
Tidsskrift for Fysik og Astronomi 28. årgang



- KAN VI BYGGE EN SOL PÅ JORDEN?
- THORIUM ELLER: HVORDAN JEG LÆRTE AT HOLDE OP MED AT BEKYMRE MIG OG AT ELSKE SALTSMELTEREAKTORER
- PROTONTERAPIENS FYSIK – EN KORT UDLEDNING AF BRAGGKURVEN OG DENS TOP
- DA DANMARK BEGRAVEDE TYCHO BRAHE (1602)
- EN KVANTEMEKANISK EVENTYRFE
- KUNST I VIDENSKAB – KONKURRENCE

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk
Facebook  : KVANT.fysiktidsskrift
ISSN (trykt) : 0905-8893
ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab,
Dansk Fysisk Selskab,
Dansk Geofysisk Forening,
Selskabet for Naturlærers Udbredelse,

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),
Christianshavns Gymnasium
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Dorte Olesen (SNU),
DTU Compute
Christine Pepke Pedersen,
DTU Fotonik
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Julie Søgård (AS)
Torben Westerberg (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Henvendelser vedr. abonnement til Christine Pepke Pedersen: christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

1/1 side: 3600 kr, 1/2 side: 2300 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk (tlf. 22 67 26 42).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2200.

Produktionsplan

Nr. 3-17 udkommer ca. 15. september
Nr. 4-17 udkommer ca. 15. december
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Kan vi bygge en sol på Jorden?

Alexander Simon Thrysoe 3

Thorium eller: Hvordan jeg lærte at holde op med at bekymre mig og at elske saltsmeltereaktorer

Aslak Stubsgaard 7

Protonterapiens fysik – en kort udledning af Braggkurven og dens top

Pernille Bræmer-Jensen og Ulrik I. Uggerhøj 13

Foreningsnyt – kommende foredrag i 2017 18

Annonce: KVANT søger ny ansvarshavende redaktør

KVANT 19

Redaktørskifte

Dorte Olesen 19

KVANT-nyheder

Christine Pepke Pedersen 20

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen, Christine Pepke Pedersen og Jens Olaf Pepke Pedersen 22

Facit til Regneopgaver om Meteoritter og Solsystemet

Svend E. Rugh og Michael Cramer Andersen 24

Kunst i Videnskab – konkurrence

Christina Toldbo 25

Tidevandsfelter – breddeopgave 71 og 72 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen 26

Da Danmark begravede Tycho Brahe (1602)

Peter Andersen 28

En kvantemekanisk eventyrfe

Finn Berg Rasmussen 35

Monument for Inge Lehmann på Frue Plads

Jens Olaf Pepke Pedersen Bagsiden

Billedet på forsiden viser plasma i en fusionsreaktor – tokamakken MAST. Der ses tydelige filamenter som følger magnetfeltlinjerne ved kanten af det indesluttede plasma. Billedet er ikke i naturlige farver. (Culham Centre for Fusion Energy)
I dette nummer kan du bl.a. læse to artikler om kerneenergi.



Den første artikel handler om *fusion* og er skrevet af Alexander S. Thrysoe. En af udfordringerne ved at bygge en fusionsreaktor er, at undgå at der transporteres energi fra kanten af plasmaet til omgivelserne.

Den anden artikel, skrevet af Aslak Stubsgaard, handler om *fission*. Der forskes i disse år meget i "saltsmeltereaktorer", der har sit brændsel som kemisk stabile salte, der cirkuleres rundt i reaktoren ved temperaturer over saltens smeltepunkt. Det giver dels en effektiv strømgenerering og hvis man tilføjer thorium kan overskuddet af neutroner anvendes til at avle thorium der kan fungere som brændsel.

KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle alle gymnasier, seminarier og HTX-kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).

Kan vi bygge en sol på Jorden?

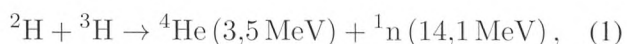
Alexander S. Thrysoe, DTU Fysik

Energiproduktion fra fusion i et kraftværk vil potentielt give en energikilde, som er ren, bæredygtig og sikker. Det er imidlertid endnu ikke lykkedes at producere mere energi fra fusion, end hvad systemet har skullet have tilført for at opretholde fusionsprocessen. En af de essentielle parametre for realisering af fusion som energikilde er en bedre forståelse af transportprocesserne på kanten af fusionsplasmaet, herunder plasmaets interaktion med elektrisk neutrale atomer og molekyler.

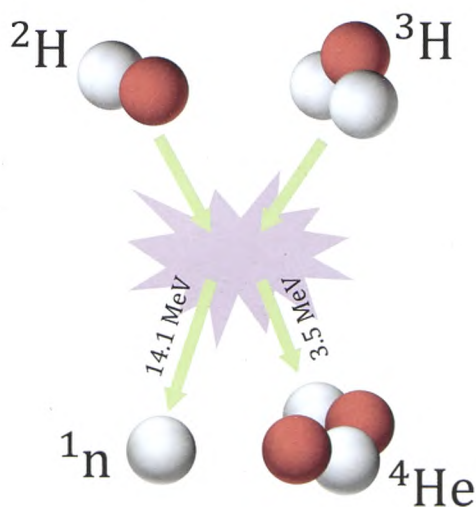
Energi fra fusion

Når lette grundstoffer fusionerer til tungere, frigives store energimængder. Det er denne proces, som driver Solen og de andre stjerner, hvor brintkerner gennem flere trin fusionerer til helium. Det er også muligt at skabe betingelserne for fusion her på Jorden. Verdens største forsøgsreaktor er lokaliseret i England, og er det varmeste sted i solsystemet.

Denne varmerekord holdes naturligvis kun imens eksperimenterne står på. For at maksimere reaktions-tværsnittet for fusionsprocesserne kræves, at fusionen finder sted mellem brintisotoperne deuterium (^2H) og tritium (^3H), samt at temperaturen er omkring 150 mio. $^{\circ}\text{C}$ – dette er ti gange varmere end Solens centrum. Ved denne energi kan de positivt ladede kerner overkomme deres indbyrdes Coulomb-frastødning og fusionere ofte nok til, at fusion vil kunne give netto energiproduktion. I fusionsprocessen omdannes deuterium og tritium til helium (^4He) og en fri neutron



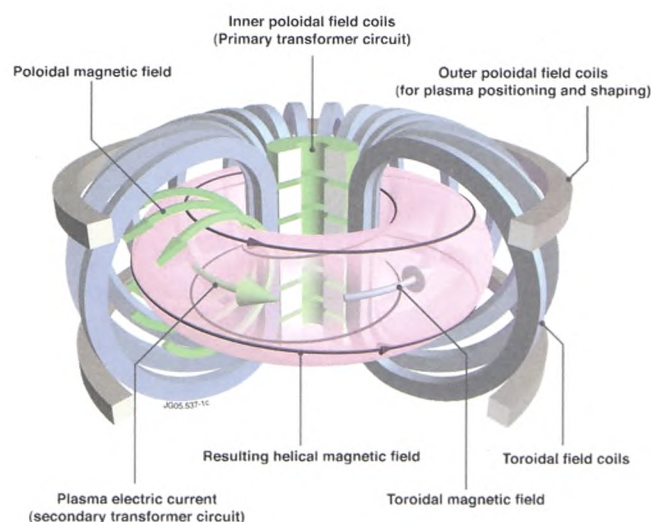
som vist i figur 1. Neutronen bærer 80 % af de 17,6 MeV som frigives ved reaktionen, og vil i et fremtidigt kraftværk efterfølgende afgive sin energi som varme i kølevand, som igen vil blive brugt til at drive en turbine og producere elektricitet.



Figur 1. Fusion mellem brintisotoperne deuterium og tritium frigiver 17,6 MeV kinetisk energi. 80 % af energien bærer den resulterende neutron, mens α -partiklen bærer de resterende 20 %.

Den høje temperatur gør det imidlertid svært at fastholde brændstoffet – det er ikke muligt at bygge en beholder, som vil kunne modstå temperaturer i nærheden af disse, og selv hvis dette var muligt, ville de fusionerende partikler miste deres energi ved kollisioner med væggen. Der er dog hjælp at hente fra naturens side. Brændstoffet er så varmt, at det er et plasma – en tilstandsform, hvor elektroner og atomkerner ikke længere er bundet til hinanden som i atomer, men derimod bevæger sig 'frit' imellem hinanden og vekselvirker via elektromagnetiske kræfter. Idet det varme fusionsplasma har frie ladninger kan det bære en elektrisk strøm, og derfor også manipuleres med eksterne elektriske og magnetiske felter.

Der er eksperimenteret med forskellige mulige konfigurationer til magnetisk indeslutning af plasma, og den som der indtil nu er forsket mest i, er den såkaldte tokamak. I en tokamak indesluttet plasmaet i et toroidalt (donut-formet) snoet magnetfelt, se figur 2. De ladede partikler vil bevæge sig i helixer omkring de lukkede magnetfeltlinjer i tokamakken, hvilket betyder at plasmaet i princippet er indesluttet og ikke i kontakt med maskinens væg. Det førnævnte eksperiment i England, Joint European Torus (JET), er en tokamak.



Figur 2. Magneter skaber et toroidalt magnetfelt, og den indre spole driver en toroidal strøm og danner derved et poloidalt magnetfelt. Det resulterende spiralformede magnetfelt er karakteristisk for en tokamak. Fra www.eurofusion.org/2011/09/tokamak-principle-2/.

Tokamakens energiregnskab

Det har vist sig, at indeslutningen af plasma, i en tokamak ikke er perfekt, og der er tab af partikler og energi via forskellige transportmekanismer, dvs. forskellige typer transport (klassisk, neo-klassisk, turbulent), som alle giver tab af partikler og energi. Derfor er det nødvendigt at tilføre mere brændstof og energi til fusionsplasmaet, hvis dette skal opretholdes. Et simpelt energiregnskab giver ændringen i den indesluttede energi E ved

$$\frac{dE}{dt} = P_{\text{opvarmning}} - P_{\text{tab}}, \quad (2)$$

hvor $P_{\text{opvarmning}}$ beskriver tilførelsen af energi til systemet, og P_{tab} beskriver tab af energi grundet transport af energi væk fra det indesluttede område. Energien til opvarmning kan enten komme internt fra de resterende 3,5 MeV per fusionsproces, som bæres af det resulterende helium, eller eksternt via forskellige mulige opvarmningsmetoder.

Energitabsleddet kan skrives

$$P_{\text{tab}} = \frac{E}{\tau_E}, \quad (3)$$

hvor τ_E er den såkaldte energiindeslutningstid – et mål for hvor hurtigt plasmaet mister sin energi til omgivelserne, hvis det ikke opvarmes. Energiindeslutningstiden er en af tre essentielle parametre for energiproduktion fra fusionsenergi. De resterende to parametre er iontætheden, n_i , og iontemperaturen, T_i . Det såkaldte Lawson-kriterium [1] siger, at produktet af disse tre parametre skal have en vis størrelse:

$$n_i k T_i \tau_E \geq 1,5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}, \quad (4)$$

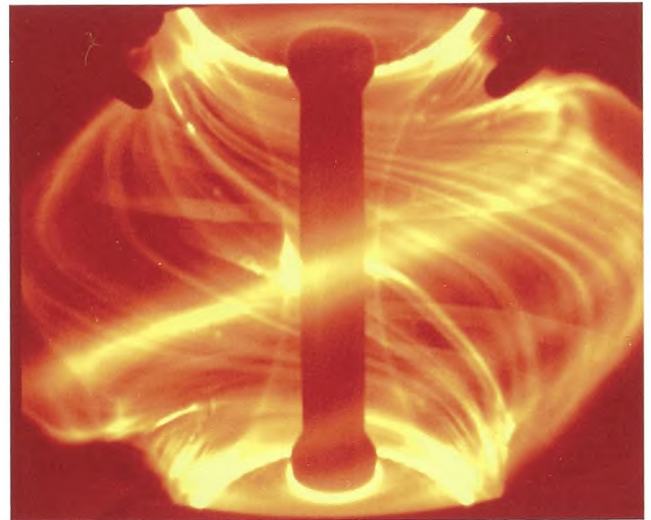
for tilstrækkeligt høje temperaturer, for at producere lige så meget energi fra fusion, som der forlader systemet gennem P_{tab} . Ovenstående produkt kaldes tripelproduktet, og er uligheden opfyldt, når det såkaldte break-even. Det er endnu ikke lykkedes at opnå break-even i de nuværende testreaktorer, men JET er den maskine, som er kommet tættest på. I 1997 lykkedes det forskere på JET at producere en effekt fra fusion svarende til 65 % af den tilførte effekt. Dette er stadig rekorden.

Transport af energi og partikler

Grunden til at vi ikke har fusionsenergi i et kraftværk endnu er, at det endnu ikke er lykkedes at få et tripelprodukt, som er stort nok til at opfylde ligning (4) (i realiteten skal tripelproduktet faktisk være ca. 5 gange større end for break-even, for at fusionsplasmaet kan opretholde den nødvendige temperatur). Der er fysiske begrænsninger for hvor store n_i og T_i kan være i en tokamak, hvorfor der forskes meget i, hvilke transportmekanismer som modvirker en stor værdi af energiindeslutningstiden τ_E og dermed et stort tripelprodukt.

Det har vist sig, at transport af partikler og energi væk fra det indesluttede plasma primært sker via filamenter af plasma (blobs) [2], som strækker sig langs magnetfeltlinjerne, og udbreder sig radialt vinkelret på magnetfeltet ud gennem det såkaldte scrape-off lag

(SOL) mod kammerets væg. SOL betegner området mellem det indesluttede plasma og kammerets væg, hvor magnetfeltlinjerne ikke slutter på sig selv, men i stedet på materialeoverflader og derfor ikke kan indeslutte plasmaet. Det er muligt at observere filamenterne i en tokamak med et højhastighedskamera, da det varme plasma exciterer omkringliggende koldere atomer, som derefter udsender lys i det synlige område. Dette er illustreret i figur 3 i et helt nyt billede fra april 2017.



Figur 3. Plasma i tokamakken MAST, hvor filamenter som følger magnetfeltlinjerne tydeligt ses ved kanten af det indesluttede plasma. Billedet er ikke i naturlige farver. (Culham Centre for Fusion Energy, www.ccf.ac.uk/taming_elms.aspx).

At forstå mekanismerne der styrer kanten af plasmaet, og specielt hvordan blobs dannes og udbreder sig, er en essentiel gren af fusionsforskningen. Det er gennem blobs at plasmaet vekselvirker med det omkringliggende miljø, og f.eks. måleudstyr kan blive beskadiget ved kontakt med meget store og varme filamenter. Derudover virker plasmaet på randen som en grænsebetingelse til det indesluttede plasma, og har stor indflydelse på de overordnede indeslutningsparametre. Forskningsgruppen for plasmafysik og fusionsenergi (PPFE) ved DTU Fysik har udviklet en plasmamodel, "hot edge-sol-electrostatic" (HESEL)-modellen, som beskriver transport af plasma ved randen af et fusionsplasma. Det er med denne model muligt at simulere blobs, og derved få en bedre forståelse for transport af partikler og energi i et fusionsplasma.

I plasmafysik anvendes typisk modeller af forskellig detaljegrad afhængig af, hvilke fysiske fænomener modellen forventes at beskrive. Nær den ene ende af spektret findes de kinetiske modeller, som giver udviklingen i elektronernes og ionernes fordelingsfunktioner, og i den modsatte ende er magnetohydrodynamik (MHD)-modellerne, hvor plasmaet antages at være et elektrisk ledende fluid. Sidstnævnte findes ved at tage hastighedsmomenter af det kinetiske ligningssystem, hvilket reducerer antallet af variable og derfor tillader at simulere et større domæne, men i mindre detalje, med samme regnekraft. Midt imellem de to nævnte modeller findes "plasma fluid"-modellerne, som ligeledes er udledt fra den kinetiske ligning, men som

beskriver elektronerne og ionerne som adskilte fluider, med hver deres termodynamiske variable såsom tæthed og temperatur.

HESEL er en fluidmodel, der beskriver hvordan tæthed, vorticitet, og ion- og elektrontemperatur udvikler sig. Den kan beskrive formationen og udviklingen af blobs i et todimensionelt domæne, som dækker kanten af det indesluttede plasma og SOL området udenfor, som illustreret for elektrontætheden i øverste plot i figur 4. Det er til mange formål tilstrækkeligt kun at simulere det todimensionelle plan vinkelret på magnetfeltlinjerne, idet der er en høj grad af symmetri i magnetfeltets retning. Dette tillader at parameterisere felterne parallelt med magnetfeltet frem for at køre en fuld tredimensionel simulering.

Når varmt møder koldt

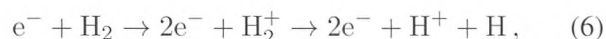
I det fysiske område beskrevet i HESEL-modellen, som omfatter randen af det indesluttede plasma og SOL området udenfor, er plasmaet imidlertid også koldt nok til, at der også eksisterer en anseelig population af elektrisk neutrale atomer og molekyler. I en tokamak opstår neutrale partikler enten ved at plasma fra blobs bliver afkølet ved kontakt med væggen og rekombinerer til atomer, eller de kan være tilført udefra med det formål at øge tætheden i plasmaet. Effekten af de neutrales interaktion med plasmaet er imidlertid ikke en del af den oprindelige HESEL-model, men er i de seneste år

blevet undersøgt, og formuleret i en kombineret plasma-neutral fluidmodel [3].

I den kombinerede model beskrives de vigtigste vekselvirkninger mellem neutrale atomer og molekyler, og ladede ioner og elektroner. Modellen indeholder dissociering af molekyler til atomer



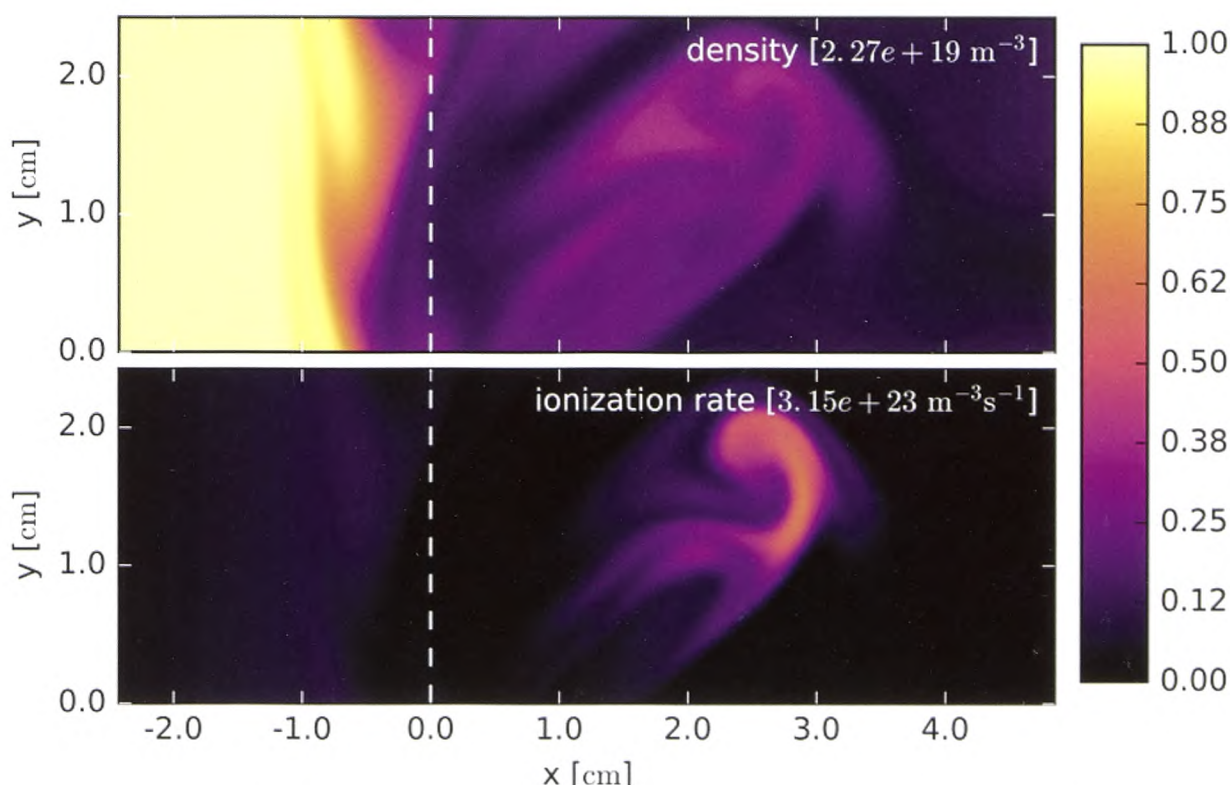
ionisering (evt. efterfulgt af dissociering) af molekyler og atomer



og de såkaldte ladnings-bytte-kollisioner, hvor en varm ion modtager en elektron fra et koldt atom, hvilket resulterer i en kold ion og et varmt atom



I reaktionsligningerne ovenfor henviser e^- til elektroner, og H til brintisotoper, fx deuterium eller tritium. Der er naturligvis et væld af andre reaktioner som kan finde sted, heriblandt excitationer af atomer og molekyler, men ovenstående vekselvirkninger er tilstrækkelige til at beskrive en række centrale effekter.



Figur 4. Simulering af plasmataetheden (øverst) og ioniseringsraten (nederst), i et domæne vinkelret på magnetfeltlinjerne, som strækker sig fra plasma-kanten (til venstre for den stiplede linje) og dækker SOL-området udenfor det indesluttede plasma (til højre for den stiplede linje). Det ses hvordan en blob omkring 2-3 cm udenfor det indesluttede plasma ioniserer de neutrale partikler, inden de når det indesluttede område med lukkede magnetfeltlinjer.

En af disse er en vurdering af, hvor i maskinen neutrale partikler bliver ioniseret. Dette er et vigtigt estimat, idet ioniseringer i SOL-området ikke bidrager til at opretholde plasmataetheden og dermed et højt tripelprodukt. Ionisering udenfor det indesluttede område kan finde sted når varme blobs propagerer igennem gassen af neutrale partikler, hvilket i første omgang tyder på, at blobs er med til at sænke effektiviteten af brændselstilførslen til det indesluttede plasma. Figur 4 viser et plot fra en simulering af den kombinerede plasma-neutral-model; her ses det, hvordan en blob lokalt ioniserer langt mere end plasmaet i det øvrige domæne, og således fjerner partikler fra den neutrale population udenfor det indesluttede område. Det viser sig imidlertid også, at blobs gennem ladningsbytte-effekten beskrevet i ligning (8) producerer en population af meget varme neutrale atomer. De varme atomer har en lang fri middelvejlængde, hvilket tillader dem lettere at nå gennem SOL området og ind i det indesluttede plasma, og derved øge effektiviteten af brændselstilførslen.

De to beskrevne effekter på brændselstilførslen vil mere eller mindre udligne hinanden, men vekselvirkningerne har også en effekt på plasma filamenterne. Disse bliver større, koldere og langsommere gennem vekselvirkninger med neutrale partikler. Dette kan igen få betydning for, hvordan plasmaet i blobs vil rekombinere på væggen og danne nye neutrale partikler.

Vejen til fusionenergi

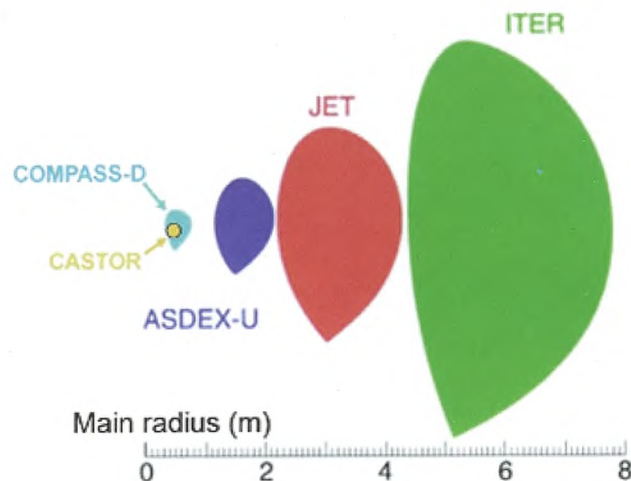
En bedre forståelse af dynamikken på kanten af plasmaet, og de neutrale partiklers indvirkning herpå, er blot en enkel brik i et stort puslespil. Målet om at skabe et fusionsplasma, hvori der produceres mere energi end der tilføres, er ikke nået endnu, men vi er godt på vej.

