså muliggjøre detaljerte studier av fenomenet kvark–gluonplasma i årene som kommer.

Hva med Higgs-partikkelen? I det mest aktuelle masseområdet for Standardmodellens Higgs-partikkel (mellom 114 og 150 GeV/c²) så har LHC faktisk produsert nok proton–protonkollisjoner til at et hundretalls Higgs-partikler kan ha blitt laget!

Hvorfor har vi ikke sett disse? Det er flere grunner til dette. For det første har de aller fleste av Higgs-partiklene (hvis de fins) henfalt til slutt-tilstander som vi ikke kan skille fra de store mengdene av partikler som produseres. Signaturer for Higgs vil være i henfallskanaler som er nokså sjeldne. Selv i disse kanalene må man gjennom utvalgsprosedyrer som kan ha forholdsvis lav effektivitet. Videre må det akkumuleres en del statistikk i disse kanalene før vi kan si at vi ser noe annet enn de kjente prosessene.

Målet for LHC i 2011 er at eksperimentene skal akkumulere nok data til å kunne si noe meningsfullt om Higgs-partikkelen i masseområdet nevnt ovenfor. Man skal med andre ord ha nok data til å kunne

se tydelige signaturer dersom denne partikkelen eksisterer slik Standardmodellen forutsier. 2011 blir dermed et særdeles spennende år for oss som arbeider i LHC-eksperimentene.

Inntil nylig var 2012 avsatt til oppgradering av sveisene nevnt ovenfor, slik at man kan komme opp i kollisjoner ved 14 TeV som planlagt. Imidlertid er det nå (31/1-2011) bestemt at det også skal samles data i 2012, på "halv" massesenterenergi (7 TeV), før den store pausen for oppgradering. Denne beslutningen ble tatt etter en workshop i Chamonix, der alle momenter ble vurdert av et representativt utvalg av fysikere og akselerator eksperter.

Referanser

1. Anna Lipniacka: *LHC, en lykt inn i mørk materie*. Fra Fysikkens Verden, **68**, Nr. 1, 6-12 (2006)
2. H. Sandaker: *Oppstart av LHC, verdens største partikkelakselerator*. Fra Fysikkens Verden, **70**, Nr. 4, 115 (2008)

Bjarne Stugu

∞

Bokomtaler

Graham Farmelo: *The Strangest Man: The Hidden life of Paul Dirac, Quantum Genius*. Faber and Faber Limited 2009, ISBN 978-0-571-22278-0 (539 sider), 225 kr.

En utmerket Dirac-biografi

Mens det foreligger en mengde biografier av A. Einstein (jf Henning Knutsen, FFV nr. 1, 2010, s. 27) kjenner jeg bare til én som i sin helhet er viet *Paul Adrien Maurice Dirac* (Helge Kragh: "*Dirac: A Scientific Biography*," ISBN-10: 0521017564). Dette er for så vidt helt i Diracs ånd; han overveide sogar å takke nei til Nobelprisen, men ble frarådet dette av Rutherford, idet det sannsynligvis ville vekke mer oppsikt enn om han aksepterte. I hans hjemby Bristol, er hans bysbarn og medelev på Bishop Road School, Cary Grant, mer kjent og priset. Når Einstein er mer berømt enn Dirac – som fysikere spilte de i samme liga – er det spøkefullt hevdet at det skyldes at $E = mc^2$ er

lettere å trykke på en T-skjorte enn Diracs relativistiske Schrödingerlikning med tre sett "brackets" og det halve greske alfabetet. Apropos "brackets": Dirac fant som kjent opp bracket-notasjonen ($\langle bra | ket \rangle$). Etter et aftensmåltid på St. John's, i Cambridge, under en hyggelig passiar mellom "dons" bryter Dirac plutselig inn med fire ord: "*I invented the bra*," uten å foretrekke en mine. På spørsmål om nærmere forklaring falt han tilbake til sin habituelle taushet. Dirac var opplært til ikke å starte en setning med mindre han visste hvordan den skulle avsluttes. Det blir ikke mye "*small-talk*" av det.

