



- DEN DANSKE LORENZ • TEMPERATUREN OG DEN NYE KELVIN •
- RØNTGENSTRÅLING OG CT-SKANNING FOR GYMNASIEELEV •
- KVANTESIMULATION AF KVASIPARTIKLER • NEUTRINOS ON THE ROCKS •
- ANTIMATERIEN, DER BLEV VÆK • ØRSTED-MEDALJE TIL GRUNDSKOLELÆRER •
- STANDARDMODELLEN FOR PARTIKELFYSIK OG IKKE-KOMMUTATIV GEOMETRI •
- HIAWATHA-KRATERET • SEISMISKE UNDERSØGELSER AF SOLEN OG ANDRE STJERNER •

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o DTU Space
Centrifugevej 356
DK-2800 Kgs. Lyngby

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 Naturlærens Udbredelse

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space
Michael Cramer Andersen,
Christianshavns Gymnasium
Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Health Technology
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
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Julie Søgaard (Facebookredaktør og AS)
Sarah Pepke Pedersen (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr./år.
Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnement tegnes på www.kvant.dk.
Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:
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 reprojekteret
materiale i farver. Henvendelser om an-
noncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk
(tlf. 28 91 87 74).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2500.

Produktionsplan

Nr. 3-19 udkommer ca. 15. september
Nr. 4-19 udkommer ca. 15. december
Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Kære læser

Jens Olaf Pepke Pedersen 3

Neutrinos on the Rocks

Markus Ahlers og D. Jason Koskinen 4

Hiawatha-krateret – verdens suverænt yngste og bedst bevarede store
meteorkrater

Henning Haack 8

Breddeopgave 79. Klodesprængning

Jens Højgaard Jensen 11

Breddeopgave 80. Bobler

Jens Højgaard Jensen 13

Korrektioner 14

Seismiske undersøgelser af Solen og andre stjerner

Jørgen Christensen-Dalsgaard 15

Antimaterien, der blev væk

Bernhard Lind Schistad 22

KVANT-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson 28

Standardmodellen for partikelfysik og ikke-kommutativ geometri

Jesper Møller Grimstrup 30

Temperaturen og den nye kelvin

Finn Berg Rasmussen 33

Kvantesimulation af kvasipartikler

Georg M. Bruun 37

Røntgenstråling og CT-skanning for gymnasieelever

Ole L. Trinhammer 40

Den danske Lorenz

Anja Skaar Jacobsen 44

Foreningsnyt 46

Kommende foredrag 47

H. C. Ørsted-medalje til grundskolelærer

Jens Olaf Pepke Pedersen Bagsiden

Billedet på forsiden viser det sorte hul, som Event
Horizon Telescope (EHT) præsenterede i april. Læs
mere i nyhederne side 28.



KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til 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, Kemi og Farmaci (SDU), Institut for Materialer og Produktion (AAU),
DTU Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).

Kære læser

Dette nummer af KVANT

Velkommen til KVANTs sommernummer! Denne udgave af KVANT fylder mere end sædvanligt, og forklaringen er, at der ved trykningen af det forrige nummer desværre forsvandt en række minus-tegn fra formler og superscripter i overførslen fra PDF-filer til trykplader. Det gik ud over artiklerne af Georg M. Bruun, Finn Berg Rasmussen, Jens Højgaard Jensen og Anja Skaar Jacobsen. Vi er selvfølgelig ærgerlige over fejlene og forsøger sammen med trykkeriet at forhindre, at det sker igen. Imidlertid har vi valgt at genoptrykke de berørte artikler i dette nummer, og vi vil derfor også bede om, at man bruger udgaverne i dette nummer af KVANT, når der fremover refereres til artiklerne.

Udover glæden ved at kunne genlæse flere gode artikler kan vi som sædvanligt også byde på nyt fra forskningsverdenen. Vi har denne gang artikler fra begge klodens polarområder, idet Markus Ahlers og Jason Koskinen skriver om neutrinodektoren IceCube ved Sydpolen, mens Henning Haack skriver om et nyt meteorkrater under Indlandsisen i Grønland. Jørgen Christensen-Dalsgaard skriver om observationer af stjernessvingninger, og hvordan det kan give information om stjernernes opbygning, og Jesper Grimstrup skriver om sit arbejde med standardmodellen for partikelfysik. En af KVANTs flittige bidragsydere, Bernhard Schistad, gennemgår denne gang mysteriet om antimaterien, der blev væk, mens Ole Trinhammer fortæller om mulighederne med nye røntgenapparater på Nanoteket på DTU. Jens Højgaard Jensen er som sædvanlig klar med en ny breddeopgave og løsningen på opgaven fra sidste nummer.

Temanummer om Ørsted og elektromagnetismen

Vi kan også allerede nu afsløre, at vi forbereder os på 200-året for H. C. Ørsteds berømte opdagelse af elektromagnetismen i 1820, som Laila Zwisler tog hul på i vores decembernummer. Årets sidste KVANT bliver et stort temanummer om Ørsted, og også i løbet af 2020 vil vi på forskellig vis markere Ørsteds opdagelse og bl.a. se på, hvordan det er gået i eftertiden med Ørsteds tanker om et stort sammenhæng mellem de forskellige naturfænomener og teorierne, der beskriver dem.

Fysikkens historie indeholder således flere foreninger. Udover Ørsteds egen forening af elektriske og magnetiske kræfter har Newton forenet himmelske og jordiske fænomener med den universelle tyngdelov, og Einsteins specielle relativitetsteori kan ses som en forening af elektromagnetismen og den ikke-gravitationelle del af klassisk mekanik. Den generelle relativitetsteori er en generalisering af den specielle teori, hvor der også tages hensyn til gravitationen, og kvantefeltteorien er en forening af den specielle relativitetsteori og kvantemekanikken. Glashow, Salam og Weinberg har forenet de

elektromagnetiske kræfter med de svage kernekræfter, som bl.a. er ansvarlige for visse former for radioaktivitet. Spørgsmålet er nu, om alle naturfænomener på et tidspunkt kan beskrives ved en samlet "Teori om Alting".

KVANT på vej mod de 30 år

Samtidig kan vi også fejre os selv lidt, idet KVANT nu er begyndt på sin 30. årgang. Eftersom KVANT afløste "Fysisk Tidsskrift", der udkom fra 1902 til 1989, og som igen var efterfølgeren for "Nyt Tidsskrift for Fysik og Kemi" (1896–98) og "Tidsskrift for Fysik og Chemi samt disse Videnskabers Anvendelse" (1862–94), betyder det, at der i sammenlagt over 150 år er udkommet tidsskrifter på dansk, der har henvendt sig til danske fysikere.

Gennem årene har tidsskrifterne især skrevet om udviklingen inden for fysik, men en del af pladsen har også være brugt til emner som astronomi, kemi, meteorologi og geologi.

Et andet væsentligt emne har været undervisning, og Fysisk Tidsskrift var i en meget lang årrække tidsskriftet for offentliggørelse af undervisningsforsøg samt metodiske og didaktiske tiltag, og i mere end 50 år var der til redaktionen knyttet medarbejdere med henblik på "skolefysik".

Fysisk Tidsskrift blev udgivet af Selskabet til Naturlærens Udbredelse, som i 1990 gik sammen med Dansk Fysisk Selskab om at udgive KVANT. Siden er Astronomisk Selskab og Dansk Geofysisk Forening kommet til, således at der nu er fire foreninger bag udgivelsen af bladet.

KVANTs første redaktør blev Jørgen Friis Bak, og derudover bestod den første redaktion af Jørn Johs. Christiansen, Torsten Freltoft, Ove Østergaard, Mogens Esrom Larsen og Finn Berg Rasmussen. De to sidstnævnte er fortsat aktive i redaktionen og kan således snart fejre 30 års jubilæum i KVANTs redaktion.

Der vil dog gå nogle år, før de kan slå rekorden, som er sat af fysikeren Kaj Georg Hansen (1906–1998), der i 42 år – fra årgang 46 til årgang 87 – var medlem af redaktionen af Fysisk Tidsskrift. K. G. Hansen var student fra Odense Katedralskole og blev i 1929 cand.mag. fra Københavns Universitet med eksperimentel fysik som hovedfag. Han fik ansættelse ved Øregård Gymnasium, hvor han virkede i 33 år, samtidig med at han underviste i kurser på N. Zahles Skole. Senere underviste han også ved Københavns Universitets Fysiske Laboratorium i fysiske undervisningsforsøg. Hans faglige interesse var den elektromagnetiske strålings virkning på biologisk materiale, et engagement som bl.a. førte til et mangeårigt arbejde ved Finseninstituttet og en doktorgrad i 1948 på en afhandling om hudens transmission af synligt og ultraviolet lys.¹

Jens Olaf Pepke Pedersen

¹Knud Maack Bisgård: K. G. Hansen i Dansk Biografisk Leksikon, 3. udg., Gyldendal 1979-84.

Neutrinos on the Rocks

Markus Ahlers og D. Jason Koskinen, Niels Bohr International Academy & Discovery Center, Niels Bohr Institutet

IceCube-projektet forvandlede en kubikkilometer naturlig antarktisk is ved Sydpolen til verdens største neutrinodektektor. Detektoren gør det muligt at observere neutrinoer fra kosmiske kilder og studere grundlæggende egenskaber ved disse "spøgelsesagtige" partikler. I 2013 opdagede IceCube-observatoriet kosmiske neutrinoer med meget høj energi, men med ukendt oprindelse. For nylig har IceCube fundet de første beviser for, at de højenergetiske neutrinoer udsendes i forbindelse med processer omkring et supermassivt sort hul i centrum af en fjern galakse. I forventningen om at spille en afgørende rolle for astropartikelfysik planlægger IceCube nu betydelige opgraderinger af det nuværende instrument samt en næste-generationsdetektor.¹

Kort efter opdagelsen af neutrinoen i 1956 opstod idéen om, at den repræsenterede en fremragende astronomisk budbringer. Neutrinoer er elementarpartikler med en meget lille (og endnu ukendt) masse og ingen elektrisk ladning. De vekselvirker kun svagt med stof, og de kan derfor undslippe astrofysiske objekter med høj densitet og krydse store kosmiske afstande uden at blive absorberet eller afbøjet. Neutrinoer er ikke alene potentielle budbringere fra nogle af de mest eksotiske fænomener i vores univers, men de udgør også en dør ind til forståelsen af fundamental partikelfysik på de allermindste skalaer. På Sydpolen overlapper neutrinoastronomi og partikelfysik gennem den forskning, der udføres med neutrinoobservatoriet IceCube.

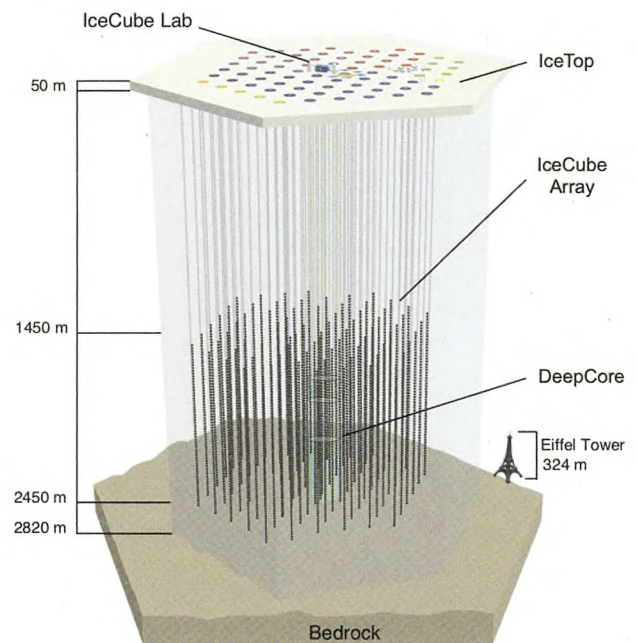
Vi forventer, at der sker udsendelse af neutrinoer fra mange forskellige processer i vores univers. Fx er det varme og tætte, tidlige univers ansvarlig for en lavenergetisk baggrund af ældgamle neutrinoer med en gennemsnitlig tæthed på ca. 336 neutrinoer i hver kubikcentimeter. Vores Sol og andre stjerner producerer konstant nye neutrinoer som et biprodukt fra kernefusion, og når tunge stjerner dør, udsendes samtidig et enormt udbrud af neutrinoer, som er ansvarlige for at transportere størstedelen af stjernernes gravitationelle bindingsenergi væk.

En af de vigtigste grunde til at udføre astronomi med neutrinoer er neutrinoens unikke mulighed for at udpege de mest energirige kilder til ikke-termisk stråling i vores univers. Disse kilder er ansvarlige for kosmiske stråler (ladede partikler, der rejser igennem universet) med ti millioner gange højere energi, end hvad der kan opnås i accelerators som Large Hadron Collider (LHC). Jordens atmosfære bliver konstant bombarderet med disse kosmiske stråler, som producerer enorme byger af sekundære partikler, der kan nå ned til jordoverfladen. Jordbaserede observatorier kan identificere intensiteten af disse partikler, men deres oprindelse har været et åbent spørgsmål i mere end et århundrede.

Vi forventer en emission af højenergetiske neutrinoer fra vekselvirkningen mellem kosmiske partikler og gas eller stråling på deres lange rejse fra deres kilder til Jorden. Disse vekselvirkninger producerer pioner, der efterfølgende henfalder via $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ efterfulgt af

$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ og relaterede processer. Typisk modtager en neutrino fra denne produktionskanal ca. 5% af energien fra en nukleon i en kosmisk stråle. Disse neutrinoer er derfor et stensikkert tegn på den kosmiske stråling.

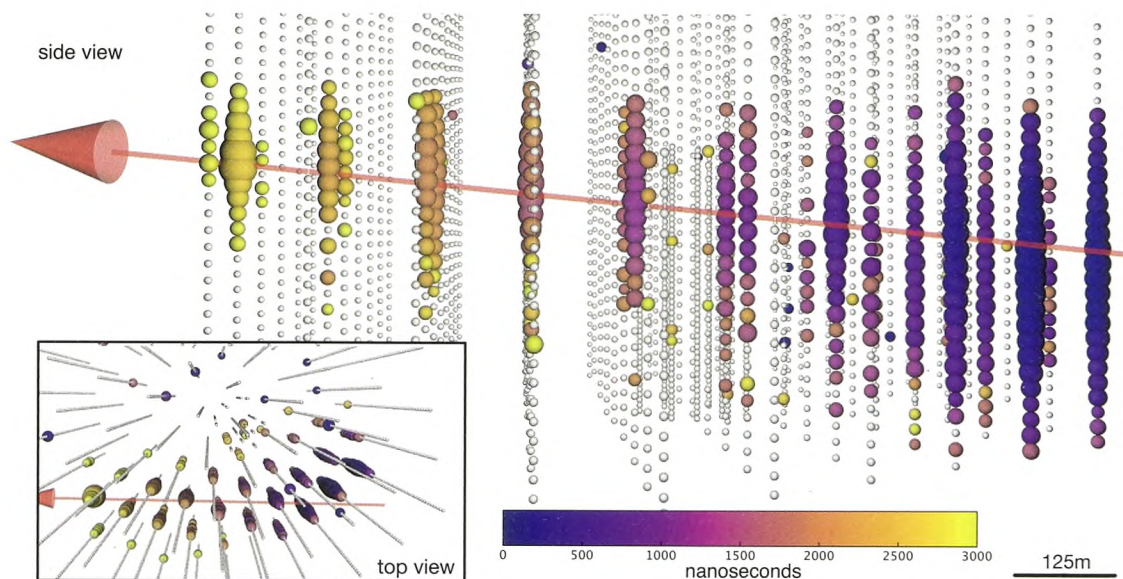
Neutrinoernes svage vekselvirkning, som gør dem i stand til at nå Jorden, giver en udfordring for den eksperimentelle detektion. For at give en idé om størrelsen af problemet, så kan en neutrino med en kinetisk energi² på 1 GeV passere gennem en blyplade med en tykkelse på en astronomisk enhed (afstanden fra Jorden til Solen!), før vi kan forvente, at den kolliderer med et af blyatomerne. Situationen bliver noget bedre ved højere energier, men det illustrerer det principielle problem: Neutrinoteleskoper skal som minimum være ekstremt store. De mest følsomme neutrinoobservatorier benytter sig derfor af store, naturlige reservoirer af egnede detektormedier, der gør det muligt at registrere de sjældne neutrinoekselvirkninger.



Figur 1. En skitse af IceCube-Observatoriet ved Sydpolen, som fremhæver de vigtigste komponenter: IceCube, IceTop og DeepCore (se teksten).

¹ Artiklen er oversat fra engelsk af Jens Olaf Pepke Pedersen og Morten Ankersen Medici.

² Vi bruger partikelfysikernes energienhed elektronvolt (eV). En energi på 1 GeV svarer omtrent til hvilemasseenergien af en proton.



Figur 2. En begivenhed med et højenergi-spor (en vekselvirkning mellem en myon og en neutrino) observeret den 22. september 2017. Den rekonstruerede retning af myon-sporet (omkring 6° under horisonten) og dens høje energi indebærer, at sporet er produceret ved en vekselvirkning med en astrofysisk neutrino.

IceCube-Observatoriet

I øjeblikket er det mest følsomme højenergi-neutrinoobservatorium (i energiområdet TeV-PeV) IceCube-Observatoriet, som er placeret ved Sydpolen. Figur 1 viser en skitse af hoveddetektoren, der består af en kubikkilometer ultraklar gletsjeris, som er udstyret med 5.160 moduler med fotomultiplikatorrør, som registrerer lyset fra hurtige, ladede partikler (den såkaldte Cherenkovstråling), der går gennem detektoren. Modulerne er fordelt langs 86 kabler (som kaldes strenge), som når mellem 1,5 km og 2,5 km ned under overfladen. De fleste strenge følger et trekantet gitter med en bredde på 125 m, med undtagelse af otte strenge i midten. Disse strenge danner sammen med det første lag af de omgivende "standardstrenge" en del-detektor med en lavere energitærskel, som kaldes DeepCore.

Den større IceCube-detektor er optimeret til neutrinoastronomi ved energier over 1 TeV, og DeepCore er konstrueret til at studere neutrinooscillationer og søge efter signaler fra mørkt stof i energiområdet mellem 10 GeV og 1000 GeV. Detektorerne nede i isen suppleres med en overfladedetektor, kaldet IceTop, som gør det muligt at identificere kosmiske stråler, som går igennem IceCube ovenfra. IceCube-Observatoriet har været fuldt instrumenteret og operationelt siden 2011.

Neutrinoer detekteres i IceCube via Cherenkovstrålingen fra de ladede partikler, som dannes i vekselvirkninger mellem neutrinoer og nukleoner i isen i detektoren. De mest værdifulde begivenheder med henblik på neutrinoastronomi er dem, der producerer højenergi-myoner, som krydser detektoren. Disse begivenheder kan være et resultat af kollisioner mellem myon-neutrinoer og nukleoner i isen, hvor den sekundære myon overtager det meste af neutrinoens oprindelige retning og energi. Sporene fra disse begivenheder giver mulighed for en god vinkelopløsning på $\lesssim 0.4^\circ$ for energier over 100 TeV. Et eksempel på en sådan

begivenhed er vist i figur 2. Alle andre neutrino-vekselvirkninger producerer enten elektromagnetiske eller hadroniske byger (kaskader), som ikke bevæger sig lige så langt igennem isen. Kaskaderne i disse begivenheder har en ringere vinkelopløsning i IceCube, med ca. $10^\circ - 15^\circ$, men tillader til gengæld et godt estimat af den oprindelige neutrinoenergi med en usikkerhed under 15%.

For neutrinoastronomi er den første udfordring for IceCube at udvælge en ren samling af neutrinoer, ca. 100.000 pr. år med en energi over 100 GeV, ud af en baggrund på ti milliarder kosmiske stråler (nærmere bestemt atmosfæriske myoner, skabt i bygerne fra de kosmiske stråler). Den anden udfordring er at identificere den lille del af disse neutrinoer, der har en astrofysisk oprindelse, hvilket er under hundrede begivenheder om året. Atmosfæriske neutrinoer udgør en overvældende baggrund for kosmiske neutrinoer, i det mindste ved neutrinoenergi under ~ 300 TeV. Over denne energi reduceres den atmosfæriske neutrino-flux til mindre end én begivenhed om året, selv i en kilometerstor detektor, og dermed er langt de fleste neutrinoer detekteret i dette energiområde af kosmisk oprindelse. De neutrinoer, der udgør baggrunden for de astronomiske eftersøgninger, udgør det vigtigste signal for forskningen i neutrinooscillationer. Her bruger vi DeepCore til at måle egenskaberne, der afgør, hvordan neutrinoerne overgår fra en type af neutrinoer til en anden type (fx fra elektron-neutrino til myon-neutrino).

For både den astronomiske og den fundamentale neutrinfysik kan vi eliminere baggrunden fra de atmosfæriske myoner ved at udvælge opadgående myon-spor, som kun kan komme fra myon-neutrinoer, da intet andet har mulighed for at rejse gennem Jorden. Derudover følger atmosfæriske neutrinoer en fordeling i energi, som kan skelnes fra fordelingen af kosmiske neutrinoer, og dermed kan de kosmiske neutrinoer udpeges gennem en statistisk analyse. En anden mulighed

består i at udvælge neutrinoer med høj energi, hvis spor/kaskade starter inde i IceCube (high-energy starting events, HESE). Disse neutrinoer udvælges ud fra, at det punkt, hvori de interagerer med nukleoner i isen, er inden for et virtuelt ydre vetolag af optiske moduler. Fordelen ved dette valg er, at atmosfæriske neutrinoer, der kommer fra et område oven for detektoren (det vil sige fra den sydlige halvkugle), kan registreres, da de ledsages af atmosfæriske myoner, som udløser dette veto, se [1].

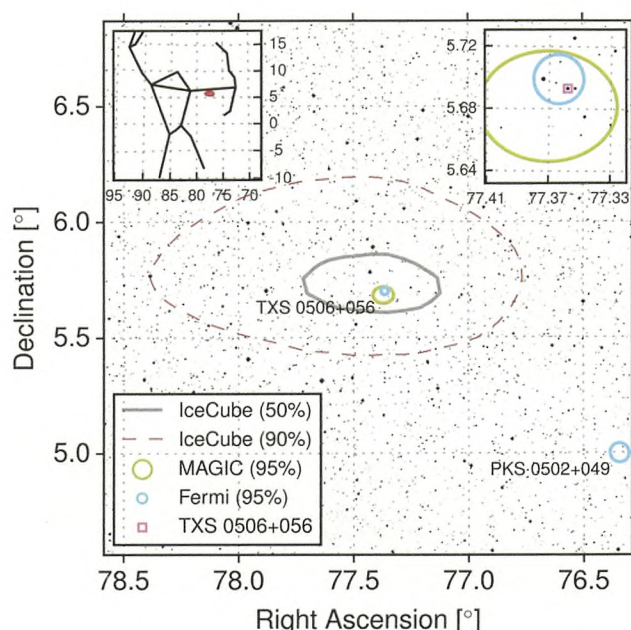
Neutrinoastronomi med IceCube

I 2013 rapporterede IceCube-Observatoriet det første bevis på detektion af TeV-PeV-neutrinoer af kosmisk oprindelse i en analyse af to års data baseret på HESE-udvælgelsen [2,3]. Oprindelsen til denne neutrinoemission er for tiden ukendt. Ankomstreningen af de astrofysiske neutrinoer er dog i overensstemmelse med en isotrop fordeling af neutrinoer, når vi har taget højde for den vinkelafhængige absorption i Jorden samt detektorresponsen af IceCube. Dette er en indikation på, at den diffuse flux består af en population af svage, ekstragalaktiske kilder. Forskellige muligheder er blevet overvejet, men vi afventer stadig en afgørelse [1].

En af de hovedmistænkte er aktive galakser – kæmpe, elliptiske galakser, der er vært for et supermassivt sort hul i deres centrum, som vejer mere end en million gange mere end vores egen Sol. I nogle tilfælde producerer disse galakser to stråler af lys og andre elementarpartikler, der udsendes fra polerne langs rotationsaksen på det sorte huls tilvækstskive, og disse partikler får hastigheder tæt på lysets. En underklasse af disse kilder er blasarer, hvor en af jetstrålerne peger direkte ned mod Jorden. Blasarer er kendt for at producere et intenst og bredt spektrum af fotoner, som gør, at vi fra Jorden kan se meget fjerne objekter.

Den 22. september 2017 registrerede IceCube en højenergi-myon, der kom ind i detektoren fra en retning nogle få grader under horisonten (se figur 2) [4]. Disse sjældne detektioner udløser alarmer, der sendes ud til partnerobservatorier for at tjekke, om de ser elektromagnetisk emission fra samme del af universet. Efter en uge rapporterede Fermi-satellitten, at neutrinoalarm IC-170922A var sammenfaldende med en kendt kilde til gammastråling, nemlig blasar TXS 0506+056, der i samme periode havde en periode med forøget γ -emission. Denne blasar er placeret lige under armen på stjernebilledet Orion (se figur 3) og er omkring 3,7 milliarder lysår fra Jorden.

Motiveret af korrelationen, som Fermi havde set, undersøgte IceCube også arkivdata for at finde beviser på tidligere neutrinoemissioner fra TXS 0506+056. Denne analyse afslørede, at i en periode fra september 2014 til marts 2015 viste kilderne et langvarigt udbrud med anslået 13 ± 5 neutrinoer. En tilfældig korrelation af denne type neutrinoudbrud kan udelukkes med et konfidensniveau på $3, 5\sigma$. Sammen med observationen i 2017 giver dette et overbevisende bevis for, at denne blasar er en kilde til neutrinoer med høj energi.



Figur 3. Blasaren TXS 0506+056 findes lige ved siden af den venstre skulder af konstellationen Orion (øverst til venstre på det indsatte plot). Konturerne indikerer positionen for kilden set med γ -stråler (Fermi & MAGIC) og neutrinoer (IceCube). (Figur fra [4]).

Udbruddet af neutrinoer i 2014/15 er ikke ledsaget af en forøget γ -emission fra Fermi-satellitten. Den målte neutrinoemission er ca. fire gange større end den forventede γ -emission fra blasar TXS 0506+056 i normal tilstand. Der er dog antydning af, at Fermi-spektret i løbet af neutrinoudbruddet viser et spektralindeks, der kunne indikere et uopdaget udbrud af TeV-gammastråler. Under alle omstændigheder er de forskellige foton- og neutrinoemissioner i henholdsvis 2014/15- og 2017-observationerne for tiden den største udfordring for at finde en samlet model for neutrinoemissionen.

Er blasarer også ansvarlige for den diffuse emission af TeV-PeV-neutrinoer? Dette spørgsmål blev behandlet i en tidligere undersøgelse fra IceCube, hvor fokus var på den tidsintegrerede emission af blasarer observeret i γ -stråler. Denne undersøgelse kunne ikke finde beviser for neutrinoemission og satte en øvre grænse for blasarernes relative bidrag til den diffuse neutrinoflux. Afhængigt af neutrinospektret ligger denne øvre grænse omkring 30%. I lyset af de seneste resultater er det derfor plausibelt, at blasarer bidrager, men det er usandsynligt, at de dominerer den observerede diffuse neutrinoflux. Fremtidige analyser med IceCube data vil yderligere teste denne hypotese ved at kigge efter tidsbegrænset neutrinoemission fra blasarer.

Neutrinooscillationer med IceCube

Det primære mål for neutrinoobservatoriet IceCube var at finde kilden/kilderne til de højenergetiske astrofysiske neutrinoer, samt at hjælpe med at besvare de århundredgamle spørgsmål om de kosmiske strålers natur og det ikke-termiske univers. Ud over den astrofysiske historie har IceCube med DeepCore været i stand til at undersøge, hvordan neutrinoer oscillerer. Oscillationerne er vigtige, fordi de er det endelige bevis på, at neutrinoerne har en (meget, meget lille) masse.