I det sydlige Frankrig samarbejder 35 nationer om at opføre en tokamak, der er langt større end de testreaktorer, som har været brugt til eksperimenter hidtil. Projektet går under navnet ITER [4] ('sti' på latin), og er måske det mest ambitiøse energiprojekt i Verden. Maskinen kommer til at være 30 m høj og veje over 23.000 tons, og får et plasma volumen på 840 m^3 – langt større end JET's 100 m^3 . Til sammenligning er et tværsnit af plasmavoluminet og dets afstand fra centrum af maskinen vist for udvalgte eksisterende tokamakker og ITER i figur 5.

Budgettet for ITER er 15 milliarder euro, og det forventes at det første plasmaeksperiment udføres i 2025. Det vil i første omgang være eksperimenter udelukkende med hydrogen-plasma, hvori antallet af fusionsprocesser vil være begrænset. 10 år senere, i 2035, vil eksperimenter med både deuterium og tritium påbegyndes, og det er her ITER skal vise, at det er muligt at skabe et overskud af energi fra fusion.

ITER er designet til at producere 500 MW fusions-effekt, og dermed levere en effekt 10 gange høje-

re, end hvad der bruges til opvarmning af plasmaet. Dette vil give et tripelprodukt på $n_i k T_i \tau_E \approx 5,4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$. Lever ITER op til forventningerne, er det planen at det første fusionskraftværk skal levere strøm til elnettet i 2050.



Figur 5. Tværsnit af plasmavoluminet og dets afstand fra centrum for udvalgte tokamakker og ITER. Tværsnittet af plasmaet er typisk ikke cirkulært, men snarere D-formet. Fra [5].

Litteratur

- [1] M. Kikuchi, K. Lackner, M.Q. Tran (red.). *Fusion Physics*. IAEA, Vienna, 2012.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1562_web.pdf
- [2] S.J. Zweben et al. (2007), *Plasma Phys. Control. Fusion* bind **49**.
<http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/49/7/S01>.
- [3] A.S. Thrysøe et al. (2016), *Plasma Phys. Control. Fusion* bind **58**
<http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/58/4/044010>.
- [4] ITER's website, <https://www.iter.org>.
- [5] COMPASS Tokamak, Institute of Plasma Physics of the Czech Academy of Sciences,
http://www.ipp.cas.cz/vedeck_a_struktura_uvp/tokamak/tokamak_compass/



Alexander Simon Thrysøe er ph.d.-studerende i gruppen for plasmafysik og fusionsenergi ved DTU Fysik. Han arbejder med modellering af vekselvirkninger mellem plasma og neutrale partikler ved randen af magnetisk indesluttet fusionsplasmaer.

Thorium eller: Hvordan jeg lærte at holde op med at bekymre mig og at elske saltsmeltereaktorer

Af Aslak Stubsgaard, DTU Space

Saltsmeltereaktoren er en radikalt anderledes type kernekraftreaktor, der blev opfundet og udviklet ved Oak Ridge National Laboratory i 1960'erne. Saltsmeltereaktorer har fået øget opmærksomhed det sidste årti, blandt andet grundet muligheden for effektiv thorumbaseret brændselsavling, samt øget sikkerhed sammenlignet med traditionelle reaktordesigns og langt billigere konstruktion og operation. Saltsmeltereaktorer har sit brændsel som kemisk stabile salte, der cirkuleres rundt i reaktoren ved rødgldende temperaturer, godt over saltenes smeltepunkt. Udover effektiv strømgeneration åbner disse temperaturer op for en bred vifte af implementeringer. Denne artikel forsøger at give et indblik i, hvorfor thorium i saltsmeltereaktorer er en attraktiv teknologi for udnyttelse af fissionsenergi.

Opdagelsen af kernekraft

I starten af det 20. århundrede lærte fysikere om den enorme mængde energi der blev frigivet under radioaktivt henfald af visse atomkerner. Hvis radioaktivt henfald kunne igangsættes og kontrolleres ville det blive en revolutionerende energikilde, ligesom ild og organisk materiale var for tidlige mennesker, og fossilt brændsel var for den industrielle revolution.

Men tvunget henfald, for eksempel via protonbombardement, viste sig hurtigt at være upraktisk med henblik på energiproduktion. Selv Ernest Rutherford som oprindeligt havde opdaget radioaktiviteten og foreslået dets potentiale som en energikilde udtalte senere "Anyone who expects a source of power from the transformation of the atom is talking moonshine".

I 1932 opdagede James Chadwick neutronen. Dette førte i 1938 til opdagelsen af neutroninduceret fission af Otto Hahn, Lise Meitner, og Fritz Strassmann. Denne totalt uforudsete opdagelse beskrev perfekt hvorfor en så bred vifte af lette højradioaktive kerner blev observeret under neutronbombardement af uran.

Den vigtigste opdagelse blev gjort af Enrico Fermi og Frédéric Joliot-Curie, først publiceret i 1939, nemlig at antallet af neutroner udskilt under fission af uran-235 er større end én, hvilket gør en kædereaktion mulig. Med denne viden indså fysikere på tværs af kloden urans potentiale til både ekstrem destruktion og som en enorm energikilde. Dermed startede atomkapløbet.

Den 2. december 1942 blev den første menneskeskabte selvbærende kritiske kædereaktion opnået af Enrico Fermis "Chicago pile-1"-reaktor. En lav-effekt grafitmodereret uranreaktor, konstrueret af mursten og 4" x 4" lægter under tribunerne af Chicago Universitets fodboldstadion. Den 16. juli 1945 blev den første superkritiske ukontrollerede kædereaktion opnået med Trinitytesten i New Mexico.

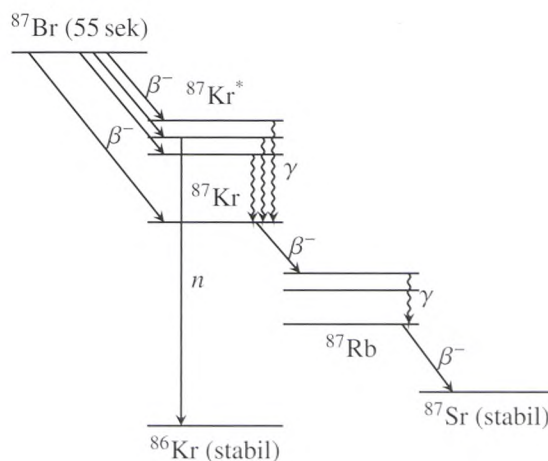
Teorien bag kernekraft

Energien, der udskilles under fission, skyldes forskellen i bindingsenergien i tunge og lettere kerner. Dette er et produkt af samspillet mellem den elektrostatiske frastødning mellem protonerne og den stærke kernekrafts tiltrækning mellem protoner og neutroner. Dette betyder, at tunge kerner indeholder flere neutroner per proton end lettere kerner, for at opnå en stabil tilstand.

Når tunge kerner splittes vil de ofte to fissionsprodukter have samme antal neutroner per proton som deres moderkerne. For de lettere kerner er dette et overskud af neutroner, i forhold til deres stabile isotoper. Dette fører til henfald via omdannelse af en neutron til en proton og udsendelse af en elektron og en anti-neutrino. Disse fissionsprodukter og deres efterfølgende henfaldsprodukter ender ofte i exciterede tilstande af datterkernen, hvilket oftest resulterer i henfald, gennem udsendelse af en foton, til en lavere excitationstilstand eller til grundtilstanden.

I sjældne tilfælde kan fissionsprodukter også henfalde fra en exciteret tilstand via udsendelse af en neutron. Disse neutroner kan blive frigivet sekunder eller minutter efter fissionsproduktet blev dannet, og dermed langt senere end de direkte neutroner der bliver udskilt under fission. Af denne grund kaldes de forsinkede neutroner. Forsinkede neutroner udgør mindre end én procent af det totale antal neutroner der udskilles som en konsekvens af fission men grundet deres forsinkelse har de en kæmpe indflydelse på styringen af reaktorkritikaliteten.

Et eksempel på sådan en forløber for forsinket neutroner er brom-87.



Figur 1. Eksempel på et muligt forsinket neutronhenfald fra brom-87.

Fissionsprodukter og deres henfaldsprodukter har hovedsageligt langt kortere halveringstider end de actinider de blev dannet af. Fissionsprodukter skal derfor kun opbevares i ca. 300 år for at henfalde til en radioaktivitet sammenlignelig med uranmalm, i modsætning til de millioner af år transuraner skal opbevares.

Visse kerner kan, efter absorption af en neutron, ende i exciterede tilstande af den resulterende isotop. I nogle tilfælde fører dette til deling af den resulterende isotop i to eller flere dele, og udskilning af en eller flere neutroner. Disse kerner kaldes fissionable, ikke at forveksle med fissile, hvilket er fissionable kerner der kan vedligeholde en fissions kædereaktion.

Af alle kendte kernetyper er kun 33 fissile, kun 14 af dem har halveringstider længere end et år, og kun uran-235 har en lang nok halveringstid til stadig at være i rimelig koncentration på jorden. I dag udgør uran-235 ca. 0,7 % af naturligt forekommende uran. Nogle naturligt forekommende kerner kan blive konverteret til fissile kerner, disse kaldes fertile. Altså kan fertile kerner ikke vedligeholde en kædereaktion, men kan konverteres til kerner der kan. Af de fertile kerner har kun thorium-232 (100 % af naturligt thorium) og uran-238 (99 % af naturligt uran) lange nok halveringstider til stadig at være i stor koncentration i naturen, respektive 14 milliarder år og 4 milliarder år.

Fission af en tung kerne frigiver ca. 200 MeV energi med en fordeling omtrent som i tabel 1.

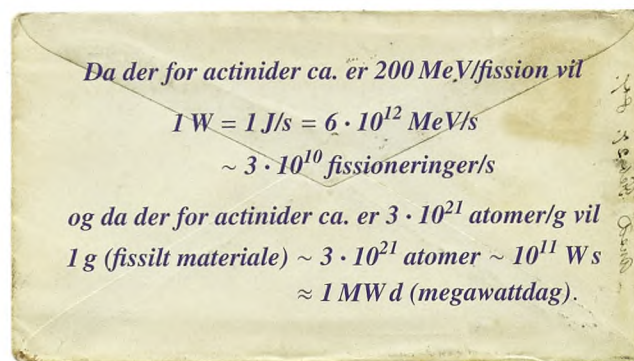
Fordeling	MeV
Kinetisk energi til lette fissionsfragmenter	100
Kinetisk energi til tunge fissionsfragmenter	67
Energi af instantane neutroner	5
Energi af instantan gammastråling	5
Energi af betastråling fra fissionsprodukter	7
Energi af gammastråling fra fissionsprodukter	6
Subtotal	190
Energi af neutrinoer	11
Total	201

Tabel 1. Approksimativ fordeling af energien frigivet i fission af en uran-235-kerne.

Rundt regnet vil hver anden neutron i en kritisk kædereaktion blive absorberet uden at føre til fission, men dette frigiver i gennemsnit 10 MeV, på grund af forskelle i bindingsenergier. Så udover de 11 MeV der forsvinder med neutrinoer, resulterer en fissionering og en neutronabsorption i ca. 200 MeV af termisk energi.

Det er ret interessant, at ca. 5 % af energien fra en fissionsreaktor bliver udstrålet af neutrinoer, som er meget svagt vekselvirkende med masse, hvilket er med til at gøre deres detektion meget svær. De nuværende 447 kernereaktorer, der producerer ca. 11 % af verdens strømforbrug med en gennemsnitlig effekt på ca. 600 MWe, vil i så fald hver udstråle neutrinoer med en effekt på ca. 100 MW, der bare fiser ud i det interstellare rum, antaget en $1/3$ virkningsgrad.

For at få en ide om potentialet i kernekraft laver vi en "back-of-the-envelope-calculation" af energidensiteten af fissilt materiale.



Til sammenligning så er der 1 MW d i afbrændingen af 3 t til 4 t kul, hvilket skyldes de relativt lave 4,5 eV frigivet per kul-hydrogen molekyle under forbrændingen af kulbrinter.

Vores interesse i uran og thorium skyldes deres allestedsnærværende forekomst i jordskorpen. Uran og thorium forekommer naturligt i alt fra havejord, sten og klippe, til fossilt brændsel, oftest i størrelsesordenen af millionte dele. I en kubikmeter dansk havejord er der gennemsnitlig en halv kubikcentimeter uran og to kubikcentimeter thorium.

Da hver dansker har et gennemsnitligt total energiforbrug på ca. 4 kW og en gennemsnitlig levealder på ca. 80 år svarer dette til et livsforbrug på 117 MW d eller energien fra 117 g fissilt materiale, hvilket principielt kan produceres med thorium fra ca. 5 kubikmeter dansk havejord. Selvfølgelig er der meget rigere og økonomisk fordelagtige kilder til thorium end dansk havejord, men pointen er den samme.

Bemærk yderligere at energien frigivet under fission af actinider er over en million gange større end den kemiske energi frigivet under forbrændingen af kulbrinter. Da uran- og thoriumforekomster i kul er i størrelsesordenen få millionte dele, er der mere potentiel fissionsenergi i disse spormængder fertilt materiale i kul, end der er i forbrændingen af den kemiske energi lagret i kul.

Thorium

Uran-235 er som nævnt det eneste naturligt forekommende fissile materiale, men har nogle åbenlyse problemer, blandt andet dets lave naturlige forekomst (0,3 % af naturligt uran), udfordringen ved berigning, og associeret proliferationsrisiko (dvs. spredning af kernevåben, fissionibelt materiale og teknologier og information til fremstilling af kernevåben til lande, der ikke er anerkendt som "Nuclear Weapon States").

Alternativerne er fertilt uran-238 (99,7 % af naturligt uran) og thorium-232 (100 % af naturligt thorium). Historisk er der blevet satset på uran-238. Det er først i det sidste årti, at thorium har fået øget opmærksomhed. Baggrunden for dette ligger gemt i følgende kernefysiske forudsætninger.

Sandsynligheden for at en kerne indfanger en passerende neutron afhænger af mange parametre, blandt andet excitationstilstanden af kernen inden indfangning, neutronens hastighed, og hvilke tilladte energitilstande der er i den resulterende kerne.

Generelt aftager sandsynligheden for indfangning,

som den inverse værdi af neutronfarten. Altså er en neutron generelt meget mere tilbøjelig til at blive indfanget og danne en ny exciteret kerne, jo langsommere/lavere energi den har.

Neutroner dannet under fission har en gennemsnitlig energi på 1 MeV svarende til en termisk fart på 14 000 km/s. Under elastiske og inelastiske kollisioner kan disse hurtige neutroner tabe energi til det materiale de bevæger sig igennem, indtil de har samme termiske energi som materialet, hvorpå de kaldes termiske neutroner. Ved stuetemperatur svarer dette ca. til 0,025 eV eller 2,2 km/s.

I reaktorer hvor man ønsker langsomme neutroner bruges moderatore, som hovedsageligt består af lette kerner (da de tillader større energitab per kollision end tunge kerner), har høj sandsynlighed for spredning, men er svagt tilbøjelige til selv at indfange neutronerne. Eksempler på typiske moderatore er vand, tungt vand, grafit, og beryllium.

Fordelen ved at bremse neutronerne med en moderator er at actinider er mere tilbøjelige til at indfange langsomme neutroner, hvilket resulterer i at en mindre mængde fissilt materiale er nødvendig for at opnå kritikalitet. Dette har dog den ulempe, at der er et vist tab af neutroner til moderatoren. Yderligere har indfangne langsomme neutroner større sandsynlighed end hurtige, for ikke at føre til fission i actinider.

Der er, i grove træk, en vis sandsynlighed σ_f for at en neutron bliver indfanget i en kerne og resulterer i fission, og tilsvarende en sandsynlighed σ_γ for at en neutron bliver indfanget i selvsamme kerne, men gennemgår radioaktivt henfald. Den totale sandsynlig-

hed for indfangning af en neutron er derfor $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$. Ganges sandsynligheden for at kernen, der har indfanget en neutron, undergår fission med antallet af neutroner ν der i gennemsnit udskilles som konsekvens af fissionen fås reproduktionsfaktoren η :

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_a}.$$

ν , σ_f , og σ_γ er alle stærkt afhængige af neutronenergien resulterende i at η også har en stærk afhængighed af neutronenergien. ν vil, for de fleste fissile transuraner, ligge omkring 2 i et termisk spekter.

Reproduktionsfaktoren beskriver dermed, hvor mange neutroner der i gennemsnit udsendes efter indfangning af en neutron, og giver dermed en måde at kvantisere brugbarheden af et brændsel. For at en reaktor kan udnytte fertile materialer til dannelsen af fissilt brændsel, skal brændslet have en $\eta > 2$, hvis den skal kunne vedligeholde konvertering, da en neutron går til at holde kædereaktionen kritisk, mens den anden går til at skabe nyt brændsel. Hvis en reaktor laver mere brændsel end den bruger kaldes den en avler. Hvis den bruger mere brændsel end den laver kaldes den en afbrænder. I realiteten vil selve reaktorkonstruktionen også æde en del neutroner. Avl er derfor kun mulig hvis reproduktionsfaktoren, vægtet over hele neutronspektret af reaktoren, er noget større end to. Brændselstype, reaktortype, og reaktordesign har rigtig meget at sige i forhold til om reaktoren er en afbrænder eller en avler.

Figur 2 viser de enkelte brændselstypers sandsynlighed for, at en neutronindfangning resulterer i fission, givet af forholdet σ_f/σ_a (her vist for termiske neutroner).

²³⁶ Am, β^+ $t_{1/2} = 4$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁷ Am, β^+ $t_{1/2} = 1$ h $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁸ Am, β^+ $t_{1/2} = 2$ h $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁹ Am, β^+ $t_{1/2} = 11$ h $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²⁴⁰ Am, β^+ $t_{1/2} = 2$ d $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²⁴¹ Am, α $t_{1/2} = 0,4$ ky $\sigma_f/\sigma_a = 0,01$	²⁴² Am, β^- $t_{1/2} = 16$ h/141 y $\sigma_f/\sigma_a = 0,86$	²⁴³ Am, α $t_{1/2} = 7$ ky $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-3}$
²³⁵ Pu, β^+ $t_{1/2} = 25$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁶ Pu, α $t_{1/2} = 3$ y $\sigma_f/\sigma_a = 0,91$	²³⁷ Pu, β^+ $t_{1/2} = 45$ d $\sigma_f/\sigma_a = 1$	²³⁸ Pu, α $t_{1/2} = 87$ y $\sigma_f/\sigma_a = 0,03$	²³⁹ Pu, α $t_{1/2} = 24$ ky $\sigma_f/\sigma_a = 0,74$	²⁴⁰ Pu, α/SF $t_{1/2} = 7$ ky $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-4}$	²⁴¹ Pu, β^- $t_{1/2} = 14$ y $\sigma_f/\sigma_a = 0,74$	²⁴² Pu, α $t_{1/2} = 0,4$ My $\sigma_f/\sigma_a = 0,01$
²³⁴ Np, β^+ $t_{1/2} = 4$ d $\sigma_f/\sigma_a = 1$	²³⁵ Np, β^+ $t_{1/2} = 1$ y $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁶ Np, β^+ $t_{1/2} = 0,1$ My $\sigma_f/\sigma_a = 0,95$	²³⁷ Np, α $t_{1/2} = 2$ My $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-4}$	²³⁸ Np, β^- $t_{1/2} = 2$ d $\sigma_f/\sigma_a = 1$	²³⁹ Np, β^- $t_{1/2} = 2$ d $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²⁴⁰ Np, β^- $t_{1/2} = 1$ h $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²⁴¹ Np, β^- $t_{1/2} = 13$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$
²³³ U, α $t_{1/2} = 0,2$ My $\sigma_f/\sigma_a = 0,92$	²³⁴ U, α $t_{1/2} = 0,2$ My $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-3}$	²³⁵ U, α $t_{1/2} = 0,7$ Gy $\sigma_f/\sigma_a = 0,85$	²³⁶ U, α $t_{1/2} = 23$ My $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-4}$	²³⁷ U, β^- $t_{1/2} = 7$ d $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-3}$	²³⁸ U, α $t_{1/2} = 4$ Gy $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-6}$	²³⁹ U, β^- $t_{1/2} = 23$ min $\sigma_f/\sigma_a = 0,39$	²⁴⁰ U, β^- $t_{1/2} = 14$ h $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$
²³² Pa, β^- $t_{1/2} = 1$ d $\sigma_f/\sigma_a = 0,86$	²³³ Pa, β^- $t_{1/2} = 26$ d $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-3}$	²³⁴ Pa, β^- $t_{1/2} = 7$ h $\sigma_f/\sigma_a = 1$	²³⁵ Pa, β^- $t_{1/2} = 24$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁶ Pa, β^- $t_{1/2} = 9$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁷ Pa, β^- $t_{1/2} = 9$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁸ Pa, β^- $t_{1/2} = 2$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁹ Pa, β^- $t_{1/2} = 2$ h $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$
²³¹ Th, β^- $t_{1/2} = 26$ h $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³² Th, α $t_{1/2} = 14$ Gy $\sigma_f/\sigma_a \sim 10^{-6}$	²³³ Th, β^- $t_{1/2} = 21$ min $\sigma_f/\sigma_a = 0,01$	²³⁴ Th, β^- $t_{1/2} = 24$ d $\sigma_f/\sigma_a = 0,01$	²³⁵ Th, β^- $t_{1/2} = 7$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁶ Th, β^- $t_{1/2} = 37$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁷ Th, β^- $t_{1/2} = 5$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$	²³⁸ Th, β^- $t_{1/2} = 9$ min $\sigma_f/\sigma_a = \emptyset$

Figur 2. Henfald, halveringstid, og fissionabilitet af forskellige actinider. Farvekodningen repræsenterer den primære henfaldsvej. Gul repræsenterer alfa-henfald, rød repræsenterer betaplust-henfald, og blå repræsenterer betaminus-henfald. Figuren er baseret på termiske data, fra S.F. Mughabghab, Atlas of Neutron Resonances Elsevier Science, April 17, 2006.

Vores interesse i fertile materialer skyldes deres evne til at henfalde til fissile materialer efter indfangning af en neutron. Som det kan ses i ovenstående figur er hverken thorium-232 eller uran-238 særlig tilbøjelige til at undergå fission efter indfangning af en neutron. Men deres resulterende kerner thorium-233 og uran-239 vil begge betaminus-henfalde til henholdsvis uran-233 og plutonium-239, som er fissile. Hvis thorium-233 eller uran-239, før henfald til henholdsvis uran-233 og plutonium-239, indfanger endnu en neutron – eller

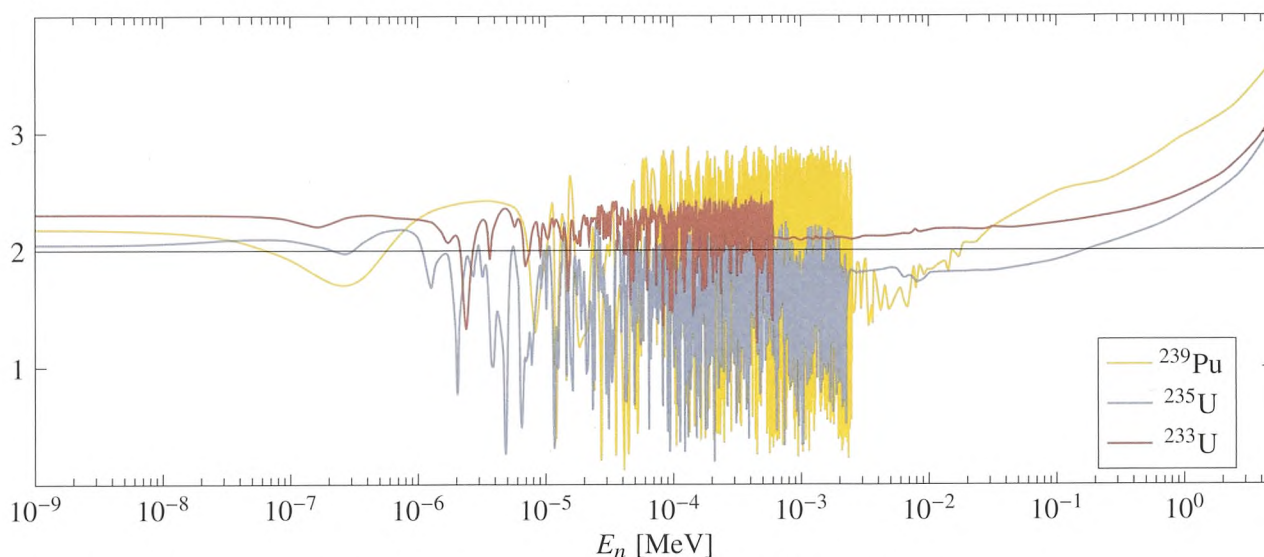
uran-233 og plutonium-239 indfanger en neutron uden at fissionere, vil det i stedet resultere i henholdsvis uran-234 og plutonium-240, hvoraf ingen er fissile.