Jeg regner med at de som leser denne spalte er vel kjent med Diracs "bragder udi fysikken" og lar det ligge. Nevnes skal bare *monopoler*, et fenomen som først ble lansert av *Pierre Curie* i 1894, men som senere ble tatt opp av Dirac i 1931. Dirac viste at deres eksistens er forenlig med Maxwells likninger bare hvis elektrisk ladning er kvantisert, hvilket jo er tilfelle. Forsøk på å påvise monopoler har dog vært mislykket. Den senere tid har monopoler fått fornyet interesse i forbindelse med strengteori. Fremdeles holder man muligheten for deres eksistens åpen. For sitt arbeid med monopoler fikk Dirac oppnavnet "Monopoleon" av Wolfgang Pauli.

Diracs barne- og ungdomsår var ikke spesielt lykkelige. Han vokste opp i en dysfunksjonell familie. Hans far, *Charles*, opprinnelig fra Sveits, endte etter intermesso i hhv. München og Paris, opp i Bristol. Her ble han *Head of Modern Languages* på Merchant Venturers School i 1896. Etter kort tid møtte han sin 12 år yngre fremtidige hustru, *Florence Holten*. Sammen fikk de tre barn: Réginald Charles *Felix* (1900), *Paul* Adrien Maurice (1902) og *Béatrice (Betty)* Isabelle Marguerite Walla (1906). Far, Charles, var meget autoritær og regjerte familien med hard hånd. Han ga sine barn lite kjærlighet. Ritualet rundt måltidene var spesielle. Far og Paul spiste alene i spisestuen, mens mor og de to andre barna spiste på kjøkkenet. Under måltidene ble Paul tvunget til å snakke fransk, hvilket han sterkt mislikte. Dette kom også til å prege hans forhold til mat senere i livet. Paul kom aldri godt overens med sin far. Til seremonien i forbindelse med nobelprisutdelingen i Stockholm i 1933, inviterte han kun sin mor. Etter sin fars død i 1936, uttalte han: "*I feel much more free now; I feel I am my own master*."

Felix slapp heller ikke unna uten "arr i sjelen". Han tok sitt liv med gift i mars 1925.

Paul var som nevnt svært fåmælt. I den grad

han svarte på spørsmål var han svært økonomisk med ord: "Ja", "Nei" og "Vet ikke". Hvis han ble avbrutt under en forelesning av noen som ikke hang med, gjentok han ordrett siste setning.

Det store spørsmålet er: *Var Paul Dirac autist?* Kriterier for autisme er: 1) Forstyrret kommunikasjonsmønster og sosialt samspill med andre, 2) begrensede og stereotype interesser og aktiviteter, 3) forstyrrelsen er gjennomgripende og preger utfoldelsen i alle situasjoner, 4) forstyrrelsen viser seg i barneårene og 5) forstyrrelsen finnes på alle nivåer av intellektuell funksjon. Ut ifra dette kan man neppe konkludere med at Dirac var autist. Når det er sagt, skal det imidlertid nevnes at det finnes flere varianter av autisme. Nevnes kan høyt fungerende autisme, Asperger og Savant-syndrom (jf Raymond Babbitt i filmen "*Rain man*"). Det er en kjensgjerning at mye av Diracs oppførsel i hans voksne liv hadde autistiske trekk, og alle de morsomme "Dirac-historier" spiller nettopp på dette. Viten rundt autisme øker stadig, og det er nå holdepunkter for at det skyldes strukturelle og funksjonelle forandringer i hjernen, ironisk nok avdekket ved hjelp av PET (*Positron EmisjonsTomografi*), altså ved hjelp av nettopp den partikkelen Dirac forutsa.