Den generelle måde, hvorpå subatomære partikler har en masse (forskellig fra nul), er ved at interagere med Higgs-feltet og ved at have en højre- og venstrehåndsversion af hver partikel. Men alle de neutrinoer, der endnu er blevet detekteret, har altid været venstrehåndede.

Selv om DeepCore er mindre, er det stadig på højde med Eiffeltårnet og samler derfor et stort antal atmosfæriske neutrinoer, der har oscilleret fra myon-tilstand til tau-tilstand på deres rejse gennem Jorden. Der er kun tre eksperimenter, der nogensinde har målt tau-tilstanden, hvoraf den seneste måling fra IceCube er den bedste [5]. Et problem med tau-neutrinoer er, at selv blandt neutrinofamilien er tau-neutrinoen det sværeste at håndtere eksperimentelt. Den har en lavere sandsynlighed for at kolliderende elektronen eller myon-tilstanden, den genererer mindre Cherenkovstråling efter kollisionen, og en tau-neutrinokollision ser næsten ud som en elektron-neutrinokollision, hvilket gør det vanskeligt at identificere tau-neutrinoer præcist.

For bedre at måle oscillationen fra myon- til tau-tilstanden og for at mindske de systematiske usikkerheder, der for øjeblikket begrænser neutrinoastronomien, vil IceCube implementere nye strenge ved Sydpolen i 2022/2023. Denne IceCube-opgradering bruger nye og mere følsomme lyssensorer til at instrumentere omkring 1% af det samlede 1 km^3 IceCube-volumen.

Fordi astronomiske neutrinoer også oscillerer, vil den store forbedring i neutrinooscillationsmålingerne hjælpe os med at forstå ikke blot neutrinoens grundlæggende natur, men også de kosmiske motorer, der er kilden til de højenergetiske kosmiske stråler.

Litteratur

- [1] M. Ahlers og F. Halzen (2018) Prog. Part. Nucl. Phys., bind **102**, side 73–88, arXiv:1805.11112.
- [2] M. Aartsen m.fl. (2013) (IceCube Collaboration), Phys.Rev.Lett., bind **111**, side 021103, arXiv:1304.5356.
- [3] M. G. Aartsen m.fl. (IceCube Collaboration), (2013) Science, bind **342**, side 1242856, arXiv:1311.5238.
- [4] M. G. Aartsen m.fl. (IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, Swift NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 Collaboration) (2018) Science, bind **361**, side eaat1378, arXiv:1807.08816.
- [5] M. G. Aartsen m.fl. (IceCube Collaboration) (2019) arXiv:1901.05366.



Markus Ahlers er adjunkt ved Niels Bohr Institutet og medlem af IceCube-samarbejdet. Hans forskning er koncentreret omkring astrofysik, herunder modellering af kilderne til højenergi-multibudbringere.



D. Jason Koskinen er lektor på Niels Bohr Institutet og leder af instituttets gruppe ved IceCube-Neutrinoobservatoriet.

PFEIFFER  **VACUUM**

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

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

Hiawatha-krateret – verdens suverænt yngste og bedst bevarede store meteorkrater.

Af Henning Haack, ScienceTalter, Sorø, og Maine Mineral and Gem Museum

I 2015 opdagede danske forskere et nyt, stort og exceptionelt ungt og velbevaret krater under isen i Nordgrønland. Krateret ligger i en af klodens mest utilgængelige egne og er dækket af 700 m is. Både opdagelsen og udforskningen af det kræver derfor avancerede teknikker. De andre store kraterer på Jorden er for længst eroderet flere km ned, men Hiawatha-krateret er bevaret stort set intakt, og der kan sågar findes smeltedråber og aske fra den paddehattesky, der dannedes efter nedslaget.

I sommeren 2015 blev jeg kaldt over på min daværende kollega Kurt Kjær's kontor på Statens Naturhistoriske Museum. Han sad og kikkede på en ny radarkortlægning af grundfjeldet under Indlandsisen på Grønland. Helt oppe mod nordvest havde han fået øje på et meget stort, rundt hul i grundfjeldet – lige inde under isranden. Han tænkte, at det unægteligt lignede et meteorkrater – men hvordan er det lige, at man undersøger sådan en idé, når den er dækket af 700 m is (figur 1)?

Vi har i forvejen fundet næsten 200 meteorkraterer på Jorden [1], så hvor interessant er det at finde endnu ét skjult under isen på Grønland? Det stod hurtigt klart, at hvis det virkelig var et meteorkrater, så var det en helt fantastisk opdagelse, Kurt havde gjort. Vi stod måske med det største, velbevarede krater på Jorden – og samtidigt det suverænt yngste, store krater. Samtidigt var der en mulighed for, at Hiawatha-krateret kunne være årsagen til en voldsom forværring af klimaet, lige da den sidste istid var ved at klinge af.

Denne sidste kuldeperiode startede med et meget dramatisk fald i gennemsnitstemperaturen på den nordlige halvkugle på flere grader over en periode på ganske få år. Kuldeperioden kaldes *Yngre Dryas*, fordi den førte til en opblomstring af en hårdfør tundraplante (*Dryas octopetala*). Yngre Dryas har altid fascineret, fordi den kom så hurtigt og ikke mindst, fordi den måske førte til, at en del af den nordamerikanske mega-fauna uddøde – bl.a. det uldhårede næsehorn.

Udfordringen var at finde ud af, om hullet under isen var forårsaget af et asteroidenedslag – eller noget helt andet? I første omgang forsøgte vi at finde alternative forklaringer på det store hul i Jorden. Kunne det måske være et stort vulkankrater, eller findes der andre former for geologiske strukturer, der kunne forklare hullet? Efter at have konsulteret en lang række geologer, der kendte til geologien i Nordvestgrønland, måtte vi konstatere, at der ikke var nogen, der kunne komme med en anden forklaring på hullet, end at det var et meteorkrater. Her skulle man måske synes, at sagen var klar – hvis der ikke er andre mulige forklaringer på fænomenet, så må man antage, at det er et meteorkrater. Sådan forholder det sig normalt i videnskab, men kraterforskningen er af historiske årsager lidt anderledes.

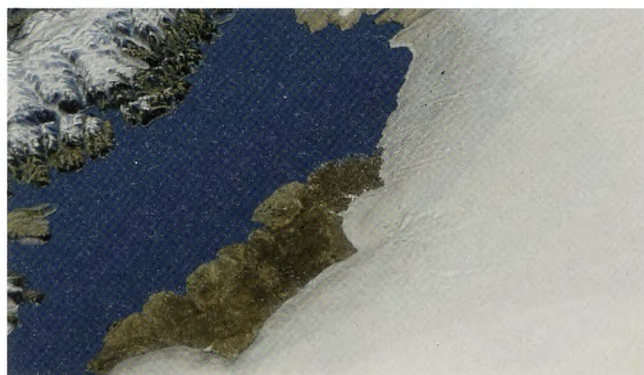
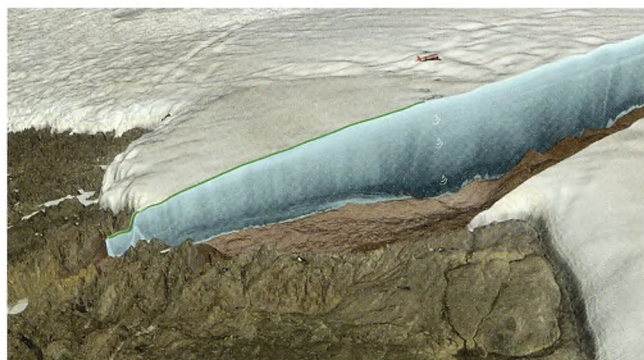
Det kan synes overraskende, men det er ikke mere end 50 år siden, at det blev accepteret, at der også findes



Figur 1. Hiawatha-krateret er opdaget i det nordvestlige Grønland under Hiawatha-gletsjeren. Radarkortlægningen viste et hul i grundfjeldet på 31 km i diameter. Billedet viser topografien under isen i forgrunden af billedet og det isfrie Inglefield Land i baggrunden.

meteorkraterer på vores planet. Det første, der blev anerkendt, var meteorkrateret i Arizona. Selvom der blev fundet tonstunge jernmeteoritter rundt om krateret, holdt man i over 100 år fast i, at den slags voldsomme fænomener ikke fandt sted på vores klode, og at meteorkrateret i Arizona derfor måtte være af vulkansk

oprindelse. Set i bagklogskabens klare lys kan det synes overraskende, at man ikke mente, at Jorden blev ramt af asteroider, når man samtidigt var enige om, at de ramte alle andre af solsystemets faste legemer.



Figur 2. Radarkortlægningen viser både bundtopografien og isens interne struktur. På profilet her kan man se mange af lagene i isen. Den nederste mørke del af isen er fra den sidste istid, mens den øvre lyse del er fra den nuværende varmeperiode. Den nederste del er tydeligt forstyrret med spor af sediment langt op i de nedre islag.

Da meteorkrateret i Arizona endelig blev accepteret, skete der – meget forudsigeligt – det, at en lang række runde strukturer på Jordens overflade blev foreslået som meteorkraterer. En gruppe geologer besluttede sig derfor for at definere en række kriterier, som kunne bruges til at skelne mellem meteorkraterer og andre geologiske fænomener [2]. Et af de anbefalede krav var, at der skulle tages prøver fra selve krateret for at se, om mineralet kvarts viste tegn på at have været udsat for chok. Systemet har fungeret fint i en lang årrække, hvor mange mere eller mindre oplagte strukturer blev undersøgt.

Nogle fund i de senere år tyder dog på, at det er ved at være på tide at opdatere kriterierne. Problemet med det ellers udmærkede initiativ er, at de strukturer, der opdages i dag, enten er så gamle, at evt. kvarts med tegn på chok enten er eroderet væk og/eller (som i tilfældet med Hiawatha), at hele strukturen er dækket af 700 m is. Det sidste gør det selvsagt vanskeligt at gå ind i krateret og tage en prøve. Alligevel holder gruppen bag kraterkriterierne fast i deres regelsæt og forsøger ihærdigt at undgå, at der publiceres artikler, der forslår, at der er tale om et nyt krater, uden at deres kriterier er opfyldt. Det var derfor noget af en opgave, vi stod overfor, da vi satte os for at publicere Kurts opdagelse.

Den oplagte løsning på problemet ville selvfølgelig være at bore et hul ned gennem isen og videre ned i grundfjeldet og tage en prøve op, så vi kunne se, om der var tale om et krater. Det ville også sætte os i stand til at datere krateret, så vi kunne få afklaret, om krateret virkelig er så ungt, som noget kunne tyde på. Problemet er bare, at den slags borehuller er voldsomt dyre, og da vi stod uden bevis for, at der rent faktisk var tale om et krater, var det ikke muligt at skaffe penge til en sådan boring.

I første omgang besluttede vi, at der skulle laves en detaljeret, flybaseret radarkortlægning af både isen og det underliggende fjeld. Med en bevilling fra Carlsberg-fondet blev det muligt at gennemføre kortlægningen i sommeren 2017. Resultaterne var mildest talt meget opmuntrende (figur 2). Først og fremmest bekræftede de, at der rent faktisk var tale om en cirkulær struktur med en antydning af en top i midten. Kortlægningen viste desuden tydeligt, hvordan islagene før Yngre Dryas var meget forstyrrede. Samtidigt viste de, at isen smelter i bunden af krateret. Begge dele passede med forventningerne, hvis krateret var dannet i forbindelse med klimaforværringen. Et krater på størrelse med Hiawatha er op mod 100.000 år om at køle ned, og det var derfor forventeligt, at der stadig ville være smeltning fra bunden. Samtidigt ville nedslaget have forstyrret den omliggende is. Efterhånden som isen flød ind i krateret igen, ville man derfor forvente, at de ældre lag ville være forstyrrede. Vi stod derfor med en langt stærkere sag – men da vi ikke kunne opfylde kriterierne for at få strukturen godkendt som et krater, måtte vi igen konstatere, at det ikke var muligt at publicere opdagelsen.

Løsningen på vores problem kom, da Kurt fik mulighed for at besøge området i sommeren 2017. På en enkelt dag lykkedes det at lande 15 steder langs

isranden og tage en lang række prøver og fotografier af geologien. Vi var ikke sikre på, hvad vi ledte efter, men vi forestillede os, at det burde være muligt at få øje på et eller andet, der kunne afsløre, hvad der gemte sig under isen. I første omgang var vi skuffede over, at billederne af geologien lige uden for randen ikke afslørede noget. Nogle af prøverne så i første omgang ud til at være såkaldte shatter cones, der også er på listen over sikre tegn på meteorkraterer. Desværre viste det sig, at der ikke var tale om shatter cones.

Kurt havde også indsamlet nogle prøver af det sediment, som en smeltevandsflod havde transporteret ud under isen (figur 3). Umiddelbart så det ikke særligt lovende ud, men da Adam Garde fra GEUS begyndte at kikke på dem, viste det sig hurtigt, at vi stod foran et større gennembrud. Adam fandt adskillige kvartskorn med tydelige choklameller (figur 4). Choklameller dannes under ekstremt voldsomme chokpåvirkninger og anses for at være sikre tegn på meteornedslag. Selvom vi ikke havde indsamlet dem inde i krateret, mente vi derfor at have en meget sikker sag.

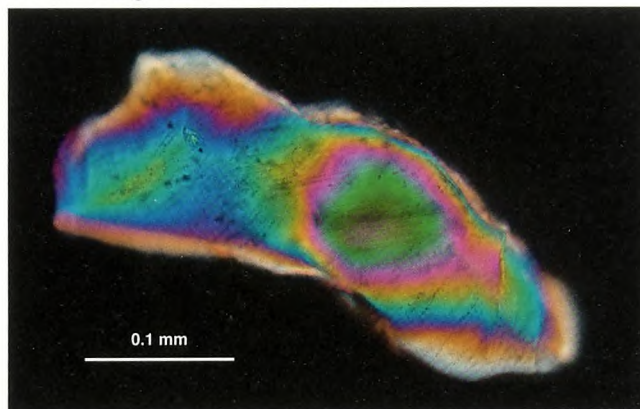


Figur 3. Indsamling af sediment i flodlejet foran Hiawatha-gletsjeren. Krateret befinder sig under isen i baggrunden.

Sedimentsprøverne viste sig i det hele taget at være en sand guldgrube. Ud over kvartskornene dukkede der smeltesdråber op i alverdens mærkelige former. Nogle af dem var fine dråber, andre var beklædt med knuste fragmenter af grundfjeldet. Enkelte indeholdt sågar små stykker forkullet træ [4]. Det virker måske ikke så overraskende at finde smeltesdråber fra et stort meteornedslag, men det er faktisk højt usædvanligt. Alle andre store nedslag er langt ældre end Hiawatha, og de øvre lag i og omkring disse kraterer er derfor for længst forsvundet. Selvom Hiawatha er svært tilgængeligt pga. isen, kan det derfor vise sig at gemme på mange oplysninger om meteorkraterer, som vi ikke kan finde andre steder på Jorden.

Prøverne viste også tegn på, at den asteroide, der forårsagede krateret, var metallisk. Det kan måske lyde overraskende, at der findes metalliske asteroider, men der findes faktisk mange af dem. De første asteroider, der dannedes i solsystemet, indeholdt den kortlivede radioaktive isotop ^{26}Al , der dannes i supernovaeksplosioner. Henfaldet af ^{26}Al var tilstrækkeligt til at smelte disse tidligere asteroider. Opsmeltingen førte til, at de

ligesom Jorden blev opdelt i en metalkerne, en kappe og en skorpe. Kun en enkelt af disse tidlige, vulkansk aktive asteroider har overlevet til i dag – den næststørste asteroide Vesta. Alle de øvrige er blevet knust efter sammenstød med andre asteroider. Kilometerstore fragmenter fra knuste asteroider rammer Jorden og de andre planeter fra tid til anden – som den kernestump, der forårsagede Hiawatha-krateret.



Figur 4. Kvartskorn fra Hiawatha-krateret med to sæt såkaldte PDF'er (Planar Deformation Features). De to sæt ses tydeligst i midten og nederst til højre på kornet. De to sæt er orienteret symmetrisk omkring en krystallografisk akse og kan kun dannes i forbindelse med meteornedslag.

At det var en metallisk asteroide, der forårsagede Hiawatha-krateret, var en meget spændende opdagelse, da det betyder, at der kan være en forbindelse mellem Jordens største byge af jernmeteoritter, de såkaldte Cape York-meteoritter, og Hiawatha-krateret. Cape York-meteoritterne er fundet i det nordvestlige Grønland, og analyser af dem tyder på, at de er faldet inden for de sidste få tusinde år (figur 5). For at afklare, om Cape York-meteoritterne kom fra den asteroide, der forårsagede Hiawatha-krateret, skal vi forsøge at finde stumper af Hiawatha-asteroiden i det isfrie område lige nord for krateret. En sammenligning af stumperne af asteroiden med Cape York-meteoritterne vil kunne afsløre, om de kommer fra samme fald. Det er desværre ikke sikkert, at det er muligt at finde sådanne fragmenter. Siden krateret blev dannet, har iskappen bevæget sig hen over hele forlandet og ud i Nares Strædet, og det kan derfor vise sig, at alle fragmenter er skubbet i havet.



Figur 5. I juli 1963 fandt Vagn Buchwald den 20 t tunge Cape York-meteorit, Agpalilik. Her ses han ved siden af meteoritten i gården foran Geologisk Museum i København.

Selvom vi havde fundet kvartskorn med tydelige tegn på et meteornedslag, viste det sig stadig meget vanskeligt at få publiceret opdagelsen – dels fordi vi ikke havde taget vores prøver inde i selve krateret, men også fordi vores analyse af kraterets alder tydede på, at der kunne være en forbindelse med Yngre Dryas. Selvom vi kun fremførte det sidste som en mulighed, der burde undersøges nærmere, var det så kontroversielt, at det viste sig umuligt at få resultaterne publiceret, før vi fjernede enhver reference til Yngre Dryas. Da artiklen blev publiceret i november 2018, blev det af tidsskriftet Science udnævnt til en af de ti største videnskabelige opdagelser i 2018 – ikke mindst netop pga. den mulige forbindelse til Yngre Dryas, som vi måtte undlade at diskutere.

Hvad var det så, der ramte Nordvestgrønland?

Krateret under isen er 31 km i diameter. For at lave så stort et krater kræves et nedslag med en energi på ca. 3×10^{21} J svarende til ca. 45 millioner Hiroshima-bomber. Energien kom fra den kinetiske energi af den asteroide, der ramte Jorden. Med en sandsynlig hastighed på ca. 20 km/s kræver det en metallisk asteroide med en diameter på ca. 1,5 km.

Et sådant nedslag genererer i første omgang en skålformet fordybning med en dybde på ca. 7 km og en diameter på 20 km. Et så dybt hul er ikke stabilt på Jorden, og det kollapsede derfor øjeblikkeligt til det endelige krater, der havde en dybde på godt 800 m og en diameter på 31 km. I forbindelse med sammenfaldet af hullets sider ind mod midten dannedes der en central top eller måske ligefrem et system af ringe i kraterets centrum. Sådanne store komplekse kratere er almindelige på Månen, Mars og de fleste andre faste legemer i solsystemet, men bortset fra det langt ældre Chicxulub-krater i Mexico, er Hiawatha det eneste kendte på Jorden, hvor selve krateret er bevaret. Chicxulub er dækket af ca. 500 m sediment og har derfor undgået erosion. De andre store kratere er typisk flere hundrede millioner år gamle, og erosionen har derfor fjernet adskillige km af de øverste lag.

Udover, at hele asteroiden fordampede, førte nedslaget også til opsmeltning af ca. 18 km^3 af grundfjeldet og op mod 1000 km^3 is. Uanset, hvornår det fandt sted, har det ført til dramatiske klimaændringer. En fremtidig datering af krateret vil derfor kunne afsløre, hvor vi skal lede efter konsekvenserne af det største kendte nedslag i Jordens nyere historie. Samtidigt vil undersøgelser af det unikt velbevarede krater også kunne give os en langt bedre forståelse af store meteornedslag. Det er selvsagt en udfordring, at krateret er dækket af is, og det vil derfor formentlig tage årtier at undersøge det til bunds.

Litteratur

- [1] impact.uwo.ca/map/
- [2] www.passc.net/EarthImpactDatabase/New%20website_05-2018/Criteria.html
- [3] advances.sciencemag.org/content/4/11/eaar8173
- [4] www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/1381.pdf
- [5] Link til NASA-video, der forklarer, hvordan Hiawatha-krateret blev fundet: www.youtube.com/watch?v=vTr3VdGIFr8&t=70s



Henning Haack er projektleder på ScienceTaler i Sorø og forsker ved Maine Mineral and Gem Museum.

Klodesprængning - breddeopgave 79 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.

Breddeopgave 79. Klodesprængning

Hvilken indflydelse har massetætheden på, hvor hurtigt kloder kan rotere om sig selv uden at sprænges? Begrund svaret.

Løsning

Lad os for nemheds skyld antage, at en klode har samme massetæthed ρ overalt. Vi kalder vinkelhastigheden for klodens rotation om sig selv ω , og klodens radius R .

En prøvemasse m på klodens overflade ved klodens ækvator er da påvirket af gravitationskraften

$$F_G = Gm \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \frac{1}{R^2} = Gm \frac{4}{3} \pi R \rho \quad (1)$$

indad. G er gravitationskonstanten. Samtidig er prøvemassen påvirket af centrifugalkraften

$$F_C = mR\omega^2 \quad (2)$$

udad. Kloden sprænges, hvis F_C er større end F_G . Og det ses at ske for

$$\omega > \sqrt{4\pi G\rho/3}. \quad (3)$$

Det er bemærkelsesværdigt, at klodens størrelse, når vi spørger til den kritiske rotationshastighed, ikke spiller nogen rolle.



Kommentar

Opgaveløsningen er ikke afhængig af den simplificerede antagelse om, at massen af kloden er homogent fordelt. Vi kan nøjes med at antage samme massefylde i samme dybde. Så er middelværdien af massefylden givet ved

$$\langle \rho \rangle = \frac{\int_0^R 4\pi r^2 \rho(r) dr}{V}, \quad (4)$$

hvor V er klodens volumen $\frac{4}{3}\pi R^3$. Ifølge Newtons teorem om massetiltrækningen fra en homogen kugleskal kan vi i stedet for ligning (1) skrive:

$$F_G = Gm \int_0^R 4\pi r^2 \rho(r) dr / R^2 = Gm \frac{4}{3} \pi R \langle \rho \rangle. \quad (5)$$

For en lagdelt klode ses betingelsen i ligning (3) derfor stadig at gælde, blot skal ρ erstattes med $\langle \rho \rangle$.

Opgaven kan også besvares ved dimensionsanalyse. Den kritiske rotationshastighed ω_{kr} kan tænkes at afhænge af ρ (eller $\langle \rho \rangle$), G og R . Vi antager da:

$$\omega_{kr} = k\rho^\alpha G^\beta R^\gamma. \quad (6)$$

Her er k nødvendigvis et rent tal, da der indgår tidsdimension i G , men ikke i ρ og R , hvorfor der ikke kan dannes en dimensionsløs kombination af ρ , G og R . Kravet om ens dimension på begge sider af lighedstegnet indebærer:

$$T^{-1} = (ML^{-3})^\alpha (M^{-1}L^3T^{-2})^\beta L^\gamma. \quad (7)$$

Da M for masse, L for længde og T for tid, som valgte basisdimensioner, ikke kan reduceres til hinanden, skal deres potenser stemme overens hver for sig. Det giver ligningssystemet:

$$M : 0 = \alpha - \beta \quad (8)$$

$$L : 0 = -3\alpha + 3\beta + \gamma \quad (9)$$

$$T : -1 = -2\beta, \quad (10)$$

med den entydige løsning $\alpha = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{2}$, og $\gamma = 0$, svarende til ligning (3). At ω_{kr} ikke afhænger af klodens størrelse, kunne vi ikke have gættet forud for dimensionsanalysen uden at opstille ligningerne (1) og (2). Men det viser sig altså også som en konsekvens af dimensionsanalysen.

Opgaver som denne, der lægger op til besvarelser på flere måder og på flere niveauer, er en god ting i breddeopgavegenren. Vi foretrækker at komme svagere og stærkere studerende samtidigt i møde herved, fremfor ved den traditionelle opbygning af eksamensopgaver med hjælpespørgsmål undervejs til den endelige opgaveløsning.

Det er ved løsningen af opgaven forudsat, at planeten er sfærisk. Men en roterende planet vil være fladtrykt på grund af centrifugalkræfterne. En gennemgang af problemet for en fladtrykt planet er omfattende. Det kunne være en udfordring for et projektarbejde, men kan ikke fungere som emne for en breddeopgave. Dog kan vi ved dimensionsanalyse komme et stykke af vejen. Hvis vi kalder planetens radier ved polerne og ved ækvator for henholdsvis T og R – i grænsesituationen for sprængning – giver dimensionsanalysen:

$$\omega_{kr} = f\left(\frac{T}{R}\right) \sqrt{G\rho}, \quad (11)$$

hvor f er en ukendt funktion af T/R . Den kritiske værdi af ω er altså igen uafhængig af planetens størrelse, men den afhænger af dens form ved den kritiske værdi af ω . Både ligning (3) og (11) er udregnet under forudsætning af, at planetens materiale er som fx en bunke grus, en væske eller en gas, dvs. et materiale uden stærk intern sammenhængskraft i forhold til gravitationskræfterne.

Breddeopgave 80. Bobler

Denne opgave er fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 2018).

En vandtank har fået skruet låget lufttæt fast efter at være blevet delvist fyldt med vand. Ved et uheld slås der et hul i bunden af tanken. Hvor meget vand løber ud af tanken, før der begynder at boble luft ind i den? Begrund svaret.

Løsning og kommentar følger på næste side.

Bobler – breddeopgave 80 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 breddeopgave nr. 80 i rækken her i KVANT:

Bobler

En vandtank har fået skruet låget lufttæt fast efter at være blevet delvist fyldt med vand. Ved et uheld slås der et hul i bunden af tanken. Hvor meget vand løber ud af tanken, før der begynder at boble luft ind i den? Begrund svaret.

Løsning

Som på figuren kalder vi startværdien af højden af luftlommen h_l , startværdien af højden af vandoverfladen h_v , startværdien af trykket i luftlommen og uden for beholderen P_u , sænkningen af vandoverfladen, når den første luftboble bobler op i flasken, for Δh , og det tryk, der da er i luftlommen, for $P_{\Delta h}$. Vandets massefylde kalder vi ρ og tyngdefeltstyrken g .