Plutonium-240 har tilbøjelighed til spontan fission, hvilket gør brugt reaktorbrændsel fra konventionelle reaktorer (ca. 20 % plutonium-240) yderst kompliceret at bruge til atomvåben, uden isotopisk 'berigning' (egentlig det modsatte) fra 20 % til maksimalt 7 % plutonium-240. Uran-234 har ikke samme problem. Til gengæld vil uran-231 også være til stede i små mængder

fra neutronbombardement af thorium, på grund af at indfangning af en neutron i sjældne tilfælde fører til udskilning af to neutroner. Uran-231 har i sin henfaldsskæde en kraftig gammastråling, hvilket betyder at det uran-233 der dannes fra thoriumavling ikke kan håndteres af mennesker. Dette besværliggør håndtering af brugt brændsel, og dets brug som våbenmateriale.

Realiteten er at enhver neutronkilde kan konverteres til konstruktion af våbenplutonium, dette inkluderer en hvilken som helst fissionsreaktor, fusionsreaktorer, eller neutronspallationskilder. Ingen kraftig neutronkilde er uden proliferationsrisiko. Spørgsmålet er om det er en risiko man er villig til at tage, og om vi mennesker overhovedet vil klare os uden energien de bringer. Der er i øvrigt meget nemmere og billigere måder for ondsindede mennesker at skabe frygt og destruktion.

η



Figur 3. Reproduktionsfaktorer baseret på interpolerede ν , σ_f , og σ_γ data fra ENDF/B-VII.1 og glattet.

Fra denne figur ses det, at uran/plutonium-cyklussen ikke kan bruges til at bygge en avler i det termiske spekter da $\eta < 2$ i gennemsnit. plutonium-239 (gul kurve i figur 3) er derimod suveræn i det hurtige spekter, meget bedre end både uran-233 og uran-235. Det giver altså kun mening at bygge en avler på uran/plutonium-cyklussen, som en hurtigneutronspekterreaktor. Dette var også vejen man valgte at gå tilbage i slutningen af 1960'erne. Plutoniumvejen har dog vist sig ikke at være energifrelsen man havde håbet på. Det er gået stabilt ned ad bakke siden 1980'erne med kun 6 opererende hurtigneutronspekterreaktorer tilbage i dag. Dette har mere at gøre med valg af reaktortype end noget andet.

Thorium/uran-cyklussen er derimod velegnet til avling i det termiske spekter, da $\eta > 2$ for uran-233 (rød kurve i figur 3) gennem næsten hele spektret. Det er denne erkendelse af, at naturligt thorium (som er allestedsnærværende og består af isotopisk rent thorium-232) kan avle mere uran-233 i et termisk neutronspekter end der forbrændes, der gør thorium til et yderst interessant materiale til at bringe menneskeheden ud af energiknaphed. Men denne viden er ubrugelig uden en praktisk teknologi som økonomisk kan udnytte den. Hvilket bringer os til den anden side af sagen, nemlig reaktortype og reaktordesign.

Grunden til at thorium er et overlegent fertilt materiale i forhold til fertilt uran er ikke: at der er fire gange så meget af det, at det avlede fissile uran er højradioaktivt og dermed mindre proliferationsrisikabelt, eller at der dannes mindre transuraner i en thoriumcyklus (grundet de to færre startprotoner). Disse grunde er alle attraktive, men grunden til at thorium er overlegent i forhold til uran, er dets potentiale til at producere mere fissilt materiale, end der bruges i et termisk neutronspekter.

For at se hvorfor thorium-232/uran-233 cyklussen er attraktiv i et termisk spekter kan η plottes (se figur 3) for uran-233, uran-235, og plutonium-239 som funktion af den indgående neutronenergi. Husk, at den gennemsnitlige energi af neutroner skabt i fission er omkring 1 MeV og energien af termiske neutroner er mindre end 1 eV.

Reaktordesign

Vi bliver nu, med denne viden, bedt om at bygge en ultrasikker boks der kan malke disse tunge ustabile kerner for deres fissionsenergi, og i processen avle mere fissilt materiale end den forbrænder. Yderligere bliver vi bedt om at gøre den væsentligt billigere end kul, olie, og gas. Hvordan vil vi så gøre det? Hvilke kriterier vil vi gå efter? Hvilken kemi vil vi basere den på? Hvilke materialer vil vi bygge den af?

Under tilstrækkeligt neutronbombardement vil alle transuraner før eller siden fissionere, så hvis vi kan holde transuranerne i reaktoren og kun ekstrahere fissionsprodukterne, vil dette resultere i deponeringstider i størrelsesordenen et par hundrede år. Dette betyder også at transuraner fra brugt brændsel, som for en stor del er fissilt, kan afbrændes og transformeres til relativt kortlevende fissionsprodukter. Yderligere har visse fissionsprodukter en meget stor tendens til at absorbere neutroner. Så for både drastisk at mindske affaldsproblemet fra traditionelle atomkraftværker og avle mest muligt fissilt materiale til at starte nye reaktorer, sætter vi yderligere det kriterie, at vi skal have evnen til at styre brændslets kemiske komposition, uden at fjerne brændslet fra reaktoren.

Ud fra alt hvad vi har fundet ud af, kan vi nu

komme med en række kriterier til vores boks. På den økonomiske og sikkerhedsmæssige side skal boksen opfylde følgende kriterier:

- simpel brændselsproduktion og reprocessering
- en stærkt negativ temperaturreaktivitetskoefficient (dvs. at en øget temperatur fører til mindre kritikalitet)
- kontinuert tilsætning og fjernelse af fissilt og fertilt brændsel
- simpel kontrol og operation
- simpel og kompakt konstruktion
- bred termisk effektrækkevidde (MW til GW)
- høj temperatur (over 500 °C)
- lavt tryk (under 10 bar)
- høj termisk effekt til fissilt inventar (1 MW/kg til 5 MW/kg).

For effektiv avling skal boksen opfylde følgende kriterier:

- kontinuert eller intermediær fjernelse af fissionsprodukter
- lav neutronabsorption af konstruktionsmaterialer og ikke-brændselsmaterialer
- eventuel mulighed for at fjerne intermediære actinider, for at lade dem henfalde til fissilt materiale uden yderligere neutronindfangning.

Spørgsmålet er nu hvilken reaktortype der bedst muligt opfylder disse kriterier. Vi kan med det samme indse at adskillige af disse kriterier, nemlig simpel brændselsproduktion og reprocessering, kontinuert eller intermediær fjernelse af fissionsprodukter, og kontinuert tilsætning og fjernelse af fissilt og fertilt brændsel, udelukker brændsel på fast form, men ikke fluider (væske, gas, og plasma).

Kravet om lavt tryk udelukker brændsel på gas- eller plasmaform hvis, reaktoren samtidigt skal have et simpelt og kompakt design. Tilbage står vi med væsker, hvilket også giver god mening, da væsker i forvejen er den fase, hvorpå størstedelen af industriel kemi foregår.

Med væsker har vi også muligheden for at cirkulere væsken med det formål at fjerne fissionsvarmen. Brændslet bliver dermed varmeevstraktionsmediet i modsætning til traditionelle reaktorer, hvor brændslet er på fast form og moderatoren er flydende og varmeevstraktionsmediet. Dette sætter så også krav til væsken om høj varmekapacitet og god varmeledningsevne.

Spørgsmålet er så om der findes en væske der overholder de resterende kriterier. Vigtigst er samtidigt at kunne operere ved høje temperaturer, lavt tryk, og lav neutronabsorption.

Brændselstype

Da brændslet er metaller kan vi vælge mellem metal-metal bindinger resulterende i legeringer, metal-ikkemetal/halogen bindinger, som både kan have kovalente- og ionbindinger, oftest resulterende i salte, eller metal-halvmetal bindinger som både kan resultere i legeringer og salte.

Da thorium, uran, og transuranerne er actinider, med smeltepunkter hovedsageligt over tusind grader, er rene

legeringer af actinider ikke praktiske som et flydende brændsel. En mulighed er at sænke actinidernes smeltepunkter med andre metaller, altså en legerings-smeltereaktor. Til dette skal vi bruge et metal med en lav neutronabsorptionssandsynlighed, lavt smeltepunkt, lavt damptryk, og høj opløselighed af actinider.

Kigger vi på det periodiske system i figur 4, hvor de termiske neutronsprednings- og absorptionssandsynligheder er angivet, ses at kun beryllium, magnesium, og bismuth af alle metaller og halvmetaller har acceptable neutronabsorptionssandsynligheder i et termisk spekter. Af disse er bismuth den eneste med et lavt nok smeltepunkt. Til gengæld har bismuth ikke en god opløselighed af actinider. Altså er naturen indrettet på en måde, der gør termiske legeringssmeltereaktorer upraktiske.

Det bør nævnes at naturligt lithiums høje absorptionssandsynlighed skyldes dets isotopiske komposition af lithium-6 og lithium-7. Beriges lithium til isotopisk ren lithium-7 er absorptionssandsynligheden kun 0,0454(3) b. Lithium-7 berigning er langt simple end uran-235 berigning, da masseforskellen er $1/7$ frem for $2/238$, og dermed billigere og uden associeret proliferationsrisiko. Men da metallisk lithium er meget reaktivt i luft og vand, især ved rødglødende temperaturer (svarende til over 500 °C), er lithiumlegeringer af sikkerhedsmæssige årsager udelukket.

Tilbage står vi med ikkemetaller og halogener. Af ikkemetallerne og halogenerne ser vi, at kun carbon, oxygen, og fluor har lave nok absorptionssandsynligheder i et termisk spekter.

Traditionelt har man lavet fast brændsel som keramiske actinidoxider, blandt andet grundet deres meget høje smeltepunkter på adskillige tusinde grader. Disse smeltepunkter gør dem dog uegnede til flydende brændsel. Carbonater dekomponerer ved høje temperaturer og organiske molekyler hydrogennbindinger nedbrydes af den kraftige stråling i en reaktor.

Actiniders fluoridsalte er dermed vores de facto væske for en termisk flydende brændselsreaktor. Rene actinidfluorider har dog i sig selv for høje smeltepunkter til praktisk anvendelse. For at sænke deres smeltepunkt kan vi vælge mellem bismuthfluorid, magnesiumfluorid, berylliumfluorid, og beriget lithium-7-fluorid. Af disse er en eutektisk blanding¹ af lithiumfluorid, berylliumfluorid, og actinidfluorid bedst egnet. Dette grundet dets lave smeltepunkt ved atmosfærisk tryk, dets ca. tusinde graders flydende fase og dets høje opløselighed af både actinid- og fissionsproduktfluorider.

Yderligere har disse saltsmelter gode varmekapaciteter og varmeledningsevner, lave viskositeter, med passende lave neutronabsorptioner. Det er også muligt at udføre kemi og/eller udnytte størstedelen af fissionsproduktfluoridernes volatilitet² til at koge dem fra saltsmelten. Altså kan vi få alle vores kriterier opfyldt med fluorid saltsmelter. Udfordringen i saltsmelter ligger i deres korrosive opførsel. Korrosionen kan dog kontrolleres ved at eliminere oxygen og tilsætte berylliumfluorid.

¹En eutektisk blanding af to stoffer er når forholdet giver det laveste smeltepunkt.

²Volatilitet beskriver et stofs tendens til at fordampe.

H Hydrogen 82,02(6) 0,3326(7)		Symbol Navn σ _s σ _a																He Helium 1,34(2) 0,00747(1)					
Li Lithium 1,37(3) 70,5(3)	Be Beryllium 7,63(2) 0,0076(8)																	B Bor 5,24(11) 767,0(80)	C Carbon 5,551(3) 0,00350(7)	N Nitrogen 11,51(11) 1,90(3)	O Oxygen 4,232(6) 0,00019(2)	F Fluor 4,018(14) 0,0096(5)	Ne Neon 2,628(6) 0,0039(4)
																		Al Aluminium 1,503(4) 0,231(3)	Si Silicium 2,167(8) 0,171(3)	P Fosfor 3,312(16) 0,172(6)	S Svovel 1,026(5) 0,53(1)	Cl Klor 16,8(5) 33,5(3)	Ar Argon 0,683(4) 0,675(9)
K Kalium 1,96(11) 2,1(1)	Ca Calcium 2,83(2) 0,43(2)	Sc Scandium 23,5(6) 27,5(2)	Ti Titan 4,35(3) 6,09(13)	V Vanadium 5,10(6) 5,08(4)	Cr Krom 3,49(2) 3,05(6)	Mn Mangan 2,15(3) 13,3(2)	Fe Jern 11,62(10) 2,56(3)	Co Kobolt 5,6(3) 37,18(6)	Ni Nikkel 18,5(3) 4,49(16)	Cu Kobber 8,03(3) 3,78(2)	Zn Zink 4,131(10) 1,11(2)	Ga Gallium 6,83(3) 2,75(3)	Ge Germanium 8,60(6) 2,20(4)	As Arsen 5,50(2) 4,5(1)	Se Selen 8,30(6) 11,7(2)	Br Brom 5,90(9) 6,9(2)	Kr Krypton 7,68(13) 25,0(10)						
Rb Rubidium 6,84(4) 0,38(1)	Sr Strontium 6,25(10) 1,28(6)	Y Yttrium 7,70(9) 1,28(2)	Zr Zirkonium 6,46(14) 0,185(3)	Nb Niobium 6,255(5) 1,15(6)	Mo Molybden 5,71(4) 2,48(4)	Tc Technetium 6,3(7) 20,0(10)	Ru Ruthenium 6,6(1) 2,56(13)	Rh Rhodium 4,6(3) 144,8(7)	Pd Palladium 4,48(9) 6,9(4)	Ag Sølv 4,99(3) 63,3(4)	Cd Kadmium 6,50(12) 2520,0(500)	In Indium 2,62(11) 193,8(15)	Sn Tin 4,892(6) 0,626(9)	Sb Antimon 3,90(6) 4,91(5)	Te Tellur 4,32(5) 4,7(1)	I Jod 3,81(7) 6,15(6)	Xe Xenon 23,9(12)						
Cs Cesium 3,90(6) 29,0(15)	Ba Barium 3,38(10) 1,1(1)	La-Lu lanthanider	Hf Hafnium 10,2(4) 104,1(5)	Ta Tantal 6,01(12) 20,6(5)	W Wolfram 4,60(6) 18,3(2)	Re Rhenium 11,5(3) 89,7(10)	Os Osmium 14,7(6) 16,0(40)	Ir Iridium 14,0(30) 425,0(20)	Pt Platin 11,71(11) 10,3(3)	Au Guld 7,75(13) 98,65(9)	Hg Kviksølv 26,8(1) 372,3(40)	Tl Thallium 9,89(15) 3,43(6)	Pb Bly 11,18(7) 0,171(2)	Bi Bismuth 9,156(4) 0,0338(7)	Po Polonium	At Astat	Rn Radon						
Fr Francium	Ra Radium 13,0(30) 12,8(15)	Ac-Lr	Rf Rutherfordium	Db Dubnium	Sg Seaborgium	Bh Bohrium	Hs Hassium	Mt Meitnerium	Ds Darmstadtium	Rg Roentgenium	Cn Copernicium	Nh Nihonium	Fl Flerovium	Mc Moscovium	Lv Livermorium	Ts Tennes	Og Oganesson						

</

Figur 4. Det periodiske system med termiske neutron-spædningsandsynligheder σ_s og -absorptionsandsynligheder σ_a for elementernes naturlige forekomst, givet i enheden barn ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$). Data fra Table of coherent scattering lengths and cross sections, Sears 1992 and Rauch 2001.

Saltsmeltereaktor

Det var selvsamme erkendelser, som vi har gennemgået, der drev en lille gruppe fysikere ved Oak Ridge National Laboratory til at udvikle og teste adskillige flydendebrændselskernereaktorer.

Forskningen blev oprindeligt drevet af det amerikanske luftvåbens ønske om et kernekraftdrevet bombefly, der kunne blive i luften med atomvåben på ubegrænset tid. Dette ville kræve udvikling af en kompakt reaktor der kunne operere ved høj temperatur og lavt tryk, være stabil og utrolig sikker. Drømmen om at spænde en reaktor ombord på et fly var ikke just delt af forskerne på projektet, men de indså, at en sådan reaktor ville være brugbar til mange andre anvendelser, ikke mindst billig energiproduktion.

Gruppen byggede og testede to termiske spekter, grafitmodererede, fluoridsaltsmeltereaktorer, "Aircraft Reactor Experiment" og "Molten-Salt Reactor Experiment", og havde en tredje planlagt, som var designet til at være en thoriumavler. Det fortyndede flydende brændselssalt blev cirkuleret gennem en grafitblok for moderation og ført ud af reaktorkernen og gennem en varmeveksler.

Den anden af disse reaktorer brugte en uran-lithium 7-beryllium-fluorid salt, opererede fra 1965 til 1969, og var kritisk i 17 655 timer ~ 2 år, uden problemer. De demonstrerede, at saltens termiske ekspansion passivt regulerede reaktorkritikaliteten. Som en sikkerhedsfunktion var der en klump frossen salt, i bunden af reaktorkernen, der stoppede brændselssalten fra at dræne ud af reaktorkernen og ned i en opbevaringstank,

hvorpå kædereaktionen stoppes helt. Saltproppen blev kølet af en blæser, så i tilfælde af strømafbrydelse ville proppen smelte og reaktorkernen drænes. Med udviklingen af specielle nikkellegeringer demonstrerede de også at korrosion kunne kontrolleres.

Projektet blev skåret væk af Nixon, i slut 1960'erne, for at satse på flydende-metalkølet-hurtigreaktor-programmet, som i dag er skrottet.

Siden årtusindeskiftet har saltsmeltereaktorer fået øget opmærksomhed, hovedsageligt på grund af muligheden for en passivt sikker, termisk spekter, thorium/uran-avler.

Som konsekvens af basal fysik og kemi er thoriumcyklus saltsmeltereaktorer den mest optimale implementation til at udnytte fissionsenergi. Yderligere har saltsmeltereaktorer evnen til være langt billigere end kraftværker med fossilt brændsel og den absolut mest sikre måde at generere energi på i form af produceret energi (i kW h) pr. antal tabte menneskeliv.



Aslak Stubsgaard er uddannet teoretisk fysiker fra Aarhus Universitet med speciale i "High Fidelity Fluid Fuel Reactor Multiphysics".

Protonterapiens fysik – en kort udledning af Bragg-kurven og dens top

Af Pernille Bræmer-Jensen og Ulrik I. Uggerhøj, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Med den nært forestående kommissionering af *Dansk Center for Partikelterapi* ved Aarhus Universitetshospital, planlagt til oktober 2018, er det relevant med en simpel, men alligevel stort set retvisende, gennemgang af den såkaldte Bragg-kurve og dens top. Som yderligere motivation til en sådan gennemgang er et emne med arbejdstitlen “Medicinsk fysik” for tiden under overvejelse til brug for “fysik i det 21. århundrede” i gymnasieskolen fra 2018. I denne artikel gives en analytisk tilgang til energitabskurven for protoner op til deres endelige rækkevidde. Formålet er at give en kortfattet og overskuelig gennemgang af en tung, elektrisk ladet partikels indtrængning i stof med særlig vægt på aspekter relevante for partikelterapi.

Protoner i kræftbehandling

I 2018 åbner Dansk Center for Partikelterapi, DCPT, som en del af Aarhus Universitetshospital og det bliver det første sted i Danmark, hvor kræftpatienter kan blive behandlet med protonstråling frem for røntgenstråling. Derfor har det stor relevans at forstå, hvordan protoner afsætter energi i en tumor såvel som i det raske væv. Det er selvfølgelig komplekst at forstå det fulde billede af, hvordan protonen agerer, og derfor kan et simpelt estimat af den ladede partikels opførsel være meget nyttigt, og også være med til at give en god forståelse for, hvordan denne type stråling kan bruges inden for medicinsk fysik, og hvilke fordele det kan give.

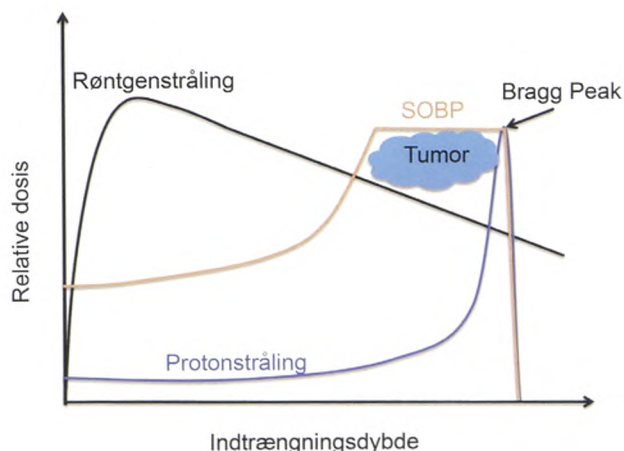
Protoner og tungere ioner bliver i dag brugt som strålingsterapi på over 50 centre verden over [1], og derfor er der allerede meget erfaring med denne type strålebehandling, som også vil blive implementeret i partikelcenteret i Aarhus.

Men hvorfor overhovedet bruge protoner til strålebehandling? Ladede partikler har en meget karakteristisk måde at afsætte dosis på, da de afsætter mest energi lige inden de bliver stoppet helt, mens røntgenstrålingen afsætter energi hele vejen igennem patienten, og den største del af dosis bliver afsat i starten. Denne top for protoner, hvor det meste dosis bliver afsat, kaldes for *Bragg Peak* eller på dansk *Bragg-toppen*, og den er kvalitativt vist i figur 1 som den blå kurve der, i modsætning til røntgenstråling, vist med den sorte kurve, leverer det meste af dosis ved stor indtrængningsdybde. Denne indtrængningsdybde for en Bragg-top er bestemt af protonstrålens energi. Dermed kan et større område af fx en tumor modtage en høj dosis, ved at have flere stråler med varierende energier, den såkaldte *Spread Out Bragg Peak*, *SOBP* eller udbredt Bragg-top. En SOBP er ligeledes illustreret kvalitativt på figur 1 med den orange kurve. Det er netop denne velafgrænsede rækkevidde, der gør protonstråling fordelagtig, både fordi tumoren bliver bestrålet med højst mulig dosis, og fordi det omkringliggende raske væv samtidigt bliver skånet, og mulige bivirkninger derved mindskes [2].

Som dette er fordelene ved partikelterapi, er det også én af de største udfordringer. Hvor den høje afsatte dosis ender, er af stor betydning, og kan meget præcist bestemmes ved hjælp af energien – hvilket vi vender

tilbage til i udregningerne nedenfor. Derfor er det lige så vigtigt, at tumorens placering er kendt med stor nøjagtighed, da der ellers kan afgives store mængder dosis i raskt væv. Det giver nogle restriktioner på, hvilke typer kræft, der med fordel kan behandles med partikelstråling. Hvis tumoren er i lungerne, vil den konstant ændre placering, når patienten trækker vejret, og ligeledes kan en tømt eller fyldt blære ændre positionen af tumoren i prostata. Der bliver forsket i forskellige teknikker, der kan korrigere for disse bevægelser, hvor bl.a. adaptiv strålebehandling er en mulighed, da dosisplanlægningen kan ændres under stråleforløbet.

Den radiobiologiske effekt (altså hvordan strålingen påvirker vævet) ved protonstråling er forskellig fra effekten ved den konventionelle strålebehandling. Hvor stor denne relative forskel, på engelsk kaldet *Relative biological effectiveness*, *RBE*, er, kan ikke nemt bestemmes, da der kan være rigtig mange faktorer, der spiller ind, fx celletypen, den samlede dosis eller den afsatte energi. Derfor bliver der især også eksperimenteret med hvilke RBE modeller, der giver den bedste forståelse af, hvad den egentlige afsatte dosis er i tumoren såvel som i det raske væv.



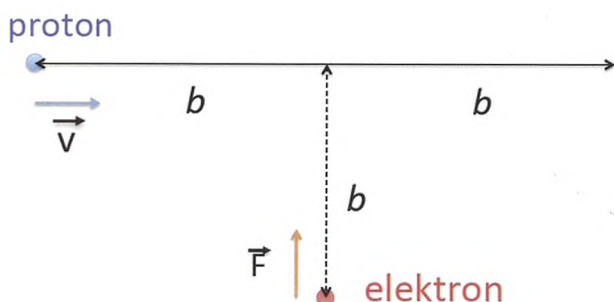
Figur 1. Et eksempel på, hvordan røntgenstråling, sort kurve, og protonstråling, blå kurve, afsætter dosis. Den orange kurve viser et eksempel på “Spread Out Bragg Peak” (SOBP), der udgøres af adskillige vægtede Bragg-toppe, hver med en forskellig indtrængningsdybde og varierende intensitet.