Utrolig nok ble Dirac gift. Han giftet seg med Eugene Wigners søster, *Margit*, bedre kjent som *Manci*. Manci hadde to barn fra et tidligere forhold. Sammen fikk Paul og Manci to døtre, *Mary* og *Monica*. Ekteskapet var ikke spesielt lykkelig. Manci var opprinnelig fra Ungarn. Interessant i så måte er at en stor andel av autistiske menn er gift med utenlandske kvinner, muligens fordi disse har høyere toleranse for avvikende adferd hos menn fra andre kulturer enn fra sin egen. Kanskje kan vi konkludere med at Dirac hadde et "snev" av Asperger.

Dirac var mest kreativ i perioden 1925 til 1933. Hans ledestjerne var "*mathematical beauty*" – "*A physical law must possess mathematical beauty.*" Dette brakte ham nok litt på avveie. I likhet med Einstein kom det lite ut av hans virke etter fylte 40 år. Einstein mislyktes i å forene gravitasjon og kvantemekanikk; Dirac mislyktes i å bli kvitt renormalisering.

Forfatteren av denne boken, Farmelo, var tidligere teoretisk fysiker, og er nå Senior Research Fellow ved London Science Museum. I arbeidet med denne boken må det være lagt ned betydelig "*research*". Boken er strengt kronologisk bygd opp og lett å finne frem i. Man kan følge Diracs gjøren og laden nærmest fra måned til måned. Man får også et innsyn i samtiden. En for meg ny og trist tildragelse

var Paul Ehrenfests drap på sin egen mongoloide sønn og eget selvmord.

Boken er innsiktsfull og underholdende og kan sterkt anbefales.

Jan Folkvard Evensen

∞

Roger Penrose: *Cycles of Time. An Extraordinary New View of the Universe*. The Bodley Head, 2010. ISBN 9780224080361 (288 sider), £ 25,00.

Går all verden rundt i ring?

Universets skjebne ligger mange relativitetsteoretikere tungt på hjertet. En av de fremste representanter for de utvalgte som sysler med den slags anvendt matematikk, er Roger Penrose. Men han nøyer seg ikke med å være en av de fremste grunnforskere innenfor gravitasjonsteori og kvantefysikk. Han er også en eminent forfatter av populærvitenskap. Hans siste bidrag bærer tittelen "*Cycles of Time. An Extraordinary New View of the Universe*". Jeg har sett fram til denne boka, for jeg ble både fengslet og bestyrtet da Penrose for første gang gikk offentlig ut med disse ideene sine. Det skjedde ved den store GRG18-konferansen (*18th International Conference on General Relativity and Gravitation*) i Sidney i 2007. Da holdt Penrose foredrag "noen til ergrelse, andre til trøst". Jeg tør nok hevde at flere enn meg var rystet og forferdet, fascinert og fortryllet da forestillingen var slutt. For Roger Penrose er en forførende god foredragsholder.

Kongstanken til Penrose er at universet går i en slags syklus der vårt univers i ei uendelig fjern framtid faktisk identifiseres med selveste Big Bang. Derfor ville jeg gjerne ha anledning til med sunn skepsis å studere disse spekulative tankene i eget tempo og i stor detalj. Nå er studiet fullført, og utbyttet er solid. Men jeg må nok innrømme at lærdommen ikke var lettkjøpt. Hver side krevde omtanke og konsentrasjon. Dette er ikke populærvitenskap for hvermannen som kun er nysgjerrig og intelligent.

Penrose framhever entropi-begrepet som særdeles sentralt for kosmologien. Her understrekes betydningen av at materien søker størst mulig uorden på forskjellig vis når den blir overlatt til seg selv. En gass som først er konsentrert til en liten del av en beholder, vil spre seg jevnt ut i hele beholderen når den slippes løs. Men om tyngdekraften

får virke mellom de materielle objektene i en beholder, vil gravitasjonen fremskaffe fortetninger i materien. Deretter vil en snøballeffekt sørge for at klumpene stadig blir større, men færre.