Hvis hullet i bunden af beholderen er tilstrækkeligt lille, kan vi antage, at udvidelsen af luftlommen sker langsomt og isotermt i overensstemmelse med Boyles lov. For en beholder med konstant tværsnitsareal har vi:

$$P_u h_l = P_{\Delta h} (h_l + \Delta h). \quad (1)$$

Idet vi ser bort fra overfladespænding, begynder der at boble luft ind i beholderen, når trykket i vandet lige inden for hullet er faldet til samme værdi som trykket i luften uden for hullet:

$$P_{\Delta h} + \rho g (h_v - \Delta h) = P_u. \quad (2)$$

Elimineres $P_{\Delta h}$ ved kombination af ligningerne (1) og (2), fås

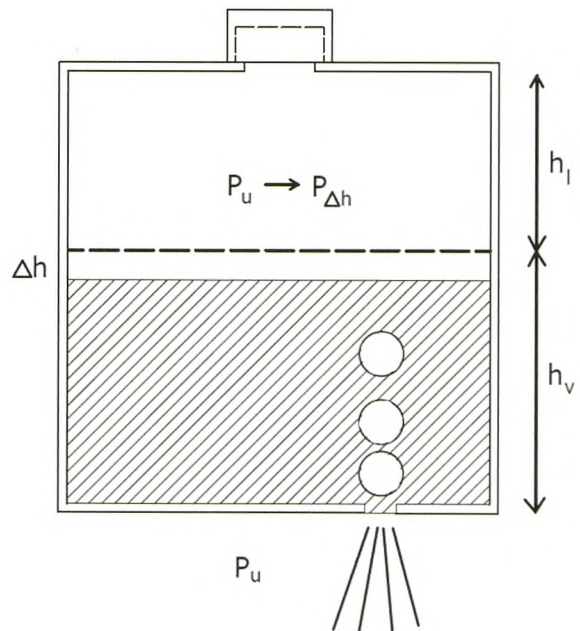
$$P_u h_l = (P_u - \rho g (h_v - \Delta h)) (h_l + \Delta h), \quad (3)$$

der omskrives til:

$$\Delta h^2 + \left(\frac{P_u}{\rho g} + h_l - h_v\right) \Delta h - h_l h_v = 0 \quad (4)$$

med løsningen:

$$\Delta h = -\frac{1}{2} \left(\frac{P_u}{\rho g} + h_l - h_v\right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{P_u}{\rho g} + h_l - h_v\right)^2 + h_l h_v}. \quad (5)$$



Figur 1. Luftbobler på grund af hul i vandtank.

Svaret på opgaven er derfor, at der er løbet et volumen vand ud af beholderen givet ved tværsnitsarealet af beholderen ganget med Δh , før der begynder at boble luft ind i den.

Hvis h_l går imod 0, ses Δh at gå imod 0. Det hænger sammen med, at undertrykket i den indespærrede luft øges hurtigt med øgningen af Δh , når h_l er lille, jævnfør ligning (1). Størrelsen Δh ses også at gå imod 0, når h_v går imod 0. Det hænger sammen med, at vandsøjletrykket på boblerne går imod 0 i denne grænse. Ligning (5) virker rimelig i begge grænser.

Kommentar

Selvom vi har set bort fra overfladespænding, lever udtrykket for Δh i ligning (5) ikke helt op til Einsteins fysikerprogramerklæring: "Make everything as simple as possible, but not simpler". Medmindre der tænkes på vandtanke af husstørrelse, er leddet $P_u/\rho g \approx 1 \text{ atm}/(1 \text{ atm}/10 \text{ m}) = 10 \text{ m}$ stort i forhold til h_l og h_v . For indendørs vandtanke kan ligning (5), omformet til

$$\Delta h = \frac{1}{2} \left(\frac{P_u}{\rho g} + h_l - h_v\right) \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4h_l h_v}{\left(\frac{P_u}{\rho g} + h_l - h_v\right)^2}}\right). \quad (6)$$

rækkeudvikles efter argumentet $\frac{4h_l h_v}{\left(\frac{P_u}{\rho g} + h_l - h_v\right)^2} \ll 1$ med

det enklere og mere overskuelige resultat:

$$\Delta h \approx \frac{h_l h_v}{\frac{P_u}{\rho g} + h_l - h_v} \approx \frac{h_l h_v \rho g}{P_u}. \quad (7)$$

Det er en pointe, at dette resultat kunne være opnået mere direkte uden omvejen omkring ligning (5) ved at approksimere fra begyndelsen, hvis vi indskrænker os til at udtale os om indendørs vandtanke. Samtidigt kan vi opnå et resultat, der ikke er indskrænket til at gælde for så små huller i tanken, at udvidelsen af luftlommen sker isotermt.

Vi erstatter ligning (1) med

$$P_u h_l^\gamma = P_{\Delta h} (h_l + \Delta h)^\gamma, \quad (8)$$

hvor $\gamma = 1$ svarer til den isoterme grænse (små huller), og $\gamma = 7/5$ svarer til den adiabatisk grænse (store huller), idet luften består af diatomige molekyler. Efter omformning til $P_{\Delta h} = P_u (1 + \Delta h/h_l)^{-\gamma}$, rækkeudvikling heraf efter $\Delta h/h_l \ll 1$ til $P_{\Delta h} = P_u (1 - \gamma \Delta h/h_l)$, og indsættelse i ligning (2) med resultatet $\rho g h_v = \Delta h (\rho g + \gamma P_u/h_l)$, fås, idet $\rho g \ll P_u/h_l$:

$$\Delta h \approx \frac{h_l h_v \rho g}{P_u \gamma}. \quad (9)$$

Dette resultat dækker flere situationer end resultatet i ligning (7), og vi er nået frem til det ved enklere regninger. Moralen synes at være, at det, for at bevare overblikket og gøre sagen så simpel som mulig, betaler sig at approksimere så hurtigt som muligt. Tænk først fysisk, så matematisk – ikke omvendt.

Men der findes også eksempler, der peger på den modsatte morale: Præcisér sagen så eksakt og matematisk som muligt, og overvej fysisk begrundede forenklinger til sidst.

Breddeopgaven i KVANT oktober 2017 handlede om, hvornår en dug, et tov eller lignende rutsjer ned af bordet, som dugen m.m. ligger på tværs af med ulige lange nedhæng til to modstående sider. Umiddelbart kunne man forestille sig, at det sker, når forskellen mellem tyngdekræfterne på de to udhæng overstiger den mulige statiske gnidningskraft imellem dugen og bordpladen. I kommentaren redegjorde jeg imidlertid matematisk for, hvordan gnidningen ved bordkanterne er afgørende på en måde, der kun gør det umiddelbare svar på opgaven tilnærmelsesvist rigtigt under specielle omstændigheder. Så moralen her var så afgjort, at det betaler sig at modellere så eksakt som muligt og først approksimere til sidst.

I kommentaren skrev jeg også, at opgaven – i modsætning til, hvad vi tænkte i udgangspunktet – var

for vanskelig til at kunne bruges som breddeopgave til eksamen. Siden har jeg gennemset samlingen af breddeopgaver og fundet, at vi alligevel ved to tidligere eksamener (januar 1996 og januar 2010) har stillet opgaver svarende til den om den rutsjende dug, hvor vi åbenbart forhastet har tænkt, at der kunne ses bort fra gnidningen imod bordkanten i forhold til gnidningen imod bordpladen. Det er først tredje gang opgaven i den ene eller anden forklædning dukker op som idé, at vi behandler den med matematisk omhu. Skaden er ikke stor i forhold til de studerendes eksamen. De bliver mere bedømt på, om de kan tænke som fysikere konfronteret med eksamensopgaverne, end om de når frem til rigtige resultater. Men sagen er en god illustration af, at fysikere (opgavestillerne) ikke kun skal “make everything as simple as possible”, men også skal være opmærksomme på anden del af Einstein-citatet: “but not simpler”.

Martin Niss har for nylig skrevet en artikel (“What is physics problem solving competency? The views of Arnold Sommerfeld and Enrico Fermi”, *Science & Education*, bind 27, nr. 3–4, side 357–369 (2018)), hvor han karakteriserer Sommerfelds tilgang til fysisk problemløsning som en “theory first, phenomenon second”-tilgang, og Fermis tilgang som en “phenomenon first, theory second”-tilgang. Modstillingen ligner den, som jeg har forsøgt at illustrere ved at modstille løsningsstrategier for breddeopgaven her om bobler og breddeopgaven om den rutsjende dug i KVANT-nummeret fra oktober 2017, idet der med “theory” tænkes på en matematisk formuleret ramme for problemet under behandling.

Breddeopgavegenren lægger sig tæt op af Fermi-udgaven af fysisk problemløsning. Men overordnet er moralen, at man, for at kunne tænke som fysiker, alt efter omstændighederne skal kunne tilgå problemer både på Fermi-måden og på Sommerfeld-måden. Breddekurset er derfor kun en del af uddannelsen til fysiker.

Breddeopgave 81. Gnidning, arbejde og varme

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningerne til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 2017, nr. 81 i rækken her i KVANT):

En stor kælk med et lad står stille på en spejlglat tilfrosset sø. Kælken sættes i bevægelse, fordi en postsæk kastes ud på ladet, hvor den bremses ned i forhold til ladet på grund af gnidning. Hvor langt har kælken flyttet sig, når postsækken ligger stille i forhold til kælken? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

Korrektion af korrektion af korrektion

De manglende minus-tegn i forrige nummer af KVANT betød desværre også, at korrektionen til korrektionen til artiklen “G-2-eksperimentet – den mest nøjagtige test

af kvanteelektrodynamikken” blev forkert. Vi forsøger derfor endnu engang med formelen for størrelsen af impulsvektoren:

$$\sqrt{\frac{E^2}{c^2} - m^2 c^2}.$$

Seismiske undersøgelser af Solen og andre stjerner

Jørgen Christensen-Dalsgaard, *Stellar Astrophysics Centre, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet*

Observation af stjernessvingninger kan give information om stjernernes egenskaber, herunder deres indre opbygning og rotation. I de seneste årtier har sådanne helioseismiske studier givet detaljeret viden om Solen og dermed en bedre forståelse af stjerners struktur og udvikling. Takket være især NASAs Kepler-satellit har vi været i stand til foretage tilsvarende asteroseismiske undersøgelser af mange andre stjerner, herunder eksempler på, hvordan Solen vil udvikle sig over de kommende mange milliarder af år.

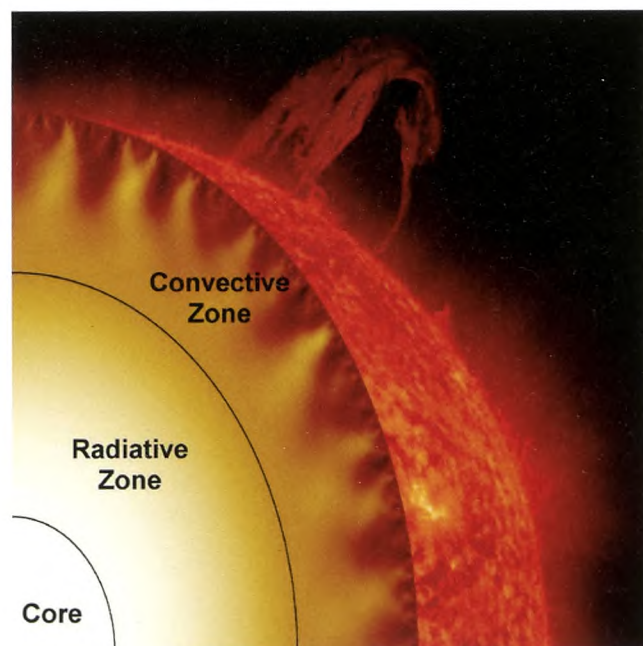
Stjerner er de basale byggesten for strukturen af universet og er på mange måder afgørende for universets udvikling. Alle grundstoffer tungere end litium produceres ved kernereaktioner i stjernernes indre, og eksplosive processer ved afslutningen af tunge stjerners liv er i høj grad med til at forme strukturen af galakser. Observationer af stjerner er afgørende for studiet af galaksers udvikling, inklusive vores egen galakse Mælkevejen. For at studere planeter omkring andre stjerner, de såkaldte exoplaneter, må vi bestemme egenskaberne ved de stjerner, de kredser omkring, og det gør det bl.a. muligt at bestemme alderen af disse planetsystemer.

Vi kan foretage observationer af stjerners overfladeegenskaber inklusive grundstofsammensætning og temperatur. Hvis vi kender afstanden til en stjerne, kan vi også bestemme stjernens samlede energiudsendelse, den såkaldte lysstyrke – i specielle tilfælde også stjernens radius – og for nogle stjerner, der kredser om hinanden i et dobbeltstjernesystem, kan også stjernernes masse bestemmes. Mere detaljeret information fås for stjerner, der er samlet i stjernehober, hvor alle stjerner kan antages at have samme alder og oprindelige grundstofsammensætning. Men alle disse observationer giver ikke direkte information om forholdene i stjernernes indre.

Vores viden om stjernernes indre struktur og deres livshistorie har i høj grad været baseret på teoretiske modeller. De involverer numerisk løsning af ligninger for betingelsen for ligevægt mellem trykgradienten og tyngdekraften, for energiproduktionen i stjernens dybe indre og energitransporten fra de centrale dele til overfladen, suppleret med en beskrivelse af stoffets egenskaber i stjernen og de kernereaktioner, der producerer energien. I stjerner som Solen produceres energien ved fusion af fire brintkerner til en heliumkerne. Ved denne proces ændres sammensætningen af stjernens indre, og det driver en gradvis udvikling af stjernen. Figur 1 viser en skematisk illustration af strukturen af Solens indre.

Med en alder på 4,6 milliarder år, bestemt ud fra radioaktivt henfald af grundstoffer i meteoritter, viser modellerne, at Solen er ca. halvvejs gennem den fase af udviklingen, hvor brintfusionen sker i de centrale dele. Om fem milliarder år er brinten brugt op i Solens centrum; Solen har herefter en heliumkerne omgivet af et område, en såkaldt skalkilde, hvor der stadig sker brintfusion. Denne proces øger massen af heliumkernen, som trækker sig sammen under den forøgede vægt. Modellerne viser, at de ydre lag af stjernen udvider

sig, til sidst så voldsomt, at stjernen bliver en rød kæmpestjerne; i Solens tilfælde måske så stor, at den vil opsluge Jorden, og med en lysstyrke tusind gange den nuværende. Som led i denne udvikling når temperaturen i det indre af heliumkernen et niveau, hvor helium begynder at fusionere til kulstof og ilt. I afslutningen af Solens udvikling vil der ske et voldsomt massetab, hvor de ydre lag afstødes og kortvarigt danner en såkaldt planetarisk tåge omkring den centrale kerne, der nu består overvejende af kulstof og ilt. Sådanne kerner, der observeres som meget kompakte, hvide dværgstjerner med masser på ca. halvdelen af Solens masse og radier sammenlignelige med Jordens radius, har i begyndelsen overfladetemperaturer over 100.000 grader og afkøles gradvist over milliarder af år.



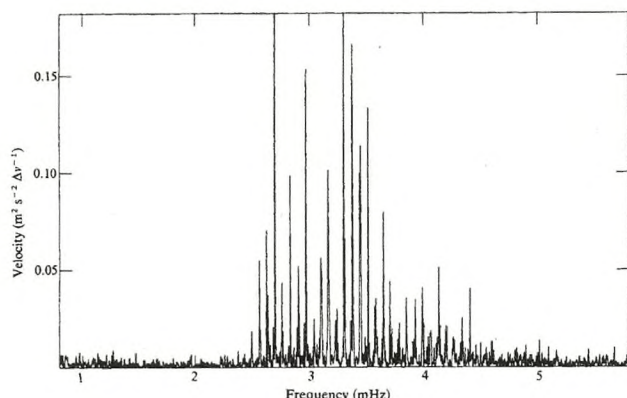
Figur 1. Skematisk illustration af strukturen af Solen og solnigende stjerner. I de centrale dele produceres energi ved fusion af brint til helium. Energien transporteres udad af stråling i de indre ca. 70 procent af Solen. I de ydre dele sker energitransporten ved konvektion, hvor varm gas stiger til vejrs, og kold gas synker indad.

Denne beskrivelse af Solens og andre stjerners udvikling er overvejende baseret på numeriske modeller. Den giver en rimelig fortolkning af observationer af stjerner, ikke mindst deres fordeling efter lysstyrke og overfladetemperatur i stjernehober, men den rummer mange usikre detaljer, som ikke kan tjekkes alene med

observationer af stjernernes overfladeegenskaber. Det kræver mere dybtgående observationer. I de seneste årtier har studier af stjernessvingninger givet sådanne observationer, først for Solen og navnlig i det seneste årti for andre stjerner [1].

Stjernessvingninger

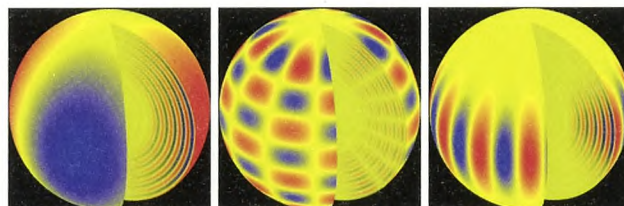
Variable stjerner har været kendt i århundreder. Den mest kendte type er nok de såkaldte Cepheider [2], opkaldt efter stjernen δ Cephei, hvis regelmæssige variationer med en periode på 5,4 døgn nemt kan observeres med det blotte øje. Cepheidernes periode er direkte relateret til deres lysstyrke, og det har gjort dem til værdifulde "fyrtårne" i karakteriseringen af universets struktur. I 1960'erne blev det klart, at Solens overflade også udviste periodiske variationer i hastighed med en periode på ca. 5 minutter, og i det efterfølgende tiår blev det vist, at disse skyldtes stående lydbølger, der i nogle tilfælde omfatter hele Solen. Amplituden er mindre end 20 cm/s for de individuelle svingninger, så opdagelsen af dem er en teknologisk triumf. De første detaljerede observationer blev foretaget fra Sydpolen i (den nordlige) vinter 1979–80 af en fransk-amerikansk gruppe (se figur 2). De observerede Solen uafbrudt i mere end 5 døgn og kunne derfor adskille de enkelte svingninger.



Figur 2. Svingningsspektrum for Solen, observeret i Dopplerhastighed i perioden 31. december 1979 – 5. december 1980, med udstyr placeret ca. 8 km fra den geografiske Sydpol. Figuren viser svingningsintensiteten som funktion af frekvensen, i millihertz. Svingningerne har maksimal amplitude ved en frekvens omkring 3 mHz, svarende til en periode på ca. 5 minutter. Hver top i spektret svarer til en egensvingning af Solen, med en frekvens der afhænger på en specifik måde af forholdene i Solens indre.

Cepheidernes svingninger er kuglesymmetriske, hvor stjernen skiftevis udvider sig og trækker sig sammen. I Solen og mange andre stjerner er der et meget rigere spektrum af svingninger. For at beskrive svingninger af et tredimensionelt objekt har vi brug for tre "bølgetal". Det ene af dem er den radiale orden n , der beskriver antallet af knuder i den radiale retning, dvs. kugleskaller hvor svingningsamplituden er nul, helt analogt til en svingende streng. De to andre bølgetal beskriver svingningernes variation hen over stjernens overflade (se figur 3). Matematisk er de givet ved de såkaldte kuglefunktioner, som også kendes fra den kvantemekaniske beskrivelse af atomer. De er karakteriseret ved graden l , som angiver det totale antal

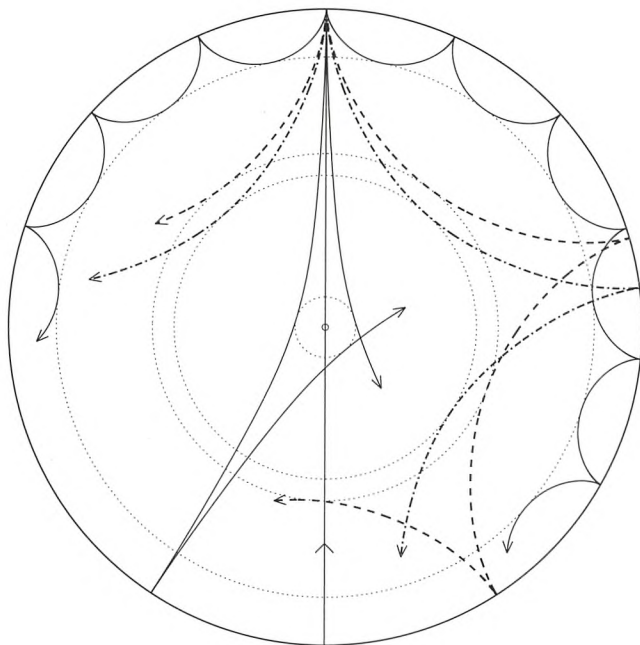
knudelinier på stjernens overflade, og antallet m (den azimutale orden) af knudelinier, der krydser ækvator. For de kuglesymmetriske (også kaldt "radiale") svingninger er $l = 0$. Observationerne på figur 2 omfatter svingninger med $l = 0 - 3$ og en radial orden mellem ca. 15 og 30. Det er typisk for svingninger observeret i mange andre stjerner, hvor stjernernes overflade ikke kan opløses. I Solens tilfælde kan vi tage "billeder" af hastighedsfeltet på Solens overflade og på den måde observere svingninger med grader op til mere end 1000.



Figur 3. Såkaldte kuglefunktioner, der beskriver opførslen hen over stjernens overflade af svingninger af en stjerne. De er karakteriseret af graden l , der giver det samlede antal knudelinier på stjernens overflade, og ordenen m , der måler antallet af knudelinier, der krydser ækvator. De viste svingninger har $(l, m) = (2, 2), (12, 6)$ og $(12, 12)$. Observationer af fjerne stjerner i lys, midlet over stjernens overflade, er kun følsomme over for svingninger med $l \leq 3$; for højere l vil områder med positive og negative udsving udslukke hinanden. På Solen kan vi observere svingninger med høje l gennem observationer, der opløser solskiven. I udsnittet af stjernen er også skitseret svingningernes opførsel i det indre af stjernen, karakteriseret ved den radiale orden n . Bemærk også, at svingningen til højre med $m = l$ er mere koncentreret mod ækvator.

Som i geofysikken kan svingningernes egenskaber illustreres ved opførslen af stråler, der følger bølgenes udbredelse. Det er vist på figur 4 for lydbølger i en stjerne. De radiale svingninger svarer til bølger, der udbreder sig radiale og når helt ind til stjernens centrum. Med voksende grad l bliver bølgerne afbøjet længere og længere ude i stjernen. Svingninger af lave grader, som også kan observeres i andre stjerner end Solen, giver altså, lidt overraskende, information om forholdene i stjernens centrale dele. I Solen gør observation af svingninger af grader fra 0 til flere hundrede, der udbreder sig i meget forskellige områder i Solen, det muligt at bestemme Solens egenskaber som funktion af positionen i det meste af Solens indre; som illustreret på figur 3 afhænger kuglefunktionernes udbredelse i breddegrad af m på en måde, som gør det muligt at opløse variationen i fx Solens rotation med bredden.

Ethvert objekt har et sæt egensvingninger, men for at kunne observeres, må svingningerne holdes i gang. I Solen og sol lignende stjerner er svingningerne dæmpet og ville dø ud, hvis de ikke hele tiden blev exciteret. Excitationen skyldes støj fra de voldsomme konvektive gasbevægelser i den såkaldte granulation, der bringer energien ud til stjerneoverfladen. Ydre konvektion findes i alle stjerner med en overfladetemperatur under ca. 7000 grader, og vi ville altså forvente sol lignende svingninger i disse stjerner; som vi skal se, er det blevet bekræftet af observationer fra Kepler-satellitten.



Figur 4. Kurver, der markerer udbredelsen af lydbølger i det indre af en stjerne, vist i et tværsnit af stjernen. Bølgerne exciteres af den turbulente konvektion nær stjernens overflade. Når de bevæger sig ind i stjernen, bliver de afbøjet af den stigende lydhastighed med dybden under stjernens overflade, indtil de når det indre vendepunkt, markeret ved prikkede cirkler, hvor de undergår total indre refleksion. Når bølgen når tilbage til stjernens overflade, bliver den reflekteret af det kraftige fald i den lokale massefylde. Bølger svarende til høje værdier af l afbøjes først: de viste kurver svarer til $l = 75, 25, 20$ og 2 . Radiale svingninger, med $l = 0$, er skematisk indikeret med en linie gennem stjernens centrum. For Solen har vi observationer for alle grader op til flere hundrede. Ved at kombinere data for svingninger med forskellige positioner af vendepunktet kan strukturen, specielt lydhastigheden, i Solens indre bestemmes.

Stjernesvingninger kan observeres ved at måle en stjernes overfladehastighed ved hjælp af Dopplereffekten, eller ved at måle variationer i lysstyrken. En udfordring for studiet af sollignende svingninger er, at denne form for excitation resulterer i meget små amplituder. For stjerner med central brintfusion, inklusive Solen, er typiske hastighedsamplituder maksimalt 10–20 cm/s, mens svingningerne i lysstyrken kun er nogle få milliontedele. Svingningerne i radialhastigheden kan måles med jordbaserede teleskoper, mens lysstyrkevariationerne set fra Jorden drukner i fluktuationer, der skyldes Jordens atmosfære; her er observationer fra rummet nødvendige.

Helioseismologi

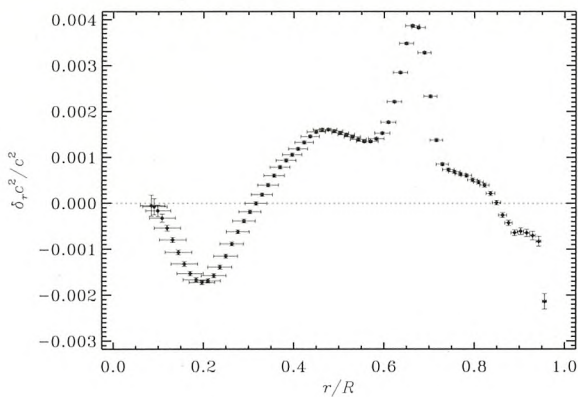
De første detaljerede observationer af solsvingninger, fx som vist i figur 2, demonstrerede det store potentiale for studier af Solens indre og førte til udviklingen af meget avancerede instrumenter. For at opnå den fulde mulige nøjagtighed og undgå komplikationer i dataanalysen er det nødvendigt at have meget lange og stort set ubrudte observationsserier, gerne over mange måneder eller år. Bortset fra områder nær polerne indebærer observationer af Solen fra Jordens overflade med et enkelt teleskop uundgåelige natlige afbrydelser; uafbrudte observationer (bortset fra problemer med vejret) kan opnås ved at kombinere data fra flere ob-

servatorier. Det er udnyttet i to omfattende netværker af teleskoper, der har været i funktion siden halvfemserne. Den anden mulighed er at observere fra rummet, og den er udnyttet i SOHO-satellitten, et fælles projekt til observation af fænomener på Solen mellem ESA og NASA. Satellitten blev opsendt i 1995 og er stadig i funktion. Figur 5 viser et "hastighedsbillede" optaget med MDI-instrumentet på SOHO; farveskalaen angiver størrelsen af den målte radialhastighed. Instrumentet optog et billede hvert minut over en periode på 15 år. Med en opløsning på 700.000 pixler svarer disse målinger af "solskælv" effektivt til at placere 700.000 seismografer på Solens overflade. MDI blev i 2011 erstattet af HMI-instrumentet på NASAs SDO-satellit, med en endnu højere opløsning.



Figur 5. Illustration af en måling af radialhastigheden af Solens overflade med MDI-instrumentet på SOHO-satellitten. Farveskalaen viser hastigheden i satellittens retning. Variationen er domineret af Solens rotation, med en overfladehastighed på ca. 2 km/s ved Solens ækvator. De øvrige variationer skyldes konvektion og den kombinerede effekt af over hundrede tusinde egensvingninger. Ved at analysere sådanne målinger optaget hvert minut over flere måneder kan de enkelte svingninger adskilles, og deres frekvenser bestemmes.

Analysen af disse meget omfattende data kaldes "helioseismologi" efter det græske ord "helios" for Solen. De analyseteknikker, der bruges, er i høj grad en videreudvikling af geofysiske teknikker. Studier af Solens indre struktur sigter generelt mod at teste de teoretiske modeller af Solen; da der er tale om lydbølger, er det specielt lydhastigheden i Solens indre, der kan bestemmes. Som eksempel viser figur 6 forskellen mellem lydhastigheden i Solens indre og i en solmodel. Der er vist usikkerheder på bestemmelsen af forskellen, men de er i meget af Solen mindre end størrelsen af symbolerne. Det er ganske slående, at teoretiske modeller, baseret på den fysik, vi har udviklet på grundlag af laboratorieforsøg og teori, er i stand til at forudsige forholdene i det indre af en stjerne med så stor nøjagtighed.