Den basale kollision

En billardkugle der rammer en anden billardkugle med samme masse, vil højst sandsynligt primært blive afbøjet fra sin indkommende retning. Dens energitab vil være ret begrænset, medmindre den rammer den anden kugle i et næsten centralt stød. Derimod, hvis billardkuglen rammer en samling små kugler med samme totalmasse, vil den sandsynligvis kun ændre retning meget lidt, men vil til gengæld tabe en betydelig mængde af sin kinetiske energi, grundet de mange små energioverførsler til kuglerne.

Det er næsten det samme, der sker under nedbremsningen af en hurtig (men i første omgang antaget ikke-relativistisk, dvs. $v \ll c$), tung, elektrisk ladet partikel, der gennemtrænger et materiale. I det følgende betegnes den indkommende partikels masse med M og dens elektriske ladning med ze , hvor z er lig med 1 for en proton. For elektronen betegnes massen med m , og ladningen er $-e$. Energitalet af det tunge projektil sker hovedsageligt – i analogi med billard-tilfældet omtalt ovenfor – gennem mange små energioverførsler til elektronerne i det materiale den gennemtrænger. Med det formål at estimere størrelsen af energitalet, og for at være specifik i forbindelse med partikelterapi til behandling af kræft, vil vi i det følgende betragte protoner, der nedbremses i vand, idet vand udgør hovedbestanddelen af kroppen.

Overførslen af energi til elektronen – og derfor energitalet for projektilet – kommer af den elektriske vekselvirkning mellem protonen og elektronen. Lad nu protonen have en *stødparameter* – den mindste afstand – på b i forhold til elektronen, og antag at protonens bevægelse foregår langs en ret linie, som vist i figur 2. At protonens spor er en (næsten) ret linie, er et resultat af, at protonen er meget tungere end elektronen, som vi antager som værende i hvile i begyndelsen, set fra laboratoriet. Endvidere, idet energitalet ΔE per elektron-kollision er meget småt (af størrelsesorden eV) sammenlignet med den indkommende partikels kinetiske energi E (af størrelsesordenen 10–100 MeV), kan projektilets hastighed under den enkelte kollision antages at være konstant lig med $\vec{v}$, omend projektilet efter et stort antal kollisioner vil blive nedbremset.



Figur 2. En skematisk tegning af kollisionen mellem en proton og en elektron. Kun kraftkomponenten vinkelret på protonens bevægelsesretning er vist.

Vi estimerer nu vekselvirkningslængden – længden over hvilken protonen overfører en betydelig impulsændring til elektronen – til at være $2b$, se figur 2, således at vekselvirkningstiden Δt kan findes ved at dele med

v , dvs.

$$\Delta t \simeq \frac{2b}{v}. \quad (1)$$

Den transversale – i forhold til projektilets retning – kraft $F_{\perp}$, er under hele vekselvirkningstiden cirka givet ved Coulomb-kraftens størrelse (her angivet i gaussiske enheder, som stort set overalt i det følgende kan konverteres til SI-enheder ved erstatningen $e^2 \rightarrow e^2/(4\pi\epsilon_0)$), dér hvor protonen er i afstanden b fra elektronen,

$$F_{\perp} \simeq -\frac{ze^2}{b^2}. \quad (2)$$

Her kan vi benytte Newtons 2. lov $\vec{F} = d\vec{p}/dt$ til at give $\Delta p_{\perp} = F_{\perp} \Delta t$, idet vi kun betragter den transversale komponent. I princippet skulle man integrere den korrekte værdi for kraften i den transversale retning, $F_{c\perp}(t) = -ze^2b/(v^2t^2 + b^2)^{3/2}$, over tid i et interval fra $-\infty$ til $+\infty$. Men i den ovenfor nævnte tilgang er overvurderingen af kraften i ligning (2) kompenseret af en tilsvarende kortere varighed givet ved ligning (1), og faktisk giver $\Delta p_{\perp} = F_{\perp} \Delta t$ det samme resultat som den korrekte integration, dvs.

$$\begin{aligned} \Delta p_{\perp} &= F_{\perp} \Delta t = \int_{-\infty}^{+\infty} F_{c\perp}(t) dt \\ &= -ze^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{b dt}{(v^2t^2 + b^2)^{3/2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Ændringen af den longitudinale komponent $\Delta p_{\parallel}$ – den langs protonens bevægelsesretning – skifter fortegn dér hvor protonen passerer tættest forbi elektronen, dvs. hvor afstanden til elektronen er b . Denne komponent bidrager derfor meget lidt til impulsoverførslen, $\Delta p_{\parallel} \simeq 0$, idet kollisionens impulsoverførsel i den anden fase – efter passagen – er næsten lig, men med modsat fortegn, impulsoverførslen i den første fase (eksakt lig, i tilfældet med nul energitab, og et lige projektil-spor). Derfor bliver kollisionens totale impulsoverførsels størrelse stort set lig produktet af ligningerne (1) og (2)

$$\Delta p \simeq \Delta p_{\perp} \simeq \frac{ze^2}{b^2} \frac{2b}{v} = \frac{2ze^2}{bv}, \quad (4)$$

hvor fortegnet er negligeret, da vi ikke er interesserede i, hvilken retning elektronen har efter kollisionen, men blot den energi, den har taget fra protonen.

Idet vi betragter en energirig, men ikke-relativistisk, kollision (dvs. kinetiske energier under $Mc^2 \simeq 1000$ MeV), kan den kinetiske energi skrives som $W = mv^2/2$, og da impulsen er $p = mv$, kan vi skrive $W = p^2/2m$, hvorved overførslen af kinetisk energi per elektron bliver

$$\Delta W \simeq -\frac{(\Delta p)^2}{2m} = -\left(\frac{2ze^2}{bv}\right)^2 \frac{1}{2m} = -\frac{2z^2e^4}{mb^2v^2}, \quad (5)$$

hvor fortegnet viser, at energi bliver taget væk fra projektilet. Alt dette var for en ganske bestemt stødparameter, b , og eftersom atomer er bittesmå, er det umuligt at kontrollere denne stødparameter. Vi må derfor integrere over alle de mulige stødparametre, som protonen udsættes for under kollisionerne med elektronerne, under gennemtrængningen af materialet med massetætheden ρ_m og tykkelse Δx . Med massetætheden givet, bliver

antalstætheden $n = N/V = N_A \rho_m / M_m$, hvor $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ er Avogadros konstant og M_m er molar-massen. For vand er $M_m = 18,0 \text{ g/mol}$ og $\rho_m = 0,998 \text{ g/cm}^3$ hvilket giver $n = 33,37 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. Dette er imidlertid molekyltætheden, og da hvert vandmolekyle har $Z = 10$ elektroner, fås

$$n_e = Zn = 3,337 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}. \quad (6)$$

Antallet af elektroner, med en stødparameter mellem b og $b + db$, mødt af partiklen mens den gennemtrænger den infinitesimale tykkelse dx er $n_e 2\pi b db dx$ (antallet af elektroner i en cirkelskive af bredde db , omkreds $2\pi b$, tykkelse dx og tæthed n_e). Således, fra ligning (5), bliver energitabet for disse kollisioner givet som

$$dW_b \simeq -\frac{2Zz^2e^4}{mb^2v^2} n_e 2\pi b db dx = -\frac{4\pi n_e Zz^2e^4}{mv^2} \frac{db}{b} dx, \quad (7)$$

der kan integreres over b , efter at have delt på begge sider med dx .

Integration over stødparametre

Men inden integrationen kan udføres, skal integrationsgrænserne for b bestemmes. Elektronerne i materialet er i virkeligheden ikke helt i hvile, de bevæger sig – forholdsvist langsomt, men de bevæger sig dog – med en vinkelfrekvens ω omkring den kerne de er bundet til. Såfremt kollisionen er tilstrækkeligt fjern, dvs. med stor stødparameter, så er vekselvirkningstiden lang ifølge ligning (1), hvorved elektronen tager mange omgange omkring sin kerne under kollisionen. I dette tilfælde bliver stort set ingen energi overført, i stedet vil det blot resultere i en midlertidig polarisering af elektronskyen. Derfor kan den maksimale stødparameter estimeres som

$$b_{\max} \simeq \frac{v}{\omega}, \quad (8)$$

hvor, hvis $b \gtrsim b_{\max}$, vinkelfrekvensen af elektronen vil være $\omega \gtrsim v/b_{\max}$, så elektronen udfører mange omløb om kernen i løbet af tiden Δt givet fra ligning (1).

Den minimale stødparameter kan findes ved at betragte den maksimale impulsoverførsel til en elektron, $\Delta p_{\max} = 2mv$. For at indse, at udtrykket for $\Delta p_{\max}$ er korrekt, kan man transformere til det referencesystem, hvori projektilet er i hvile, og tænke på en elektron der i dette system rammer protonen med impulsen $p = mv$ og derved bliver reflekteret. Der kan ikke være en større impulsoverførsel end en fuldstændig retningsændring, hvor elektronen starter med $p = mv$ og slutter med $p = -mv$ hvilket giver $\Delta p_{\max}$. Men i henhold til ligning (4), er impulsoverførslen omvendt proportional med stødparameteren, så en maksimal impulsoverførsel svarer til en minimal stødparameter, dvs.

$$\frac{2ze^2}{b_{\min}v} = 2mv = \Delta p_{\max}, \quad (9)$$

der fører til

$$b_{\min} \simeq \frac{ze^2}{mv^2}. \quad (10)$$

Nu kan ligning (7) integreres (vi sætter $dE = \int dW_b$)

$$\frac{dE}{dx} = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{dW_b}{dx} \simeq -\frac{4\pi n_e Zz^2e^4}{mv^2} \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{db}{b}, \quad (11)$$

hvor integralet giver en (naturlig) logaritme

$$\frac{dE}{dx} \simeq -\frac{4\pi n_e Zz^2e^4}{mv^2} \ln\left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}}\right), \quad (12)$$

hvilket med ligningerne (8) og (10) giver

$$\frac{dE}{dx} \simeq -\frac{4\pi n_e Zz^2e^4}{mv^2} L_B \quad \text{med} \quad L_B = \ln\left(\frac{mv^3}{\omega ze^2}\right), \quad (13)$$

så præcise værdier for $b_{\max}$ og $b_{\min}$ er ikke nødvendige for at estimere effekten, da afhængigheden kun er logaritmisk.

Fra front-faktoren i ligning (13), $4\pi n_e Zz^2e^4/mv^2$, og den langsomme variation af L_B , kan det ses, at energitabet hovedsageligt skalerer som $\propto 1/v^2$, op til det område hvor projektilet bliver relativistisk, dvs. hvor $E_{\text{kin}} \gtrsim Mc^2$ og dermed $v \simeq c$. Fra dette punkt og opefter i energi, bliver energitabet stort set kun en logaritmisk tiltagende funktion.

På den anden side, ved tilpas lave hastigheder vil $b_{\max} \simeq v/\omega$, der aftager med faldende hastighed, og $b_{\min} \simeq ze^2/mv^2$, der tiltager, til sidst blive ens, hvilket må betyde, at denne tilgang bliver ugyldig (logaritmen i ligning (12) bliver negativ under denne grænse). For $z = 1$ sker dette når $(v/v_B)^3 = \hbar\omega/\alpha^2 mc^2$, hvor $\alpha = e^2/\hbar c \simeq 1/137$ er finstruktur-konstanten, og $v_B = \alpha c$ er Bohr-hastigheden. For $\hbar\omega = 23 \text{ eV}$ bliver denne betingelse til $(v/v_B)^3 = 0,84$, og for en proton bliver Bohr-hastigheden opnået ved en kinetisk energi på 25 keV. Eftersom energitabet for $E_{\text{kin}} \lesssim Mc^2$ øges efterhånden som hastigheden aftager, $dE/dx \propto 1/v^2$, kan man forvente det maksimale energitab ved en energi cirka svarende til Bohr-hastigheden, under hvilken denne approksimation altså fejler. Det er ikke så overraskende, at maksimum opnås dér, idet ved disse energier kan projektilet og elektronen overføre energi 'resonant', da de har næsten ens hastigheder. Derfor øges dets energitab drastisk, efterhånden som projektilets hastighed aftager under indtrængningen. I den afsluttende del af dets bane, hvor projektilets hastighed er på sit laveste, afleverer partiklen derfor en signifikant del af sin kinetiske energi: Bragg-toppens basis [3]. Som det kan ses af bl.a. [4, 5], er der en stor fordel forbundet med dybdepræcision i dosisafsættelsen ved brug af Bragg-toppen i forbindelse med cancerterapi. Det var den kvalitative forklaring af Bragg-toppen, vi udleder nu et analytisk udtryk for hele Bragg-kurven.

Eftersom logaritmen i ligning (13) er en langsomt varierende funktion, bliver essensen af hastighedsafhængigheden for $E_{\text{kin}} \lesssim Mc^2$ altså givet fra front-faktoren $dE/dx \propto 1/v^2$, så for et simpelt estimat kan vi negligere logaritmens variation med hastigheden, og med $z = 1$ og $v = 0,43c$ for en 100 MeV proton, sætte logaritmen til

$$L_B = \ln\left(\frac{mv^3}{\omega e^2}\right) \simeq 12,4, \quad (14)$$

hvor det er benyttet, at $\hbar\omega \simeq 23$ eV for vand. Et alternativ til denne klassiske rute – der i hovedsagen er den Niels Bohr introducerede i 1913 og 1915 – blev senere udledt af Hans Bethe. I hans kvantemekaniske tilgang, bliver L i ligning (14), igen for en 100 MeV proton, erstattet af

$$L = \ln\left(\frac{2\gamma^2 m v^2}{I}\right) - \frac{v^2}{c^2} \simeq 8.0, \quad (15)$$

hvor det såkaldte ionisations-potential er givet som $I = \hbar\langle\omega\rangle \simeq 75$ eV for vand [6], og en relativistisk korrektion, $-v^2/c^2$, her er blevet sat ind 'per håndkraft'. Som eksempler er værdier beregnet fra ligning (15) for 50 MeV, 175 MeV og 500 MeV lig med 7,2, 8,3 og 9,2, respektivt, dvs. med en ganske svag variation indenfor intervallet af energier relevante for protonterapi. Bethes tilgang er temmelig præcis for disse relativt høje energier.

Rækkevidde og energitab pr. vejlængde

Højresiden i ligning (13), uden $1/v^2$ -delen og med L_B erstattet af L , giver $k_n = 4\pi n Z e^4 L / m$, som vi således sætter til at være en konstant, k_n . Med disse approksimationer og simplifikationer kan energitabet skrives som

$$\frac{dE}{dx} \simeq -\frac{k_n}{v^2}. \quad (16)$$

Da den kinetiske energi af projektilet i det ikke-relativistiske område er $E = Mv^2/2$ kan vi skrive $dE = Md(v^2)/2 = M2v dv/2 = Mv dv$, hvorved ligning (16) bliver

$$\frac{dv}{dx} \simeq -\frac{k_m}{v^3} \quad (17)$$

med $k_m = k_n/M = 4\pi n Z e^4 L / m M$. Vi kan nu omskrive ligning (7) til

$$v^3 dv \simeq -k_m dx \quad (18)$$

og integrere på begge sider, fra en indgangshastighed v_0 til sluthastigheden $v = 0$, svarende til en indgangsdybde på $x = 0$, til partiklens endepunkt ved 'rækkevidden' $x = x_0$,

$$\int_{v_0}^0 v^3 dv \simeq -k_m \int_0^{x_0} dx. \quad (19)$$

Disse integraler kan løses til

$$-v_0^4 \simeq -4k_m x_0, \quad (20)$$

hvorved rækkevidden er proportional med kvadratet på partiklens kinetiske energi $x_0 \simeq v_0^4 / 4k_m = (Mv_0^2/2)^2 / M^2 k_m$

$$x_0 = \frac{E^2}{4\pi n Z e^4 L} \frac{m}{M}. \quad (21)$$

Omsat til tal kan det udnyttes, at $e^2 = 14,4$ eV·Å, $m/M \simeq 1/1836$ og $n_e = nZ = 3,337 \cdot 10^{23}/\text{cm}^3$ for vand (og med $L = 8,3$)

$$x_0 = \frac{E^2}{1325 (\text{MeV})^2} \text{ cm}, \quad (22)$$

så en proton med en kinetisk energi på 175 MeV har en rækkevidde på 23,1 cm i vand. I virkeligheden er dens rækkevidde 20,6 cm, dvs. godt 12 % kortere – ikke dårligt når man tager approksimationens lidt grove karakter i betragtning.

I stedet for, som i ligning (19), at integrere hele vejen op til partiklens endepunkt, kan vi integrere op til punktet x , hvor hastigheden er v , som er mindre end v_0

$$\int_{v_0}^v v^3 dv \simeq -k_m \int_0^x dx \quad (23)$$

så

$$v^4 - v_0^4 \simeq -4k_m x. \quad (24)$$

Ved hjælp af ligning (20) opnås

$$v^2 \simeq 2\sqrt{k_m(x_0 - x)}, \quad (25)$$

der kan indsættes i ligning (13) til at give et energitab pr. vejlængde, den såkaldte stoppe-evne, for en proton på

$$\frac{dE}{dx} \simeq \frac{2\pi n Z e^4}{m\sqrt{k_m(x_0 - x)}} L \quad (26)$$

eller

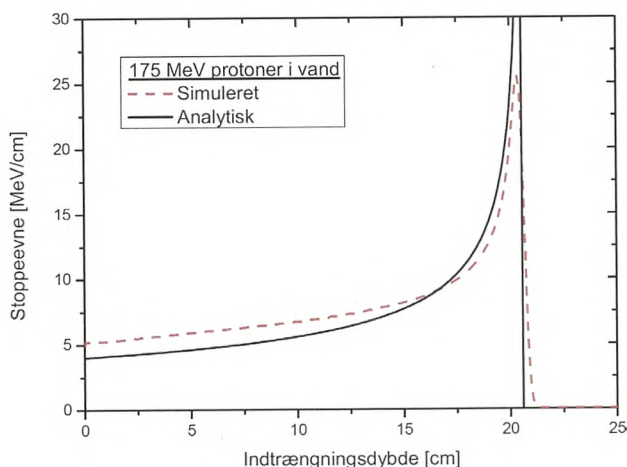
$$\boxed{\frac{dE}{dx} \simeq \sqrt{\frac{\pi n Z e^4 L}{x_0 - x}} \sqrt{\frac{M}{m}}}, \quad (27)$$

der er næsten identisk med energiafsætningen (en lille del af projektilets tabte energi kan undslippe materialet, f.eks. i form af de såkaldte δ -elektroner). Ligning (27) viser Bragg-kurvens omtrentlige form: At stoppe-evnen afhænger af indtrængningsdybden x , frem til partiklens rækkevidde x_0 , som en funktion $dE(x)/dx \propto 1/\sqrt{x_0 - x}$. Man kan naturligvis øge præcisionen i forhold til eksperimentelle data ved en forøgelse af den matematiske kompleksitet, og gennem introduktionen af mindre betydningsfulde fænomener, men det sker oftest på bekostning af gennemskueligheden af de bagvedliggende fysiske mekanismer. De her indrammede formler giver således et relativt simpelt estimat for Bragg-kurverne, men er til gengæld overskuelige og rimeligt præcise.

Divergensen ved $x = x_0$ forsvinder ved introduktion af den såkaldte energitabs-spredning, der skyldes det statistiske element i nedbremsningsprocessen: Ikke alle protoner med samme indgangsenergi taber samme mængde energi i løbet af den samme tilbagelagte afstand. Igen var Niels Bohr en af de første i behandlingen, med et estimat for kvadratet på energitabs-spredningen, Ω_B^2 , der er givet ved

$$\Omega_B^2(x) = 4\pi n Z e^4 x, \quad (28)$$

ved gennemtrængning af et materiale af tykkelse x .



Figur 3. Simulerede og beregnede Bragg-kurver for 175 MeV protoner i vand. Simuleringen er udført med 'Shield-hit' [9], der tager 'alle' vekselvirkninger med så eksakt som muligt, og som er vist at være i fin overensstemmelse med eksperimenter. Beregningen er udført med ligning (27), men med rækkevidden omskaleret fra værdien givet fra ligning (21), 23,1 cm, til den målte værdi, 20,6 cm. Der er overordnet en forskel på op til cirka 30 %, men totalt set er kurvernes former ret ens. Den simple tilgang givet i denne artikel og de resulterende indrammede udtryk for rækkevidde og stoppeevne giver således en udmærket første approksimation til Bragg-kurverne.

Omsat til tal (igen med $L = 8,3$), bliver energitabet cirka lig

$$\frac{dE}{dx} \simeq \frac{18,2}{\sqrt{x_0/\text{cm} - x/\text{cm}}} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}, \quad (29)$$

hvorved en 175 MeV proton taber

$$\frac{dE}{dx} \simeq \frac{18,2}{\sqrt{23,1 - x/\text{cm}}} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}, \quad (30)$$

dvs. omkring $dE/dx \simeq 3,8 \text{ MeV/cm}$ ved $x \ll x_0$, ifølge denne approksimation. Dette er i rimelig overensstemmelse med målinger [7] og tabeller [8] der giver $dE/dx \simeq 4,9 \text{ MeV/cm}$, og er i overensstemmelse med den lidt længere rækkevidde sammenlignet med eksperimentelle værdier. Simulerede og beregnede Bragg-kurver er vist i figur 3. Man kan se, at den simple tilgang givet i denne artikel, og de resulterende indrammede udtryk for rækkevidde og stoppeevne, giver en udmærket første approksimation til Bragg-kurverne. Tillige giver udledningen forhåbentlig en god fysisk fornemmelse for, hvorfor Bragg-kurverne ser ud som de gør.

Litteratur

- [1] Particle Therapy Co-Operative Group, <https://www.ptcog.ch/index.php/facilities-in-operation>.
- [2] Det nationale center for partikelterapi, https://www.rm.dk/siteassets/om-os/a_udbud/dnu_partikelterapi/-det-nationale-center-for-partikelterapi-2012.pdf.

- [3] W.H. Bragg og R. Kleeman (1904), On the Ionization Curves of Radium. *Phil. Mag.* bind 8, 6th series, 726.
- [4] C.S. Søndergaard (2016), Strålebehandling med partikler. *KVANT* årgang 27, nr. 2, maj 2016, s. 28.
- [5] C.E. Andersen (2016), Dosimetri og kalibrering – det fysiske grundlag for stråleterapi. *KVANT* årgang 27, nr. 2, maj 2016, s. 11.
- [6] H. Paul (2007), The mean ionization potential of water, and its connection to the range of energetic carbon ions in water. *Nucl. Instr. Meth. B* 255, 435. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2006.12.034>.
- [7] S. Molinelli m.fl. (2013), Dosimetric accuracy assessment of a treatment plan verification system for scanned proton beam radiotherapy: one-year experimental results and Monte Carlo analysis of the involved uncertainties. *Phys. Med. Biol.* bind 58, 3837-3847. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/11/3837>
- [8] stopping-power and range tables for protons (pstar*), <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>.
- [9] SHIELD-HIT12A (Monte Carlo particle transport program), <http://shieldhit.org>.



Pernille Bræmer-Jensen er fysikstuderende ved Aarhus Universitet. Hun specialiserer sig inden for medicinsk fysik, og er i øjeblikket i gang med sit bachelorprojekt, der handler om modeller for de biologiske effekter ved protonstråling i tumor i prostata.



Ulrik I. Uggerhøj er professor ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, og underviser bl.a. i kurserne 'Speciel relativitetsteori' og 'Partiklers indtrængning i stof'.

Foreningsnyt – kommende foredrag i 2017

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Juni				
19/6	19.30	Global opvarmning for 56 millioner år siden – og i dag	Jens Olaf Pepke Pedersen	SNU
September				
4/9	19.15	Store og små stjerner	Majken B.E. Christensen	AS (Kbh)
11/9	19.15	Store og små stjerner	Majken B.E. Christensen	AS (Aarh)
11/9	19.30	Kunstig intelligens – hvor længe er mennesket klogest?	Thomas Bolander	SNU
18/9	19.15	Formation of stars through the cosmic history	Charles Steinhardt	AS (Kbh)
Oktober				
2/10	19.15	Formation of stars through the cosmic history	Charles Steinhardt	AS (Aarh)
2/10	19.30	Machine learning (foredraget holdes på dansk)	Lars Kai Hansen	SNU
9/10	19.15	Stjernerne magnetfelter	Heidi Korhonen	AS (Kbh)
23/10	19.15	Stjernerne magnetfelter	Heidi Korhonen	AS (Aarh)
23/10	19.30	Watson – kunstig intelligens anvendt i medicin	Anders Quitzau og Henrik Rindell Gudbergson	SNU
November				
6/11	19.15	Stjerner i par og stjerner i hobe	Karsten Brogaard	AS (Kbh)
13/11	19.15	Stjerner i par og stjerner i hobe	Karsten Brogaard	AS (Aarh)
13/11	19.30	Artificial Intelligence in Computer Games (engelsk)	Sebastian Risi	SNU
27/11	19.15	Kompakte stjerner	Niels Lund	AS (Kbh)
December				
4/12	19.15	Kompakte stjerner	Niels Lund	AS (Aarh)
4/12	19.30	Citizen Science: grænsefladen mellem menneskelig og kunstig intelligens	Jacob Sherson	SNU
		Efter foredraget er der medaljeuddeling og reception		

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Inst., Aarhus Univ., Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Aud.F/G122, 8000 Aarhus C.

SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net, www.facebook.com/SNU1824).

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Den 19. juni 2017 holdes et ekstra foredrag i forårets foredragsrække. Her vil Jens Olaf Pepke Pedersen fra DTU Space holde foredrag om hvordan klimaforandringer kan blive selvforstærkende. Pepke Pedersen var medforfatter på en artikel som for nylig blev kåret til årets danske forskningsresultat i 2016 af videnskab.dk.

Læs mere om foredraget på SNU's facebookside:
<https://www.facebook.com/SNU1824/>

Temaet for foredragsrækken i efteråret 2017 er "Kunstig intelligens". Man behøver ikke at være medlem af SNU for at komme til foredragene. Alle er hjertelig velkomne!

Astronomisk Selskab

I denne foredragsserie fokuserer vi på astronomien omkring stjerner, fra fødsel til død. Vi har samlet en række foredragsholdere, der alle forsker eller har forsket aktivt i centrale aspekter af stjernerne dannelselse, liv og død.

Foredrag i
Selskabet for Naturlærens Udbredelse
SNU



Selskabet er stiftet i 1824 af H.C. Ørsted
Selskabets protektor er Hendes Majestæt Dronning Margrethe II

Efterårsprogram 2017

Efterårets tema er "Kunstig intelligens"

11 september 2017 kl. 19.30: Kunstig intelligens – hvor længe er mennesket klogest?
v/ Lektor Thomas Bolander, DTU Compute
Foredraget afholdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, Kbh. K

2 oktober 2017 kl. 19.30: Machine learning (foredraget holdes på dansk)
v/ Professor Lars Kai Hansen, DTU Compute
Foredraget afholdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, Kbh. K

23 oktober 2017 kl. 19.30: Watson – kunstig intelligens anvendt i medicin
v/ Anders Quitzau og Henrik Rindell Gudbergson, IBM
Foredraget afholdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, Kbh. K

13 november 2017 kl. 19.30: Artificial Intelligence in Computer Games (engelsk)
v/ Associate Professor Sebastian Risi, IT Universitetet
Foredraget afholdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, Kbh. K

4 december 2017 kl. 19.30: Citizen Science: grænsefladen mellem menneskelig og kunstig intelligens
v/ Associate professor Jacob Sherson, Aarhus Universitet
Foredraget afholdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, Kbh. K
Efter foredraget er der medaljeuddeling og reception

Alle interesserede er velkomne til selskabets foredrag - det er ingen forudsætning, at man er medlem.
Se mere om selskabet på hjemmesiden: www.naturvidenskab.net eller på www.facebook.com/SNU1824
Forespørgsler angående moderne kan rettes til:
Dorte Olesen, DTU Compute, Tlf.: 29926300 eller e-mail: snu@naturvidenskab.net

KVANT søger ny ansvarshavende redaktør

KVANT – Tidsskrift for Fysik og Astronomi er medlemsblad for en række naturvidenskabelige foreninger: Selskabet for Naturlærens Udbredelse, Dansk Fysisk Selskab, Astronomisk Selskab og Dansk Geofysisk Forening.

KVANT bringer meddelelser fra foreningerne, artikler, boganmeldelser, nyheder, debat og opgaver. Bladet udkommer fire gange årligt i et oplag på godt 2000 stk. og elektronisk på www.kvant.dk.

Med hjælp fra en redaktion bestående af frivillige har redaktøren ansvar for:

- Kommunikation med udgiverforeningerne
- Afholdelse af redaktionsmøder (ca. fire pr. år)
- Invitation af forfattere til artikler
- Koordinering af faglig og pædagogisk korrektur
- Redigering og layout af indlæg og artikler
- Sprogkorrektur med hjælp fra korrekturlæsere
- Klargøring af bladet til trykning, herunder lettere billedbearbejdning
- Elektronisk udgivelse på KVANTs hjemmeside og omtale på facebookgruppe.

Økonomistyring, abonnementer og distribution varetages af andre.

Redaktionen er koncentreret i hovedstadsområdet, og rejser hertil må påregnes i forbindelse med afholdelse af redaktionsmøderne (med refundering af rejseudgifterne).



Redaktøren skal være uddannet indenfor fysik (cand.scient., cand.polyt. eller lignende) og gerne have erfaring med redigering af trykte udgivelser.

Bladet redigeres i latex, med en fast skabelon, og erfaring med dette program – eller vilje til at lære det – er en forudsætning.

Det vil være en fordel at have gode evner indenfor skriftlig formidling samt en bred interesse i fysikkens mange discipliner og tilgrænsende områder.

Der er gode muligheder for at præge bladet og fx sætte fokus på særlige temaer.

Honoraret er pt. ca. 75.000 kr. om året og udbetales med en fjerdedel pr. nummer.

Ansøgning med CV stiles til: kvant@kvant.dk senest den 1. juli 2017. Spørgsmål om hvad arbejdet indebærer kan også stiles hertil.

Redaktørskifte

Af Dorte Olesen, Selskabet for Naturlærens Udbredelse

KVANTs redaktør Michael Cramer Andersen har nu valgt at stoppe efter 13 år på redaktørposten og foreløbigt i alt 18 år på bladet. I 1999 blev han nemlig KVANTs første nyhedsredaktør, da Astronomisk Selskab lige var blevet medudgiver og engagerede Michael, der som astronomistuderende bl.a. havde erfaring med redaktørarbejde og nyhedsformidling i de fysikstuderendes blad GAMMA.

I efteråret 2004 fik Michael så tilbudt at overtage jobbet som ansvarshavende redaktør efter Jens Olaf Pepke Pedersen, der efter fem år på posten gerne ville fokusere mere på sin hovedstilling – men dog tilbød at fortsætte med at tage sig af økonomistyringen. Det er så blevet til 13 års fantastisk godt parløb, og vi har i udgiverforeningerne været rigtig glade for den positive udvikling af bladet, som vi har set igennem disse mange år. Michael har lagt en meget stor indsats i redigeringen og samtidig skabt et fint samarbejde med den frivillige (ulønnede) redaktion, som udgiverforeningerne har udpeget medlemmer til, eller Michael selv har fundet.

Selv har Michael ved KVANTs 25 års jubilæum i 2014 beskrevet, hvordan redaktionen rigtig kom i omdrejninger ved det store temanummer i 2005, hvor "Verdens fysikår

2005" var lige om hjørnet og man planlagde et Einstein-relateret nummer.

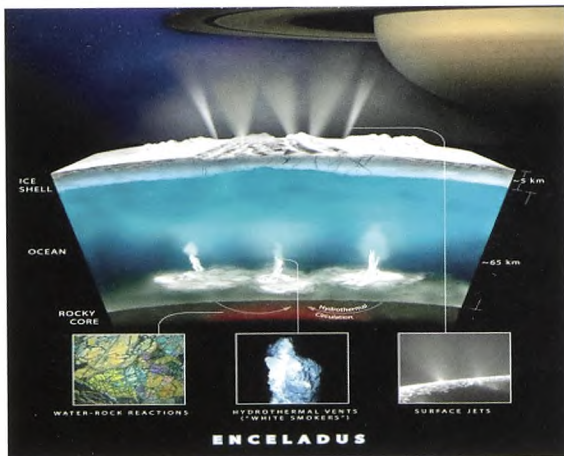
I dag er KVANT et meget levedygtigt blad, som med mellemrum udgiver spændende temanumre og ellers bringer et bredt spektrum af artikler fra forskere og undervisere som brænder for at dele ud af deres viden, og det giver en trofast læzerskare af abonnenter og medlemmer af udgiverforeningerne samt en række gymnasielærere. Lige nu har Jens Olaf Pepke Pedersen så tilbudt at være 'interim' redaktør på KVANT nr. 3 og måske også nr. 4 her i 2017, mens vi finder den helt rigtige til at overtage posten mere permanent. Michael fortsætter som redaktionsmedlem.

Michael siger selv om sine mange år med KVANT: "Det har været et privilegium at stå i spidsen for KVANT. For mig har det været spændende, udfordrende og lærerige år. Jeg har været glad for den store frihed til at præge bladet igennem temanumre om emner jeg selv brænder for og at bidrage med egne artikler. Nu vil jeg sætte mere fokus på nogle andre aktiviteter, men jeg håber meget, at den næste redaktør vil blive lige så glad for hvervet, som jeg har været."

Af Christine Pepke Pedersen, KVANT

Liv på Enceladus?

ASTRONOMI. NASA har fundet tegn på, at der kunne være liv på Saturns ismåne Enceladus. Enceladus er kendt for, at der på sydpolen er observeret gejsere, der spyr søjler af gas ud. For nylig fløj Cassini-rumsonden tæt forbi Enceladus og ind i en af gassøjlerne for at analysere dens kemiske sammensætning. Cassini opdagede, at der fandtes dihydrogen H_2 (brint-)molekyler i gassøjlen. En forekomst af H_2 er et tegn på, at der på Enceladus foregår processer, som frigiver H_2 , og de processer kan stamme fra levende organismer. Vi ved, at der under Enceladus' isoverflade befinder sig et hav og det er i det hav, at forskerne nu mener, at de har beviser for hydrotermisk aktivitet og dermed en kilde til kemisk energi. På Jorden kender vi hydrotermisk aktivitet fra hydrotermiske vælder i havet, der er sprækker i overfladen, hvorfra der kommer opvarmet geotermisk vand op. Vi ved, at der i de hydrotermiske vælder under havet findes liv i form af mikrober, der lever af den varme og de kemikalier, der eksisterer i vælterne. De kemiske processer mellem det varme vand og jernet i stenene i overfladen danner H_2 , da jernet tager oxygen fra vandet og hydrogen bobler op. H_2 er vigtigt for mikroberne, der bruger det til at danne metan. Det er de samme processer, som forskerne mener at have opdaget på Enceladus med Cassinis måling af H_2 i gejsjerne. Opdagelsen af hydrotermisk aktivitet er ikke et bevis på, at der er liv på Enceladus, men viser, at der er en stor mulighed for liv på Enceladus. Da Jupiters måne Europa minder om Enceladus, og da der på Europa også er blevet observeret is-gejsere, forventer forskerne at kunne finde en lignende aktivitet der. NASA har derfor planlagt en mission, kaldet Europa Clipper, der skal undersøge Europa i 2020.



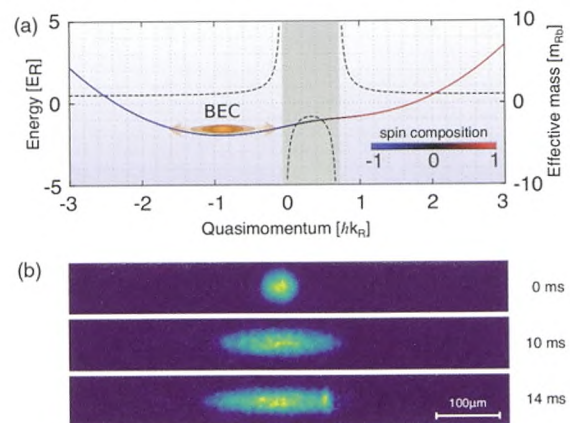
Enceladus. Kemiske reaktioner mellem sten og vand i havet danner dihydrogen der bobler op og senere spys ud af gejsere på overfladen. Figur fra dr.dk.

Kilde: J. Hunter Waite et al.: Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes, *Science* vol. **356**, 6334, pp. 155-159 (2017). DOI: 10.1126/science.aai8703.

Fysikere skaber negativ masse

KVANTEFYSIK. Det er lykkedes forskere på Washington State University at skabe et stof med "negativ masse". Det vil sige, at når man påvirker stoffet med en fremadrettet kraft, accelererer det baglæns. Det er blevet foreslået, at massen af stof, ligesom elektrisk ladning, kan være positiv eller negativ. Stoffet forskerne brugte er Rb-atomer i et såkaldt Bose-Einstein kondensat. Et Bose-Einstein kondensat er en

tilstand som bosoner (partikler med heltalligt spin) ved lav temperatur kan være i, hvor de alle har samme energi og befinder sig i samme kvantetilstand. Atomer kan opføre sig som bølger, og ved lav temperatur, hvor de bevæger sig meget langsomt, altså har lav bevægelsesmængde, har de en større bølgelængde (de Broglies formel $p = h/\lambda$). Ved meget lav temperatur vil atomernes bølgelængde være større end den gennemsnitlige afstand mellem to atomer og alle atomerne vil forme en enkelt kollektiv bølge. Man siger, at atomerne kondenserer i den lavest mulige kvantetilstand. Forskerne skabte et Bose-Einstein-kondensat ved at laserkøle Rb-atomerne til lige over det absolutte nulpunkt ($-273,15^\circ\text{C}$) og derefter med lasere fange atomerne i en fælde. Atomerne opfører sig i denne tilstand som en supervæske, det er en væske som flyder uden at miste energi. For at skabe negativ masse brugte forskerne lasere til at sparke atomerne frem og tilbage og på den måde ændre deres spin. Ændringen af spinet ændrer på, hvordan atomerne vekselvirker med omgivelserne. Nu så det ud som om, at Rb-atomerne ramte en usynlig væg. Når forskerne påvirkede supervæsken med en kraft accelererede den i en retning modsat kraften, hvilket kan fortolkes som, at den har negativ masse.



Dispersionsrelationen (energi som funktion af bevægelsesmængde) for et Rb-Bose-Einstein-kondensat, hvor det ses at der er en region med negativ effektiv masse. Figur fra kilde.

Kilde: M.A. Khamehchi et al.: Negative-Mass Hydrodynamics in a Spin-Orbit-coupled Bose-Einstein Condensate, *Physical Review Letters* vol. **118**, 155301 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.155301.

Forårsagede Yucatán-nedslaget jordskælv i Colorado?

GEOFYSIK. Det berømte Chicxulub-meteornedslag der for 66 mio. år siden slog ned i Yucatán i Mexico, og forårsagede dinosaurernes uddøen, var langt kraftigere end hidtil antaget. Nu har forskere fra Stanford University, USA, nemlig fundet en sammenhæng mellem nedslaget i Yucatan og et kraftigt jordskælv i Colorado, der målte 6 på Richterskalaen. Forbindelsen blev opdaget da forskerne fandt et lag af iridium i en forkastningszone i Trinidad Lakes State Park i Colorado. På Jorden findes iridium kun naturligt i Jordens indre jernkerne, så et fund af iridium er et tydeligt tegn på at det stammer fra et meteornedslag. Forskerne kunne spore iridium-koncentrationen til Yucatán-nedslaget, så jordskælvet skete altså på samme tidspunkt som meteornedslaget. Forskerne mener derfor, at de seismiske bølger, der blev skabt som følge af meteornedslaget, bevægede sig til Colorado, hvor de fik jorden til at bevæge sig med en hastighed på op til 2 m/s. Forskerne er sikre på, at jordskælvet var samtidig med meteornedslaget, da der ikke naturligt er jordskælv i Colorado, da Colorado ligger i midten af en tektonisk plade, så der er ikke nogle naturlige forkastningszoner. For 66 mio. år siden var Colorado meget mere sumpet og havde mange krydsende floder. Forskerne så desuden tegn på, at jordskælvet havde afledt en lille flod i området. Forskerne

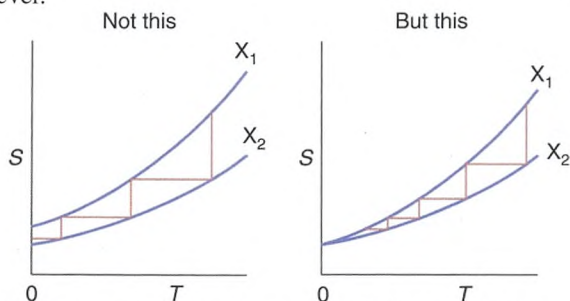
vil nu undersøge et område i New Mexico for flere tegn på jordskælv i midten af tektoniske plader som følge af Yucatán-nedslaget.



Kilde: N.H. Sleep & P. OLDS: Induced Intraplate Earthquakes in Colorado from Extreme Seismic Waves from the End-Cretaceous Asteroid Impact, præsenteret som poster på konferencen SSA Annual Meeting, april 2017.

Termodynamikkens tredje lov bevist

KVANTEINFORMATION. Termodynamikkens tredje lov siger, at det er umuligt at afkøle et objekt til det absolutte nulpunkt ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) i et endeligt tidsrum og med et endeligt antal trin. Denne lov, som kaldes det uopnåelige princip (unattainability principle) er nu blevet eftervist af forskere fra University College London ved at undersøge den maksimale hastighed af køling. De opdagede, at det er muligt at definere en hastighedsgrænse på kølingsprocessen, der gør, at det absolutte nulpunkt ikke kan opnås. Forskerne brugte ideer fra kvanteinformationsteori og computervidenskab til at eftervise loven. I disse felter er det ofte et fælles problem at skulle bestemme antallet af ressourcer, som en given opgave kræver.



Entropi som funktion af temperatur. Vi køler et objekt ved at ændre parameteren X fra X_1 til X_2 i trin. Det absolutte nulpunkt ($T=0$) kan nås med et endeligt antal trin, hvis $S(0, X_1) > S(0, X_2)$, dvs. hvis der er en entropiforskel i $T=0$ (figuren til venstre). Men der er ingen entropiforskel i $T=0$, i det absolutte nulpunkt gælder $S(0, X_1) = S(0, X_2)$, hvilket kun kan opfyldes med et uendeligt antal trin (figuren til højre). Figur fra kilden.

I kølingstilfældet var problemet at bestemme, hvor meget arbejde der måtte udføres, og hvor stort kølingsreservoiret skulle være for at afkøle objektet til det absolutte nulpunkt. De fandt, at det at køle et system til det absolutte nulpunkt enten kræver en uendelig mængde arbejde eller et uendelig stort reservoir. Dette resultat er også i overensstemmelse med den accepterede forklaring af det uopnåelige princip; at når et objekts temperatur nærmer sig det absolutte nulpunkt, nærmer objektets entropi (mængden af uorden) sig også nul, og det er ikke muligt at opnå et objekt med en entropi på nul med et endeligt antal trin. Forskerne undersøgte herefter hvor tæt de kunne komme på det absolutte nulpunkt i et endeligt tidsrum og med et endeligt antal ressourcer. De fandt en sammenhæng mellem tiden og den lavest mulige temperatur, altså hastigheden af afkølingen, og viste at med en lille forøgelse af antallet af ressourcer, kunne de komme til meget lave temperaturer, men at der er grænser. Et system kan fx ikke afkøles eksponentielt hurtigt, da dette ville resultere i en negativ varmekapacitet. Forskerne fandt, at de

opnåede temperaturer kan skalere med den inverse potens af afkølingstiden. Desuden fastsatte forskerne grænser for hastigheden, hvorved information kan slettes. Resultatet af deres forskning har mange anvendelser, da afkøling til meget lave temperaturer er nødvendig for fx kvantecomputere og for præcisionsmålinger i kvanteoptik.

Kilde: L. Masanes & J. Oppenheim: A general derivation and quantification of the third law of thermodynamics, *Nature Communications* vol. 8, 14538 (2017). DOI: 10.1038/ncomms14538.

Eksisterer mørkt stof overhovedet?

TEORETISK HØJENERGIFYSIK. En ny teori, udviklet af den hollandske fysiker Erik Verlinde, siger, at mørkt stof måske slet ikke eksisterer. Mørkt stof er ellers det stof som forudsiges at måtte eksistere, for at forklare observationer hvor stjerner, galakser og andre objekter i Universet påvirkes af tyngdekraften fra en tilsyneladende usynlig masse. Problemet med teorien vi har idag for mørkt stof er, at vi ikke kan bruge Einsteins ligninger (generel relativitetsteori) på et subatomart niveau. Der er også observationer af fx sorte huller som indikerer, at der må være mere end generel relativitetsteori til at forklare tyngdekraften.



Verlindes teori siger at mørkt stof ikke eksisterer og at tyngdekraften fremkommer som en fortolkning af kvanteinteraktioner. Einsteins generelle relativitetsteori beskriver tyngdekraften som en fortolkning af rumtidens krumning (rumtiden krummer pga. stof eller energi), men Verlinde mener altså, at tyngdekraften skabes af kvante-bits (qubits). Den nye teori hævder at kunne forklare den tilsyneladende eksistens af mørkt stof med mørk energi og kvanteinformation. Verlinde forklarer, at tyngdekraften er et produkt af kvanteinteraktioner og foreslår, at den ekstra tyngdekraft, som i dag er forklaret ved mørkt stof, er en effekt af mørk energi. Mørk energi er den energi der eksisterer overalt i rumtiden i hele Universet og som er ansvarlig for Universets accelererede udvidelse. Verlindes teori behandler rumtiden og stoffet, der befinder sig i den, som et hologram der opstår fra det underliggende netværk af qubits. Mørk energi er en egenskab af qubits, og Verlinde argumenterer for, at på store skalaer i hologrammet vekselvirker mørk energi med stof på den helt rigtige måde til at skabe en illusion af mørkt stof. I Verlindes teori er alle data i rumtiden gemt i qubits. Qubits kan være i en superposition (både 0 og 1) og kan være "entangled" (sammenfiltrede) med hinanden (dvs. målingen af den ene qubits tilstand, bestemmer øjeblikkeligt tilstanden af den anden qubit, lige meget hvor langt væk fra hinanden de befinder sig). Mørk energi er i Verlindes teori en langtrækkende entanglement mellem de underliggende qubits. Denne universelle entanglement bliver forstyrret af stof, da det fjerner mørk energi fra den del af rumtiden som stoffet optager. Den mørke energi prøver at få sin plads igen ved at påvirke stoffet med en elastisk respons, og denne respons opfatter vi som den tyngdekraft, vi i dag mener, kommer fra mørkt stof. Hvilken teori der viser sig at passe bedst, Verlindes eller mørkt stof, må kommende observationer afgøre.

Kilde: E.P. Verlinde: Emergent Gravity and the Dark Universe, <https://arxiv.org/abs/1611.02269> (2016).

Relativitetsteori

Ulrik I. Uggerhøj, "Speciel Relativitetsteori", 319 sider, 299,95 kr (ebog 149,95 kr). Set til 269,96 kr. på www.saxo.dk. Aarhus Universitetsforlag 2016.



Ulrik Uggerhøjs bog om speciel relativitetsteori gennemgår i 35 kapitler hele relativitetsteorien fra Lorentztransformationer, tidsforlængelsen og længdeforkortningen til ækvivalensprincippet, rumtid, firevektorer og gravitationsbølger og endelig gps-systemet, en teknologi som er baseret på relativitetsteorien. Bogen henvender sig til fysikstuderende på bacheloruddannelsen, men nogle kapitler kan nok læses af kvikke gymnasieelever på det sidste år. Bogen forudsætter at man kan løse simple ligninger, ved hvad en vektor er og er fortrolig med integration og differentiation. Disse krav nævnes allerede på første side. Her er der også givet forslag til hvilke kapitler der kan bruges i undervisningen i 3.g (fx til studieretningsprojektet), og på første år på universitetet hvor der nævnes kapitler der kan give henholdsvis 5 ECTS og 10 ECTS.

Bogen starter med det matematiske fundament for at kunne forstå relativitetsteorien, og de første kapitler vil nok kunne springes over, hvis man allerede har studeret relativitetsteori (fx fulgt Mogens Dams forelæsninger i Mek1 på KU). Ellers er de første kapitler nødvendige for at kunne læse resten af bogen. Vi begynder med at lære om tidsforlængelsen, at et ur i bevægelse går langsomt, længdeforkortningen, at et objekt i bevægelse forkortes, og samtidigt der illustreres med Einsteins tankeeksperimenter. Herefter udledes Lorentz-transformationerne, der er nødvendige for at kunne regne på relativitetsteorien. Begrebet

lyskegle forklares og vi hører om rumligt og tidsligt separerede begivenheder samt relativistisk energi. Vi hører derefter om ækvivalensprincippet, at fysikken i en lukket kasse i et tyngdefelt $\vec{g}$ er ækvivalent med fysikken i en lukket accelererende kasse i rummet med acceleration $\vec{a} = -\vec{g}$, og vi hører om hvordan ure går langsommere længere inde i et tyngdefelt, hvilket faktisk resulterer i at Jordens centrum er et par år yngre end dens overflade.