Både galaksefordelingen og særlig den kosmiske bakgrunnstrålingen viser at universet i tidenes morgen var meget ensartet. Derfor var det kosmologiske prinsipp, der ingen plass og ingen retning i universet utmerker seg, et naturlig valg for kosmologiske betraktninger og beregninger. Men Penrose slår fast at denne tilstanden er særdeles spesiell. Sannsynligheten for at vi rent tilfeldig skal befinne oss i et sådant univers er $1/10^{10^{124}}$.

Verden ville vært ganske annerledes om gravitasjonen hadde fått velge fritt og tilfeldig når det gjelder universets oppstandelse. Riktignok hevder gjengs kosmologi at universet utvidet seg eksponentielt en stakket stund etter sin fødsel, og da ble alle kaotiske ujevnheter glattet ut. Men Penrose påpeker nådeløst at denne såkalte inflasjonen ikke holder som forklaring. Termodynamikkens 2. lov om utjevning ville ikke eksistert om ikke universet startet i en ekstraordinær tilstand når det gjelder orden. Inflasjonen ville aldri finne sted i et kaotisk univers.

Penrose utnytter de såkalte konforme avbildninger for hva de er verdt. Dette er funksjoner som kan strekke og krympe lengder forskjellig fra sted til sted, mens vinklene likevel blir bevart. Her kan hele universets totale struktur av tid og rom framkomme ganske oversiktlig i et enkelt diagram. For lesere som er ukjente med dette stoffet og ikke synes at det umiddelbart er lettfattelig, vil jeg anbefale den boka der jeg først møtte disse Penrose-diagrammene. Det var i boka *"The Cosmic Frontiers of General Relativity"* av avdøde William J. Kaufmann, III. Hans tidlige bortgang anser jeg for et stort tap, for han var en ypperlig popularisator.

Noe skikkelig kvantitativt mål for den uorden gravitasjonsvirkning kan skape, er ennå ikke tilgjengelig for fysikerne. Men den teoretiske forskning til Jacob Bekenstein og Stephen Hawking har i alle fall gitt oss entropien for svarte hull. Hawking sin store bragd var å finne at svarte hull fordamper. Det er viktig å merke seg at denne prosessen ikke bryter med 2. hovedsetning. Nå domineres entropien i universet av den som ligger i svarte hull ved galaksentrene. Mens universet stadig utvider seg, vil alle disse hullene antagelig til slutt forsvinne i stråling. Dette blir endelig den totalt dominerende form for energi, og for fotoner eksisterer ikke tiden. Før deres egen indre klokke har rukket å slå et eneste slag, befinner de seg ved verdens ende.

Her kommer så den fryktløse spekulasjon fra Penrose: Det eneste som skiller den fjerneste framtidige tilstand i universet fra Big Bang, er en veldig forandring av skala. Men skalaforandring har ingen betydning for entropi. Penrose identifiserer evigheten i framtida med skapelsen og oppnår et merkverdig univers, som biter seg selv i halen.

Penrose er ganske uforferdet og avslører helt freidig og ærlig at han ikke deler holdningen til flertallet av fysikerne når det gjelder synet på kvantefysikken. I motsetning til Hawking mener han at informasjon faktisk vil gå tapt når materie faller inn i svarte hull. Han er på linje med selveste Einstein som alltid hevdet at kvantemekanikken bare var en foreløpig teori på vegen mot sannheten. Kan kvantefysikkens mystiske kollaps av bølgefunksjonen beskrives av en framtidig kvantegravitasjon sine lover?

For et ordentlig rart univers vi befinner oss i! Den som leser boka til Penrose, får se.

Henning Knutsen

∞

Stephen Hawking og Leonard Mlodinow: *The Grand Design*. Bantam Press, 2010, ISBN 9780593058299 (198 sider), USD 14,95.