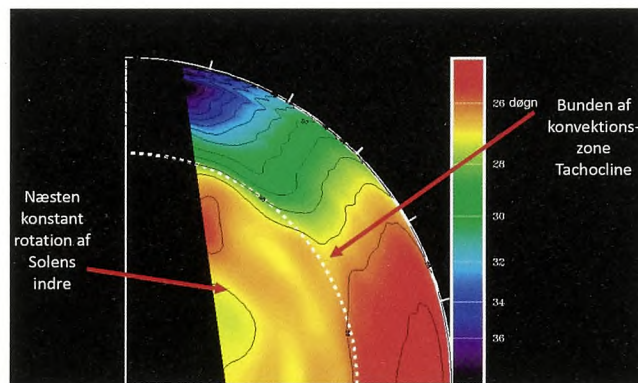
Figur 6. Relativ forskel i lydhastighedens kvadrat c^2 mellem Solen og en solmodel, bestemt ved analyse af helioseismiske data. Hvert punkt svarer til et gennemsnit af forskellen, over et område markeret ved de vandrette usikkerhedsbjælker. De lodrette usikkerhedsbjælker (der er næsten usynlige for en stor del af punkterne) markerer usikkerheden i bestemmelsen af forskellen, baseret på usikkerhederne i de målte frekvenser.

Lydhastigheden af den gas, som Solen består af, afhænger af temperaturen og grundstofsammensætningen. Ved at bestemme lydhastigheden i Solen får man derfor information om temperaturen i Solens indre. Tidligt i udviklingen af helioseismologien var det vigtigt ved at bekræfte at de gængse solmodeller var stort set korrekte. Brintfusionen i Solens indre frigør en strøm af neutrinoer, og på det tidspunkt var en kraftig uoverensstemmelse mellem den forudsagte og målte flux af neutrinoer fra Solen et tegn på alvorlige problemer med forståelsen af Solens indre. De helioseismiske resultater gjorde det usandsynligt, at årsagen skulle findes i fejl i solmodellerne, men snarere i ændringer i neutrinoernes egenskaber, fra deres dannelse til deres detektion. Det er senere blevet direkte bekræftet af nye neutrinomålinger.

Efter at modellen illustreret på figur 6 blev beregnet, har forbedrede analyser af Solens atmosfære ført til en revision af vores viden om Solens grundstofsammensætning. Modeller beregnet med den nye grundstofsammensætning afviger væsentlig mere fra Solens struktur, bestemt med helioseismologi, end modellen på figur 6. Årsagen til denne afvigelse er ikke kendt, men det er sandsynligt, at den er relateret til problemer med vores beskrivelse af, hvordan stof og stråling vekselvirker i Solens indre. Nye målinger og beregninger af denne vekselvirkning er på vej og kan forhåbentlig give os en bedre forståelse af fysikken i Solens indre.

Observationer af solsvingninger kan også bruges til at bestemme Solens indre rotation. Rotationen af Solens overflade er direkte bestemt ud fra observationer, fx af radialhastigheden som vist på figur 5. Den viser, at rotationen ikke er den samme overalt: Solens ækvator roterer med en periode på ca. 25 døgn, mens rotationsperioden nær Solens poler er mere end 30 døgn. Figur 7 viser Solens indre rotation, bestemt ud fra analyse af svingningsobservationer. De ydre ca. 27 procent af Solen roterer nogenlunde som overfladen, med en variation fra ækvator mod polerne. Under dette område er der en relativt skarp overgang til næsten konstant rotation, som fortsætter så dybt, som observationerne

rækker. Årsagen til dette rotationsmønster er ikke forstået til bunds. Det har tidligere været foreslået, at Solen havde en hurtigt roterende kerne, som forårsagede en let modifikation af Solens tyngdefelt, og dermed påvirkede en vigtig test af Einsteins generelle relativitetsteori ud fra målinger af planeten Merkurs bane. De helioseismiske resultater viser helt klart, at dette ikke er tilfældet; Merkurs bane er i fuldstændig overensstemmelse med Einsteins teori.



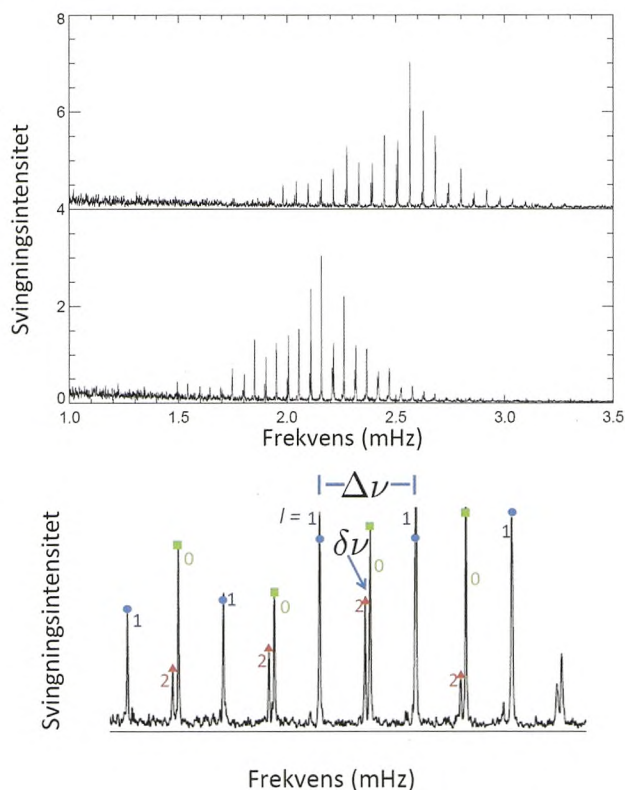
Figur 7. Solens indre rotation, bestemt ved analyse af helioseismiske data, i en kvadrant af et tværsnit af Solen, med rotationsaksen lodret og ækvator vandret. Farveskalaen markerer rotationsperioden i døgn. Den stiplede cirkel viser bunden af konvektionszonen, hvor der er en overgang mellem energitransport ved stråling og konvektion (se figur 1). Nær rotationsaksen og i de centrale dele af Solen har vi ikke tilstrækkelig information til at måle rotation.

Keplers revolution

De meget små amplituder af sollignende svingninger er en stor udfordring for at detektere dem. Efter mange forsøg over mere end ti år blev den første nogenlunde sikre bestemmelse af et sollignende svingningsspektrum i en anden stjerne foretaget i 1994 med det Nordiske Optiske Teleskop på La Palma. I de følgende 15 år blev der foretaget adskillige observationer af svingninger i radialhastigheder med jordbaserede teleskoper, inklusive observationer af Alfa Centauri A, en af himlens klareste stjerner, med et af verdens største teleskoper, ESOs Very Large Telescope.

Det store gennembrud for asteroseismologi, dvs. studiet af stjernernes egenskaber ud fra observation af deres svingninger, kom med NASAs opsendelse af Kepler-teleskopet i 2009 [3]. Hovedformålet med Kepler var detektion af planeter i bane om andre stjerner, de såkaldte exoplaneter, ved hjælp af passageteknikken. Her observerer man den lille reduktion af en stjernes lysstyrke, hvis en planet passerer hen forbi den, set fra teleskopet; for en planet som Jorden, der passerer forbi en stjerne som Solen, er effekten af størrelsesordenen en titusindedel [4]. Det kræver uhyre nøjagtige målinger af stjernernes lysstyrke. For at sikre, at effekten skyldes en planet i bane om stjernen, kræves uafbrudte observationer over meget lange tidsrum, og da kun få af de mulige planeter har baner, hvor der rent faktisk sker en passage, skal der observeres et meget stort antal stjerner. Kepler-missionen blev udviklet for at tilfredsstille disse krav og var en meget stor succes. På grundlag af missionens resultater kan man konkludere, at næsten alle stjerner

i Mælkevejen har planetsystemer, mange med planeter af nogenlunde Jordens størrelse og i baner, hvor der i princippet er mulighed for flydende vand.



Figur 8. Svingningsspektre (se figur 2) for 16 Cygni A (øverst) og B (i midten), i omløb om hinanden i et dobbeltstjernesystem. Det nederste panel illustrerer den detaljerede struktur i et udsnit af spektret for 16 Cygni A (se også ligning (1)). Her er graden l vist ved hver top, og markeret med grønne kvadrater (for $l = 0$), blå cirkler ($l = 1$) og røde trekanter ($l = 2$).

Kravene til planetobservationer svarer nøje til kravene til observationer af stjernesvingninger: meget lange, ubrudte observationer med stor nøjagtighed. Kepler observerede samme felt i stjernebillederne Lyren og Svanen i fire år og har givet os helt enestående data for astero-seismologi. Et eksempel er vist på figur 8, for dobbeltstjernesystemet 16 Cygni i stjernebilledet Svanen. Sammenligning med figur 2 viser, at svingningsfrekvenserne for disse stjerner er lidt lavere end for Solen, svarende til, at stjernerne er lidt større, med A-komponenten størst. Kvaliteten af data er på højde med tilsvarende observationer af Solen, og detaljeret analyse og sammenligning med modeller har givet en nøjagtig bestemmelse af stjernernes masser og radier, samt af alderen af systemet på 7 milliarder år, noget ældre end Solens 4,6 milliarder år. Næste skridt er en mere indgående sammenligning med stjernemodellerne for at se, hvor de skal forbedres.

Både figur 2 og figur 8 viser den karakteristiske struktur for akustiske svingninger af sollignende stjerner. Deres frekvenser er approksimativt givet ved

$$\nu_{nl} \approx \Delta\nu \left(n + \frac{l}{2} + \epsilon \right) + d_{nl}, \quad (1)$$

hvor den store frekvensadskillelse $\Delta\nu = \nu_{n+1l} - \nu_{nl}$ varierer som kvadratroden af stjernens middelmassefylde;

d_{nl} er en lille korrektion, der kan bestemmes fra den lille frekvensadskillelse $\delta\nu = \nu_{nl} - \nu_{n-1l+2}$. Denne struktur viser sig i svingningsspektrene som en serie af næsten uniformt adskilte toppe med en finstruktur, der er illustreret nederst i figur 8. Bemærk også (jf. figur 4), at banerne for de bølger, der svarer til svingninger med $l = 0$ og 2, kun afviger væsentligt fra hinanden nær stjernens centrum. Det betyder, at $\delta\nu$ er specielt følsom over for forholdene i de centrale dele af stjernen, herunder hvor meget brint, der er fusioneret til helium og dermed stjernens alder.

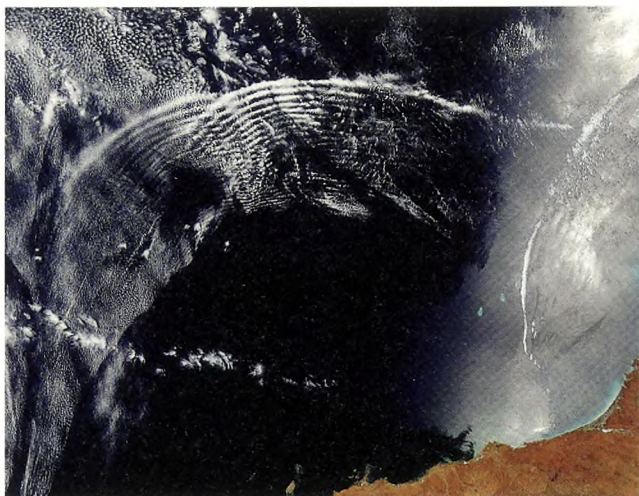
Kepler har givet os observationer af sollignende svingninger i hundredevis af stjerner i eller lige efter den centrale brintfusionsfase. Et specielt interessant udvalg af stjerner er dem, hvor Keplers observationer samtidig har vist forekomsten af exoplaneter. Her giver de astero-seismisk bestemte masser og radier af stjernerne en tilsvarende nøjagtig bestemmelse af planeternes egenskaber, og specielt er bestemmelsen af stjernernes, og dermed planetsystemernes, aldre meget vigtige for at forstå dannelsen og udviklingen af planetsystemer. Kepler har fundet planetsystemer med aldre omkring 10 milliarder år, dobbelt så gamle som Solen. Det viser, at planetdannelse fandt sted allerede i de tidlige faser af Mælkevejens historie.

Røde kæmpestjerner

De fleste af Keplers målinger skete med en såkaldt kadence på 30 minutter, hvor lysstyrken blev integreret over 30 minutter i hver måling. Et udvalg på 500 stjerner blev observeret med en kadence på et minut, og det er en forudsætning for, at svingninger med periode på nogle få minutter, karakteristisk for Solen og sollignende stjerner, kan observeres. Større stjerner svinger med længere perioder, og specielt har Keplers observationer med 30-minutters kadence givet astero-seismiske data for titusindvis af røde kæmpestjerner. Som for sollignende stjerner giver disse data en bestemmelse af stjernernes masse og radius, og fra modeller kan stjernernes aldre også bestemmes. Disse resultater er meget værdifulde i karakteriseringen af Mælkevejens udviklingshistorie, i hvad der er blevet kaldt galaktisk arkæologi, og dermed et vigtigt bidrag til den generelle forståelse af, hvordan galakser dannes og udvikler sig.

Men de røde kæmpestjerner gemmer på andre hemmeligheder, som er blevet afsløret af Keplers astero-seismiske data. Ud over lydbølger, som dominerer de svingninger, vi ser i Solen og sollignende stjerner, har stjerner indre tyngdebølger. De svarer til bølger på en vandoverflade, men kan forekomme overalt, hvor der er en gradient i massefylden, og de skyldes tyngdekraftens effekt på variationer i massefylden. (Bemærk, at de er et helt andet fænomen end *gravitationsbølger*, som er bølger i selve rummets struktur – se [5].) I Jordens atmosfære kan de undertiden ses afspejlet i skymønstre (se figur 9). I Solen og sollignende stjerner er frekvensen af de tilsvarende stående bølger for lav til, at de har kunnet identificeres. Røde kæmpestjerner har derimod, som nævnt ovenfor, en meget kompakt heliumkerne, og her er den lokale tyngdeacceleration så høj, at frekvensen af tyngdebølgerne bliver sammen-

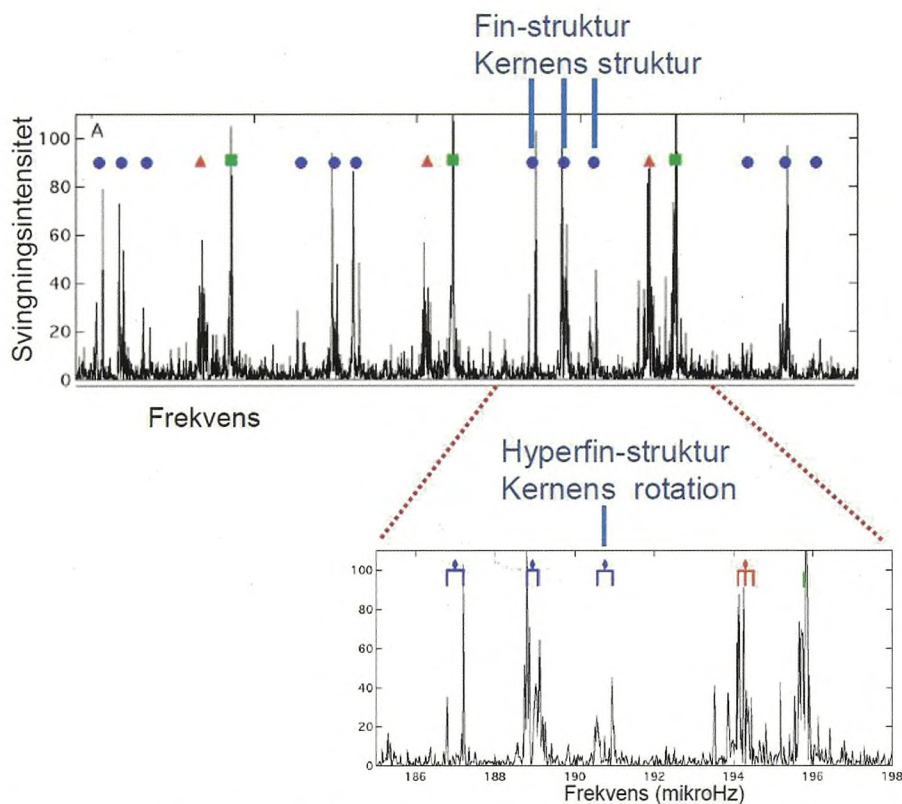
lignelig med frekvensen af de solignende svingninger, exciteret af turbulensen i stjernens ydre lag. Resultatet er, at svingningerne får en blandet karakter, hvor de opfører sig som lydbølger i de ydre dele af stjernen og som tyngdebølger i stjernens centrale område. Det er afspejlet i det observerede frekvensspektrum gennem forekomsten af ekstra toppe (se figur 10), hvis frekvenser direkte afhænger af forholdene i stjernens dybe indre og dermed giver os en enestående mulighed for at undersøge disse områder.



Figur 9. Interne tyngdebølger i Jordens atmosfære, markeret af skybåndene i venstre side af billedet. Billedet er taget af NASAs TERRA-satellit, over det Indiske Ocean, med lidt af Australien i billedets nederste højre hjørne.

Som nævnt i afsnit 1 kan røde kæmpestjerner enten få deres energi fra brintfusion i en skalkilde omkring en passiv heliumkerne eller fra en kombination af skalkilden og heliumfusion i de centrale dele af heliumkernen. Stjerner i disse fysisk set meget forskellige faser kan have overfladeegenskaber, der er meget vanskelige at skelne fra hinanden. Det mest slående resultat af Keplers studier af røde kæmpestjerner er, at observation af frekvenserne af tyngdebølger meget tydeligt adskiller disse to typer af stjerner. Vi kan altså her undersøge, hvad der foregår inde i en meget lille heliumkerne midt i en stjerne, der er 10 gange så stor som Solen! En nærmere analyse af disse data vil give os en meget bedre forståelse af de sene udviklingsstadier af solignende stjerner, inklusive hvad der i fremtiden venter Solen.

Ligesom for Solen kan svingningsfrekvenserne også bruges til at studere den indre rotation af de røde kæmpestjerner; som vist på figur 10 giver rotationen en opsplitning af frekvenserne, som afhænger af rotationshastigheden. Her viser resultaterne, at rotationen langt fra er den samme overalt i stjernerne: heliumkernen roterer typisk mere end ti gange så hurtigt som stjernens overflade. Faktisk ville man ud fra modellerne forvente en endnu hurtigere rotation af kernen. Som nævnt har kernen trukket sig voldsomt sammen under sin egen tyngdekraft i løbet af udviklingen fra et stadium som Solens til det røde kæmpe stadium. Hvis det angulære moment af kernen havde været bevaret, ville sammen-



Figur 10. Udsnit af svingningsspektrum for en rød kæmpestjerne. Som i figur 8 er graden l markeret med grønne kvadrater ($l = 0$), blå cirkler ($l = 1$) og røde trekanter ($l = 2$), men i modsætning til 16 Cygni A er der nu tre toppe med $l = 1$ mellem hvert par af toppe med $l = 0$ og 2. Det afspejler koblingen mellem den akustiske opførsel i de ydre dele af stjernen og de interne tyngdebølger i stjernens centrale dele, hvis egenskaber bestemmer frekvensforskellene mellem toppene med $l = 1$. Frekvenserne går fra ca. 0,160 til 0,210 mHz i det øverste panel. Det nederste panel viser opsplitningen af toppene for $l = 1$ (og i et enkelt tilfælde $l = 2$), der skyldes stjernens rotation.

trækningen have fået kernen til at rotere med perioder på nogle få timer, på samme måde som en skøjteløber roterer hurtigere ved at trække armene ind til siden. Den relativt "langsomme" rotation af kernen viser derfor, at der må være processer, der transporterer angulært moment ud af kernen. Hvordan disse processer fungerer, ved vi stadig ikke.

Fremtiden på Jorden og i rummet

Helio- og asteroseismologi har givet os banebrydende ny viden om Solens og stjerners egenskaber og om de fysiske processer, der ligger bag. Som altid i videnskab har den nye viden rejst nye og mere dybtgående spørgsmål. Vi er slet ikke færdige med at observere Solen og stjernerne og analysere de resulterende data, inklusive meget omfattende data fra Kepler, der her efter missionens afslutning endnu langt fra er udnyttet til bunds. Og nye data er på vej. NASA opsendte i april 2018 satellitten TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). Som for Kepler er formålet at lede efter exoplaneter med passageteknikken, men TESS skal observere felter over det meste af himlen og fokusere på relativt nære og klare stjerner, som parallelt kan observeres i større detalje med andre teknikker. Til gengæld vil de fleste felter kun blive observeret i fire uger, hvilket begrænser omløbstiden for de planeter, der kan studeres. Som Kepler vil TESS også levere glimrende asteroseismiske data, igen med vægt på at karakterisere stjerner, der huser planetsystemer. Aarhus Universitet har en vigtig rolle i både Kepler og TESS gennem at organisere internationale konsortier med ansvar for de asteroseismiske undersøgelser baseret på missionernes data. Samtidig har vi etableret databaser til at sikre adgang til disse data og deling af resultaterne af analysen. En kommende stor mission til exoplanetstudier og asteroseismologi er ESAs PLATO-mission med planlagt opsendelse i 2026, som også har betydelig dansk deltagelse.



Figur 11. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) er et rumobservatorium, der indgår i NASAs Explorers-program, der leder efter exoplaneter ved hjælp af transitmetoden i et område, der er 400 gange større end det område, der blev dækket af Kepler. TESS blev opsendt den 18. april 2018.

Aarhus Universitet leder også SONG-projektet (for Stellar Observations Network Group), der sigter mod at opstille et antal teleskoper med passende fordeling rundt om Jorden for at sikre lange og kontinuerte observationer for asteroseismologi og studier af exoplaneter [6]. Det første teleskop har været i drift på

Tenerife siden 2014. Det er fuldautomatisk og udfører observationerne uden indblanding af en observatør, givet en liste over prioriterede objekter. Sammen med internationale partnere er tilsvarende teleskoper under etablering i Kina og Australien, og det er håbet, gennem involvering af yderligere partnere, også at etablere teleskoper i Sydafrika, Sydamerika og USA. Der er en vigtig komplementaritet mellem de rum- og jordbaserede observationer. Observationer af stjernesvingninger i radialhastighed, som kan udføres med jordbaserede teleskoper, har en væsentlig højere kvalitet end lysstyrkeobservationerne fra Kepler og TESS, men til gengæld kan man kun observere én stjerne ad gangen. Desuden kræver fuld karakterisering af planeter fundet med passageteknikken opfølgende observationer af systemernes radialhastighed og andre egenskaber, som kan gennemføres fx med SONG-teleskoperne.

De seneste 40 år har set en dramatisk udvikling i vores muligheder for at undersøge Solens og stjernernes indre. Helio- og asteroseismologi er nu veludviklede teknikker, som fortsat vil være centrale i vores studier af stjerner og deres betydning for forståelsen af andre astrofysiske fænomener.

Litteratur

- [1] Torben Arentoft, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Hans Kjeldsen, Frank Grundahl, Søren Frandsen, Pierre-Olivier Quirion (2009) "Helio- og astero-seismologi", *Kvant*, bind 20, nr. 2, side 29.
- [2] Michael Quaade (2016) "Nordstjernen – en spændende stjerne", *Kvant*, bind 27, nr. 1, side 20.
- [3] Lars Buchhave (2009) "Exoplaneter og Kepler-missionen", *Kvant*, bind 20, nr. 2, side 3.
- [4] Hans Kjeldsen (2010) "Exoplaneter fundet med Kepler og CoRoT", *Kvant*, bind 21, nr. 3, side 20.
- [5] Jens Olaf Pepke Pedersen og Michael Cramer Andersen (2016) "Tyngdebølger observeret for første gang", *Kvant*, bind 27, nr. 1, side 8.
- [6] Mads Fredslund Andersen, Ole J. Knudsen, Jørgen Christensen-Dalsgaard, Frank Grundahl og Hans Kjeldsen (2016) "Tæt på stjernerne. SONG – robotteleskopet på Tenerife", *Aktuel Naturvidenskab*, december 2016, nr. 6, side 8–13.



Jørgen Christensen-Dalsgaard er professor i astrofysik ved Aarhus Universitet og leder af Danmarks Grundforskningsfonds Center for Stellar Astrofysik. Han er uddannet ved Aarhus Universitet og har en ph.d. fra University of Cambridge. Han har beskæftiget sig med helio- og astero-seismologi i mere end 40 år, i de senere år især på basis af data fra Kepler-satellitten.

Antimaterien, der blev væk

Af Bernhard Lind Schistad, Viborg Tekniske Gymnasium

I starten af Big Bang var der præcis lige så mange partikler som antipartikler. Men i det nuværende univers eksisterer der kun materie bestående af ordinære partikler. Alle antipartiklerne er væk. Hvad der skete med antimaterien i starten af Big Bang i den proces, som vi kalder baryogenesen, er fremdeles et af de største mysterier i fysikken. Vi ved ikke, hvad løsningen er, men vi kan antyde lidt om i hvilken retning, løsningen skal søges.

Antipartikler blev teoretisk forudsagt af den engelske fysiker Paul A. M. Dirac i 1930 [1]. Dirac ville prøve at forene den kvantemekanik, der var formuleret af Schrödinger, Heisenberg og Pauli, med Einsteins specielle relativitetsteori i en ny bølgeligning for elektronen. I klassisk fysik er en partikels energi givet ved formlen

$$E = \frac{1}{2}m \cdot v^2 + E_{pot} \quad (1)$$

Kvantemekanikken var i sin oprindelige version baseret på den klassiske mekanik, og alle løsninger af Schrödinger-ligningen har positiv energi.

Men i relativitetsteorien har en partikel energien

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \quad (2)$$

hvor p er impulsen (egentlig bevægelsesmængden, men herefter kaldes den impulsen).

Når man går fra klassisk fysik til kvantemekanik, erstattes en partikels koordinater for position og impuls med de tilsvarende differential-operatorer. Men kvadratroden af en differential-operator giver ingen mening. Dirac opdagede, at han kunne komme elegant uden om problemet med kvadratroden i udtrykket for energien og samtidig tage højde for elektronens spin, ved at kvadrere ligningen og lade bølgefunktionen for elektronen (som er løsningerne for Dirac-ligningen og beskriver amplituden af sandsynligheden for at finde elektronen i en bestemt tilstand) være matricer med fire komponenter.