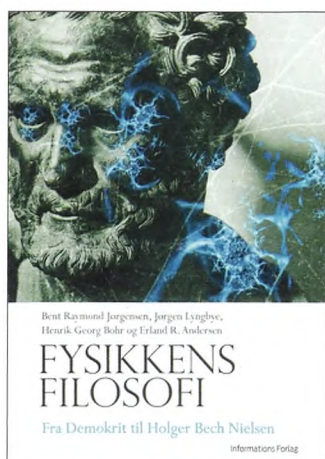
De mest spændende kapitler, synes jeg, er om sorte huller og Hawkingstråling, der går ud på at sorte huller stråler pga. kvantemekaniske effekter (dannelse af partikel-antipartikel par) hvor den ene partikel, med negativ energi, dannes ved begivenhedshorisonten og derefter falder ind i det sorte hul så hullets masse formindskes, mens den anden partikel, med positiv energi, undslipper og observeres som stråling. Bogen beskriver også mange besynderlige paradokser i relativitetsteorien, hvor det mest kendte nok er tvillingeparadokset, som der gives en uddybende forklaring af.

Anden halvdel af bogen er matematisk sværere. Vi får her defineret firevektorer, firekraften (Minkowskikraften) og den elektromagnetiske felttensor (hvilket dog er noget over niveauet på første år på universitetet). Herefter følger en udledning af Lorentztransformationer af elektriske og magnetiske felter. Vi hører kort om observationen af Higgs-partiklen, og bruger firevektorer til at regne på dens masse. Endelig hører vi om målingen af gravitationsbølger og om gps-systemet, hvor satellitter udstyret med præcise atomure og ved hjælp fra relativitetsteorien kan bestemme en position nøjagtigt.

Bogen er godt skrevet, den er spændende at læse og indeholder mange detaljer, særligt i de matematiske udledninger, hvor den til tider kan føles tung at læse hvis man gerne vil regne med på alle udledningerne. Det kan være noget af en mundfuld at læse hele bogen på en gang, da den er så omfattende, så jeg vil foreslå, at man udvælger nogle kapitler til en start. De sværeste kapitler er markeret med stjerner og kunne evt. springes over ved første læsning. Bogen kan også fint fungere som et opslagsværk, som man senere kan vende tilbage til og læse mere i (under forudsætning af at man ikke glemmer fundamentet). Jeg synes det vil være en rigtig god ide at bruge bogen i undervisningen på universitetet, da den er interessant at læse, indeholder mange gode illustrationer og da der medfølger opgavesæt (som man kan downloade). At bogen er på dansk vil muligvis også gøre det lettere for studerende at læse den. Endelig indeholder bogen referencer til artikler som de studerende kan læse videre i.

Fysikkens biografier

Bent Raymond Jørgensen, Jørgen Lyngbye, Henrik Georg Bohr og Erland R. Andersen, "Fysikkens filosofi – Fra Demokrit til Holger Bech Nielsen", 448 sider, 449,95 kr. Informations Forlag 2016 (butik.information.dk).



Bogens titel fangede omgående min interesse, men undertitlen med sammenstillingen af Demokrit og Bech Nielsen gjorde mig straks mere betænkelig. På trods af Bech Nielsens mange fortjenester, opfatter jeg ham nu ikke som filosof, og efter endt læsning er konklusionen også, at bogens titel burde have været "Fysikkens biografier", for der er mange biografiske oplysninger, men til gengæld ikke så meget filosofi.

Bogen er da også bygget op som en samling biografier og er i øvrigt inspireret af en planche, der hænger i en af kældergangene under Niels Bohr Institutet. Den begynder også med Demokrit, men ender dog med Stephen Hawking. Mange af biografierne er udmærkede og med mange interessante detaljer, men fremstillingen er ganske ujævn og med mange sludrende formuleringer som "på en måde", "på sin vis", og "mange fysikere mener". Vi får fx at vide, at "Galilei er i en vis forstand..." og "På mange måder gjorde Galilei...", hvorefter man efterlades i uvished om, at i en anden forstand eller på mange andre måder, så var eller gjorde Galilei alligevel ikke osv.

Ind imellem bliver stilen også lidt for lomme-filosofisk, som fx når den omstændighed, at Københavns Universitet i 2001 plantede et æbletræ, som stammer fra Newtons berømte æbletræ, udlægges som "et stærkt vidnesbyrd om, at også de objektivitetsstræbende forskere falder for den charmerende og i hvert fald psykologisk sigende fortælling om en begivenhed, der burde have fundet sted".

Forfatterne gør også William Gilbert (1544-1603) lidt uret, når de skriver, at han fejlagtigt mente, at Jordens magnetisme og dens rotation havde en fælles årsag, fordi det ikke kunne bero på en tilfældighed, at den magnetiske og den astronomiske nordpol lå så nær hinanden. Nu kan man diskutere, hvad man skal forstå ved en fælles årsag i dette tilfælde, men Gilbert havde helt ret i at antage, at det ikke er en tilfældighed, at de to poler ligger nær hinanden.

En mere principiel indvending er det habilitetsspørgsmål, der melder sig, når Holger Bech Nielsen

selv har skrevet kapitlet med sin egen biografi, ligesom Ben Mottelsons biografi er skrevet af Mottelson selv sammen med Dines Hansen. Her har forfatterne dog løst problemet ved, at den mere personlige skildring af Mottelson, bl.a. som "venligheden selv", citeres fra en anden kilde.

I den lidt mere pedantiske afdeling generer det også, at man i en dansksproget bog bruger udtryk som "Local Group galaksehob" eller anfører sin titel som "M.Sc. Physics" eller "M.Sc. Electronics". Det er også lidt underligt, at lederen af Davids Samling pludselig optræder som kilde til et ret generelt udsagn om at islamiske astronomer havde brug for at kunne fastlægge månekalenderen og retningen til Mekka, når de fleste oplysninger ikke har nogen kildehenvisninger.

I en vis forstand og på sin vis er det en læseværdig bog, men på mange måder risikerer man også at blive irriteret undervejs.

JOPP

Billeder af himmelfænomener

Jesper Grønne, "Hvad i himlen", 320 sider, 375 kr. Forlaget Hvadihimlen 2016 (www.hvadihimlen.dk).



Denne bog er et sandt overflødighedshorn af smukke og interessante billeder af himmelfænomener. Der er mere end 700 illustrationer, heraf mange af forfatterens egne fotos. Jesper Grønne er nemlig astrofotograf og har bl.a. specialiseret sig i at fotografere flere af de mere sjældne lysfænomener, bl.a. lysende natskyer, nordlys og "røde feer".

Mere velkendte fænomener som haloer, regnbuer, iskrystaller, lyn, stjernesud og meteorer beskrives også i bogen, og et kapitel omhandler astronomiske objekter. Et afsnit beskriver historiske danske bidrag til forskningen. Her beskrives også, hvordan amatørforskere, som forfatteren selv, og professionelle forskere kan samarbejde om at dokumentere og analysere nogle af de mere sjældne fænomener.

Den sidste del af bogen forklarer en række fototeknikker og efterbehandling af billederne. Her vil aktive fotografer nok finde mange gode tips til fotoindstillinger ved forskellige observationer.

Bogen henvender sig primært til lægmænd, der helt sikkert kan finde inspiration til at observere nogle af de utallige fænomener på himlen.

MCA

Facit til Regneopgaver om Meteoritter og Solsystemet

Svend E. Rugh og Michael Cramer Andersen

I KVANT nr. 1, april 2017 blev der bragt nogle regneopgaver om *Meteoritter og Solsystemet*. Der er udarbejdet facit og identificeret enkelte trykfejl.

Trykfejl:

I den trykte version af regneopgaverne er der nogle fejl:

- På side 29, opgave 1 a) skal der stå, at afstanden fra A til B er **9,5 km**.
- På side 29, opgave 1 c) skal der stå, at meteoriden bevægede sig ca. **19,5 km**.
- På side 30, opgave 3 b) refererer R_M til den oplyste radius, dvs. der bør stå $R_M = 25$ cm.
- På side 32 i opgave 6 c) refereres der til formel (5).
- Henvisningerne til litteraturen skal være [1] på side 31, 2. spalte og [2] på side 34, 2. spalte.

Rettelserne fremhævet med fed er indført i den elektroniske version på www.kvant.dk. Vi beklager fejlene.

Facit til Regneopgaverne:

I KVANT nr. 1, april 2017 blev der bragt nogle regneopgaver om *Meteoritter og Solsystemet*, som også var temaet for nummeret. Der er udarbejdet facit til opgaverne, som findes på:
www.kvant.dk/Regneopgaver-facit.pdf

Løsningerne er udarbejdet af Henning Haack og Michael Cramer Andersen. Hvis du finder fejl i udregningerne må du gerne sende dem i en mail til Henning Haack (hhaack@mainmineralmuseum.org) og Michael Cramer Andersen (micran@gmail.com).

KVANT samlepakke

De seneste 3 årgange (2014-2016) kan købes til i alt 250 kr. plus forsendelse.



Kunst i Videnskab – konkurrence

Af Christina Toldbo

Dage, uger og måneder i laboratoriet gør videnskabsfolk døve for den unikke skønhed, der gemmer sig overalt i deres daglige forskning. Og når vi bliver voksne, glemmer vi nogle gange magien i den videnskab, der findes i vores hverdag. Ikke desto mindre beviste ARTiS-konkurrencen i 2016, at underskøn videnskab findes i både laboratoriet, i naturen og endda i køkkenet!



“Form, Function, Fabulous”(Kim N. Dalby).

Oven på succesen i 2016, åbner Naturvidenskabeligt Fakultet (SCIENCE) på Københavns Universitet nu for konkurrencen “Art in Science” (ARTiS) 2017.

Vi inviterer alle – fra skoleelever, over kokke til videnskabsfolk – til at finde den kunstneriske videnskab i deres hverdag og indsende deres billeder.



10 μ m

“The Lonesome Nomad” (B. Desbiolles og V. Flauraud)

Vinderne udvælges både via offentlige stemmer på sociale medier (Facebook og Instagram) og af et dommerpanel. Der vil blive uddelt priser i adskillige kategorier, heriblandt Young ART-Scientists, der er målrettet gymnasieelever i et forsøg på at opmuntre den næste generation af videnskabsfolk. Der er også priser for det mest humoristiske billede og for den bedste billedtekst! Indsend dit billede på artis.ku.dk, hvor du også finder flere detaljer og inspiration.

Læs mere: www.artis.ku.dk

Instagram: https://www.instagram.com/artis_16/
(#artis og #artinscience)

Facebook: <https://www.facebook.com/ARTiS2016>



Tidevandsfelter – breddeopgave 71 og 72 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere. I første omgang i forhold til universitetsundervisning. Men i anden omgang kunne der måske også trækkes paralleller til andre undervisningsniveauer.

Her bringes løsning og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af KVANT var disse breddeopgaver (nr. 71 og 72 i rækken her i KVANT):

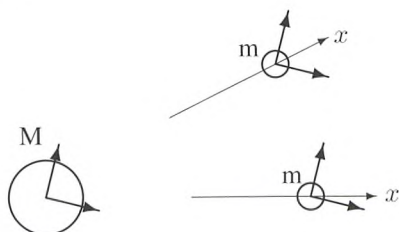
Breddeopgave 71 og 72: Tidevandsfelter

71. Hvordan kan det være, at det med god tilnærmelse går godt at regne med, at inertiens lov gælder i et koordinatsystem med centrum i Solen og faste akser i forhold til stjernerne i vores galakse, når vi ved, at Solen deltager i galaksens rotation?

72. Indtræffer springflod ved fuldmåne, nymåne eller halvmåne? Begrund svaret.

Løsninger

Det væsentlige angående tidevandsfelter kan forstås ud fra følgende figur:



Figur 1. Koordinatsystem (m) accelereret i forhold til inertialsystem (M).

På figuren er markeret to legemer M og m med masserne M og m . For nemheds skyld antager vi, at M er så mange gange større end m , at der til det store legeme kan knyttes et inertialsystem med nulpunkt i det store legemes centrum, medens det lille legeme kredser omkring det store på grund af deres gensidige tyngdekraftstiltrækning. Accelerationen a af det lille legeme er da ifølge Newtons II lov rettet imod centrum af det store legeme og har størrelsen

$$a = GM/R^2, \quad (1)$$

hvor G er gravitationskonstanten og R afstanden imellem de to legemes centre.

På figuren er også indtegnet et koordinatsystem med nulpunkt i det lille legemes centrum, og akser der ikke drejer i forhold til inertialsystemet. Hvis vi vil beskrive bevægelser relativt til dette koordinatsystem, skal vi, udover de kræfter, der også er virksomme i inertialsystemet, medregne en systemkraft (ofte kaldet en fiktiv kraft, selvom den er virkelig nok) modsatrettet a af størrelsen a gange massen af det, der bevæger sig. Tilstedeværelsen af det store legeme har derfor to samtidige konsekvenser for bevægelser af masser relativt

til det lille legemes koordinatsystem. Det store legeme påvirker masserne med en tyngdetiltrækning. Og det store legeme accelererer det lille, således at der i dets koordinatsystem herudover virker et systemkraftfelt. Tidevandsfeltet fra det store legeme i det lille legemes koordinatsystem er summen af dette systemkraftfelt og tyngdekraftfeltet fra det store legeme. I det lille legemes massemidtpunkt ophæver de to kraftfelter hinanden. Men da tyngdekraftfeltet varierer med stedet, hvorimod systemkraftfeltet er det samme overalt, gælder det kun i netop massemidtpunktet. På figuren er indtegnet en x -koordinatakse, som går igennem de to massemidtpunkter, og som har nulpunkt i det lille legemes massemidtpunkt. Langs denne x -akse er størrelsen af tidevandsfeltet $F_t(x)$, regnet positivt bort fra M :

$$F_t(x) = \frac{GM}{R^2} - \frac{GM}{(R+x)^2} = \frac{GM}{R^2} \left[1 - \frac{1}{(1 + \frac{x}{R})^2} \right]. \quad (2)$$

Her er x afstanden fra det lille legemes massemidtpunkt, regnet positivt bort fra M . Ved rækkeudvikling efter den lille størrelse $\frac{x}{R}$ fås:

$$F_t(x) \approx \frac{GM}{R^2} \left[1 - \left(1 - \frac{2x}{R} \right) \right] = \frac{GM}{R^2} \frac{2x}{R}. \quad (3)$$

Denne formel rummer svarene på begge opgaver. (En mere detaljeret udledning af formelen findes i artiklen om springflod i KVANT, juli 2008, breddeopgave 31).

I den første opgave er pointen, at tidevandsfeltet er faktoren $2x/R$ mindre end gravitationsfeltet i nærheden af det lille legeme, GM/R^2 . Med galaksen som det store legeme og Solen, i afstanden $2.6 \cdot 10^{20}$ m fra galaksecentret, som det lille legeme, ses tidevandsfeltet i solkoordinatsystemet i Jordens afstand fra Solen, $1.5 \cdot 10^{11}$ m, således at være af størrelsesordenen $2(1.5 \cdot 10^{11})/(2.6 \cdot 10^{20}) \approx 10^{-9}$ gange mindre end både gravitationsfeltet og udslyngningen fra galaksen taget hver for sig. Faktoren 10^{-9} forklarer, hvorfor et koordinatsystem med centrum i Solen i praksis kan regnes for et inertialsystem.

I den anden opgave er pointen, at tidevandsfeltet omkring det lille legeme ifølge formelen, idet x på figuren er negativ på siden vendt imod det store legeme og positiv på siden vendt bort fra det store legeme, peger bort fra centrum af det lille legeme på begge sider. Solen forårsager derfor på Jorden både en tidevandspukkel vendt imod Solen og en tidevandspukkel vendt bort fra Solen, som Jorden dagligt drejer sig i.

Hvad angår tidevandsfeltet fra Månen gør det ingen forskel, at det fælles tyngdepunkt ligger så forskelligt i de to situationer. Med M for Månens masse og R for afstanden imellem Jorden og Månen er accelerationen af Jorden i dens bevægelse omkring Jordens og Månens fælles massemidtpunkt igen givet ved ligning (1), og tidevandsfeltet på forbindelseslinjen følger igen givet ved ligning (3) med to tidevandspukler.

Tidevandsfelterne fra Solen og Månen ses at forstærke hinanden, når Solen, Månen og Jorden ligger på linje. Springflod finder derfor sted så vel ved fuldmåne, som ved nymåne. Men ikke ved halvmåne.

Kommentar

Indsættes talværdier i Newtons gravitationslov findes gravitationsfeltet fra Jorden ved Månen at være $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Tilsvarende findes Solens gravitationsfelt ved Månen ud fra gravitationsloven at være $5,9 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Solens træk i Månen er altså mere end dobbelt så stort som Jordens træk i Månen.

Som indledning til undervisning i accelererede koordinatsystemer har jeg ofte taget udgangspunkt heri. Hvordan kunne det, dette faktum taget i betragtning, lade sig gøre for Newton at demonstrere sammenhængen imellem æblets fald fra træet og Månens omløbstid om Jorden ved at regne Månen og Jorden som et isoleret system uden Solens tilstedeværelse? Forklaringen ligger i faktoren $2x/R$ i ligning (3). Med afstanden mellem Jorden og Månen indsat for x og afstanden mellem Jorden og Solen indsat for R er faktoren 0,005. Effekten af Solens tilstedeværelse på Newtons regnestykke, Solens tidevandsfelt på Månen i jordkoordinatsystemet, er derfor af størrelsesordenen 1% af Jordens træk, og ikke det dobbelte af Jordens træk.

Besvarelsen ovenfor af breddeopgave 71 er inspireret af denne forklaring. Solen kan tages som nulpunkt for et inertialsystem, hvor der ses bort fra galaksens påvirkning af genstande i solsystemet, på samme måde som Jorden kan tages som nulpunkt for et inertialsystem, hvori der ses bort fra Solens påvirkning af genstandes bevægelser omkring Jorden. Generelt er det måske sådan, at det er faktoren $2x/R$, der forklarer den hyppige forekomst af koordinatsystemer, som i praksis fungerer som inertialsystemer? I et system af kinesiske æsker kan der ved beregninger i indre æsker ofte med god tilnærmelse ses bort fra indvirkningen af gravitationsfelterne fra de ydre æsker, fordi disse kun medfører radikalt mindre tidevandsfelter end gravitationsfelterne selv.

Det mere direkte svar på opgave 71 er imidlertid, at gravitationsfeltet fra galaksen i solsystemet er ca. $5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$, bedømt ud fra en solomløbstid i galaksen på $250 \cdot 10^6$ år og en solafstand til galaksens centrum på 26000 lysår. Og dette er i sig selv et meget svagt felt sammenlignet med f.eks. Solens gravitationsfelt på Jorden og Månen på $5,9 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Ved udregningen af formel (3) er antaget en sfærisk symmetrisk massefordeling i galaksen. Om det mørke stof bidrager tilstrækkeligt til at gøre antagelsen berettiget, ved jeg ikke. Men selvom forholdet imellem styrken af tidevandsfeltet fra galaksen og gravitationsfeltet fra galaksen ikke er 10^{-9} , som antagelsen fører til, er der under alle omstændigheder tale om, at tidevandsfeltet er ret så mange størrelsesordener mindre end gravitationsfeltet. Alligevel er gravitationsfeltet i sig selv så svagt, at hele snakken om tidevandsfelter er overflødig, som svar på opgave 71.

I øvrigt burde opgaveformuleringens "faste akser i forhold til stjernerne i vores galakse" under alle omstændigheder have været ændret til "faste akser i forhold til fjerne objekter uden for vores galakse", svarende til figur 1. Ellers skal der udover systemkraftfeltet som følge af accelerationen af koordinatsystemets nulpunkt også, unødvendigt komplicerende, tages højde for systemkraftfelter som følge af koordinatsystemets aksedrejning. Jeg ville ikke have stillet opgaven i dag.

Min tanke om gravitationen opbygget i et kinesisk æske-

system har også ledt mig på vildveje i forlængelse af besvarelsen af opgave 72. Det er jo nemlig ikke Jorden, der isoleret bliver slynget rundt af Solen, men det samlede system af jord plus måne. Det relevante tidevandsfelt til bedømmelse af fejlen, der begås, når Månens omløbstid udregnes i det isolerede jord/måne system, er derfor det felt, der findes i koordinatsystemet med Jordens og Månens fælles masse-midtpunkt som nulpunkt, fremfor feltet i koordinatsystemet med Jordens centrum som nulpunkt. Og hvad menes der så – i forlængelse af denne tankegang – med at addere tidevandsfelterne på Jorden fra Månen og fra Solen, som det altid gøres, og som det blev gjort i løsningen her af opgave 72

Godt hjulpet (af Peter Ditlevsen) er mit svar nu på dette spørgsmål:

Lad os tænke på en klode påvirket af gravitationskraftfelter fra n andre objekter $a_1(\mathbf{0}), a_2(\mathbf{0}), \dots, a_n(\mathbf{0})$, hvor $\mathbf{0}$ refererer til klodens centrum, således at det er feltstyrkerne i centrum, der er tale om. Kloden vil da i et inertialsystem have accelerationen $a(\mathbf{0}) = a_1(\mathbf{0}) + a_2(\mathbf{0}) + \dots + a_n(\mathbf{0})$. I et koordinatsystem med nulpunkt i klodens centrum og faste akser i forhold til inertialsystemets akser vil genstande i positionen $\mathbf{r}$ derfor, udover gravitationskraftfelterne $a_1(\mathbf{r}), a_2(\mathbf{r}), \dots, a_n(\mathbf{r})$, være påvirket af systemkraftfeltet $-a(\mathbf{0})$. Det resulterende kraftfelt i klodens system er derfor

$$a(\mathbf{r}) = a_1(\mathbf{r}) + a_2(\mathbf{r}) + \dots + a_n(\mathbf{r}) - a(\mathbf{0}) \quad (4)$$

$$a(\mathbf{r}) = [a_1(\mathbf{r}) - a_1(\mathbf{0})] + \dots + [a_n(\mathbf{r}) - a_n(\mathbf{0})], \quad (5)$$

hvor de kantede parenteser repræsenterer tidevandsfelterne forårsaget af de n objekter. Ifølge formel (5) findes det resulterende felt tydeligvis ved direkte addition af bidragende tidevandsfelter fra involverede kilder.

Det er altså i orden at besvare springflodsproblemet ved at lægge tidevandsfeltet fra Solen og tidevandsfeltet fra Månen sammen. Men jeg savnede som sagt et argument for det før den enkle udledning af ligning (5). Jeg har ikke kunnet finde argumentet og udledningen i litteraturen. Tilsyneladende tages den almindelige addition af kræfter umiddelbart til indtægt for den direkte addition af tidevandsfelter. Måske er det selvfølgelig, selvom tidevandsfeltet forårsaget af en enkelt kilde på en måde er virtuelt, når der findes flere tidevandsfelt-forårsagende kilder. Tidevandsfeltet fra den enkelte kilde er virtuelt i den forstand, at det refererer til en ikke eksisterende acceleration, som ville være der, hvis alene kilden var til stede. Måske er det hele noget fortænkt; men tidevandsfeltet fra Solen i koordinatsystemet med nulpunkt i jord/måne masse-midtpunktet, til bedømmelse af fejlen i Newtons isolering af jord/måne systemet ved beregningen af Månens omløbstid, er et andet end tidevandsfeltet fra Solen i koordinatsystemet med nulpunkt i Jordens centrum, til bedømmelse af spørgsmålet om springflod.

Breddeopgavegenren udfordrer ikke kun de studerende. Den udfordrer også opgavestillerne.

Breddeopgave 73. Rutsjende dug.

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave (nr. 73 i rækken her i KVANT):

Hvornår rutsjer en dug, et tov eller lignende ned af bordet, som dugen m.m. ligger på tværs af med ulige lange nedhæng til to modstående sider? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

Da Danmark begravede Tycho Brahe (1602)

Af Peter Andersen, Strasbourg Universitet

Den 13. juli 1602 holdt fysikprofessor Jon Jakobsen Venusin en epokegørende tale foran det københavnske akademi og nok også kongen. Han identificerede Gud med Solen, hyldede Copernicus og hånedes den netop afdøde Tycho Brahe.

Modstanden mod Copernicus

I slutningen af 1500-tallet opnåede den hæderfulde skåning Tycho Brahe international berømmelse, og Europa havde blikket rettet mod hans forskningscenter på Hven. Her begyndte han i 1576, som kong Frederik II's lensmand for øen, at foretage observationer med en hidtil ukendt nøjagtighed. Han måtte i 1597, under gådefulde omstændigheder, forlade sit fædreland og døde den 24. oktober 1601 i Prag, ligeledes under gådefulde omstændigheder. Adskillige forklaringer på hans afrejse og død har gennem tiderne verseret. De skal ikke diskuteres nærmere i denne sammenhæng.