The Grand Design: bommer på hoppkanten

Den verdensberømte og sterkt handikappede engelske fysikeren Stephen Hawking (f. 1942) og hans amerikanske fysikerkollega Leonard Mlodinow (f. 1954) har skrevet boka *"The Grand Design"*. Hawking gjorde stor suksess i 1988 med sin populære bok *"A Brief History of Time"*, som solgte i over 10 millioner eksemplarer. Forventningene til den siste boka var store, også hos undertegnede. Jeg sto på venteliste hos Norli i flere uker for å få boka, og nærmest småløp til bokhandelen da det tikket inn en sms om at boka var kommet.

De fem første kapitlene er en ganske velskrevet versjon av fysikkens historie og de ulike trappe-trinnene i vår erkjennelse av den fysiske virkeligheten rundt oss. I kapittel 1 hører vi om de tre av Arkimedes' lover som fortsatt står støtt i dag: loven om oppdrift, vektstangprinsippet, og refleksjonsloven for lys. Og vi får nye, ukjente detaljer, for eksempel om Kepler som trodde at planetene hadde en sanselig bevissthet og fulgte bevegelseslover som var *"grasped by their mind"*. Kapittel 3 diskuterer virkeligheten (*reality*), og setter opp fire

greie krav til hva som kjennetegner en god modell for virkeligheten. Kapittel 4 og kapittel 5 gir en grunnleggende innføring i kvantemekanikken og relativitetsteorien. Kapittel 5 forklarer også standardmodellen for elementærpartiklene, og letingen etter en *Grand Unified Theory* (GUT).

Disse første kapitlene er skrevet med en slentrende undertone som til tider kan være ganske underholdende. Eksempel fra side 92, om mulig liv utviklet på andre planeter: *"Aliens who evolved in the presence of x-rays might have a nice career in airport security."*

Etter denne systematiske oppbyggingen hadde jeg store forventninger til de tre siste kapitlene. Men der bråstopper på en måte boka, akkurat på hoppkanten. Boka angir M-teorien og Multiverset, bestående av ca. 10^{500} alternative universer, som en *Løsning på Alt*. Men dette er meget tynt og ufullstendig forklart. Boka prøver seg på en historisk analogi: Menneskene trodde jorda var unik og verdens midtpunkt, inntil man kunne observere planetenes gang rundt sola. Senere trodde man at sola og Melkeveien var spesielle, inntil man tydelig kunne observere utallige andre stjerner enn sola og utallige andre galakser enn Melkeveien. I analogi med dette fremmer forfatterne den tesen at vårt univers er ett av fryktelig mange. Men analogien halter fordi vi slett ikke har observert noen av de andre universene, selv om det finnes enkelte indisier.

Istedenfor å oppsummere og konkludere i kapittel 8, bruker forfatterne det meste av dette siste kapitlet på en lang og kronglete analogi med dataspillet *"The Game of Life"*. For meg fungerer dette overhodet ikke, og boka ender med full forvirring. Så i sum: Boka holder ikke hva den lover, verken for fysikere eller legfolk.