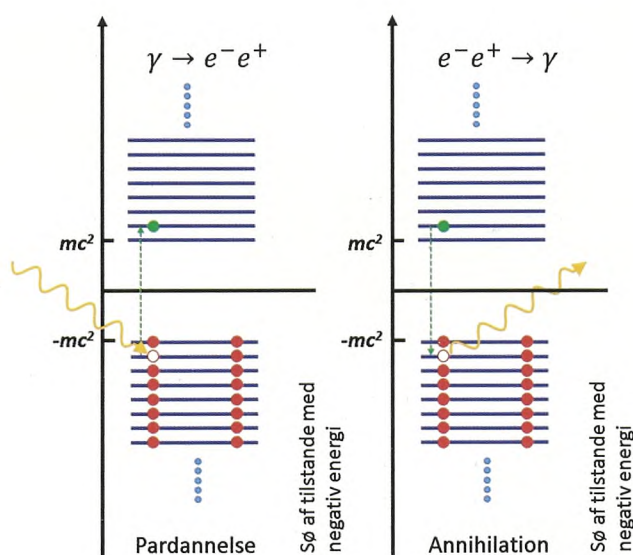
Dette medførte, at Diracs bølgeligning havde fire løsninger for en fri elektron med impuls p :

$$\begin{aligned} \text{Spin op med energi } E &= \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \\ \text{Spin ned med energi } E &= \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \\ \text{Spin op med energi } E &= -\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \\ \text{Spin ned med energi } E &= -\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \end{aligned}$$

Men det betyder, at Diracs ligning har løsninger med negativ energi. Dette giver umiddelbart ingen mening, men Dirac fandt en fortolkning baseret på Paulis udelukkelsesprincip. Elektronen er en fermion, og der kan derfor kun være én elektron i hver tilstand. Dirac fremsatte den hypotese, at "vakuum" er den tilstand, hvor alle negative energitilstande er fyldt op, men der er ingen positive energitilstande. Hvis en elektron med negativ energi absorberer en foton, får den positiv energi og bliver en "rigtig" elektron. Men dette efterlader et hul i søen af negative energitilstande. Dette hul opfører sig som en partikel med positiv ladning, men med

samme masse og spin som en elektron. Dette hul er elektronens antipartikel, positronen.

Hullet kan fyldes ved, at en "rigtig" elektron "falder ned" i søen ved at afgive energidifferencen til den ledige negative energitilstand i form af en foton. Derved annihileres elektronen. Processerne er vist på figur 1.



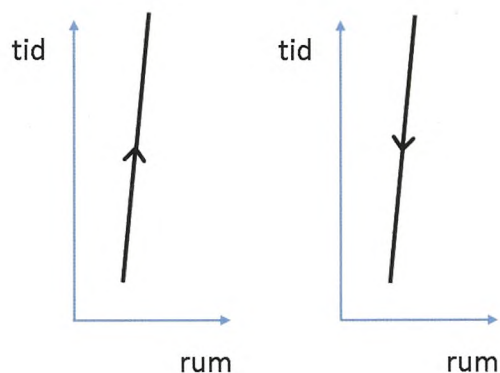
Figur 1. Dirac-søen.

I 1932 blev elektronens antipartikel opdaget i et tågekammer af Carl David Anderson [2]. I 1936 fik han Nobelprisen i fysik for sin opdagelse af positronen. Dirac fik Nobelprisen i 1933 for sit bidrag til kvantemekanikken.

Antipartikler

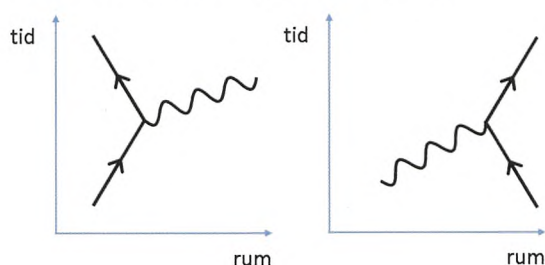
Ligesom elektronen har alle elementarpartikler en antipartikel. I kvantefeltteori beskriver vi antipartikler som partikler, der bevæger sig baglæns i tid og rum. Richard P. Feynman har skabt en meget illustrativ grafisk model til at beskrive vekselvirkning mellem partikler. Vi tegner simple diagrammer, hvor x -aksen repræsenterer rumkoordinaterne, og y -aksen repræsenterer tiden.

En partikel, som bevæger sig uden at vekselvirke, tegnes som en sammenhængende linje med pil opad, og den tilsvarende antipartikel har pil nedad:



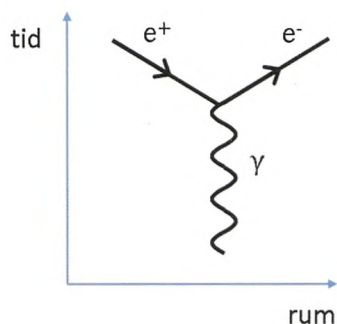
Figur 2. Feynman-diagram for partikel og antipartikel.

Tilsvarende tegner vi en foton som en bølgelinje. Vi kan nu tegne diagrammet for en partikel, som udsender eller absorberer en foton og ændrer bevægelse:



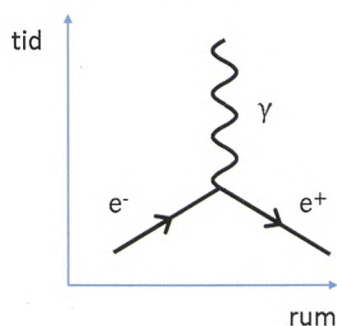
Figur 3. En partikel udsender eller absorberer en foton.

Men vi kan også rotere diagrammet, så vi starter med en foton i bunden. Nu illustrerer diagrammet, at en foton skaber et partikel/antipartikel-par, for eksempel elektron/positron:



Figur 4. Skabelse af partikel/antipartikel-par.

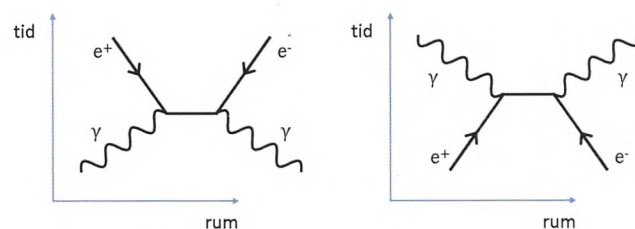
Hvis vi vender dette diagram på hovedet, får vi annihilation af partikel/antipartikel:



Figur 5. Annihilation af partikel/antipartikel-par.

Disse simple diagrammer kan ikke finde sted i denne form i naturen, da de ikke samtidig kan bevare energi

og impuls. De beskriver virtuelle processer. For at alle fysiske love skal være opfyldt, må der være to fotoner. Disse processer er vist i figur 6.



Figur 6. Pardannelse og annihilation af partikel/antipartikelpar i naturen.

Processen, hvor der dannes et partikel/antipartikel-par, er den eneste proces i standardmodellen, hvor der kan dannes stof af fotoner. I denne proces dannes der præcis lige så mange antipartikler som partikler.

Det vil sige, at da der blev dannet stof af stråling i det meget tidlige univers, var der lige så mange antipartikler som partikler.

CPT-symmetri

Indtil slutningen af 1950'erne var fysikerne enige om, at universet ikke kender forskel på højre og venstre. Men man opdagede, at den svage vekselvirkning har en meget mærkelig egenskab, som strider mod al sund fornuft:

Kun venstrehåndede partikler (og højrehåndede antipartikler) kan deltage i den svage vekselvirkning!

Årsagen til, at spejlsymmetrien ikke gælder, er, at neutrinoerne altid er venstrehåndede, mens antineutrinoer er højrehåndede. Spejlbilledet af en neutrino eksisterer derfor ikke i naturen.

Matematisk ytrer det sig ved, at paritetssymmetri ikke gælder i denne vekselvirkning. En partikels paritet angiver, om bølgefunktionen Ψ (som beskriver amplituden for at finde partiklen i en bestemt tilstand) skifter fortegn, når den spejles omkring origo (alle rumkoordinater skifter fortegn). Lige paritet angiver, at fortegnet ikke skifter

$$\Psi(x, y, z) = \Psi(-x - y - z)$$

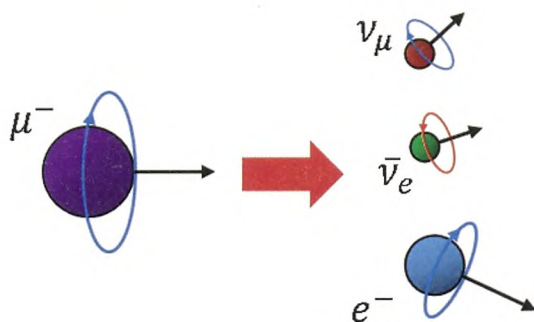
og ulige paritet angiver, at det skifter

$$\Psi(x, y, z) = -\Psi(-x - y - z).$$

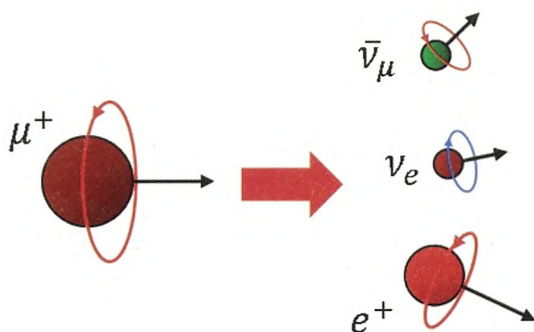
Da bruddet på paritetssymmetri blev opdaget, gik man ud fra, at hvis man kombinerer paritets-transformationen med ladningskonjugation, det vil sige, at man skifter alle partikler om til de tilsvarende antipartikler, har man en gyldig symmetri.

Et eksempel på en sådan transformation har vi i myonhenfald. En myon henfalder til en elektron, en myon-neutrino og en elektron-antineutrino. Denne proces er kun mulig for en venstrehåndet myon, som vist på figur 7.

Spejlbilledet af denne proces er umulig i naturen. Men hvis vi udfører en CP-transformation, det vil sige, at vi spejlvender billedet og skifter alle partikler til antipartikler og omvendt, får vi en mulig proces, nemlig antimyonhenfald (figur 8).



Figur 7. Myonhenfald.



Figur 8. Antimyonhenfald.

Hvis alle processer i naturen opfylder CP-symmetri eksakt, skal alle antipartikler have samme levetid som deres tilsvarende partikler. Men i 1964 opdagede James Cronin og Val Fitch ved Brookhaven-laboratoriet, at den neutrale K^0 -meson kan forvandle sig til sin egen antipartikel, $\bar{K}^0$ [3]. Dette skyldes, at K^0 består af en s -kvark og en anti- d -kvark, mens $\bar{K}^0$ består af en anti- s -kvark og en d -kvark. Disse kvark/antikvark-par kan forvandle sig til hinanden ved hjælp af den svage vekselvirkning. Men, denne forvandling sker ikke med samme hyppighed i begge retninger. Det vil sige, at der er forskel på levetiden på partikler og de tilsvarende antipartikler, og CP-symmetrien er brudt. Cronin og Fitch fik Nobelprisen i fysik i 1980 for denne opdagelse.

Senere er der fundet flere andre eksempler på, at partikel og antipartikel har forskellig levetid.

Vi må derfor konkludere, at CP-symmetrien ikke altid er overholdt i naturen.

Hvis vi også omvender tiden, det vil sige, at vi "kører filmen baglæns", løser vi problemet med hyppigheden, da reaktionen nu også kører baglæns. Vi kan derfor konkludere, at vi også må omvende tiden for at få en eksakt symmetri.

CPT, det vil sige ladningskonjugation (bytte om på partikler/antipartikler) + paritetstransformation (spejlvende processen) + tidsomvendning (køre filmen baglæns) er en eksakt symmetri i naturen. Det vil sige, at hvis en proces er mulig, vil CPT-transformationen også være mulig i naturen.

Baryoner og leptoner

Alt stof i universet (med undtagelse af mørkt stof, hvis natur vi ikke kender) er opbygget af protoner, neutroner og elektroner. Protoner og neutroner består af tre kvarker. Partikler, som består af tre kvarker, kaldes baryoner.

Der findes mange andre baryoner med højere masse end protonen (for eksempel Σ , Ξ , Λ , Δ , Ω osv.). De består alle af tre kvarker fra standardmodellens tre familier. Der findes også de tilsvarende antipartikler, som består af tre antikvarker. For at holde rede på de mulige partikelreaktioner har fysikerne givet baryonerne et kvantetal, som kaldes baryontallet B . Alle baryoner har $B=1$, mens antibaryonerne har $B=-1$. Tilsvarende har alle kvarker $B=1/3$, og antikvarkerne har $B=-1/3$.

I alle partikelreaktioner i standardmodellen er baryontallet bevaret. Tilsvarende er elektronen og dens tunge brødre myonen og tau-leptonen fundamentale partikler i standardmodellen. Sammen med neutrinoerne kaldes de leptoner og har også et tilknyttet kvantetal kaldet leptontallet L . Alle leptoner (også neutrinoerne) har leptontal $L=1$, og antileptonerne har $L=-1$.

Ligesom baryontallet er leptontallet altid bevaret i standardmodellen.

Lad os betragte et par eksempler. Når en elektron annihilerer med en positron, dannes der to fotoner (én foton ville ikke kunne bevare både energi og impuls, se også figur 6 th.):

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma \quad (3)$$

Leptontallet i starttilstanden er $L=1-1=0$.

Leptontallet i slutttilstanden er også $L=0$, da fotoner ikke har leptontal.

Vi ser nu på en proces, som involverer både leptoner og baryoner, nemlig neutronhenfald:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad (4)$$

Leptontallet i starttilstanden er $L=0$ (neutronen er en baryon). Leptontallet i slutttilstanden er $L=1-1=0$ (elektronen har $L=1$ og antineutrinoen har $L=-1$).

Baryontallet i både begyndelsestilstand og slutttilstand er $B=1$ (både neutronen og protonen er baryoner).

Ligesom partikel/antipartikel-par kan annihilere til fotoner, kan den modsatte proces danne elektron/positron-par eller kvark/antikvark-par fra fotoner:

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (5)$$

eller

$$\gamma + \gamma \rightarrow q + \bar{q} \quad (6)$$

I alle processer med pardannelse vil der gælde, at $B=0$ og $L=0$, da fotoner hverken er baryoner eller leptoner.

Da alle processer ifølge standardmodellen bevarer baryontal og leptontal, skulle vi naivt forestille os, at universet har $B=L=0$, hvis det er startet med lys, det vil sige fotoner. Der burde derfor være præcis lige så mange antipartikler som partikler i universet.

Hvor er antimaterien?

I det nuværende univers er der ca. $6,7 \cdot 10^{-10}$ baryoner for hver foton [4]. Af disse baryoner er mindre end én ud af 10.000 en antibaryon. Hvad er der sket med antimaterien?

Vi ved, at solsystemet udelukkende består af normal materie, ellers ville vi se voldsom stråling fra annihilationer. Tilsvarende ved vi, at der kun er normal materie

i Mælkevejens stjerner. Vi rammes af mange alfapartikler i kosmisk stråling, men vi har aldrig nogensinde observeret en anti-alfapartikel (man leder bl.a. efter anti-atomkerner med eksperimentet Alpha Magnetic Spectrometer ombord på ISS). Det lille antal antiprotoner, vi observerer, skyldes højenergetiske partikler, som kolliderer med normal materie. Når vi observerer forholdet mellem mængden af brint, deuterium, helium og litium i universet, finder vi en forekomst, som er fuldstændig i overensstemmelse med, at hovedparten af de lette grundstoffer, der findes, blev dannet under nukleosyntesen i Big Bang, da universet var nogle sekunder gammelt [5]. Tilstedeværelse af antimaterie på dette tidspunkt ville have forrykket balancen mellem baryoner og fotoner.

Faktisk findes den bedste indikation, vi har på manglen på antimaterie, i den kosmiske mikrobølgestråling. Her observerer vi en fuldstændig perfekt sortlegemestråling med en temperatur på 2,7 K. Hvis der fandtes antimaterie, ville vi se mange fotoner med en energi svarende til elektron/positron- og proton/antiproton-annihilation (rødforskudt til mikrobølgeområdet lige som resten af baggrundsstrålingen).

Den eneste mulighed for, at der er lige så mange antibaryoner som baryoner, er, at de ved en eller anden mærkelig proces skulle være flyttet ud af det observerbare univers. Men vi kan ikke forestille os nogen fysisk proces, som kan være ansvarlig for dette.

Baryogenesen

Vi vil nu prøve at forstå lidt mere af, hvad der skete, da materien (elementarpartiklerne) blev dannet. Vi regner med, at det begyndte umiddelbart efter det, vi i kosmologien kalder den elektrosvage faseovergang. Før denne faseovergang havde elementarpartiklerne ingen masse, og fotoner og vektorbosoner var kvanter i det samme elektrosvage felt. Men da temperaturen var faldet ned til et niveau, hvor fotonenergien var lig med Higgs-massen, skete der et symmetribrud, hvor elektromagnetismen og den svage vekselvirkning blev to separate kræfter, vektorbosonerne (W^+ , W^- og Z^0) og elementarpartiklerne fik masse ved at vekselvirke med Higgs-feltet. Dette skete ved en temperatur på 10^{15} K (svarende til Higgs-massen på 125 GeV).

Efter den elektrosvage faseovergang kan vi med stor succes bruge termodynamikken og kvantemekanikken til at beskrive universets udvikling. Universet udvidede sig, og temperaturen faldt ligesom i en gas, der udvider sig. Som vi har set, vil fotoner kunne skabe par af partikler og antipartikler. Så længe fotonenergien er større end masseenergien, vil der være termisk ligevægt mellem materie og fotoner, da processen kan gå begge veje. Når fotonenergien falder under masseenergien, kan processen kun gå én vej, og partikel/antipartikel-par vil annihilere.

Så længe temperaturen var over 10^{13} K, havde kvarkerne endnu ikke dannet protoner og neutroner, og der var ca. lige så mange kvark/antikvark-par som fotoner i termisk ligevægt. Men da baryontallet (en tredjedel af antal kvarker minus antal antikvarker) er bevaret, må der på en eller anden måde være dannet et overskud af

kvarker (svarende til ca. tre kvarker pr. 10^9 fotoner).

Hvis dette ikke var sket, ville der være lige så mange protoner som antiprotoner i universet, og forholdet mellem protoner n_p og fotoner n_γ ville være det samme som forholdet mellem antiprotoner $n_{\bar{p}}$ og fotoner. Dette forhold kan beregnes ud fra statistiske fluktuationer på grund af vakuumpolarisation, hvor fotonerne skaber virtuelle proton-antiproton-par. [6]:

$$\frac{n_p}{n_\gamma} = \frac{n_{\bar{p}}}{n_\gamma} \cong 10^{-18} \quad (7)$$

Dette er 8 størrelsesordner mindre end det observerede forhold mellem protoner og fotoner. Det viser helt klart, at der må være sket "noget" med antipartiklerne, så de ikke nåede at annihilere med partiklerne. Da universet er elektrisk neutralt, må noget tilsvarende være sket med leptonerne, da der er lige så mange elektroner som protoner i universet.

Vi kan også se, at det er nok, hvis der var et overskud på 3 kvarker per milliard kvark/antikvark-par, inden temperaturen faldt under tærsklen for at danne nye par.

Hvis dette "noget" ikke var sket, ville universet være tomt bortset fra den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, og vi ville ikke være her.

Den proces, som førte til, at antimaterien forsvandt, og at vores univers domineres af baryoner (og leptoner), kaldes baryogenesen. Vi har ingen god teori for, hvad der skete, men vi skal prøve at skitsere lidt om, hvad vi ved.

Sakharovs kriterier

I 1967 offentliggjorde den russiske brintbombs fader (og senere vinder af Nobels fredspris), Andrej Sakharov, tre kriterier [7], som skal være opfyldt for, at de manglende antipartikler skal kunne forklares. De tre Sakharov-kriterier er:

1. Der er nødt til at findes en proces, som bryder med bevarelse af baryontallet B . Hvis en sådan proces ikke findes, vil vi ikke kunne have nogen asymmetri, og universet ville bestå af fotoner fra annihilationen af partikel/antipartikel-par.

2. Der må være brud på både C- og CP-symmetri. Hvis dette ikke var tilfældet, ville der ikke kunne dannes overvægt af partikler. Hvis der ikke var brud på C-symmetri, gælder samme love for antipartikler som for partikler og den proces, der producerer ekstra baryoner, vil også producere ekstra antibaryoner. Tilsvarende, hvis CP-symmetrien ikke var brudt, ville der gælde de samme love for produktion af venstrehåndede baryoner som for højrehåndede antibaryoner. Processen ville ikke give overskud af baryoner, kun asymmetri mellem venstrehåndede og højrehåndede baryoner og antibaryoner.

3. På det tidspunkt, da bruddet på symmetrien skete, må universet have været ude af termisk ligevægt. Hvis der var ligevægt, ville processen, der bryder bevarelse af baryontallet, løbe lige hurtigt begge veje, og baryontallet ville fluktuere omkring nul. Hvis temperaturen derimod falder meget hurtigt, vil det kunne favorisere den ene retning, hvis sandsynligheden afhænger af temperaturen.

Vi har ingen færdig teori, som kan opfylde Sakharovs tre kriterier og forklare forholdet mellem antal fotoner og antal baryoner i det nuværende univers. Vi har dog en ide om, i hvilken retning vi skal lede efter denne teori. Vi vil i det følgende gennemgå et par af disse ideer.

Protonhenfald

Den simpleste forklaring på manglen på antibaryoner ville være, at de er ustabile og henfaldt i starten af Big Bang, inden nukleosyntesen (dannelsen af de første atomkerner) startede efter ca. et sekund. Da kvarker ikke har nogen kendte partikler at henfalde til, hvis elektrisk ladning skal bevares, må det være protoner og neutroner, som henfalder.

Desværre kan vi (på grund af CPT-symmetri) ikke lave en teori, hvor baryoner er stabile, mens antibaryoner henfalder; vi kan kun lave forskel på levetiden ved at bryde CP-symmetri.

Hvis antiprotoner er ustabile, må også protoner kunne henfalde. Vi kan prøve at spekulere over, hvorledes denne proces ville se ud. Vi ved, at energi, impuls, ladning og spin må være bevaret. De eneste kendte elementarpartikler med ladning, der har mindre masse end protonen, er elektronen og myonen. De har også samme spin som protonen. Men vi kan ikke lave en proton om til en positron og samtidig bevare både energi, spin og impuls. Der må derfor være to fotoner i sluttetilstanden. De simplest mulige reaktioner vil derfor være:

$$p^+ \rightarrow e^+ \gamma + \gamma \quad (8)$$

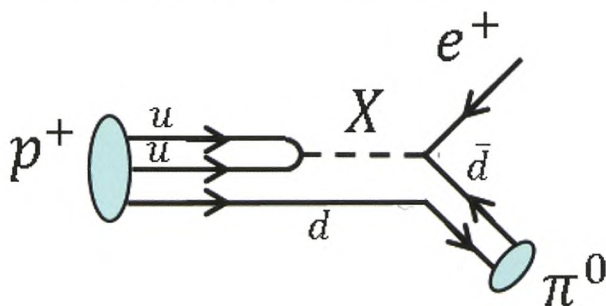
$$p^+ \rightarrow \mu^+ \gamma + \gamma \quad (9)$$

Disse reaktioner er ikke mulige i standardmodellen, men der findes en udvidelse af den, som kaldes GUT (Grand Unified Theory) [8], som forener den elektrosvage teori med kvantekromodynamikken ved høje energier. I GUT findes der to meget tunge X - og Y -bosoner med elektrisk ladning $+4/3 e$ og $+1/3 e$ (hvor e er elementarladningen).

I GUT-teorien kan protonen henfalde til en elektron via den neutrale π^0 -meson efter reaktionen:

$$p^+ \rightarrow X + q_d \rightarrow e^+ + \pi^0 \rightarrow e^+ + \gamma + \gamma \quad (10)$$

Det tilsvarende Feynman-diagram er:



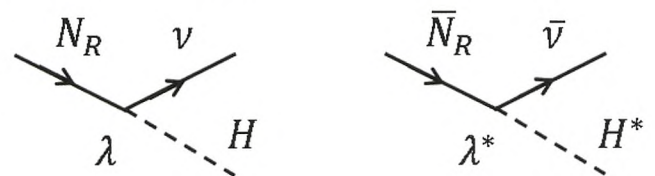
Figur 9. Protonhenfald.

X -bosonen skulle have en masse på ca. 10^{15} GeV. Dette ville give protonen en levetid på mere end 10^{35} år, da levetiden er proportional med kvadratet af den inverse masse af X . På grund af brud på CT-symmetri

vil antiprotonen have en kortere levetid, og asymmetrien kan være opstået i det meget tidlige univers, da antiprotonens kinetiske energi var meget tættere på X -massen, og levetiden derfor var meget kortere.

Der er lavet en lang række forsøg på at påvise protonhenfald efter denne proces. I princippet fylder man en gammel mine med vand og installerer fotondetektorer, som kan se de to fotoner. Men alle forsøg har været resultatløse, og det ser ud til, at protonen er stabil. Videre har teorien et problem med den høje masse af X -bosonen. Hvis den skulle være produceret under Big Bang, måtte det være sket, mens temperaturen var over 10^{19} K, hvilket var før inflationsfasen var overstået. Et overskud af baryoner ville derfor blive fortyndet med 50 størrelsesordener af inflationen, og universets baryontal ville blive alt for lille.

De fleste fysikere afviser derfor GUT-teorien på grund af bosonernes urealistisk høje masser og manglen på observation af protonhenfald.



Figur 10. Henfald af Majorana-neutrinoer. N_R er en tung, højrehåndet neutrino, $\bar{N}_R$ den tilsvarende antineutrino, H og H^* er Higgs-partikler, λ og λ^* er koblingskonstanterne.

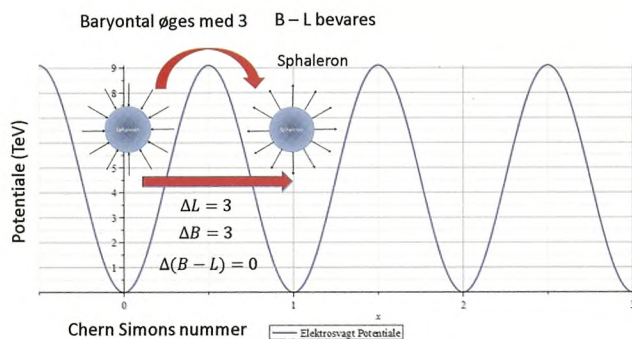
Elektrosvag leptogenesis

Der findes en bagdør i standardmodellen, hvor vi kan lave om på baryontallet ved at bryde konservering af leptontallet og skabe overskud af leptoner eller antileptoner. Denne proces kaldes leptogenesis. Processen er interessant, da den også hjælper med at forklare, at neutrinoerne har en lille masse. I standardmodellen findes der kun venstrehåndede neutrinoer. I leptogenesis-modellen antager man, at der også findes højrehåndede neutrinoer, men de er sterile og kan ikke mærke den elektrosvage vekselvirkning. Til gengæld er disse partikler Majorana-partikler, det vil sige, at de er deres egne antipartikler. Det viser sig, at hvis de højrehåndede neutrinoer er ekstremt tunge, medfører dette, at de venstrehåndede er ekstremt lette. Dette kaldes "vippe-mekanismen" (seesaw mechanism) og forklarer, hvorfor de normale neutrinoer er så meget lettere end alle andre elementarpartikler. Masse opstår ved, at elementarpartiklerne vekselvirker med Higgs-feltet. Når en neutrino absorberer en Higgs-boson, skifter den mellem højre- og venstrehåndet. Men da massen af den højrehåndede neutrino er ekstremt høj, sker dette meget sjældent. Men dengang, da universets fotonenergi var af samme størrelsesorden som massen af den tunge, højrehåndede neutrino, oscillerede neutrinoerne kontinuerligt. I leptogenesis-modellen kan den tunge neutrino henfalde til en normal, venstrehåndet neutrino ved at udsende en Higgs-boson. Neutrinoen har leptontal $L=1$. Men da den tunge neutrino er sin egen antipartikel, kan den også henfalde til en antineutrino og en Higgs-boson. Antineutrinoen har leptontal $L=-1$ (se figur 10). Hvis der er brud på CP-symmetri, vil

koblingskonstanterne λ og λ^* for de to processer være forskellige, og de vil have forskellig sandsynlighed (for at henfalde). Dette vil kunne skabe et overskud af antileptoner.