Det er imidlertid et faktum, at astronomen havde mange fjender i Danmark. I to af sine sidste breve fra Bøhmen kaldte han en af dem 'Mercurius' (Merkur eller kviksølv). Det vides ikke, hvem han hentydede til, men et af de mest oplagte emner er en humanist med Jon Jakobsen som dåbsnavn. I yderst snævre forskningskredse kendes han som Venusin¹. Hans korte liv beskrives i en Wikipedia-artikel baseret på en for længst forældet biografi. Siden slutningen af 1900-tallet har han kun været genstand for overfladisk dansk forskning, med den seneste omtale i 2015 [7].

Venusin er af mange årsager interessant, blandt andet, fordi han, som den første i Norden, bekendte sig til det verdenssystem, som den tysksindede polak Nicolaus Copernicus havde fremlagt i sit dødsår 1543. Nogle mener, at denne astronom bevidst havde udskudt udgivelsen for at undgå at blive brændt som kætter. I hvert fald var Europas normalt dybt splittede katolikker og protestanter enige om at bekæmpe hans ideer. Ikke kun kirken, men også Tycho Brahe, datidens mest berømte videnskabsmand, ydede ihærdig modstand mod det nye verdensbillede, der modsagde Bibelen. Det slog først igennem langt op i 1600-tallet takket være nytænkende folk som Johannes Kepler [8].

I Venusins øjne var det specielt et spørgsmål om mod. Det fremgår i høj grad af de digte, han skrev til Tycho Brahe, mens astronomen boede på Hven, eksempelvis *Tu cor habe* (Hav hjerte, dvs. mod), et anagram for 'Tuc Brahe'. I et andet digt opfordrer han sin berømte landsmand til at træde i Atlas og Herkules' fodspor som himmelbærer og til at genopløfte den nedstyrtede Olymp. Hvem skulle ellers gøre det? spurgte han i sidste vers. Måske tænkte han på sig

selv, måske på den italienske filosof Giordano Bruno, som dengang sad fængslet i Rom. Begge digte findes med dansk oversættelse i "Kunstværket" [2] (s. 162 og 166). I år 1600 blev den heltemodige humanist brændt i Rom for kætteri, uden på noget tidspunkt at have fornægtet sin verdensanskuelse. Henrettelsen skyldtes blandt andet udtalelser om universets uendelighed, men filosofens mening om Jordens bevægelighed spillede måske også en rolle. Der er i hvert fald god grund til at tro, at Venusin opfattede Bruno som en martyr. Se specielt forfatterens tyske artikel om emnet fra 2014 [5].

Endnu i 1633 blev Galilei Galileo i Rom under dødstrussel tvunget til at afsværge det kopernikanske verdensbillede. Sidstnævnte italiener blev først rehabiliteret af den katolske kirke i 1992, hans henrettede landsmand venter endnu på revision af sin proces. Modstanden mod Copernicus skærpedes i første halvdel af 1600-tallet, men eksisterede helt fra begyndelsen. Allerede af Martin Luther, der døde i 1546, blev den polske astronom kaldt en nar og – med rette – beskyldt for at ville vende op og ned på hele astronomien (om denne udtalelse se "Kunstværket" [2], s. 9). Intet under, at Copernicus indtil 1602 kun havde ganske få erklærede tilhængere, og i det lutherske Danmark slet ingen.

En dansk heliocentrist af usikker herkomst

Nordens første kopernikaner kaldte sig selv 'Coronensis' frem til sit første bevidnede møde med Tycho Brahe i 1590. Dette latinske tilnavn, ordret 'ham fra kronen', henviste til Landskrona, hvor Venusin havde tilbragt nogle barndomsår. I den endnu utrykte latinske tale fra 1602, vi her skal beskæftige os nærmere med, forklarer han, at han for længst var nået op i fyrrerne. Han var altså født i slutningen af 1550'erne. I talen beskriver han Hven som sit fødested og gentog året efter det samme på dansk i et besynderligt eventyr med titlen "Om Hueen mellom Sielandt Oc Schaane". Det er lidt bedre kendt som "Den Hvenske Krønike" og ender med følgende sætning: "hans fader war sidenn Sogneprest vdj Landskrone i mange Aar" [9]. Da sognepræsten i Landskrona mellem 1563 og 1599 hed Jakob Jonsen, tyder alt umiddelbart på, at Venusin var denne mands søn.

¹Forfatteren har skrevet om Venusin på flere forskellige sprog, om humanistens konflikt med Tycho Brahe specielt bogen "Die Nibelungen zogen nach Dänemark" (2007) [1], om hans rolle omkring astronomens død "Kunstværket" (2009) [2], om hans historieopfattelse "Nordens gotiske storhedstid" (2012) [3], om hans forhold til Italien "De la devise de Bruno à la mort de Tycho Brahe" (2014) [4], om hans heliocentrisme "Auf dem Weg zu Guericke: Jakobsens Lobrede auf Copernicus, Rheticus und Valentin Otho von 1602" (2014) [5], om hans tvetydige udtryksmåde "Die Wiedergeburt der Nibelungen in Dänemark" (2015) [6]. Se forfatterens CV: <http://www.unistra.fr/index.php?id=6685>.

Han blev som dreng sendt til Sjælland og fik optagelse på den kongelige skole, Frederik II havde grundlagt på Frederiksborg i 1568. Han tilhørte sandsynligvis første årgang, blev seks år på kongens yndlingslot og kom da muligvis til Københavns Universitet, altså omkring 1574. Dengang var Tycho Brahe netop blevet berømt takket være en supernova opdaget i november 1572. Allerede året efter beskrev han den nye stjerne i "De stella nova" og forudsagde store forandringer. Datiden så ham mindre som astronom end som astrolog, og han bidrog selv til misforståelsen, eksempelvis ved at stille horoskoper. På hans tid gjorde de fleste ingen væsentlig forskel på de to erhverv. Selv Kepler forsvarede stædigt astrologiens dyder og hævdede, at man ikke skulle smide barnet ud med badevandet, navnlig i 1610 i den ret ukendte tyske afhandling med den latinske titel "Tertius interveniens" (Tredjeparts Interventioner). Allerede inden Tycho Brahes død var nogle dog begyndt på at tage afstand fra astrologien. Venusin var en af dem. Han synes at have været en rationalist helt ud til fingerspidserne.

Efter den uafgjorte Nordiske Syvårskrig (1563-1570), der var endt med et afgørende prestigetab for Frederik II, gjorde Tycho Brahe sin internationale berømmelse gældende over for kongen og fik tildelt øen Hven på livstid i 1576. Samtidig fulgte Københavns Universitet hans aktiviteter med skepsis og efterstræbte ikke noget samarbejde med hans forskningscentrum. Tycho Brahe fik aldrig nogen tilknytning til Danmarks førende akademiske institution, men holdt dog her i september 1574 en længere "tale om de matematiske fagområder" ("De disciplinis mathematicis oratio") [10]. Den blev først udgivet i 1610, men Venusin må have kendt den gennem de tilstedeværende akademikere eller ved selvhør. I talen beskriver Tycho Brahe matematikkens og astrologiens historie siden oldtiden og redegør for forholdet mellem makrokosmos og mikrokosmos. I hans øjne svarede hver planet til en kropsdel, Merkur eksempelvis til lungen. Copernicus forblev unævnt, selv om en af talerens landsmænd havde udgivet verdens første kommentar om det nye polske astronomiske verdensbillede. Den var skrevet af Jørgen Dybvad og udkom i 1569 i Wittenberg under titlen "Commentarii breves in secundum librum Copernici" (Korte kommentarer om Copernicus' anden bog). Ingen af de 112 sider berørte imidlertid den livsfarlige påstand om Jordens bevægelse. Dybvad kan altså ikke betegnes som Nordens første Copernicus-tilhænger.

Den 12. april 1577 fik Frederik II endelig en arving, men ifølge ondsindede tunger var barnet ikke hans, men frugten af hans kones utroskab med Tycho Brahe. Rygtet, der først blev genopdaget for få år siden, har muligvis haft indflydelse på selveste Shakespeare, da han skrev sit drama om utroskab i det danske kongehus. Det anerkendes i dag generelt, at rygtet eksisterede, men det vides ikke, om det talte sandt, se fx [11]. En af dem, der

bidrog mest ihærdigt til at tilsvine dronning Sophie og astronomen, var tilsyneladende Venusin, blandt andet gennem hentydninger i "Den Hvenske Krønike", men også i andre tekster. En forklaring på hans had mod dronningen er muligvis, at han betragtede sig selv som kongens ældste søn. Det kunne forklare tilnavnet 'Coronensis' og den sidste sætning i "Den Hvenske Krønike". Hvorfor i alverden skulle Venusin være stolt over en afdød skånsk sognepræst og samtidig lade vedkommende forblive anonym? Det er mere sandsynligt, at han hentyder til Frederik II, der "i mange år" (1559-1588) bar "landets krone" og styrede sit "sogn" som kirkeligt overhoved. Ordet 'præst' kommer fra græsk og betyder oprindeligt blot 'den ældste'. Frederik II havde før sit ægteskab haft en mangeårig kærlighedsaffære med adelsdamen Anne Hardenberg og ønskede netop at ægte hende i 1558 omkring Venusins formodede fødsel. Dennes forestillinger om kongeligt ophav kan altså teoretisk set være begrundede. Han tilbragte længere tid i nærheden af hoffet end i Landskrona. Det er desuden påfaldende, at han netop forlod Danmark, da kongen fik en officiel arving, og netop vendte tilbage, da Christian blev hyldet til rigets fremtidige konge².

Fra Rostock og Wittenberg til Herfølge og København

I maj 1577 blev Venusin immatrikuleret i Rostock. Han rejste senere gennem Europa og tog i 1580 sin magistereksamen i Wittenberg. Her hørte han forelæsninger af Valentin Otho. I Wittenberg underviste denne mand i nogle år som matematikprofessor og ejede Copernicus' originalhåndskrift, som han havde overtaget fra sin mere velkendte forgænger i samme embede, den polske astronoms første tilhænger, østrigeren Rheticus. Det kan ikke udelukkes, at Venusin under sit studium fik lov til at kigge i det fascinerende kodeks. Selv om Wittenberg ikke havde noget berømt observatorium som på Hven, havde byen symbolsk betydning for astronomiens historie, for det var her, supernovaen ifølge Tycho Brahes eget udsagn første gang blev iagttaget, altså før han selv fik øje på den ovre i Skåne. Wittenberg var ikke kun protestanternes, men også kopernikanernes højborg. Byen er det eneste stednavn i "Hamlet" ud over 'Elsinore'. Prinsens rådgiver Horatio har studeret i Wittenberg, og stednavnet er af den amerikanske astronom Peter Usher blevet fortolket som et symbol på den nye astronomi i modsætning til Elsinore, som han relaterer til kredsen omkring Tycho Brahe [12]. Denne allegoriske fortolkning af det engelske drama understøttes af den afgørende passage i Venusins tale, der gengives nedenfor. Den handler om Valentin Otho, og Wittenberg afspejler for en gangs skyld ikke skjult, men udtrykkeligt kampen mellem det gamle og det nye verdensbillede.

Efter syv år som student i Tyskland vendte Venusin tilbage til Danmark. Han blev præst og provst i Herfølge og overværede hyldesten af den syvårige kronprins i Ringsted i 1584. Tre år senere kom han til Helligånds-

²Denne hypotese om kongeligt ophav er forbundet med rygtet om dronning Sophies utroskab. Den blev første gang forsigtigt overvejet i "Kunstværket" [2] (s. 420-425), uden hensyntagen til "Den Hvenske Krønikes" tvetydige slutsætning. Der var måske kun tale om personlige gisninger fra Venusins side. Det afgørende er ikke, om hans selvpfattelse byggede på et konkret genealogisk grundlag, men at den overhovedet synes at have eksisteret. Det samme gælder for rygtet om dronning Sophie, der dog let kunne verificeres med videnskabelige metoder, hvis der forelå en politisk vilje til at undersøge sagen.

kirken i København og fortsatte her sit præsteembede indtil 1600. Mellem 1590 og 1596 traf han Tycho Brahe flere gange, både i hovedstaden og på Hven. Han skrev latinske hyldestigte og blev forviklet i en kompliceret retssag mellem astronomen og dennes assistent Gellius Sascridus. Sidstnævnte havde under en våd julefrokost på Venusins præstegård højlydt nægtet at indfri sit løfte om at blive astronomens svigersøn. Under retssagen, hvor Venusin mod sin vilje måtte optræde som vidne, skiftede han pludselig tilnavn og begyndte at kalde sig 'Venusinus'. Det skete den 14. maj 1595 i et brev til den islandske humanist Arngrimur Jónsson (jævnfør "Die Nibelungen zogen nach Dänemark" [1] s. 394 og "Kunstværket" [2] s. 200). Venusin valgte dette nye tilnavn som en hyldest til sin fødeø, men også til den antikke syditalienske by Venusia, i dag Venosa. Herfra stammede den romerske digter Horats der af sin samtid blev kaldt 'Venusinus'. Den københavnske præst identificerede sig altså med Horats og havde allerede gjort sig bemærket som digter. Muligvis nåede hans berømmelse helt over på den anden side af Nordsøen, for han har en påfaldende lighed med Hamlets rådgiver Horatio. Han rykkede efterhånden ind i inderkredsen omkring den unge konge, som han jo åbenbart betragtede som sin egen halvbror.

Den nye fysikprofessor forlader hovedstaden i efteråret 1601

Da fysikprofessor Anders Krag den 8. juni 1600 døde af forgiftning efter kemiske eksperimenter, blev Venusin på kongelig anbefaling udnævnt til den afdødes efterfølger. Han opgav dermed sin gejstlige karriere. I de næste syv år bevidner universitetets protokol hans tilstedeværelse i København mere end hundrede gange. Indtil 1607 kan han ikke have befundet sig langt fra hovedstaden på noget andet tidspunkt end i efteråret 1601 og i sommeren 1606. Den 29. august 1601 blev universitetet lukket på grund af en epidemi og åbnede først igen i januar 1602. Venusin rejste i denne periode bort, ifølge eget udsagn til Jylland. Han drog sandsynligvis helt ned til Gottorp Slot, for i den tale, han senere holdt i København, citerer han flere gange et græsk Proclus-håndskrift. Det blev først udgivet i 1618 i Hamborg, men må allerede have tilhørt det berømte slotsbibliotek i 1601. Måske rejste Venusin endnu længere sydpå, for talen vidner om kendskab til Keplers debutværk "Cosmographicum mysterium", udgivet i Tübingen i 1596. Ligesom den tyske astronom beskriver Venusin de fem platoniske legemer (tetraeder, terning, oktaeder, dodekaeder og ikosaeder). Han taler med begejstring om himmellegemernes musik og angiver citater fra Rheticus' "Prima narratio", som Kepler havde genudgivet sammen med sit eget værk. "Prima narratio" er den første trykte beretning om det nye verdensbillede, og den udkom i 1540, tre år før Copernicus' egen beskrivelse. Keplers dobbeltudgave kan Venusin have erhvervet hvor som helst. Det er alligevel en nærliggende tanke, at han under universitetets fire måneder lange lukning rejste helt ned til Bøhmen, hvor den tyske kopernikaner havde arbejdet for Tycho Brahe siden februar 1600. Måske traf Venusin personligt

Kepler, der dengang boede på første sal af skåningens palads i Prag. I Tycho Brahes dødsbo har man fundet det mytologiske digt "Urania Titani", der efter alt at dømme ikke blev skrevet i 1594 af astronomen selv, men først i 1601 af Venusin. Senest om dette digt se [13]; om den nye tilskrivning af digtet til Venusin se "Kunstværket" [2] (s. 225-276).

Venusin bliver efter hjemkomsten dekan og kongelig historiograf

Da Københavns Universitet i januar 1602 genåbnede efter mere end fire måneders lukning, genoptog fysikprofessor sin undervisning og fik snart forfremmelse. Den 15. maj 1602 døde Anders Krag's storebror, den kongelige historiograf Niels Krag. Han var Tycho's eneste ven på universitetet og havde i 1600 modtaget et af astronomens sidste breve til Danmark. Kun en uge efter dødsfaldet blev Venusin udnævnt til efterfølger for Niels Krag som kongelig historiograf. Den 28. maj tilføjede fysikprofessor endnu en titel på sit visitkort, idet han blev valgt til dekan for det filosofiske fakultet. I denne egenskab tilkom det ham at holde en tale ved den årlige magisterpromotion.

I 1602 fik denne akademiske ceremoni et helt usædvanligt format. I april begyndte Venusin at sende breve til forskellige præster for at opfordre dem til at blive magistre. Han stillede en af dem kongelig deltagelse i udsigt. Han fik overtalt 13 personer til at gå op til eksamen og skrev selv en filosofisk traktat i 60 teser om "den menneskelige lykke" ("De beatitate hominis"). Den skulle kandidaterne forholde sig til i en mundtlig prøve for at bestå.

Magisterpromotionen fandt sted lørdag den 13. juli. Om søndagen var der stor festmiddag, og samme dag blev der opført et allegorisk teaterstykke om en bonde, der skiftede klæder ligesom Jeppe, men i modsætning til ham på Bjerget sikkert permanent. Festtalen blev rimeligvis holdt som optakt til magisterpromotionen. Den er kun bevaret i en enkelt afskrift fra Venusins amanuensis Peder Hansen, der kom fra Sakskøbing. Han boede i professorens tjenestebolig på Studiegården mellem oktober 1600 og juni 1604 og afskrev i dette tidsrum talrige breve, digte og netop denne tale. Afskrifterne er samlet i et oktavhæfte med 226 blade. Det er delvist pagineret fra 1 til 365 (bl. 41^r-225^v). Hæftet blev påbegyndt i 1594 på Herlufsholm, hvor Peder Hansen var elev inden ankomsten til København. Enkelte breve og to korte uddrag af talen udkom i slutningen af 1900-tallet. Bagefter gik hæftet i glemmebogen.

Højdepunktet ved magisterpromotionen i juli 1602

Talen fylder 33 sider med ca. 25 linjer på hver side (s. 107-139). Den indledes med et forsvar for den forestående ceremoni. Dernæst præsenterer Venusin sit emne. Det beror på et berømt citat, som Plutarch tillægger Platon: "Gud er geometriker". Citatet findes i adskillige Plutarch-udgaver, men Venusin kendte det sandsynligvis gennem Keplers debutværk. Her finder vi det to gange, både i "Cosmographicum Mysterium" og i "Prima narratio". Det kan fortolkes som et filosofisk grundlag for heliocentrismen, dvs. den opfattelse, at Solen befinder sig i midten af universet. Geocentrismen,

dvs. den modsatte opfattelse, at Jorden er universets ubevægelige centrum, stammer fra den antikke geograf Claudius Ptolemæus. Tycho Brahe modificerede ganske vist den traditionelle geocentrisme ved at lade de øvrige planeter rotere excentrisk omkring Solen, men han gik ikke så langt som sin forgænger Copernicus. Mens Venusin kun havde spekulative argumenter for heliocentrismen, byggede Tycho Brahe sin modificerede geocentrisme på eksperimentelle observationer, men kunne ikke iagttage nogen parallakse for fiksstjernerne under Jordens årlige bevægelse. Hvorom alting er, så fastholdt den skånske astronom Jordens ubevægelighed i midten af universet og antydede nok også med sin berømte symmetriske have omkring Uraniborg, at alt udstrålede fra det sted, hvor han selv befandt sig. Ifølge Peter Usher er navnet på den onde tronraner Claudius, der i "Hamlet" kæmper mod en anonym polak, en hentydning til Ptolemæus.

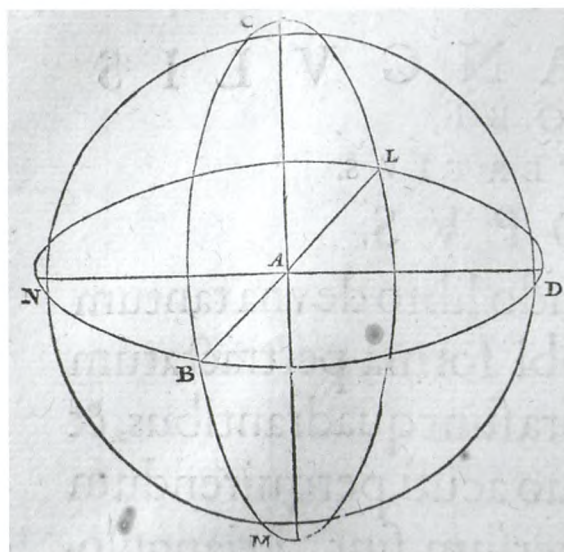
Shakespeareforskningen og astronomien har længe arbejdet uafhængigt af hinanden, og den sidstnævnte disciplin har tit betragtet litteraturvidenskabens højtflyvende teorier med en berettiget skepsis. Stadig flere elementer tyder imidlertid på, at "Hamlet" forbinder de to videnskabsgrene og således udgør en unik undtagelse. Usher kan være svær at følge for Shakespearefolkene, fordi han graver sig dybt ned i astronomiske spidsfindigheder, og svær for astronomerne, fordi hans teorier forudsætter et indgående kendskab til dramatikerens samlede værker. Ikke desto mindre ser det ud til, at den nye "Hamlet"-teori er ved at slå igennem både internationalt og i Danmark. En velkendt dansk udløber af Ushers forskning er Ib Lucas' kriminalroman fra 2008, "Manden på Tapetet". I denne bestseller bliver Tycho Brahe – uden baggrund i noget samtidigt rygte – gjort til far for den verdensberømte engelske dramatiker.

Indtil for nylig kendte hverken Peter Usher eller Ib Lucas noget til Venusin. Dennes heliocentrisme bygger hverken på møjsommelige observationer af stjernehimlen eller matematiske beregninger. Den er intuitiv og teologisk, moralsk og æstetisk funderet. Matematikken udgør kun et æstetisk argument for det nye verdensbillede. Venusin identificerer Gud med Solen og opfatter den som en perfekt kugle. Ifølge Venusin har Gud med vilje valgt denne geometriske form som udtryk for sig selv, fordi den overgår alle andre i skønhed og fuldkommenhed. I modsætning til kantede volumener er kuglen uendelig ligesom Gud. Den er også retfærdig, fordi den skænker alle Jordens indbyggere nøjagtigt det samme antal årlige lystimer, uanset om de bor på Ækvator eller på en af polerne. Solkuglens tre geometriske karakteristika, dens centrum, krop (dvs. volumen) og overflade, identificerer Venusin med Treenigheden, henholdsvis Faderen, Sønnen og Helligånden. Han understøtter denne yderst uortodokse fortolkning af Treenigheden med henvisninger til de hedenske filosoffer Platon og Proclus og påberåber sig også Hermes Trismegistos, hermetismens og alkymiens grundlægger. Denne sagnomspundne ægypter fandt mange tilhængere i Renæssancen, specielt englænderen John Dee. Han placerede på filosofisk grundlag Merkur i centrum af universet og formodes at have udøvet en

vis indflydelse på Shakespeare. Måske omdøbte Tycho Brahe 'Venusinus' til 'Mercurius' på grund af dennes beundring for Hermes Trismegistos. Hermes er jo det græske navn for Merkur.

I Venusins øjne har Solen ikke kun geometriske ligheder med Gud. Også som evig kilde for lys, varme, liv og glæde svarer den til Bibelens beskrivelse af universets skaber og opretholder. Den solreligion, den forhenværende lutherske sognepræst gør sig til talsmand for, minder om den, der blev dyrket i de præcolumbianske kulturer, og faktisk må Venusin have haft et vist kendskab til Amerika, for han beskriver i sin tale den meget aktive, 635 meter høje Masaya-vulkan i Nicaragua. Han hævder, at den hver sjette time afgiver en sfærisk flamme, og at de omkringboende bruger de regelmæssige udbrud som tidsreference. Siden 1552 var vulkanen blevet beskrevet af forskellige spanske forfattere, men ingen af dem synes at nævne netop dette fænomen.

Efter en lang redegørelse for Guds sfæriske fuldkommenhed går Venusin over til trigonometrien og udtrykker dyb beundring for de otte retvinklede, konvekse trekanter, der opstår, når en kugle gennemskæres af tre vinkelrette cirkler. En sådan kugle er afbildet i en bog, som hans tidligere matematiklærer fra Wittenberg, Valentin Otho, havde udgivet i 1596 under titlen "Opus Palatinum de triangulis" (Det pfalziske værk om trekanterne) (se figur 1). Det var tilegnet den matematikinteresserede pfalzgreve Frederik IV. Venusin fik et eksemplar af værket foræret af en gammel studiekammerat og blev så begejstret for gaven, at han skrev et digt.