Hugo Parr

∞

Nytt fra NFS

Nye medlemmer 22. nov. 2010

Alne, Katrine; Narvik vgs, 8512 Narvik

Alsaker, Øystein; Bergen Katedralskole, Kong Oscarsgt. 36, 5017 Bergen

Andersson, Martin; Skedsmo vgs, Vestbygata 61, 2003 Lillestrøm

Apelseth, Ole Kristian; Bergen Handelsgymnasium, Kalfarveien 2, 5018 Bergen

Bjerkvik, Aslak; Trondheim Katedralskole, Munkegata 8, 7013 Trondheim

Bjørnsen, Kjetil; Bardufoss Høgtun vgs, Sundlia, 9325 Bardufoss

Blom, Kjartan; Bjørgvin vgs, Strandgaten 195, 5024 Bergen

Boganes, Karl; Sola vgs, Åsnutveien 51, 4050 Sola

Bomark, Nils-Erik; Inst. for fysikk og teknologi, Pb 7803, 5020 Bergen

Borvik, Ruth; Hamar Katedralskole, Ringgt. 235, 2305 Hamar

Breivik, Åse Bøylestad; Meløy vgs, Spildervika 6, 8150 Ørnes

Brown, Robert; Bergen Handelsgymnasium, Kalfarveien 2, 5018 Bergen

Carlsen, Dag Vartdal; Fana Gymnas, Pb 414, 5853 Bergen

Ervik, Stine; Saltdal vgs, Fredheimveien 15, 8250 Rognan

Frontéri, Paul Anthony; Inst. for fysikk og teknologi, Pb 7803, 5020 Bergen

Furu, Nic; Ytre Namdal vgs, Hansvikveien 3A, 7900 Rørvik

Gaustad, Peder Anders; Strinda vgs, Harald Bothners vei 21, 7052 Trondheim

Hammer, Andreas; Danielsen intensivgymnas, Nygaten 9, 5017 Bergen

Hatlevik, Caspar Wangensten; Olsvikåsen vgs, Olsvikåsen 152, 5184 Olsvik

Hauge, Sigmund; Skeisvang vgs, Rogalandsgt. 197, 5518 Haugesund

Haugen, Lars; Voss Gymnas, Gymnasvegen 12, 5700 Voss

Heer, Joël; Meråker vgs, 7530 Meråker

Heggstad, Jon Egil; Sotra vgs, 5353 Straume

Hellesøy, Andreas; Bergen Katedralskole, Kong Oscarsgt. 36, 5017 Bergen

Helseth, Hans Lie; Asker vgs, Fredtunveien 81, 1386 Asker

Hjørnevik, Jon Olav; Greåker vgs, Pb 130, 1720 Greåker

Husebø, Jan; Olsvikåsen vgs, Olsvikåsen 152, 5184 Olsvik

Hynne, Borgny; Flora vgs, Pb 127, 6901 Florø

Häger, Maria; Narvik vgs, Villaveien 595, 8512 Narvik

Jamroz, Piotr; Stange vgs, Ljøstadvegen 11, 2335 Stange

Josefsen, Roger; Re vgs, Bergsåsen, 3175 Ramnes

Kamben, Robert; Kongsbakken vgs, Pb 355, 9254 Tromsø

Landstad, Mona Methi; Fredrik II vgs, Merkurveien 2, 1617 Fredrikstad

Larsen, Arild; Drottningsborg vgs, Drottningsborg 20, 4885 Grimstad

Larsen, Lars Arve; Orkdal vgs, Follo, 7300 Orkanger

Langelandsvik, Rannveig; Haugesund toppidrettsgymnas, Mjåsundveien 30, 5518 Haugesund