Her er N_R den tunge neutrino, λ er koblingskonstanten og H er Higgs-bosonen. Ved hjælp af denne proces kan vi bryde bevarelsen af leptontallet, hvis den højrehåndede neutrino er en Majorana-partikel (fermioner, som er deres egen antipartikel, kaldes Majorana-partikler). Men vi mangler at veksle et lepton-overskud til et baryon-overskud. Det viser sig, imidlertid, at baryontal og leptontal ikke behøver at være bevaret hver for sig i standardmodellen. Derimod er difference $B - L$ altid bevaret. Der findes en lidt kendt proces i standardmodellen, som kan konvertere leptoner til baryoner. Denne proces, som kaldes en elektrosvag sphaleron (græsk for glat eller fedtet) blev opdaget (teoretisk) i 1984 [9].

Baggrunden for, at det kan lade sig gøre at ændre baryontal og leptontal, er, at vakuumtilstanden i det elektrosvage felt er degenereret. Det vil sige, at der eksisterer uendelig mange vakuumtilstande med potentiel energi lig nul, men med forskellig baryontal og leptontal, dog således, at $B - L$ altid er bevaret. Men de enkelte vakuumtilstande er adskilt af en potentialbarriere, som er ugennemtrængelig i det nuværende univers. Men i det tidlige, meget varme univers, var det muligt, at baryoner og leptoner kunne smutte over potentialbarrieren ved at danne en sphaleron, som er en ustabil løsning af Winberg-Salams feltligninger for den elektrosvage vekselvirkning, i form af en lille "klump" feltenergi med en udstrækning på ca. 10^{-2} fm (figur 11).



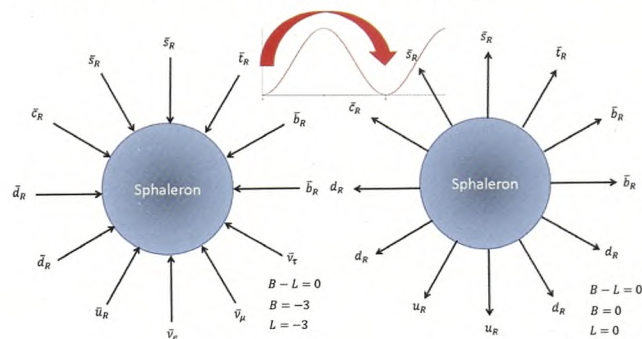
Figur 11. Overgang mellem vakuumtilstande.

En sådan sphaleron kan ikke beskrives ved hjælp af Feynman-diagrammer og kan ikke beregnes ved at addere amplituder. Men det er en klassisk løsning af feltligningerne. For eksempel kan tre antileptoner og seks antikvarer danne en sphaleron, som, hvis den smutter over til næste vakuumtilstand, vil henfalde til tre kvarker og seks antikvarer. Processen er vist på figur 12.

På denne måde kan vi trylle tre antileptoner som for eksempel antineutrinoer og tre antikvarer om til seks kvarker og øge leptontal og baryontal med tre [10].

Denne proces vil kun kunne løbe, når universets temperatur svarer til højden af potentialbarrieren, det vil sige ca. $7 \cdot 10^{16}$ K. Dette skete, da universet var $3 \cdot 10^{-14}$

sekunder gammelt, det vil sige efter inflationsfasen og lige inden den elektrosvage faseovergang.



Figur 12. Forvandling af antileptoner til baryoner.

Vi skal være opmærksomme på, at sphaleron-processen kører begge veje, med samme sandsynlighed. Den vil ikke i sig selv kunne bryde bevarelse af baryontallet ud over statistiske fluktuationer. Men ved et overskud af antileptoner, vil den favorisere baryoner. Vi skal også huske på, at ved termisk ligevægt vil det overskud af baryoner, vi har skabt, blive udvasket igen. Men her hjælper Sakharovs 3. kriterium os. Hvis temperaturen falder meget hurtig, vil det være sværere at komme tilbage over potentialbarrieren, fordi energiforskellen er større efter første overgang.

Vi kan opsummere processen:

1. De tunge, "højrehåndede" (Majorana-)neutrinoer bliver til normale, "venstrehåndede" neutrinoer ved at vekselvirke med Higgs-feltet.

2. Fordi de højrehåndede neutrinoer er deres egen antipartikel, kan de også blive antineutrinoer, men på grund af brud på CP-symmetri (Sakharovs 2. kriterium) har denne proces større hyppighed, og der dannes overskud af antineutrinoer.

3. Antineutrinoer og antikvarer danner sphaleroner, som smutter over i nabo-vakuumtilstanden, hvorved baryontallet øges med tre (Sakharovs 1. kriterium).

4. På grund af termisk uligevægt er temperaturen faldet, inden processen når at køre tilbage, og der dannes overskud af kvarker og leptoner (Sakharovs 3. kriterium).

Der er foreslået flere varianter af denne mekanisme. Nogle af dem involverer Supersymmetri, som er en foreslået udvidelse af standardmodellen, men hidtil er alle forudsigelser fra denne teori blevet afkræftet af data fra LHC-acceleratoren, og tiden er ved at løbe ud for Supersymmetri.

Konklusion

I det meget varme univers, hvor fotonenergien var højere end masseenergien i partikel/antipartikel-par, var der ligevægt mellem fotoner, leptoner og baryoner. Da temperaturen faldt under masseenergien, blev der ikke skabt flere nye partikler, og partikler annihilerede med antipartikler til fotoner.

Hvis dette var hele sandheden, ville universet være fyldt med fotoner, og stof ville ikke eksistere. Den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, som er fotonerne strækket til mikrobølger på grund af rødforskydning forårsaget af universets udvidelse, ville være universets eneste indhold. Men inden partikler og antipartikler

annihilerede, må der have været en lille overvægt af kvarker på ca. 3 ud af en milliard kvark/antikvark-par. Denne overvægt har ikke kunnet annihilere, da de mangler en antikvark, og har derfor kunnet danne de protoner og neutroner, som universet består af i dag, ca. et sekund efter Big Bang. Der er i dag ca. $6,7 \cdot 10^{-10}$ nukleoner for hver foton.

Standardmodellen giver ingen forklaring på, hvad der skabte denne overvægt, men vi ved, at den har sammenhæng med brud på nogle af naturens dybeste symmetrier som højre/venstre, +/- ladning og tidens pil. Måske ligger nøglen til gåden i neutrinoernes mærkelige egenskaber. I standardmodellen findes der kun masseløse venstrehåndede neutrinoer, men mange observationer har vist, at neutrinoernes egenskaber går langt ud over standardmodellen, og måske ligger nøglen til gåden om antimaterien hos højrehåndede neutrinoer.

Litteratur

- [1] P. Dirac (1930) "A Theory of Electrons and Protons", *Proceedings of the Royal Society A*, bind **126**, nr. 801, side 360–365.
- [2] C. D. Anderson (1933) "The Positive Electron", *Physical Review*, bind **43**, nr. 6, side 491–494.
- [3] J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch og R. Turlay (1964) "Evidence for the 2π Decay of the K^0_2 -Meson System", *Physical Review Letters*, bind **13**, nr. 4, side 138.
- [4] Andrew Liddle (2015) "An Introduction to Modern Cosmology", John Wiley & Sons, side 79–80.

- [5] Steven Weinberg (2008) "Cosmology", Oxford University Press, side 163–173.
- [6] Hannu Kurki-Suonio, "Thermal history of the Early Universe", Lecture notes University of Helsinki, <http://www.courses.physics.helsinki.fi/teor/-cosmology/Cosm4.pdf>
- [7] A. D. Sakharov (1967) "Violation of CP Invariance, C Asymmetry, and Baryon Asymmetry of the Universe", *Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz.*, bind **5**, side 32–35.
- [8] H. Georgi og S. L. Glashow (1974) "Unity of All Elementary Particle Forces", *Physical Review Letters*, bind **32**, nr. 8, side 438–41.
- [9] F. R. Klinkhamer, og N. S. Manton (1984) "A saddle-point solution in the Weinberg-Salam theory", *Phys. Rev. D.*, **30**, nr. 10, 2212–2220.
- [10] M. Fukugita og T. Yanagida (2003) "Physics of Neutrinos and Application to Astrophysics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, side 487–500.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste fem år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

KVANT-nyheder

Af Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

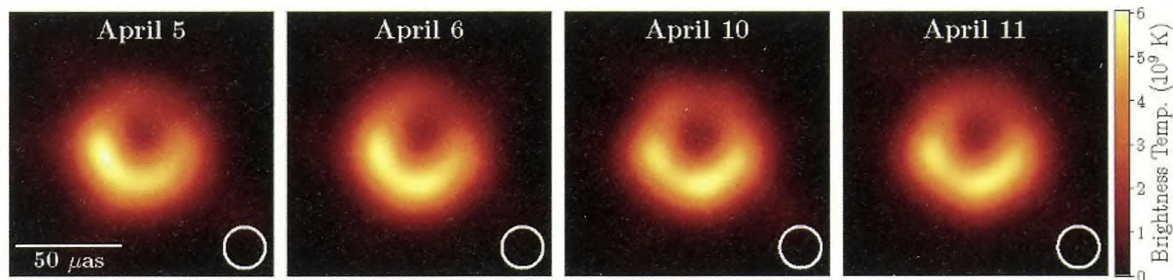
Netværk af teleskoper tager det første billede af et sort hul

ASTROFYSIK. Det er måske de færreste, også ikke-fysikere, der ikke har set billedet af det sorte hul, som Event Horizon Telescope (EHT) præsenterede i april. Nu viser vi det alligevel i KVANT, så vi er sikre på, at alle vores læsere får set det. Billedet viser et supermassivt sort hul, som ligger i midten af galaksen M87, der befinder sig 55 millioner lysår fra Jorden. Billedet er taget af EHT, som består af 8 teleskoper, der er fordelt ud over Jorden. Billedet af det sorte hul er en imponerende bedrift og bekræfter, ligesom målingen af tyngdebølger i 2015 gjorde, igen Einsteins generelle relativitetsteori, der her forudsiger den runde form af det sorte huls skygge.

Et sort hul er et meget lille og tæt objekt med en enormt høj massefylde, hvor tyngdekraften er så stærk, at selv ikke lys kan undslippe, når det kommer

inden for en vis afstand af det sorte hul. Denne afstand kaldes begivenhedshorisonten og afhænger af det sorte huls masse. Uden for begivenhedshorisonten kan lys og partikler med høje hastigheder godt undslippe. Begivenhedshorisonten er netop den afstand, hvor undvigelseshastigheden er lig lysets hastighed. Det sorte hul er en singularitet i rumtiden, da det er en enorm mængde masse på et uendeligt lille punkt i rumtiden. Ifølge Einsteins generelle relativitetsteori vil det sorte huls tyngdefelt afbøje lys omkring det sorte hul og forme en ring rundt om det. Stof og lys i nærheden af det sorte hul vil kredse omkring det, og friktionen vil opvarme det så meget, at det stråler. Denne lysende ring, som består af gas og plasma, laver en skygge af det sorte hul.

Det stof og lys, der bevæger sig imod os, er mere intenst end det, der bevæger sig væk. Det ses nederst i ringen, hvor intensiteten af stråling er højere end øverst. Fra billedet kunne forskerne se, at det sorte hul i M87



Figur 1. EHT's billeder af det sorte hul i M87 fra fire forskellige observationsnætter. Den hvide ring viser EHT's opløsning.

roterer med uret. Forskerne bestemte desuden, at det sorte hul i M87 er 6,5 milliarder gange Solens masse og 40 milliarder km i diameter, hvilket er større end Neptuns bane omkring Solen.

At tage billedet af et sort hul er en meget kompliceret teknisk opgave. Strålingen fra gassen omkring det sorte hul, som har højest intensitet, er radiobølger med bølglængder på omkring 1 mm. At observere radiobølgerne fra det sorte hul kræver faktisk et teleskop på størrelse med Jorden, hvilket selvfølgelig ikke er en mulighed. Et eksempel, der illustrerer denne svære opgave, er, at den opløsning, som er nødvendig for at tage et billede af det sorte hul i M87 fra Jorden af, svarer til at sidde på en cafe i Paris og læse en tekst på en telefon i New York.

For at løse denne udfordring kombinerede forskerne 8 forskellige teleskoper placeret i et netværk over hele Jorden til at simulere et stort teleskop. Når Jorden roterer, ændrer teleskopernes position sig og flere punkter på overfladen dækkes af målinger, og vi kan se flere dele af billedet. Jordteleskopet virker ligesom et stort, krumt spejl, som reflekterer det indkomne lys fra alle vinkler (teleskoper) ind i dets fokuspunkt, hvor billedet dannes. Det virtuelle teleskop virker kun, hvis de individuelle teleskoper er stabile og synkroniserede, hvilket forskerne opnåede ved at bruge atomure. Denne teknik, hvor flere små teleskoper kombineres for at få et stort teleskop med meget høj opløsning, kaldes Very Long Baseline Interferometry (VLBI).

Hvert teleskop indsamlede i øvrigt omkring 1 PB (10^{15} byte) data. Data fra alle 8 teleskoper blev samlet på harddiske og sendt med fly til to supercomputere (det var hurtigere at bruge fly end at sende dataet elektronisk), som korrigerede tidsforskellene i data og lavede billedet med en avanceret algoritme, der bl.a. bruger billedegenkendelsesteknikker.

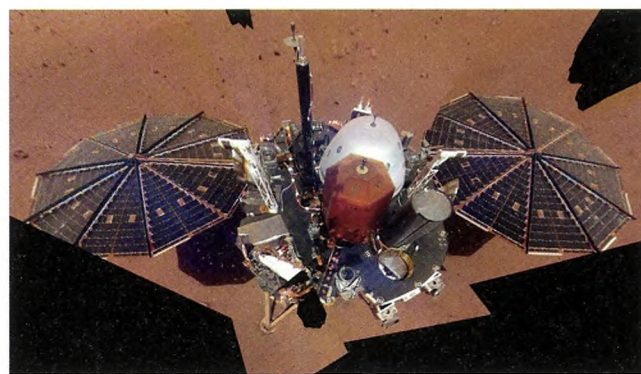
Kilde: <https://eventhorizontelescope.org>

Marsskælv

GEOFYSIK. En anden nyhed, som de færreste nok har hørt om, er, at der er blevet detekteret et muligt "Marsskælv", altså et jordskælv på Mars. Det er NASAs InSight rumfartøj, som undersøger Mars, blandt andet med det formål at detektere Marsskælv, der med sit seismometer SEIS for første gang har detekteret et muligt skælv. Det er den første rystelse, som menes at komme inde fra planeten, som SEIS har detekteret, da SEIS indtil nu kun har målt udefrakommende støj som fx vind.

Jordskælv fremkommer ved bevægelser af Jordens tektoniske plader, men på Mars er der ingen tektoniske

plader. Her fremkommer skælvne ved sammentrækninger af planeten, der opbygger stress, som udløses i skælv. Marsskælvets størrelse og varighed passer med de Måneskælv, der blev detekteret under Apollo-missionerne på Månen for 50 år siden, hvilket er en af grundene til, at forskerne formoder, at rystelsen var et Marsskælv.



Figur 2. InSight-landeren, som registrerede et Marsskælv.

InSight skal undersøge Marsskælv for at lære om Mars' opbygning; da forskellige materialer kan reflektere og ændre hastigheden af de seismiske bølger, kan man ved at analysere, hvordan bølgerne bevæger sig gennem skorpe, kappe og kerne finde ud af, hvor dybe hvert lag er, og hvad de består af. På den måde fortæller Marsskælvne om strukturen under overfladen. Forskerne håber bedre at kunne forstå, hvordan Mars blev formet.

Da Mars seismisk set er meget stille, kan SEIS måle selv små rystelser, der fx på Jorden ville forsvinde i den store mængde af seismisk støj fra vind, havene og jordskælv. SEIS har dog flere isolerende barrierer til at beskytte den mod det ekstreme vejr og de store temperaturforskelle, der er på Mars. InSight har også en varmesonde med, som skal måle varmestrømmen i Mars' undergrund. Sonden skal gå 3–5 m ned i undergrunden, hvilket er dybere end nogen anden Mars-mission har været. InSight har desuden en robotarm, som i sin tid placerede SEIS på Mars 1,636 m foran sig, som netop er robotarmens længde. Robotarmen har også taget en selfie af InSight, som ses på billedet.

På NASAs hjemmeside kan man høre Marsskælv og optagelser af Marsvind samt af InSights robotarm i bevægelse. Det er tydeligt at høre, at Marsskælv er anderledes og adskiller sig fra de to andre optagelser.

Kilde: nasa.gov

Standardmodellen for partikelfysik og ikke-kommutativ geometri

Af Jesper Møller Grimstrup

Ikke-kommutativ geometri er et moderne forskningsfelt, der kombinerer avanceret matematik med partikelfysik. I denne artikel ser vi på en ny formulering af standardmodellen for partikelfysik, hvor det ved hjælp af ikke-kommutativ geometri er muligt at se standardmodellen som en integreret del af en ren gravitationel teori. Dette rejser en lang række spørgsmål og peger muligvis i retningen af en teori for kvantegravitation.

Den moderne, teoretiske højenergifysik kan grundlæggende set betragtes som et puslespil bestående af tre brikker: *kvantemekanikken*, *Einsteins almene relativitetsteori* og *standardmodellen for partikelfysik*. Målet er at få de tre brikker til at passe sammen, så vi kan se, hvad det er for et billede, puslespillet skjuler.

De to første brikker, kvantemekanikken og almen relativitetsteori, blev som bekendt opdaget i begyndelsen af det tyvende århundrede, og i dag, 100 år senere, er problemet med at finde en teori, der forener de to, stadig uløst. De metoder, som vi normalt anvender, når vi vil opgradere en klassisk teori til en kvanteteori, løber ind i problemer, når vi forsøger at anvende dem på tyngdekraften. Efter mange årtiers forskning ved vi stadig ikke, hvordan man skal formulere en kvanteteori for tyngdekraften. Så de to første brikker passer ikke sammen.

Den tredje brik, standardmodellen for partikelfysik, beskriver det dybeste lag af virkeligheden, som det indtil nu er lykkedes os at nå eksperimentelt. Standardmodellen er en matematisk teori, der beskriver de elektrosvage og -stærke kernekrafters vekselvirkning med elementarpartikler såsom kvarker og leptoner samt den såkaldte Higgs-mekanisme, der giver partiklerne deres masse.

Standardmodellen, der er en kvantefeltteori, har en matematisk struktur, der på den ene side ser næsten tilfældig ud – den indeholder en række matematiske detaljer, der tilsyneladende lige så godt kunne have været valgt anderledes – men når man ser nærmere efter, opdager man, at dens struktur tilsyneladende er alt andet end tilfældig. Standardmodellen ligner et spørgsmål, der har et svar. Så den tredje brik i vores puslespil ser altså mystisk ud.

Det vil sige, at vi i dag står med to grundlæggende spørgsmål, som vi gerne vil have svar på:

1. Findes der en kvanteteori for tyngdekraften?
2. Hvorfor ser standardmodellen ud, som den gør?

Afstanden mellem to punkter

Den franske matematiker og Fields-medaljemodtager Alain Connes har i samarbejde med fysikeren Ali Chamseddine udviklet en ny tilgang til, hvordan de tre fundamentale brikker i moderne, teoretisk fysik skal lægges, og den tilgang har fået navnet *ikke-kommutativ geometri* [1-3].

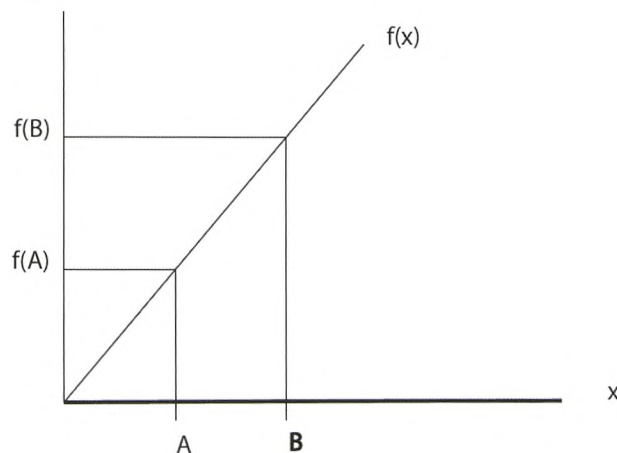
Ikke-kommutativ geometri handler, som navnet rø-

ber, om geometri. Så lad os begynde med at se på almindelig geometri, eller det, vi kalder riemannsk geometri, hvilket er den matematiske begrebsramme, som Einsteins relativitetsteori er formuleret indenfor.

Grundlæggende set handler geometri om afstanden mellem punkter i et rum, så lad os begynde med et rum og se på dets geometri. Normalt formulerer vi et rums geometri med det, man kalder en *metrik*, hvilket er et felt, der til hvert punkt i rummet tilordner en række tal, der fortæller os noget om geometrien i det punkt.

Tænk på en lige linje. Når vi vil måle afstanden mellem to punkter A og B på linjen, tager vi en lineal frem og placerer den på linjen og aflæser afstanden. Linealen er her det ækvivalente til en metrik. Metrikken er så at sige en generaliseret lineal, som vi bruger, når rummet er mere kompliceret og har en ikke-triviel geometri.

Einsteins almene relativitetsteori, der grundlæggende set handler om, at rum og tid har en ikke-triviel geometri, der er givet ved materien i rummet, er netop formuleret ved hjælp af et metrisk felt. Einsteins feltligninger fortæller os, hvordan krumningen af det metriske felt hænger sammen med energien og impulsen af stoffet i rummet.



Figur 1. Afstanden mellem punkterne A og B er identisk med afstanden mellem $f(A)$ og $f(B)$, hvis funktionen f har hældning præcis lig 1. Denne noget trivielle observation er startpunktet for ikke-kommutativ geometri, der udvider Gelfand-Naimarks dualitet mellem kompakte Hausdorff-rum og kommutative C^* -algebraer til en dualitet mellem spektrale tripler og spin-geometrier.

Men lad os vende tilbage til vores to punkter A og B på den lige linje. Jeg vil nu gerne foreslå en anden måde

at måle afstanden mellem dem på. Det, som jeg gerne vil gøre, er i stedet at vælge en funktion på den lige linje og så aflæse funktionens værdier i de to punkter og trække dem fra hinanden. Idéen er, at det skal give os en afstand mellem de to punkter på den lige linje.

For at det skal give mening, må vi naturligvis indskrænke vores valg af en funktion. Hvis vi for eksempel vælger en funktion, der har en gradient eller hældning, der er præcist lig en overalt på linjen, så er det klart, at når vi trækker funktionens værdier i punkterne A og B fra hinanden, vil det give os den korrekte afstand mellem de to punkter (se figur 1).

Ikke-kommutativ geometri

Lad os nu prøve at generalisere denne anden metode til at måle afstande på til et generelt rum med en mere kompliceret geometri. Det kan for eksempel være et tredimensionalt rum. Så vi følger proceduren fra før og vælger en funktion på dette rum. For at vi kan bruge funktionen til at give os en afstand, har vi brug for en metode til at sikre os, at vores funktion har, hvad der svarer til en gradient, der er lig en¹. Måden at gøre det på er at introducere en såkaldt *Dirac-operator*, hvilket er en matematisk størrelse, der giver os gradienten af funktioner på vores rum. Dirac-operatoren er kendt fra Dirac-ligningen, som beskriver fermioner.

Vi ser altså, at når vi generaliserer den anden metode til at måle afstande på, ender vi med et setup, hvor vi har funktioner på rummet kombineret med en Dirac-operator, der giver os gradienter af funktioner. Disse to komponenter har imidlertid brug for en tredje komponent, hvilket er et såkaldt Hilbert-rum, der groft sagt er et sted, hvor vi kan evaluere forskellen på forskellige funktioner. Hilbert-rummet er så at sige det sted, hvor funktionerne og Dirac-operatorerne "lever". Til slut arrangerer vi vores funktioner i det, man kalder en algebra, hvilket er et elementært, matematisk setup, der involverer addition og multiplikation.

For at opsummere: ved at generalisere den anden metode til at måle afstande på, får vi en samling af tre komponenter: 1) en algebra med funktioner på vores rum, 2) en Dirac-operator og 3) et Hilbert-rum. Dette er, hvad man kalder et *spektralt triple*.

Nu kan man imidlertid løfte denne anden metode op på et mere abstrakt niveau. Det vil sige, at vi kan *glemme alt om selve rummet* og bare betragte det spektrale triple som et abstrakt objekt, der opfylder et sæt matematiske regler eller aksiomer. Så vi har altså en abstrakt algebra, der vekselvirker med en abstrakt Dirac-operator, og hvor det hele lever i et Hilbert-rum.

I 2008 beviste Alain Connes, at dette setup er *ækvivalent* til det første setup, hvor vi har et metrisk felt. Det såkaldte rekonstruktionsteorem siger, at det ikke gør nogen forskel, hvilket setup, vi vælger, da de begge to svarer til den samme geometriske struktur.

Det er vigtigt her at lægge mærke til, at når vi arbejder med Connes' geometriske formalisme, så er selve rummet – *altså punkterne* – en sekundær størrelse. Det kan udledes af algebraen via et teorem bevist af Gelfand og Naimark i 1943 [4]. Samtidigt er afstanden mellem

punkterne kodet ind i vores Dirac-operator. Så Dirac-operatoren – den størrelse, der giver os gradienten – svarer her til metrikken i den riemannske geometri.

Læg også mærke til, at sproget, som benyttes her – operatoren og Hilbert-rum – er det samme matematiske sprog, som vi kender fra kvantemekanikken. Det betyder imidlertid ikke, at Connes' spektrale tripler er kvantemekaniske; det her handler om geometri og er i sit udgangspunkt klassisk.

Så disse to metoder til at formulere en geometri på er altså ækvivalente. Men der er en meget vigtig forskel på de to formalismer, og den forskel er, hvad der gør det her dybt interessant.

Nøglen til at forstå, hvor de to metoder er forskellige, er algebraen med funktionerne. Jeg har allerede nævnt, at en algebra er en samling elementer, som man kan addere og multiplicere. Tal danner for eksempel en algebra, og det samme gør funktioner på et rum. Man kan addere og multiplicere to tal for at få et tredje tal, og man kan addere og multiplicere to funktioner for at få en tredje funktion. Og læg mærke til, at det ingen forskel gør, i hvilken rækkefølge man gør dette. To gange tre er det samme som tre gange to; vi siger, at tal *kommuterer*.

Nu viser det sig imidlertid, at de matematiske regler – aksiomerne – som et spektralt triple skal opfylde for at give os en geometri, ikke afhænger af, om algebraen af funktioner er kommutativ. Aksiomerne kan uden videre generaliseres til også at gælde for algebraer, der *ikke* kommuterer. Altså algebraer, hvor det faktisk betyder noget, i hvilken rækkefølge man multiplicerer dets elementer. Det kalder man *ikke-kommutative algebraer*.

Og nu er vi endelig nået frem til det, man kalder ikke-kommutativ geometri. En ikke-kommutativ geometri er simpelthen givet ved et spektralt triple, der involverer en ikke-kommutativ algebra.

Vi kender selvfølgelig til ikke-kommutative algebraer fra kvantemekanikken, hvor for eksempel positions- og impulsoperatorerne ikke kommuterer, hvilket fører os til Heisenbergs usikkerhedsrelation. Og vi ser nu, at en formalisme, der for kommutative algebraer er ækvivalent til riemannsk geometri, har en helt naturlig generalisation, der involverer den type algebraer.

Og det er her, at vores fortællinger for alvor bliver interessante. Pointen er, at denne generalisering åbner en dør til en helt ny verden af eksotiske, geometriske rum. Og det viser sig – meget overraskende – at standardmodellen for partikelfysik koblet til Einsteins relativitetsteori giver os et eksempel på netop sådan en geometri.