Figur 1. Sfære gennemskåret af tre vinkelrette cirkler © Valentin Otho, Opus Palatinum, 1596, s. 104

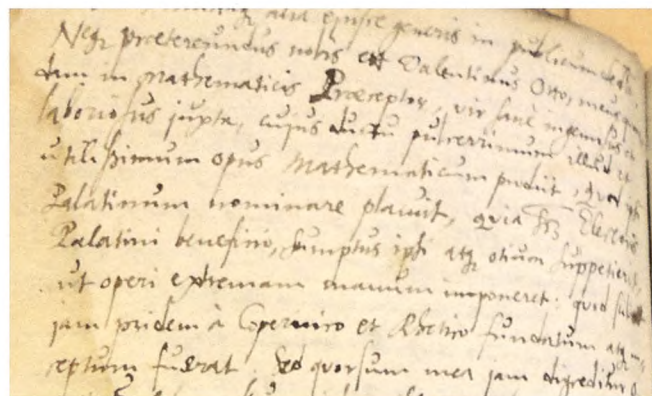
Matematikken gjorde dengang store fremstridt inden for trigonometrien. I 1583 havde Thomas Fincke i Basel udgivet bogen "Geometria rotundi" (Geometri om rundheden) og heri indført funktionerne tangens og sekans. Han blev i 1590 ansat på Københavns Universitet som matematikprofessor og fik efter Tycho Brahes afrejse fra Hven til opgave at inspicere øens astronomiske installationer. Mens den tidligere lensmand endnu

befandt sig i København, erklærede Fincke den 2. juni 1597, at den hvenske forskning ikke kun var "unyttig, men også udsprunget af skadelig nysgerrighed". Venusins tale ved magisterpromotionen i 1602 overværede Fincke som retorikprofessor og overlod året efter dette embede til Venusin, der utvivlsomt havde større talent på dette område end i de eksakte videnskaber, såsom fysikken, matematikken og astronomien. Han var tilhænger af empirismen, men udførte aldrig selv nogen systematisk eksperimentel forskning.

Venusin interesserede sig for alt, men mest kun overfladisk. Botanik og magnetisme er nogle af de emner, der optog ham i begyndelsen af hans akademiske karriere. Senere fordybede han sig i historien og forsøgte at påvise spor efter danske udvandrere rundt omkring i Europa, specielt i England. Det land besøgte han selv i 1606 sammen med Christian IV, der dengang med et stort følge besøgte sin svoger Jakob I. Ifølge et samtidigt vidnesbyrd fik Venusin i London tilbudt optagelse i den engelske adel. Det vides naturligvis ikke, om han samtidig traf Shakespeare. Det er pudsigt, at de to mænd næsten samtidig behandlede Saxos gamle Amlethus-sagn, Venusin i 1602 i et lille latinsk digt. Den 26. juli, tretten dage efter talen i København, finder vi det ældste vidnesbyrd om Shakespeares "Hamlet" i et register over kommende udgivelser.

Efter en længere redegørelse for trekanten giver Venusin et overblik over astronomiens historie, her for første gang i dansk oversættelse (s. 121-122, se figur 2):

"Ved Herkules, vi står i stor gæld til de gamle grækere for deres forarbejder og opdagelser, også til araberne for deres skarpsind og flid, men i meget større gæld for deres begavelse og udholdenhed til de rent ud sagt heltemodige mænd, som Gud i vore forfædres dage og i vores egen tid har opildnet til at betragte Minerva og udfolde hendes slør. Blandt dem hæver den guddommelige og uforlignelige mand Nicolaus Copernicus sit hoved over de andre, ligesom cypresserne plejer at overgå de magelige sneboller. Og efter ham kommer Joachim Rheticus, dernæst vores agtværdige kollega Thomas Fincke, som jeg for ærens skyld nævner. Han har skænket os den særdeles nøjagtige "Geometri om rundheden", har som den første udtænkt de særdeles nyttige eller næsten uundværlige regler for tangenter og sekanter og har udgivet mange andre bøger af samme slags. Vi vil heller ikke forbigå Valentin Otho, min tidligere matematiklærer, et samtidig geniale og uheldigt menneske. Han udgav det særdeles smukke og nyttige matematiske værk, han valgte at kalde det pfalziske, fordi den pfalziske kurfyrste havde oppebåret udgifterne og sikret ham den nødvendige fritid til at fuldende det, et værk, Copernicus og Rheticus engang havde grundlagt og påbegyndt."



Figur 2. Venusins hyldest til Copernicus i Peder Hansens brevbog © Det Kongelige Bibliotek, NKS 271,8°, s. 122

Med andre ord deler Venusin astronomiens historie op i seks faser: grækerne, araberne, Copernicus, Rheticus, Fincke og Otho, med sidstnævnte som kronen på værket. Denne historiske fremstilling er naturligvis i høj grad subjektiv, for Fincke og Otho havde begge en personlig tilknytning til Venusin, der på intet tidspunkt leverer et videnskabeligt bevis for sin verdensopfattelse. Tilsyneladende anså han det ikke for nødvendigt. Han forbigår helt Ptolemæus og dennes lokale arvtager Tycho Brahe. Det er ingen forglemmelse, for 28 år tidligere havde hans publikum og måske også han selv hørt skåningen tale om samme emne, måske endda fra samme talerstol. Talen kan altså betragtes som et åbent opgør med det geocentriske verdensbillede. Den 13. juli 1602 begravede det officielle Danmark den landflygtige, netop afdøde videnskabsmand, som mere end nogen anden før ham havde bragt hæder til sit fædreland. Den symbolske begravelse af Tycho Brahe og opgøret med hans eftermæle i talen fandt sandsynligvis sted under stor latter og i kongens personlige tilstedeværelse. Lige efter sin hyldest til Copernicus og polakkens tilhængere citerer Venusin en passage fra et neoplatonisk værk og nævner dens titel: "Lovprisning af skaldetheden". Det eneste, vi ved om hans eget udseende, er, at han var skaldet som et æg!

Han nævner aldrig Kepler, men forudsiger "en anden Copernicus", der vil løse forskellige problemer, navnlig den excentricitet i planeternes baner, man havde konstateret. Det blev Kepler, der fandt løsningen. Han beskrev banerne som ellipser, men først i 1609. Også tyngdekraften og det frie fald gør Venusin sig visse overvejelser om i talen.

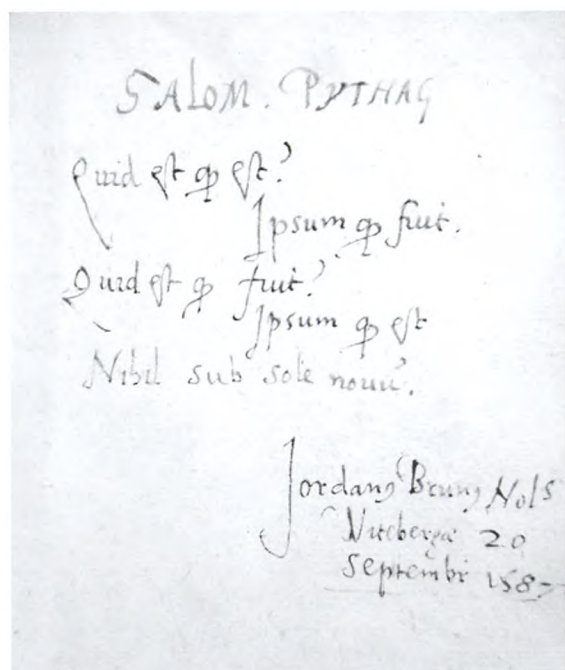
Dernæst fortæller han om en naiv ven, der ikke troede på Copernicus og forsøgte at gøre sine modstandere til grin (s. 128-129):

"Men her spilder vi vores kræfter, eftersom det ikke engang kan lade sig gøre at overvise lærde folk om, at himmellegemerne forholder sig til hinanden som fastlagt af Copernicus, og det til trods for, at man tydeligt kan bevise, at de gamle hypoteser og de formodede bevægelser er beskæmmende og grufulde tåbeligheder, og at de andre hypoteser derimod er harmoni og reel sandhed. En vis ven, jeg endnu for kort tid siden havde, gjorde nar af dem, der påstod, at jordkloden roterede, idet han sagde, at de måtte

være rundtossede. Denne mand, der ellers var velbevandret i matematik og skarpt begavet, syntes, at han på den måde var morsom. Men hvor er de folk lettroende, der går til den yderlighed at forestille sig, at himlen med fixstjernerne gør en daglig omdrejning! Og dette minder mig i sandhed om Lactantius, for han lod sig ingenlunde overbevise om andet, end at Jorden var flad, at havet rakte ud i himlen, og at Jorden nærmest flød rundt i det. Jeg ved ikke, hvilke andre usmagelige idiotier han havde hentet fra almuen og poeterne. Således gjorde han spydige bemærkninger om dem, der sagde, at Jorden var sfærisk eller sfæroid, og at den støttede sig på sin midte med et lufthylster omkring sig. Denne mand var ellers uden tvivl lærd, havde et bredt kendskab og var veltalende. Men hvad der ifølge mundheldet er indlysende for skeløjede og frisører og derfor kan forklares til selv en matros og et kvindfolk, havde Lactantius ikke tilstrækkelig intelligens til at forstå. Derimod lod enkelte andre, der har opnået stor anseelse inden for litteraturen, sig dengang overbevise af det, almuen ved i dag. Således vil der komme en tid, hvor ikke kun matematikere, men også almuen vil erkende sandheden om disse forhold, selv om de fleste griner af dem i dag."

Den anonyme ven, der her sammenlignes med den senantikke forfatter Lactantius, som påstod, at Jorden var flad, kan kun være Tycho Brahe, af helt anden årsag af Milan Kundera erklæret til nummer ét blandt verdenshistoriens latterlige udødelige. I "Udødeligheden" fortæller den tjekkiske forfatter den velkendte skrøne om, at astronomen af overdreven høflighed holdt sig tilbage ved en fin middag, indtil hans blære sprængtes, hvilket skulle have udløst en blærebetændelse med dødeligt udfald. Selv om denne forklaring er fysisk uholdbar, har Tycho Brahe gennem tiderne været udsat for meget sarkasme af den grund, og Kunderas bog har i høj grad forøget hans berømmelse på en trist måde. Om skrønen udvikling fra 1601 til engelske hiphopsange se "Kunstværket" [2] (s. 21-62).

Tycho Brahe er i dag mindre kendt for sin egen humor. Han yndede satiriske vittigheder og gjorde især nar af sine modstandere med forhånende navneforandringer. Det spotske tilnavn 'Mercurius' vidner om hans sorte humor. Den gik også ud over Giordano Bruno, der kaldte sig selv 'Nolanus' med reference til sin fødeby Nola ved Napoli. Den ligger kun 100 km vest for Venosa, som Horats og Venusin forholdt sig til. Efter et længere ophold i England, hvor han havde omvendt sig til heliocentrismen, ankom den italienske filosof til Wittenberg. Her indtegnede han den 20. september 1587 sit motto og sit navn i en jysk stambog. Den tilhørte den senere biskop af Sjælland, Hans Poulsen Resen. Mottoet er en samtale mellem den vise jøde Salomon og den endnu mere vise græker Pythagoras og handler om Solen (se figur 3).



Figur 3. Giordano Brunos motto i Hans Poulsen Resens stambog: "Salomon: Hvad er det, der er? Pythagoras: Det, der var. Salomon: Hvad er det, der var? Pythagoras: Det, der er. Intet nyt under Solen." © Det Kongelige Bibliotek, Thott 572,8°, bl. 55^r.

Året efter udgav Bruno bogen "Acrotismus" og sendte et eksemplar til Hven. I stedet for at takke pænt blev Tycho Brahe rasende og skrev egenhændigt to latinske vers i gaven. De kan oversættes således: "Ham fra Nola er nul og intet, navne stemmer ofte overens med sagerne." Astronomen gentog samme ætsende vits i et brev til en tysk astronom og offentliggjorde brevet i 1596, så enhver kunne læse, hvad han mente om Bruno. Ved udgivelsen af Tycho Brahes brevsamling havde italieneren siddet i romersk fængsel i tre år. Under retssagen nægtede han trods tortur at trække sine udtalelser tilbage og gentog modigt sit motto. Det er også bevaret i inkquisitionens protokol.

Resen var i Wittenberg som hofmester for en ung dansk adelsmand, Frederik Rosenkrantz, en af Tycho Brahes fjerne slægtninge og samtidig navnebror til Rosencrantz, en af Claudius' latterlige hofmænd. Den 31. maj 1589 rejste denne unge adelsmand sammen med sin hofmester til Hven, og ved den lejlighed indtegnede Tycho Brahe sit eget motto i stambogen næsten lige ved siden af Brunos. Resen blev senere ansat ved universitetet. Han havde nær omgang med Venusin og lyttede som teologiprofessor til fysikkollegaens tale. Han må have vist ham stambogen med de to ærkefjenders mottoer. Det er nemt at gætte, hvilket Venusin foretrak.

Fysikprofessoren afslutter sin tale med at citere fjorten vers fra et langt latinsk digt skrevet af en af Tycho Brahes bedste venner, Johannes Pratensis. Det var udkommet i 1571 i Basel i en bog om paracelsisk medicin. Værket var skrevet af digterens ven Peder Sørensen. Pratensis var død, men Sørensen sad som medicinprofessor og lyttede til talen. Foran publikum roser Venusin sin medicinkollega som Danmarks Fønix, og dette tilnavn måtte minde den akademiske forsamling om en opsigtsvækkende danskfjendtlig bemærkning,

der blev oplæst ved Tycho Brahes bisættelse i Prag og udgivet kort efter. I et sørgedigt beskrev Kepler sin afdøde arbejdsgiver som en Fønix, der havde forladt "det ugæstfrie nord" for at "bygge rede på tysk jord".

Efter digtet opremser Venusin en lang række naturfænomener og fortolker dem som udtryk for guddommelig geometri: regndråber, haglkorn, snefnug, lygtemænd, blomsterkroner, sæbebobler, kålhoveder, æg (formodet sfæriske inden udstødningen) og regnbuer. Han præciserer, at han selv eksperimentelt har iagttaget det sidste naturfænomen under et besøg på Hven, en diskret spydighed mod øens tidligere lensmand. Som allersidste eksempel på guddommelig geometri nævner Venusin sygdomskurver og beskriver dem med det flertydige ord 'revolutio' som tilbagevendende baner. Ordet kan oversættes med 'omløb', 'skifte', 'omdrejning' og i overført betydning med 'voldsom forandring'. Det er netop det ord, Copernicus havde anvendt i titlen på sin bogstaveligt talt revolutionære bog om "himmellegermernes baner": "De revolutionibus orbium coelestium". Det forekommer også i "Hamlet", hvor hovedpersonen i graver scenen (V,1) synes, at der er vendt op og ned på alting. Denne engelske replik sammenfatter Venusins københavnske tale. Hans omtale af sygdomskurver kan ses som et sidste posthumt hug mod den astronom, der havde gjort sig morsom over de rundtossede kopernikane.

Venusin døde ikke. Han forsvandt. Han endte sin karriere i 1608 i Sorø som forstander for den kongelige skole, samme sted og i samme embede som Niels Krag seks år tidligere. Tilsyneladende fik ingen af de to mænd nogen begravelse.

Litteratur

- [1] Peter Andersen (2007), Die Nibelungen zogen nach Dänemark. Eine Neuinterpretation der Erzählung 'Von Hven zwischen, Seeland und Schonen'. coll. *Bremer Beiträge zur Literatur- und Ideengeschichte* 48, Frankfurt/Main et al.: Peter Lang.
- [2] Peter Andersen (2009), Kunstværket. København: Eget forlag.
- [3] Peter Andersen (2012), Nordens gotiske storhedstid. coll. *Studies in History and Social Sciences* 433, Odense: Syddansk Universitetsforlag.
- [4] Peter Andersen (2014), De la devise de Bruno à la mort de Tycho Brahe. *Bruniana & Campanelliana* 20, s. 79-95.
- [5] Peter Andersen (2014), Auf dem Weg zu Guericke: Jakobsens Lobrede auf Copernicus, Rheticus und Valentin Otho von 1602. *Monumenta Guerickeana* 23/24, s. 11-30.
- [6] Peter Andersen (2015), Die Wiedergeburt der Nibelungen in Dänemark (1580-1603) und auf den Färöern (1818-1851). Trykt i: *Das Mittelalter des Historismus. Formen und Funktionen in Literatur und Kunst, Film und Technik*, éd. Mathias Herweg et Stefan Keppler-Tasaki, coll. *Rezeptionskulturen in Literatur- und Mediengeschichte* 3, Würzburg: Königshausen & Neumann, s. 125-149.
- [7] Helge Kragh (2015), Georgius Frommii (1605-1651) and Danish Astronomy in the Post-Tychonian Era. *Acta Baltica Historiae et Philosophiae Scientiarum* 3/1, s. 43-66, her s. 47. DOI: 10.11590/abhps.2015.1.03.
- [8] Carl Henrik Koch (2007), Fra Aristoteles til Newton – Træk af den naturvidenskabelige tænkemådes historie. *KVANT* nr. 3, 2007, s. 6-12.
- [9] Det i marts 1603 udarbejdede originalhåndskrift bevarer i Stockholm. Førsteudgaven fra 1892 er tilgængelig online: <http://gottfried.unistra.fr>.
- [10] Tychonis Brahe Dani Omnia Opera. 15 bd. Udgivet af I.L.E. Dreyer. Kbh. 1913-1929, bd. 1, s. 143-173.
- [11] Kaare L. Rasmussen m. fl. (2013), Was He Murdered Or Was He Not? – Part I: Analyses of Mercury in the Remains of Tycho Brahe. *Archaeometry* bind 55, s. 1187-1195.
- [12] Peter Usher (2006), Hamlet's Universe. San Diego. Jævnfør "Die Nibelungen zogen nach Dänemark" [1] (s. 394) og "Kunstværket" [2] (s. 200).
- [13] Peter Zeeberg (2013), Videnskab og lidenskab – Tycho Brahes latinske digtning. *KVANT* nr. 4, s. 13-16.



Peter Andersen er professor på Strasbourg Universitet. Han interesserer sig bl.a. for kryptografiske tekster, navnlig "Den Hvenske Krønike" (1603). Hans fund af en kodet dagbog vakte i 2008 stor international opsigt.

En kvantemekanisk eventyrfe

Af Finn Berg Rasmussen, Niels Bohr Institutet

En spansk forfatter inddrager Schrödingers kat.

Schrödingers kat, kvanteusikkerhed, osv.

Det var lidt af en overraskelse, da der i mit spanskkursus pludselig dukkede en novelle op, hvor kvantemekanikken spiller en vis rolle. Det er den spanske forfatter Herminia Luque's (født 1964) der lader kvantefysikken invadere eventyrenes verden. ("La Hada Cuantica", ca. 2005)

En lille skoledreng sidder fredag aften og sveder over lektierne. De naturvidenskabelige opgaver har han løst først(!). Han mangler endnu nogle skriftlige opgaver i religion og at male en plakate til Mors dag. "Bare der ville komme en eller anden venlig nisse og hjælpe mig", siger han hen for sig. Han tænker på tante Robertas fortællinger om venlige trolde og nisser, der hjælper børn og unge med de utroligste ting.

Lige med ét hører han en svag hosten og får øje på et lille væsen på størrelse med en blyant. Hun præsenterer sig som en fe, men en speciel slags fe, ikke som de klassiske, der opfylder ønsker eller deler slik ud, derimod en kvantemekanisk fe. "Kvante-hvad-for-noget", spørger drengen. "En fe, som ikke er nogen fe, men som alligevel er en fe", lyder svaret. Og således fortsætter det derudad: Feen er ikke noget, før nogen siger, hvad hun er; hun kommer fra her eller fra der; hun ved ikke hvor gammel hun er, for vokser hun opad eller nedad?

Efter flere sådanne usikre udsagn indser drengen, at han må hjælpe sig selv med lektierne, og "nu må du lade mig gøre det i fred, for når min far kommer og ser, at jeg ikke er færdig, får jeg ikke lov at komme med i morgen ud til mine fætre med det store svømmebassin".

"Er det lørdag i morgen".

"Ja, du kvante-et-eller-andet, ved du ikke en gang hvad ugedag vi har!"

"Næh, det kunne jo faktisk godt være, at det var lørdag i dag".

I det samme kommer faderen ind og skynder på drengen: "husk nu baderingen og tegneserierne, for det har jeg lovet dine fætre. Mor venter nede i bilen". Åbenbart har feen alligevel kunnet udrette noget, nemlig at udnytte tidsusikkerheden til at forvandle fredag aften til lørdag morgen.

Den følgende aften beretter feen om sin vanskelige opvækst som et klodset fe-barn næsten uden magiske evner. Ved en afgørende eksamen var hun bundet til en pæl og skulle inden fem minutter befri sig og åbne en kasse, hvor en kat ellers ville blive slået ihjel ved en ukendt mekanisme. Missionen lykkedes ("det var også sådan en sød lille gråmis"), men under hele aktionen

havde feen kun kunnet forestille sig katten som både død og levende på samme tid! I feernes verden blev den tankegang betragtet som fuldstændigt sindssyg, og den lille fe var nu blevet sendt til den "virkelige" verden for at en person udefra - frem for alt et barn - skulle observere hende og dermed afgøre, om hun var en fe eller en ganske almindelig pige. Drengen advarer hende om, at som menneskepige skal hun gå i skole og læse lektier, men hun glæder sig omvendt til at få drengen som ven og til at spise chokolade og andet godt.

Til slut åbner forfatteren en kattelem(!) for, at det hele er en drøm: I skoleklassen er der nemlig kommet en ny elev, en pige, der hedder Ada, og som drengen straks bliver ven med. Det spanske ord for en fe er "hada", men h er stumt, så udtalen er netop: Ada.

Det var jo noget af en udfordring at skulle forklare Schrödingers kat for de øvrige kursusedtagere, på spansk. Det kom næppe til at stå lysende klart, men det er en anden historie.

PFEIFFER  **VACUUM**

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

Monument for Inge Lehmann på Frue Plads

Af Jens Olaf Pepke Pedersen

En af Danmarks største, men oversete videnskabsfolk, geofysikeren Inge Lehmann, har nu fået sit monument på Frue Plads i København. Inge Lehmann er i dag kendt for opdagelsen af, at Jorden har en fast indre kerne, men i sin samtid havde hun svært ved at få anerkendelse for sin indsats, hvilket Københavns Universitet nu ønsker at rette op på med opstillingen af monumentet.

Det er en mindre kendt del af historien om Inge Lehmann, at hun var tæt på at blive den første professor i geofysik. Universitetet op-slog efter flere tilløb i 1952 det første profes-sorat i geofysik. Det var især Niels Bohr, der havde argumenteret for professoratet, idet han håbede at geovidenskaberne kunne befrugtes med anvendelsen af fysikkens metoder. Han havde nok også en anden dagsorden, idet han tidligere havde argumenteret med, at pro-fessoratet skulle oprettes i magnetisme, med det argument, at man havde en fremragende mand indenfor området (nemlig fysikeren Niels Arley), som man ellers havde svært ved at få placeret i en stilling.

Niels Arley var da også en af de fire ansøgere til professoratet i geofysik, selvom hans erfaringer indenfor området var meget

begrænsede, og han skrev da også direkte i sin ansøgning, at "geofysik således er et ganske fremmed felt for mig i de senere år". Den mest oplagte kandidat var derfor Inge Lehmann, der på det tidspunkt var in-ternationalt anerkendt for sine seismologiske studier, men på grund af Niels Bohrs støtte til Arley blev denne indstillet af et flertal i bedømmelsesudvalget. Det gav dog så megen ballade i Fakultetsrådet, at Arley til sidst trak sit kandidatur, og Fakultetsrådet valgte så den nemme løsning slet ikke at besætte profes-soratet, som herefter først blev opslået igen 12 år senere, hvor statsgeodæt Henry Jensen således blev den første professor i geofysik.

Inge Lehmann opsigte sin stilling ved Geodætisk Institut i 1953 og havde herefter flere ophold i USA, hvor hun opdagede Lehmann-diskontinuiteten, der er en ændring i udbredelseshastigheden af seismiske bølger i Jorden i ca. 220 km dybde. I øvrigt fik Inge Lehmann, så vidt vides, aldrig et svar på sin ansøgning om professoratet.

Kilde:

Maiken Lolck (2006), Klima, kold krig og iskerner, Aarhus Universitetsforlag, side 34-37.



Monumentet for Inge Lehmann på Frue Plads i København. Fotos: Michael Cramer Andersen.