Lie, Marianne Kjøde; Sandsli vgs, Sandslimarka 51, 5254 Sandsli

Lysebo, Marius; Høgskolen i Oslo, Pb 4, St. Olavs plass, 0130 Oslo

Moreau, Francois; Vardø vgs, Pb 290, 9951 Vardø

Nordsveen, Ole Kristian; Ullern vgs, Ullernchaussen 56, 0379 Oslo

Nygaard, Christoffer; Sola vgs, Åsnutveien 51, 4050 Sola

Nylund, Jolanta H.; Akademiet Drammen, Skogliveien 4, 3047 Drammen

Olausen, Anita; Fana Gymnas, Pb 414, 5853 Bergen

Olsen, Anke; St. Olav vgs, Jens Zetlitzgt. 33, 4008 Stavanger

Omland, Karen; Byåsen vgs, Selsbakkveien 34, 7027 Trondheim

Salen, Eivind; Bjørgvin vgs, Strandgaten 191, 5004 Bergen

Sandvei, Geir; Bodin vgs, Mørkvedtråkket 2, 8021 Bodø

Schakenda, Jeanette A.; Nord-Gudbrandsdal vgs, Avd. Lom, 5686 Lom

Schmidt, Sebastian; Oppdal vgs, 7340 Oppdal

Skålvik, Astrid Marie; Inst. for fysikk og teknologi, Pb 7803, 5020 Bergen

Steffensen, Kristian J.; Røyken vgs, Jon Leiras vei 30, 3440 Røyken

Strømme, Magne; Vennesla vgs, 4700 Vennesla

Sve, Rannveig Noraberg; Kristelig Gymnasium, Homansbakken 2, 0352 Oslo

Sørby, Simen André; Oppgård vgs, Bregneveien 2, 1412 Sofiemyr

Trondsen, Karoline; St. Olavs vgs, Jens Zetlitz gate 33, 4008 Stavanger

Tveiten, Silje Stakland; Vennesla vgs, Pb 158, 4703 Vennesla

Ursin, Bjarte; Fana Gymnas, Pb 414, Nestun, 5853 Bergen

Vassbotn, Per; Høgskulen i Sogn og Fjordane, Pb 523, 6803 Førde

Vågø, Silje; Ytre Namdal vgs, Hansvikvegen 3A, 7900 Rørvik

Wang, Bodil Synnøve; Narvik vgs, Villaveien 595, 8512 Narvik

Williams, Gary; Instiute of Physics, 5 The Holmes, UK, LD2 3EQ

Aagenæs, Knut Harald; Drottningborg vgs, Drottningborg 20, 4885 Grimstad

Ølfarnes, Per; Lundeneset vgs, 5582 Ålensvåg

Aalesen, Tor E.; Sandvika vgs, Elias Smiths vei 15, 1357 Sandvika

Aanesland, Ina; Finnfjordbotn vgs, Skoleveien 55, 9300 Finnsnes

∞

Trim i FFV

Løsning på FFVT 4/10

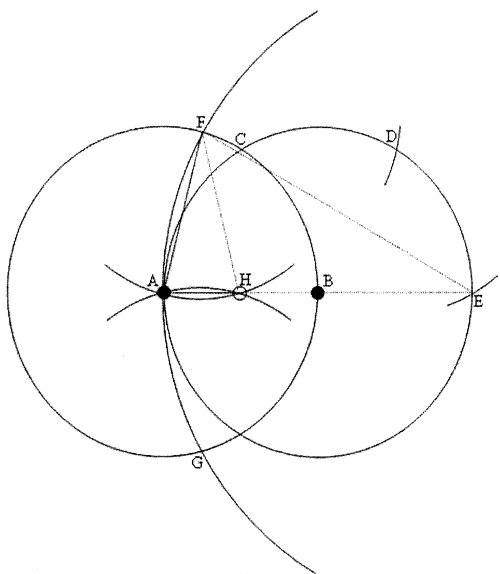
Halvering av en gitt rett linje med passer

I sin bok "*La Geometria del Compasso*" fra 1797 (kan lastes ned på italiensk fra <http://www.archive.org/details/lageometriadelc01mascgoog>), presenterte Mascheroni fem ulike løsninger på oppgaven. Den enkleste løsningen er.

De oppgitte punktene er A og B i figuren. Slå to sirkler med A og B som sentra, og radius (r) lik avstanden mellom A og B . Sirklene krysser hverandre i to punkter. Kall det ene punktet C . Bruk passereren til å avsette punktet D i avstand r fra C , og E i avstand r fra D . (Den øverste halvdel av sirkelen omkring B er nå delt i tre like store buer, og E ligger på forlengelsen av linjen AB .) Avstanden AE må være den dobbelte av avstanden AB . Slå en sirkel med E som sentrum og radius lik AE . Den krysser sirkelen omkring A i punktene F og G . Til slutt slås sirkler omkring F og G med r som radius. Disse

sirklene krysser hverandre i A og H . H er midt mellom A og B , og er derfor problemets løsning.

Dette ses enkelt ved å se på de to likebente trekantene AFH og AFE (prikket linje). De har FAE som felles vinkel, og er derfor kongruente. AE er dobbelt så lang som AF . Derfor må AH være halvparten av AB (og AF).



FFVT 1/11

Hvilken farge har hatten min?