En næsten-kommutativ geometri

For at få en bedre forståelse af, hvordan standardmodellen passer ind i formalismen med spektrale tripler, starter vi med at betragte et meget simpelt eksempel på en ikke-kommutativ algebra, nemlig en algebra givet ved rotationer i et tredimensionalt rum. Vi kan rotere rundt om de tre akser, og vi kan kombinere to rotationer til en tredje, hvilket vil sige, at vi kan multiplicere dem. Denne multiplikation er ikke-kommutativ, det betyder

¹Den præcise betydning af dette er givet ved Connes' såkaldte afstandsformel.

noget i hvilken rækkefølge, vi udfører rotationerne, og derfor vil den algebra, som vi bygger ud fra sådanne rotationer, være ikke-kommutativ. Det giver os det, man kalder en matrix-algebra.

Nu kan man kombinere en matrix-algebra med den algebra, som jeg allerede har talt om, nemlig algebraen af funktioner på et rum, og når vi gør det, får vi det, man kalder en *næsten-kommutativ* algebra.

En næsten-kommutativ algebra er meget tæt på det algebraiske setup, som svarer til Einsteins almene relativitetsteori, altså et setup baseret udelukkende på funktionerne på rummet. Det eneste, vi har gjort, er at lægge en smule ikke-kommutativitet til i form af en matrix-algebra.

Og det er denne type algebra, der fører os til standardmodellen for partikelfysik. Hvis vi vælger den rigtige type matrix-algebra og drejer på alle de matematiske håndtag i maskineriet for ikke-kommutativ geometri, så er det, der kommer ud i den anden ende, netop standardmodellen koblet til almen relativitetsteori.

Med Connes' matematiske maskineri har vi altså fået en fuldstændig ny måde at forstå standardmodellen på. Ting, der i den gamle formulering så tilfældige ud, giver pludselig perfekt mening. Det bedste eksempel er Higgs-mekanismen, som i den almindelige formulering af standardmodellen er et element, som vi ved, skal være der, men som fra et matematisk synspunkt ser mærkeligt ud. I Connes' formulering er Higgs-mekanismen en integreret del af den sektor, der indeholder de tre fundamentale kræfter (de elektromagnetiske, de svage og de stærke kernekrafter). Higgs-sektoren er simpelthen en nødvendighed i Connes' formulering.

Hvad betyder det her?

Der er en række vigtige detaljer, som man kunne skrive om her. Der er nogle vigtige forbehold – for eksempel det faktum, at Connes' formulering først rigtig fungerer i det euclidiske setup, altså når tidsretningen er *kompleks* – og andre vigtige teknikaliteter. Men selvom alle disse detaljer er vigtige, ja essentielle, så tror jeg, at det er bedst i første omgang at lade dem ligge og i stedet se på det store billede. Hvad fortæller Connes' arbejde os, og i hvilken retning peger det?

Der er to pointer, som jeg gerne vil fremhæve:

1. Den ikke-kommutative formulering af standardmodellen er en ren *gravitationel* formulering. Standardmodellen plus almen relativitetsteori er her kombineret til en enkel gravitationel teori over et underligt, abstrakt rum. Dette er efter min vurdering dybt interessant.

2. Det faktum, at dette er muligt, er ikke trivielt. Ikke alle modeller passer ind i maskineriet for ikke-kommutativ geometri, hvilket betyder, at standardmodellen er *speciel*. Hvis den havde set anderledes ud, ville Connes' formulering ikke fungere [5].

Dette rejser to centrale spørgsmål:

1. Hvor stammer den næsten-kommutative struktur fra? Hvorfor netop den struktur? Hvad ligger der bag netop dette matematiske valg? Efter min mening er dette et af de mest interessante spørgsmål i moderne, teoretisk fysik.

2. Hvilken rolle spiller kvantefeltteori i alt dette?

Det andet spørgsmål kræver en forklaring. Standardmodellen for partikelfysik er som nævnt en kvantefeltteori. Men Connes' formulering af standardmodellen fanger kun den *klassiske* del af modellen. Den ikke-kommutative formulering involverer *ikke* kvanteaspektet [1].

Det er ikke svært at forstå, hvorfor det nødvendigvis må være sådan. Da den ikke-kommutative formulering af standardmodellen essentielt er en gravitationel formulering, så ville den, hvis den skulle involvere kvantiserede felter, også involvere en eller anden form for kvantegravitation. Og det er noget, som vi ikke ved, hvordan man gør. Så det, Chamseddine og Connes i stedet gør, er at anvende kvantiseringsproceduren i et sekundært skridt og kun på selve standardmodellen – ikke til gravitation.

Dette er tydeligvis ikke tilfredsstillende. Hvis denne elegante formulering skal være fundamental, så må den nødvendigvis involvere kvanteteorien som et primært element og ikke som en mere eller mindre tilfældig tilføjelse. Derfor mit spørgsmål: Hvilken rolle spiller kvanteteorien i den ikke-kommutative formulering af standardmodellen?

Det er en besynderlig situation. På den ene hånd har vi den gamle formulering, hvor standardmodellen er en kvanteteori, og hvor gravitation er en separat størrelse, og på den anden hånd har vi den nye formulering, hvor standardmodellen og gravitation på et klassisk niveau er forenede, men hvor kvanteaspektet mangler. Hvad betyder alt det her? Det er der ingen, der ved. Connes' arbejde har rodet brikkerne i vores puslespil rundt og sat dem sammen på en ny måde. Men det er stadigvæk ikke klart, hvad det er for et billede, puslespillet skjuler.

Lad mig afslutte med at give læseren mit eget synspunkt. Jeg tror, at Chamseddines og Connes' formulering er et vejskilt. Jeg tror, at det peger os i retningen af en mere fundamental teori, og jeg tror, at vores opgave er at læse dette vejskilt meget grundigt.

Det minder om Maxwells ligninger, der som bekendt har to ækvivalente formuleringer: én formulering med elektriske og magnetiske felter og én med et såkaldt gauge-felt. De to formuleringer er ækvivalente, men når man anvender formuleringen med gauge-feltet ser man, at Maxwells ligninger peger frem mod Einsteins specielle relativitetsteori og mod de såkaldte ikke-abelske gauge-teorier, som vi i dag ved, beskriver de svage og stærke kernekrafter (og faktisk også almen relativitetsteori). Så når man har ækvivalente formuleringer, kan det ske, at en af dem tydeligst peger i retningen af mere fundamentale teorier.

Efter min mening peger Connes' arbejde os i retningen af en teori for kvantegravitation, der skal gøre to ting: for det første skal den involvere maskineriet fra ikke-kommutativ geometri og for det andet skal den producere den matrix-algebra, som vi havde brug for for at nå frem til standardmodellen, i en klassisk grænse. Et korollar til det synspunkt er, at kvantefeltteorien, som vi kender den, må være en lavenergigrænse af en kvanteteori for gravitation.

Det var sådanne overvejelser, der oprindeligt motiverede matematikeren Johannes Aastrup og mig selv til

at begynde vores arbejde på vores egen tilgang til en teori for kvantegravitation. I vores arbejde har vi foreslået et setup, der essentielt er rent geometrisk – altså gravitationelt – men som involverer en mulighed for at opnå en næsten-kommutativ geometri i en klassisk grænse. Vores idé er, at når man betragter matematikken, der beskriver, hvordan objekter flyttes rundt i et tredimensionalt rum, så lander man automatisk i et setup, der kombinerer Connes' matematiske formalisme med en central ingrediens fra en teori for kvantegravitation. Det vil sige, at hvis man baserer en fundamental teori på en algebra, der indeholder information om, hvordan ting flyttes rundt i et rum – altså egenskaber ved selve rummet – så har man muligvis noget, der både giver os en ny ansatz til en teori for kvantegravitation og samtidigt involverer en mulig forbindelse til standardmodellen for partikelfysik. Alt dette kan man læse mere om i min bog *“Shell Beach – jagten på den endelige teori”* [6], der netop nu udkommer på forlaget Montagne, og hvor jeg også fortæller om mine oplevelser i maskinrummet af den moderne teoretiske og matematiske fysik.

Litteratur

- [1] Alain Connes (1996) “Gravity coupled with matter and foundation of noncommutative geometry”, *Commun.Math.Phys.*, bind **182**, side 15–176.
- [2] Alain Connes og Matilde Marcolli (2006) “A Walk in the noncommutative garden”, *Archive: math/0601054*.

- [3] Thomas Schucker (2005) “Forces from Connes’ geometry”, *Lect.Notes Phys.*, bind **659**, side 285–350.
- [4] I. M. Gelfand og M. A. Naimark (1943) “On the imbedding of normed rings into the ring of operators on a Hilbert space”, *Math. Sbornik.*, bind **12**, nr. 2), side 197–217.
- [5] Bruno Iochum, Thomas Schucker og Christoph Stephan (2004) “On a classification of irreducible almost commutative geometries”, *J.Math.Phys.*, bind **45**, side 5003–5041.
- [6] Jesper Møller Grimstrup (2019) “Shell Beach – jagten på den endelige teori”, Forlaget Montagne.
- [7] Ryszard Nest (2010) “Ikke-kommutativ geometri”, *Kvant*, bind **21**, nr. 4, side 24–26.
- [8] Alain Connes (2013) “On the spectral characterization of manifolds”, *J.Noncommut.Geom.*, bind **7**, side 1–82.



Jesper Møller Grimstrup forsvarede sin ph.d.-titel ved Wiens Tekniske Universitet i 2002 og har i en årrække været ansat blandt andet ved Niels Bohr Institutet og NORDITA i København. Han er en aktiv forsker inden for forskningsfelter såsom ikke-kommutativ geometri og kvantegravitation. I dag arbejder Jesper Grimstrup som freelance forsker og forfatter. Se mere på hjemmesiden www.jespergrimstrup.org.

Temperaturen og den nye kelvin

Finn Berg Rasmussen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og KVANT

Fra 13. til 16. november 2018 har Generalkonferencen for Mål og Vægt holdt sit 26. møde. Her godkendtes nye definitioner af fire af SI-systemets grundenheder, kilogram, ampère, kelvin og mol. De sidste forberedelser til denne ændring har stået på siden 2011, hvor den 24. Generalkonference formulerede krav til målenøjagtighed og reproducerbarhed som forudsætning for nye definitioner.

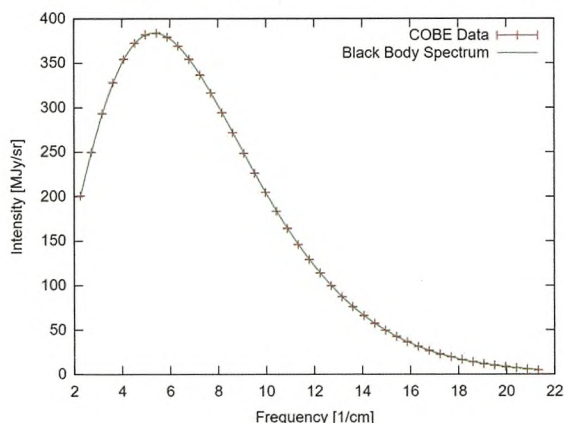
De nye definitioner

Hver af de oprindelige internationale enheder var baseret på en størrelse af samme slags: Enheden for masse – et kilogramlod – var selv en masse, enheden for længde var en meterstok, altså en længde, enheden for temperatur blev fastlagt ved et temperaturinterval osv. Med udviklingen af stadigt stigende nøjagtighed og pålidelighed af målemetoder er det blevet muligt at måle og reproducere værdier af nogle af naturkonstanterne mere præcist, end de relevante måleenheder kan realiseres. Når dette indtræffer, bliver det rimeligt at opdatere enhedernes definition. I de officielle papirer fra BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) understreges det, at dette års nye definitioner kun har betydning i tilfælde, hvor der kræves helt ekstrem nøjagtighed. I almindelig målepraksis vil man ikke mærke noget til ændringerne.

Sekundet blev i 1968 defineret gennem en nøje specificeret overgangsfrekvens i atomer af cæsium-133. Meteren har siden 1983 været defineret som den afstand, lyset tilbagelægger i en vis tid, det vil sige, at lyshastigheden er blevet tildelt en bestemt værdi. De nye definitioner af yderligere fire af de syv grundenheder går videre ad denne vej, idet fire relevante naturkonstanter defineres med hver sin bestemte værdi. Det siger sig selv, at disse værdier er de nøjagtigste, man indtil nu har kunnet bestemme og reproducere mellem forskellige standardlaboratorier [1] og ved forskellige metoder på grundlag af de eksisterende enheder.

Mens man let kan forestille sig et særligt fint kilogramlod som international masseenhed, er det betydeligt sværere at se, at det nu kan erstattes af en defineret værdi af Plancks konstant (i kombination med meteren og sekundet). Det eksperimentelle grundlag

er tidligere beskrevet i KVANT [2]. En ampère bliver nu defineret gennem elektronens ladning, hvilket til gengæld er langt mere pædagogisk – man kan lige se for sig strømmen af elektroner gennem en ledning fremfor de mere u håndgribelige virkninger af et magnetfelt. Det samme kan siges om definitionen af mol: nu tildeles Avogadros tal en bestemt værdi, og dét er antallet af atomer, molekyler eller andet i et mol. For temperatur tager man konsekvensen af, at den, som påpeget af Feynman [3], dybest set er et mål for en (gennemsnits)energi, og definerer enheden kelvin ved hjælp af omsætningsfaktoren mellem energi og temperatur, Boltzmanns konstant. Om man under denne nye filosofi kan finde temperaturen, er emnet for denne artikel.



Figur 1. Baggrundsstrålingen fra universet ligner en perfekt sortlegemestråling fra et legeme med $T = 2,72548 \pm 0,00057$ K [4].

Plancks strålingslov

Danmarks første kvindelige fysiker Kirstine Meyer beskæftigede sig [5] indgående med de tidlige forestillinger om varmt og koldt. Begyndelsen til vores temperaturbegreb sås først omkring år 1600, hvor Galilei benyttede et instrument, som vi ville kalde et luft- eller gastermometer. Efter min mening må oldtidens smede imidlertid have været i stand til at bruge varmestråling for at vurdere, hvornår deres glødende jern har været passende varmt. Det har de kunnet gøre, fordi farven på udstrålingen afhænger af jernets temperatur: rødglødende jern er meget varmt – hvidglødende endnu varmere.

En genstand ved temperaturen T udsender en elektromagnetisk stråling, hvis intensitet $I(\nu)$ afhænger af frekvensen ν , som beskrevet i *Plancks strålingslov*:

$$I(\nu) = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}. \quad (1)$$

Her betyder c lyshastigheden, h Plancks konstant og k Boltzmanns konstant.

Strengt taget skal genstanden kunne betragtes som et absolut sort legeme, dvs. et legeme, der absorberer al stråling (alle bølgelængder), der rammer det. Det er ren matematik at regne ud, at funktionen $I(\nu)$ har maksimum, når den dimensionsløse størrelse $z = h\nu/(kT)$ har en vis værdi z_0 (≈ 2.82). Hvis den tilsvarende frekvens er ν_0 , er temperaturen

$$T = \frac{h\nu_0}{kz_0}. \quad (2)$$

Heraf ses, at spektret flytter til højere frekvens, når temperaturen stiger.

Langt større nøjagtighed opnås, hvis man kan måle hele spektret og tilpasse Planck-funktionen i ligning (1) med temperaturen som tilpasningsparameter. Det mest spektakulære eksempel på dette er baggrundsstrålingen fra universet, der ligner en perfekt sortlegemestråling fra et legeme med $T = 2,72548 \pm 0,00057$ K [4]. Strålingen ligger i øvrigt i mikrobølgeområdet, idet frekvensen ν_0 ved maksimum er ca. 160 GHz.

I praksis er der mange tilfælde, hvor det er en stor fordel, undertiden eneste udvej, at bruge Planck-strålingen til temperaturmåling. Instrumenter til dette brug, pyrometre, findes i forskellige varianter, blandt andre mange håndholdte. De første pyrometre indeholdt en glødetråd, hvis temperatur kunne reguleres med en elektrisk strøm, indtil farven passede med det undersøgte objekt. Blandt moderne pyrometre har nogle en varmefølsom sensor, som opfanger hele spektret. Andre har frekvensselektive sensorer eller filtre. Teoretisk kan den samlede intensitet I (den samlede varmestråling) i spektret findes ved en rigtig lærebogsberegning, hvis resultat er

$$I = \int_0^\infty I(\nu) d\nu = \sigma T^4, \quad (3)$$

hvor σ er en konstant, Stefan-Boltzmann-konstanten:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}. \quad (4)$$

Varmestrålingen har således en meget stærk temperaturafhængighed.

Som nævnt forudsætter de foregående ligninger, at strålingen kommer fra et "absolut sort legeme". Man taler også om "hulrumsstråling". Den sidste betegnelse skyldes, at ligning (1) er udledt ved at analysere mulighederne for stående elektromagnetiske bølger i et lukket hulrum. Jo kortere bølgelængde, der betragtes, jo flere bølgemuligheder vil der være, og en klassisk-fysisk beregning ville medføre, at energitætheden blev uendeligt stor ("ultravioletkatastrofen"). Korte bølgelængder betyder høje frekvenser og dermed høje fotonenergier $h\nu$. Sandsynligheden for høje energier ved en given temperatur aftager imidlertid kraftigt med voksende energi (se Boltzmann-faktoren ligning (5) nedenfor), hvorfor man når til en endelig energitæthed. Fotonstrømmen ud af en lille åbning fra hulrummet ud til det fri vil afspejle frekvensfordelingen inde i hulrummet.

Udstrålingen fra virkelige genstandes overflader vil opvise mindre eller større afvigelser fra Planck-fordelingen [6]. For det meste reflekterer blankpolerede metaloverflader som bekendt omtrent alle bølgelængder i det synlige område. Når kobber er rødt, skyldes det absorption af højere fotonenergier end svarende til rødt. Planternes blade er grønne, fordi klorofyl absorberer kraftigt i rødt og i blå og svagere midt i spektret. Det forhindrer ikke, at udstrålingen fra en given genstand er temperaturafhængig. Hvis der kræves stor nøjagtighed, må man derfor ved brug af et pyrometer være opmærksom på, hvilket spektrum instrumentet er kalibreret ved.

Paramagnetisme. Boltzmann-faktoren

Ved behandling af systemer, der består af mange partikler, må man anvende statistisk fysik. Strålingsloven var den første anvendelse på et kvantesystem.

Lad os se på et simpelt system bestående af et stort antal ens partikler, som hver især kun har to kvantetilstande med energierne ϵ_1 og ϵ_2 . Det kan være en samling elektroner i et magnetfelt, hvor elektronernes spin kun kan pege enten "op" eller "ned". Elektronens magnetiske moment vil så forårsage en energiforskel $\epsilon_2 - \epsilon_1$ mellem de to spinretninger. Energiforskellen kan måles i et resonansforsøg, hvor elektronerne absorberer elektromagnetiske kvanter $h\nu$. Den enkelte partikels magnetiske moment μ kan fås af energiforskellen ved division med magnetfeltet. Ved enhver endelig temperatur vil antallet N_1 af spin i det nederste niveau være større end antallet N_2 i det øverste. Forskellen giver anledning til et samlet magnetisk moment (en magnetisering), hvis absolutte størrelse kan findes ud fra resonansspektret eller ved susceptibilitetsmålinger. Med kendskab til $N_1 - N_2$ og til det samlede antal $N = N_1 + N_2$ kan antallene N_1 og N_2 beregnes hver for sig. Forholdet imellem dem er ifølge den statistiske fysik bestemt ved *Boltzmann-faktoren*, som indeholder temperaturen:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{kT}\right). \quad (5)$$

Temperaturen kan herefter beregnes af ligning (5), men metoden har sine begrænsninger. For det første er de involverede energier så små, at Boltzmann-faktoren er meget tæt på 1, undtagen ved millikelvintemperaturer (eller for atomkernespin, mikrokelvintemperaturer). For det andet gælder det simple billede kun, hvis partiklernes momenter ikke påvirker hinanden. Spinsystemet kan have en ordnet tilstand, fx ferromagnetisk, ved lav temperatur, og når man nærmer sig denne, kan ligning (5) ikke længere bruges. For det tredje er det altid vanskeligt at måle absolutte størrelser.

Klassisk termodynamik

Noget af det første, man møder i traditionel varmelære, er tilstandsligningen for en såkaldt ideal gas:

$$pV = nRT, \quad (6)$$

hvor p er gassens tryk, V rumfanget og n stofmængden (med enheden mol). Gaskonstanten R er defineret i det nye SI, idet den er produktet af Avogadros konstant N_A og Boltzmanns konstant k , $R = N_A k$. Man skal altså blot måle tryk og rumfang af en vis mængde gas for at kunne beregne temperaturen. Det ser ganske let ud, og ligningen er anvendelig over et stort temperaturområde.

Men hvordan kan man vide, om gassen kan betragtes som ideal under de anvendte betingelser? Man kunne måle isotermer og prøve, om pV er konstant (der findes mange temperaturfølsomme detektorer, der i hvert fald kan bruges til at *genkende* en temperatur). Herudover kommer vanskeligheden ved at måle rumfang og stofmængde med tilstrækkelig nøjagtighed. I det eksisterende SI er temperaturen af rent vands

triplepunkt defineret med 5 betydende cifre (273,16 K eksakt), og den nye SI-kelvin (k med 7 betydende cifre) er kun relevant, hvis man kan gøre det bedre.

Boks 1: Grundenhederne i det nye SI

(Uddrag af forslag til resolution A ved CGPM's 26. møde 13.-16. november 2018. Oversat fra den engelske tekst).

CGPM har på sit 26. møde besluttet, at fra den 20. maj 2019 er Det Internationale Enhedssystem, SI, det enhedssystem, hvor:

- frekvensen svarende til hyperfinopsplittningen af den uperturberede grundtilstand i atomer af cæsium-133 $\Delta\nu_{Cs}$ er 9.192.631.770 hertz (eksakt),
- lyshastigheden i vakuum c er 299.792.458 meter per sekund (eksakt),
- Plancks konstant h er $6,62607015 \times 10^{-34}$ joule sekund (eksakt),
- elementarladningen e er $1,602176634 \times 10^{-19}$ coulomb (eksakt),
- Boltzmanns konstant k er $1,380649 \times 10^{-23}$ joule per kelvin (eksakt),
- Avogadros konstant N_A er $6,02214076 \times 10^{23}$ reciprokke mol (eksakt),
- lysstyrken K_{cd} af monokromatisk stråling ved frekvensen 540×10^{12} Hz er 683 lumen per watt (eksakt),

hvor

hertz, joule, coulomb, lumen og watt, med de respektive symboler Hz, J, C, lm og W, er relateret til enhederne sekund, meter, kilogram, ampère, kelvin, mol og candela, med de respektive symboler s, m, kg, A, K, mol og cd, ved ligningerne $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$, $\text{C} = \text{s A}$, $\text{lm} = \text{cd m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd sr}$, og $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$.

Ligningen (6) siger, at for et konstant rumfang er gassens tryk proportionalt med temperaturen. Det har gjort dette *lufttermometer* til et vigtigt instrument under termometriens udvikling gennem flere århundreder. Den første tanke om et absolut temperaturnulpunkt stammer herfra, idet Amontons i 1703 fremsatte den idé, at hvis trykket blev nul, havde man nået en tilstand, hvor varmen var forsvundet.

Ifølge ligning (6) er det let at finde *forholdet* mellem to temperaturer, men det skulle gerne være forholdet mellem de termodynamiske temperaturer. Hertil kræves mere omstændelige termodynamiske målinger. Én metode har været at bruge Clapeyrons ligning for ligevægten mellem to faser:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}. \quad (7)$$

Den har fx været brugt langs damptrykskurven for vand, hvor L så betyder fordampningsvarmen af en vis mængde vand, og $V_2 - V_1$ er forskellen i rumfang mellem mættet damp og væske for den samme mængde. Ligningen kan omformes til

$$\frac{dT}{T} = (V_2 - V_1) \frac{dp}{L}, \quad (8)$$

hvor højresiden kan måles i små skridt langs damptrykskurven, og ved integration langs denne fra trykket p_1 til trykket p_2 findes $\ln(T_2/T_1)$, altså forholdet mellem de to tilsvarende termodynamiske temperaturer. Metoden har ligeledes været anvendt ved millikelvin-temperaturer på faseligevægten mellem fast og flydende helium-3 [7]. Her spiller Boltzmanns konstant k direkte ind som referencepunkt, fordi det eneste bidrag af betydning til entropien S kommer fra de frie kernespin i fast ^3He og kan beregnes (fx er $S = N_A k \ln 2$ i den helt uordnede tilstand)

Boks 2: Den internationale temperaturskala. Fixpunkter i definitionen af ITS-90:

Stof	Fixpunktets art	T_{90} / K
helium, He	V	3-5
brint, H_2	T	13,8033
H_2 eller He	V	≈ 17
H_2 eller He	V	$\approx 20,3$
neon, Ne	T	24,5561
ilt, O_2	T	54,3584
argon, Ar	T	83,8058
kviksølv, Hg	T	234,3156
vand, H_2O	T	273,16
gallium, Ga	M	302,9146
indium, In	F	429,7485
tin, Sn	F	505,078
zink, Zn	F	692,677
aluminium, Al	F	933,473
sølv, Ag	F	1234,93
guld, Au	F	1337,33
kobber, Cu	F	1357,77

V damptryk; T triplepunkt; M smeltepunkt; F frysepunkt.

I den benyttede brint skal ortho- og para-brint være i ligevægt.

Den internationale temperaturskala ITS-90

I flere af ovenstående eksempler er det noget vanskeligt at se, hvordan Boltzmanns konstant skal komme ind som reference. Hvis man ikke lige har brug for den yderste nøjagtighed, er der imidlertid hjælp at hente.

Til brug ved nøjagtig termometri blev der i 1989 aftalt en praktisk temperaturskala, ITS-90. Denne internationale temperaturskala af 1990 er konstrueret således, at dens temperaturangivelser T_{90} stemmer overens med

den termodynamiske temperatur inden for den målenøjagtighed, som kunne realiseres på den tid, hvor skalaen blev aftalt. Skalaen er etableret ved hjælp af en række termometriske fixpunkter og en række måleforskrifter for interpolation imellem fixpunkterne. ITS-90 omfatter alle temperaturer over 0,65 K, se boks 2.

Lavere temperaturer, fra 0,9 mK til 1 K, dækkes af en "Provisional Low Temperature Scale", PLTS-2000, som angiver smeltepunktstrykket af ^3He som funktion af temperaturen i form af et polynomium med 13 led.

Disse praktiske skalaer vil være gyldige, indtil Generalkonferencen eller dens underkomiteer aftaler noget andet.

Til at etablere andre temperaturer er der foreskrevet en række eksperimentelle metoder sammen med interpolationsformler, der angiver T_{90} som funktion af den målte størrelse. Formlerne indeholder konstanter, hvoraf nogle er foreskrevne, mens andre skal findes ved kalibrering i fixpunkterne. Hver metode dækker sit temperaturområde:

1. fra 0,65 K til 5,0 K: Damptrykket af ^3He og ^4He .
2. fra 3,0 K til neons triplepunkt: Gastermometri med ^3He og ^4He .
3. fra brints triplepunkt til sølvs frysepunkt: Elektrisk modstand af en tråd fremstillet af ren platin.
4. temperaturer over sølvs frysepunkt: Plancks strålingslov.