Noen logiske oppgaver kan kalles "hattefargeproblemer". En av de mest kjente er:

Tre menn, A , B og C , er alle rimelig oppegående mentalt sett. De har tørkler foran øynene og ser ingen ting når de får hatter plassert på sine hoder. De får vite at hattene er enten røde eller grønne. Tørklene fjernes, og de tre får to instruksjoner:

1) Å rekke en hånd i været hvis de ser minst én rød hatt.

2) Å forlate rommet så snart en av dem er sikker på fargen på sin hatt.

Alle hattene er røde, så alle ser minst én rød hatt, og alle rekker en hånd i været. Etter et par minutter går den mest tenksomme, C , ut av rommet. Hvordan kunne han vite fargen på hatten sin?

∞

Husk å melde
adresseforandring!



GOD
PÅSKE!



Retningslinjer for forfattere

FRA FYSIKKENS VERDEN utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høyskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og biblioteker ved videregående skoler. Bladet gis ut fire ganger i året, i mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er f.t. 1900.

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

MANUSKRIPTER leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiserbar. De skal leveres elektronisk, helst som e-post. Dersom formatet ikke er ren tekst (helst LATEX) eller i Microsoft Word, må det merkes med hvilket tekstbehandlingsprogram som er brukt. Under alle omstendigheter må redaksjonen kunne forandre teksten direkte.

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

SMÅSTYKKER: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møtereferater etc. mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Bokkronikker kan være noe lengre. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

ILLUSTRASJONER er en viktig del av en artikkel. Legg derfor mye omtanke i figurene. All tekst skal være på norsk. Figurene vil som regel bli trykt i svart/hvitt med en spaltebredde på 8,6 cm. Av økonomiske grunner vil bilder bare i spesielle tilfeller trykkes i farger. Figurene bør være på elektronisk form i et standard grafisk format og med god oppløsning. Vi kan unntaksvis motta figurer eller bilder som urastrerte kopier. Figurer og tabeller skal være referert i den løpende teksten, og ønsket plassering må markeres. Hvis forfatterne selv ikke har laget figurene, skal opprinnelsen oppgis. Forfatterne må selv innhente tillatelse til bruk av slike illustrasjoner.

FORSIDEBILDER velges som regel i tilknytning til en av artiklene. De må være teknisk gode og kan trykkes i farger.

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

Norsk Fysisk Selskap

STYRE

President:

Professor Per Osland

Inst. for fysikk og teknologi, UiB

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

Visepresident:

Professor Åshild Fredriksen

Inst. for fysikk og teknologi, UiT

e-post: ashild.fredriksen@uit.no

Styremedlemmer:

Professor Jon Otto Fossum

Institutt for fysikk, NTNU

Professor Håvard Helstrup

Høgskolen i Bergen

Professor Ola Hunderi

Institutt for fysikk, NTNU

Postdoktor Eirik Malinen

Radiumhospitalet, Oslo

Førsteaman. Kjartan Olafsson

Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Professor Jon Samseth

Høgskolen i Akershus, Lillestrøm

Lektor Morten Trudeng

Asker videregående skole

Selskapets sekretær:

Cand.scient. Øyvind Svensen

Inst. for fysikk og teknologi, UiB,

Allégaten 55, 5007 Bergen.

Tlf: 55 58 28 78, Faks: 55 58 94 40

e-post: oyvind.svensen@ift.uib.no

Bankgiro: 7878.06.03258

Fra Fysikkens Verden

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn

Høgskolen i Oslo og Fysisk inst. UiO

Stipendiat Marit Sandstad

Inst. for teoretisk astrofysikk, UiO

Redaksjonssekretær:

Karl Måseide

Fysisk institutt, UiO

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia

Institutt for fysikk, UiT

Professor Per Chr. Hemmer

Institutt for fysikk, NTNU

Førstelektor Ellen K. Henriksen,

Fysisk institutt, UiO

Professor Bjarne Stugu

Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Ekspedisjonens adresse:

Fra Fysikkens Verden

Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,

Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.

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

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

e-post: oyvind.gron@iu.hio.no

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

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