Litteratur

- [1] www.bipm.org
- [2] F. B. Rasmussen (2012) "SI-systemet under revision", KVANT, bind 22 nr. 1, side 3–6.
- [3] R. P. Feynman, R. B. Leighton og M. Sands (1977) "The Feynman Lectures on Physics", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, side 39-10.
- [4] upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Cmbr.svg
- [5] K. Meyer (1909) "Temperaturbegrebets udvikling gennem tiderne samt dets sammenhæng med vekslede forstillinger om varmets natur", Gjellerup, København.
- [6] J. O. Henningsen: "Farve", i Den Store Danske, Gyldendal, denstoredanske.dk/index.php?sideId=74478
- [7] D. S. Greywall (1986) *Phys. Rev. B*, **33**, 7520; W. P. Halperin, C. N. Archie, F. B. Rasmussen og R. C. Richardson (1975) *Phys. Rev. Lett.*, bind 34, side 718.



Finn Berg Rasmussen er emeritus ved Niels Bohr Institutet, pensioneret 2006. Har forsket i faststoffysik ved lave temperaturer: metaller, elektriske egenskaber, organiske superledere, magnetisme fra atomkernernes spin i ^3He , Ag og Rh. Medlem af KVANTs redaktion.

Kvantesimulation af kvasipartikler

Af Georg M. Bruun, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Kvantemekanikkens ligninger er så komplekse, at de kun kan løses eksakt for nogle få simple systemer. Et centralt problem i den moderne fysik er derfor at forstå realistiske systemer bestående af mange vekselvirkende partikler. I denne artikel diskuterer vi, hvordan man heldigvis i mange tilfælde kan forsimple problemet drastisk ved at beskrive sådanne systemer ved hjælp af partikellignende objekter – de såkaldte kvasipartikler. Vi forklarer, hvordan denne elegante teori, udviklet af den russiske fysiker Landau og anvendt overalt i fysikken, fornyligt er blevet undersøgt i epokegørende eksperimenter bl.a. ved Aarhus Universitet ved brug af kvantesimulatorer bestående af atomare gasser.

Kvasipartikler

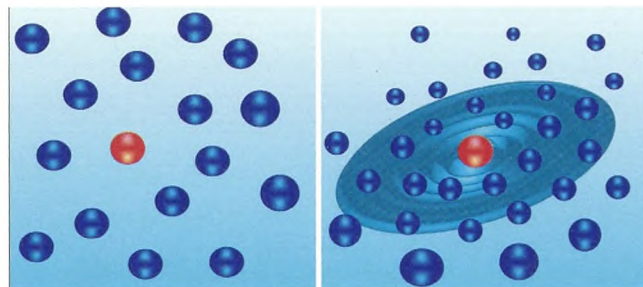
Vi har alle en klar fornemmelse af, hvad en partikel er, og vi bruger hele tiden vores intuition til at forudsæ, hvordan de opfører sig. Fx kan langt de fleste kaste og gribe en tennisbold med en vis sikkerhed. Den præcise matematiske formulering af sådanne makroskopiske partiklers bevægelse, dvs. deres position og hastighed, blev formuleret af Isaac Newton i hans verdensberømte værk "Principia" i 1687. De er derfor kendt som Newtons love. I begyndelsen af det 20. århundrede gennemrystedes fysikken af endnu en revolution, da det gik op for Niels Bohr og hans kollegaer, at Newtons love bryder sammen på små længdeskalaer, hvor de skal erstattes af den langt mere komplicerede kvantemekanik. De grundlæggende kvantemekaniske ligninger er så komplekse, at det selv med de hurtigste computere kun er muligt at løse dem for et meget begrænset antal simple systemer. Et grundlæggende problem i den moderne fysik er derfor at forstå realistiske kvantesystemer, der ofte består af mange partikler på atomar eller subatomar skala.

Her kommer den menneskelige intuition, nu i skikkelse af den russiske fysiker Lev Landau, heldigvis til hjælp, og angiver en genvej til at løse dette problem [1, 2]. Landau udførte følgende tankeeksperiment: start med en idealgas, der består af mange partikler, som ikke vekselvirker med hinanden. Idealgassen er forholdsvis enkel at forstå, da den er beskrevet fuldstændigt af de kvantetilstande, hver enkelt partikel er i. Forestil dig nu, at du langsomt skruer op for vekselvirkningen mellem partiklerne. Landau postulerede så, at med mindre der sker noget drastisk som fx en faseovergang, vil kvantetilstandene af idealgassen kontinuert udvikle sig til kvantetilstandene af det vekselvirkende system, når vekselvirkningsstyrken gradvist øges. Specifikt vil de ikke-vekselvirkende partikler i idealgassen svare én til én til såkaldte kvasipartikler i det vekselvirkende system, se figur 1.

Landau gav endvidere et klart og intuitivt billede af, hvordan vi skal forestille os en kvasipartikel. Hvis man langsomt skruer op for styrken af fx en tiltrækkende vekselvirkning, vil en partikel tiltrække en stadig større sky af de omkringliggende partikler. Jargonen blandt fysikere er, at partiklen bliver "klædt på" af den omgivende sky. En kvasipartikel kan derfor tænkes som bestående af den "bare" partikel fra idealgassen og den

omkringliggende sky, som illustreret på figur 1.

Det fantastiske ved Landaus kvasipartikelteori er, at den drastisk forenkler beskrivelsen af et ekstremt kompliceret vekselvirkende kvantesystem, så den bliver næsten lige så simpel som for en idealgas: Systemets lave energitilstande består ganske enkelt af en eller flere kvasipartikler. Rent faktisk kan man i mange tilfælde (dog ikke altid!) forstå dynamikken af kvantesystemet ud fra et simpelt intuitivt billede af "almindelige" partikler såsom tennisbolde, der kolliderer med hinanden.



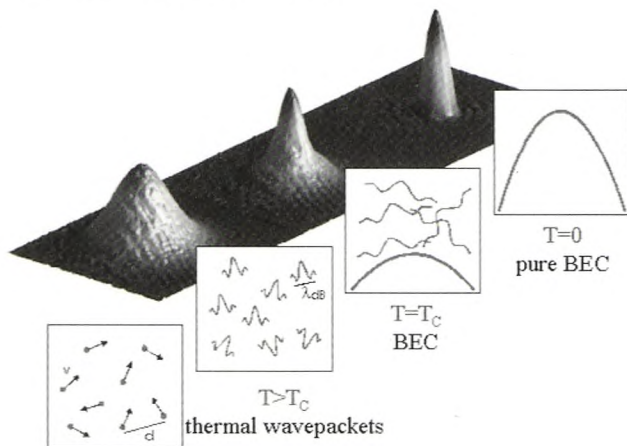
Figur 1. Venstre: En partikel i en gas uden vekselvirkninger. Højre: Når der skrues op for en attraktiv vekselvirkning, tiltrækker den de omkringliggende partikler og skaber dermed en kvantemekanisk tilstand, som fysisk bedst kan beskrives som en kvasipartikel. Kvasipartikelens masse er typisk større end den "bare" partikel, fordi den trækker en sky af atomer med sig rundt.

For at beskrive vekselvirkende kvantesystemer ved hjælp af Landaus teori skal man bruge nogle få inputparametre: kvasipartiklernes masse, levetid og deres vekselvirkning. Disse parametre er typisk fænomenologiske, da de er svære at udregne fra den grundlæggende mikroskopiske kvantemekanik. Fx er faste stoffer ofte præget af urenheder og andre ukontrollerede effekter, som i praksis umuliggør en mikroskopisk beregning af kvasipartiklernes egenskaber. Derfor har det indtil fornyligt været svært at udforske det kvantemekaniske grundlag for Landaus teori, altså hvordan kvasipartikler helt præcist dannes mikroskopisk ud fra de "bare" partikler i et kvantesystem.

Atomare kvantegasser

Det er her atomare kvantegasser kommer ind i billedet. En atomar kvantegas er en sky bestående af fx ^{39}K -atomer fanget i et vakuumkammer. Atomerne er nedkølet til en ekstremt lav temperatur for at få kvanteeffekter i spil. Den typiske udstrækning af den

kvantemekaniske bølgefunktion for en partikel med massen m er nemlig givet ved de Broglie-bølgelængden $\lambda = (2\pi\hbar^2/mk_B T)^{1/2}$, hvor k_B og $\hbar$ er hhv. Boltzmanns og Plancks konstant, og T er temperaturen. Når temperaturen sænkes, bliver partiklernes bølgepakker derfor større og større, og til sidst begynder de at overlappe. Når det sker, bliver partiklernes bølgeegenskaber vigtige, og kvantemekaniske effekter sætter ind. Altså vil kvantemekanik være vigtig for en gas med tætheden n , når $n\lambda^3 \sim 1$, og man siger da, at gassen er kvantede-genereret. Fx indtræder Bose-Einstein-kondensation, som er en udpræget kvantemekanisk effekt, når $n\lambda^3 \simeq 2.6$ for en idealgas af bosoner, se figur 2. Atomare Bose-Einstein-kondensater er beskrevet i et tidligere nummer af Kvant [3]. Den typiske tæthed for atomare gasser er $n = 10^{12} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, og de skal derfor køles helt ned til temperaturer omkring $T \simeq 10^{-6} \text{ K}$ for at se kvantemekaniske effekter. Heldigvis har fysikere i en teknologisk tour de force gennem de sidste tyve år udviklet avancerede teknikker, som kan køle atomare gasser helt ned til $T \simeq 10^{-9} \text{ K}$. Det har indtil videre givet to Nobelpriser, og det hævdes, at det koldeste sted i universet er i et vakuumkammer med en ultrakold atomar gas her på Jorden [4]!



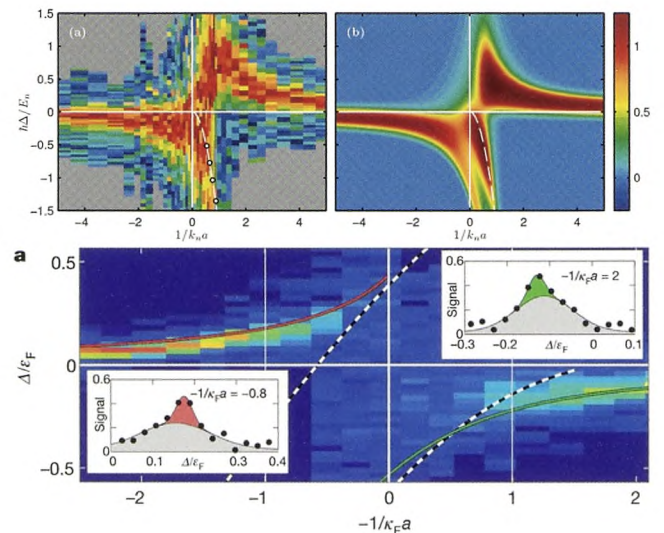
Figur 2. Når en sky af bosoner køles ned, bliver udstrækningen af bølgepakken for hver partikel større og større. Ved tilstrækkelig lav temperatur begynder de derfor at overlappe, og partiklerne kondenserer ned i den samme kvantemekaniske tilstand ved den kritiske temperatur T_c . Det resulterende Bose-Einstein-kondensat har en meget høj tæthed. Overfladeplottene er rigtige eksperimentelle data for tætheden af skyen.

Hvorfor arbejder man så hårdt for at lave kvantede-genererede gasser? Grunden er, at de er meget rene, og man kan kontrollere dem i hidtil uset grad ved brug af lasere og magnetfelter. De atomare gasser kan så at sige skræddersys til at have præcis de ønskede egenskaber, og man er samtidigt fri for alle de ukendte parametre, som plager mere konventionelle systemer. Det betyder, at man kan studere kvantemekanik i stor detalje og i regimer, som aldrig er set før. Siden de første Bose-Einstein-kondensater blev realiseret i 1995 med atomare kvantegasser [5, 6], har de derfor udviklet sig til en utrolig fleksibel platform for kvantesimulation: man designer dem til at opføre sig som det system, man gerne vil studere. På den måde kan komplicerede kvantemekaniske problemer udforskes, som ikke kan

løses på selv de hurtigste klassiske computere – ved simpelthen at spørge naturen direkte!

Kvantesimulation af kvasipartikler

Vi kan nu vende tilbage til kvasipartiklerne. Man kan nemlig bruge atomare gasser til at realisere Landaus tankeeksperiment beskrevet ovenfor. Idéen er ganske enkelt at indsætte et enkelt atom af en anden slags, en såkaldt “urenhed”, i en atomar kvantegas. Urenhedsatomet vekselvirker med kvantegassen og danner dermed en kvasipartikel som illustreret på figur 1. En fantastisk egenskab ved atomare gasser er, at man nemt kan justere styrken på vekselvirkningen mellem atomerne blot ved at ændre et ydre magnetisk felt. Specifikt kan vi ved langsomt at skruer op for vekselvirkningen mellem urenhedsatomet og kvantegassen i detaljer studere, hvordan urenhedsatomet gradvist udvikler sig til en kvasipartikel ved at samle en sky af atomer omkring sig. Det er præcis Landaus tankeeksperiment, som beskrevet tidligere, der danner grundlag for hans teori om kvasipartikler. Han forestillede sig næppe, at det nogensinde ville blive realiseret, men med moderne teknologi blev eksperimentet rent faktisk udført i 2015 i to laboratorier uafhængigt af hinanden!



Figur 3. På det øvre plot ses energispektret for et urenhedsatom i et Bose-Einstein-kondensat som funktion af vekselvirkningsstyrken. Plottet til venstre er data fra Aarhus-eksperimentet, og det til højre er de teoretiske beregninger. Bemærk, at x-aksen er $1/k_n a$, hvor k_n^{-1} er proportional med den gennemsnitlige afstand mellem bosonerne. Fra ref. [7]. På det nedre plot ses energispektret målt i Innsbruck-eksperimentet for et urenhedsatom i en Fermi-gas som funktion af vekselvirkningsstyrken. Linierne er teoretiske beregninger. Fra ref. [8].

Den ene af de to eksperimentelle grupper er ledet af Jan Arlt ved Aarhus Universitet. Først dannede hans gruppe et Bose-Einstein-kondensat af ^{39}K -atomer, hvorefter de ændrede spintilstanden af nogle få atomer, så de blev til urenhedsatomer. Urenhedsatomerne dannede kvasipartikler ved at vekselvirke med atomerne i kondensatet, og Jan Arlts gruppe kunne nu ændre vekselvirkningen og måle kvasipartiklens energi. På figur 3 ses de eksperimentelle data for kvasipartiklens energi som funktion af den såkaldte spredningslængde a , der

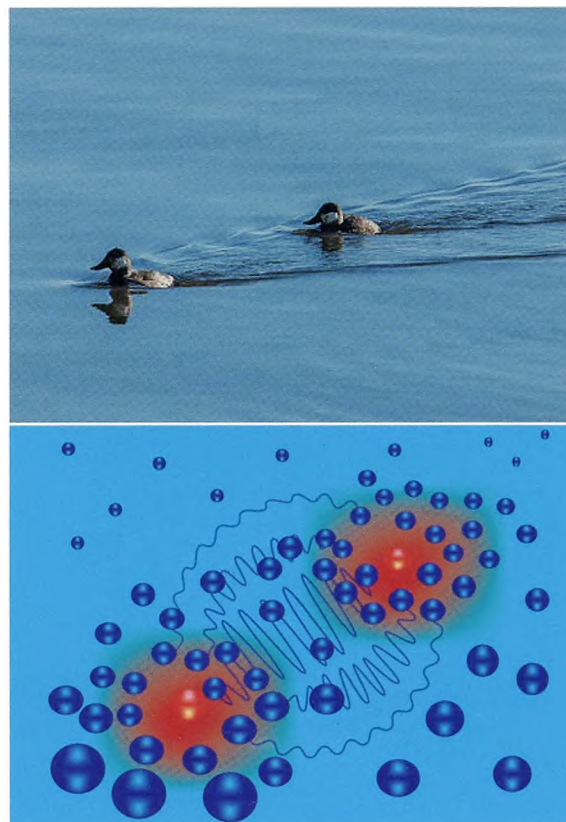
angiver styrken af vekselvirkningen mellem urenhedsatomet og atomerne i kondensatet. Mine samarbejdspartnere og jeg beregnede kvasipartiklens energi ved hjælp af kvantemekanik, og som man kan se på figur 3, er der god overensstemmelse mellem de eksperimentelle data og vores teori. Denne overensstemmelse er bemærkelsesværdig, fordi der ikke er nogle frie parametre i teorien, da atomare gasser som sagt er meget rene. Specielt er det overraskende, hvor godt teori og eksperiment passer for $1/k_F a = 0$, hvor spredningslængden er uendelig og vekselvirkningen så stærk som kvantemekanisk muligt! En sådan konsistens mellem teori og eksperiment er sjælden for kvantesystemer med mange partikler, fordi de kvantemekaniske ligninger generelt er så komplicerede. Overensstemmelsen mellem teori og eksperiment gjorde, at vi med sikkerhed kunne annoncere den første observation af en kvasipartikel i et Bose-Einstein-kondensat i verden! Vores resultater blev opnået parallelt med og i skarp konkurrence med en gruppe ledet af Nobelpristageren Eric Cornell ved JILA i Colorado, USA. Efter lidt diskussion frem og tilbage mellem de to grupper, besluttede vi os for, at artiklerne skulle publiceres lige efter hinanden i det anerkendte tidsskrift *Physical Review Letters* [7, 9].

I et tidligere eksperiment udført af en eksperimentel gruppe ledet af Rudolf Grimm i Innsbruck blev ^{40}K -urenhedsatomer studeret i en ultrakold gas bestående af ^6Li -atomer. Den væsentlige forskel er, at ^6Li -atomerne er fermioner, hvorimod atomerne i kondensaterne i Aarhus og JILA er bosoner. Altså studerede man i Innsbruck kvasipartikler i et fermionisk reservoir. Min samarbejdspartner og jeg beregnede kvasipartiklens energi, og som det kan ses på figur 3, var der også her god overensstemmelse mellem teori og eksperiment. Heraf kunne vi konkludere, at vi som de første i verden havde observeret en kvasipartikel i en Fermi-gas med stærke frastødende vekselvirkninger [8]!

Perspektiver

Den eksperimentelle observation af kvasipartikler i atomare kvantegasser åbner for spændende perspektiver. Som sagt er atomare gasser en ekstremt fleksibel og effektiv platform for kvantesimulation, og den kan nu bruges til at udforske Landaus banebrydende teori om kvasipartikler systematisk og i regimer, som aldrig er set før. Eksperimenterne i Innsbruck, JILA og Aarhus realiserede Landaus tankeeksperiment i virkeligheden, og kombineret med de teoretiske beregninger kunne vi give hans intuition om kvasipartikler et mikroskopisk fundament. Som resultat af de to ovennævnte eksperimenter har mange teoretikere derfor kastet sig over emnet. Selv har jeg fx forudsagt, at kvasipartiklen i kondensatet ret overraskende splitter sig op i to kvasipartikler, når temperaturen er så høj, at kondensatet er tæt på at smelte [10]. En lignende opsplitning af kvasipartikler er forudsagt i varme elektron- og kvarkgluon-plasmaer, hvilket giver en overraskende forbindelse mellem atomare gasser, som jo er de koldeste systemer på jorden med $T \simeq 10^{-9} - 10^{-6}$ K, og så quark-gluon-plasmaer, som med en temperatur på $T \simeq 10^{12}$ K er de varmeste systemer på Jorden!

Endvidere vekselvirker to kvasipartikler i et kondensat temmelig stærkt med hinanden via udveksling af lydbølger – lidt ligesom to ænder kan mærke hinanden via de bølger, de udsender som illustreret på figur 4. Vekselvirkningen mellem kvasipartiklerne er tiltrækkende, og jeg har været med til at vise, at den faktisk er stærk nok til at binde to kvasipartikler sammen i et molekyle [11, 12]. Molekyler bestående af to kvasipartikler, ofte kaldet bipolaroner, står bag den elektriske ledningsevne af polymere kæder, organisk magnetoresistans og sågar visse former for eksotisk superledning. Det vil derfor være et stort fremskridt, hvis vi kan studere bipolaroner systematisk ved hjælp af atomare kvantegasser.



Figur 4. To kvasipartikler vekselvirker med hinanden ved at udveksle bølger i det omkringliggende medium, lidt ligesom anden til venstre sender bølger mod den til højre.

Alt i alt står vi nu med en enestående mulighed for bruge atomare gasser som effektive kvantesimulatorer til at udforske kvasipartikler. Givet den fundamentale rolle, de spiller for vores forståelse af naturen, vil det højst sandsynligt resultere i en række vigtige resultater. Aarhus Universitet huser et verdensledende miljø inden for dette stærkt konkurrenceprægede felt, bestående af teoretiske såvel som eksperimentelle grupper, der arbejder tæt sammen. Det bliver spændende at se, hvad mere vi kan lære om Landaus geniale idé i de kommende år!

Litteratur

- [1] L. D. Landau, "The theory of a Fermi liquid," *J. Exp. Theor. Phys.*, vol. 3, no. 6, pp. 920–925, 1957.
- [2] G. Baym and C. Pethick, *Landau Fermi-Liquid Theory: Concepts and Applications*. Wiley-VCH, 1991.

- [3] K. T. Therkildsen and J. W. Thomsen, "Bose Einstein kondensation i atomare gasser – når atomer bliver til kvantebølger," *KVANT*, vol. 19, no. 2, pp. 20–23, 2008.
- [4] <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/the-coldest-place-in-the-universe-8121922/>.
- [5] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, and E. A. Cornell, "Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor," *Science*, vol. 269, no. 5221, pp. 198–201, 1995.
- [6] K. B. Davis, M. O. Mewes, M. R. Andrews, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle, "Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 75, pp. 3969–3973, Nov 1995.
- [7] N. B. Jørgensen, L. Wacker, K. T. Skalmstang, M. M. Parish, J. Levinsen, R. S. Christensen, G. M. Bruun, and J. J. Arlt *Phys. Rev. Lett.*, p. 055302, Jul.
- [8] C. Kohstall, M. Zaccanti, M. Jag, A. Trenkwalder, P. Massignan, G. M. Bruun, F. Schreck, and R. Grimm, "Metastability and coherence of repulsive polarons in a strongly interacting fermi mixture," *Nature*, vol. 485, pp. 615–618, May 2012.
- [9] M.-G. Hu, M. J. Van de Graaff, D. Kedar, J. P. Corson, E. A. Cornell, and D. S. Jin, "Bose polarons in the strongly interacting regime," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117, p. 055301, Jul 2016.
- [10] N.-E. Guenther, P. Massignan, M. Lewenstein, and G. M. Bruun, "Bose polarons at finite temperature and strong coupling," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, p. 050405, Feb 2018.
- [11] A. Camacho-Guardian and G. M. Bruun, "Landau effective interaction between quasiparticles in a Bose-Einstein condensate," *Phys. Rev. X*, vol. 8, p. 031042, Aug 2018.
- [12] A. Camacho-Guardian, L. A. Peña Ardila, T. Pohl, and G. M. Bruun, "Bipolarons in a Bose-Einstein condensate," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, p. 013401, Jul 2018.



Georg M. Bruun er teoretisk fysiker ved Aarhus Universitet og beskæftiger sig med ultrakolde atomare gasser. Hans forskning fokuserer på emner som superledning, transport, magnetisme og topologiske tilstande.

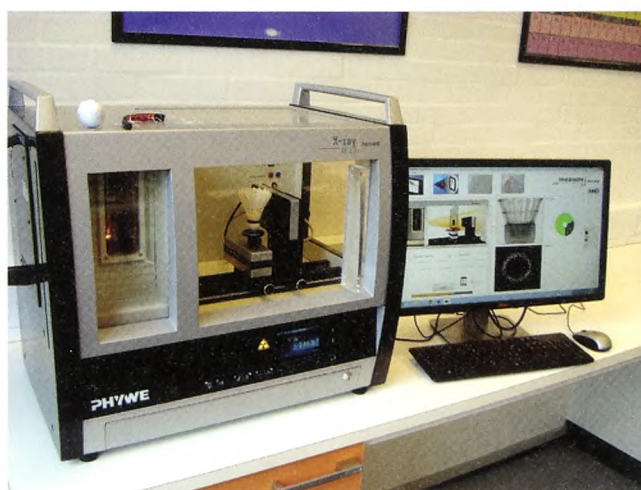
Røntgenstråling og CT-skanning for gymnasieelever

Af Ole L. Trinhammer, Nanoteket, DTU Fysik

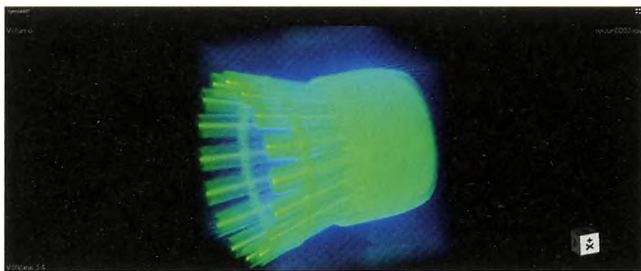
Tredimensionale billeder fra todimensionale skygger? Kan man prøve det selv? Ja, gymnasieklasser kan – med Nanotekets nye røntgenapparater. De fleste kender røntgenbilleder og forstår dem nemt som skygebilleder. Ved en CT-skanning drejes skanneren omkring personen, og skygebillederne sammenstilles ved hjælp af absorptionsloven til et tredimensionalt billede af den indre struktur.

Nanoteket er et undervisningslaboratorium under DTU Fysik for studerende ved DTU og for besøgende gymnasieelever fra hele landet. Det fik sit navn i 2004, hvor vi investerede i skanningprobemikroskoper til nanoteknologi. Siden er der kommet et væld af gymnasieøvelser til: Brændselsceller og solceller som knytter an til instituttets forskning i katalyse, plasmafysikøvelse med e/m -rør, skanningelektronmikroskoper, hvor elever kan se strukturen i sommerfugleskæl, kvanteoptikudstyr, hvor de kan bryde Bells ulighed, og røntgenudstyr, som jeg her vil koncentrere mig om.

Røntgenudstyret gør det muligt at "se det usynlige". Røntgen- og neutronspretningsgrupperne ved instituttet bruger metoderne især til materialeteknologiske formål. Det kan være at undersøge funktionen og strukturen inden i et batteri, mens det er virksomt. Neutronspretningsgruppen er tilknyttet den kommende spallationskilde ESS i Lund i Sverige, ligesom røntgengruppen er i gang med at udvikle en beamlinje, Danmax, ved synkrotronkilden, Max IV, sammesteds.

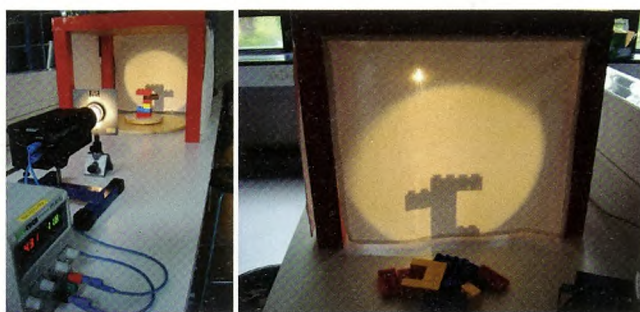


Figur 1. Et af Nanotekets røntgenapparater sat op til CT-skanning af fjerbold. Røntgenrøret sidder til venstre, og man aner katoden gløde orange. Bolden roteres, og man optager fx 200 projektioner fra forskellige vinkler. Disse behandles i computeren, og en 3D-rekonstruktion dannes.



Figur 2. Klip fra videoanimation af 3D-rekonstruktion af fjerbold.

Neutronspreddning er i høj grad komplementær til røntgenspreddning. Neutronerne “ser” spin og dermed magnetisme, og de “ser” bedst de lette grundstoffer, da neutronerne vekselvirker mest med de lette atomkerner. Røntgen “ser” bedst de tunge grundstoffer, da røntgenfotonerne vekselvirker med elektronerne, som der er flere af i de tunge grundstoffer.



Figur 3. Opstilling til illustration af 3D-rekonstruktion. Her virker hjernen som computer!

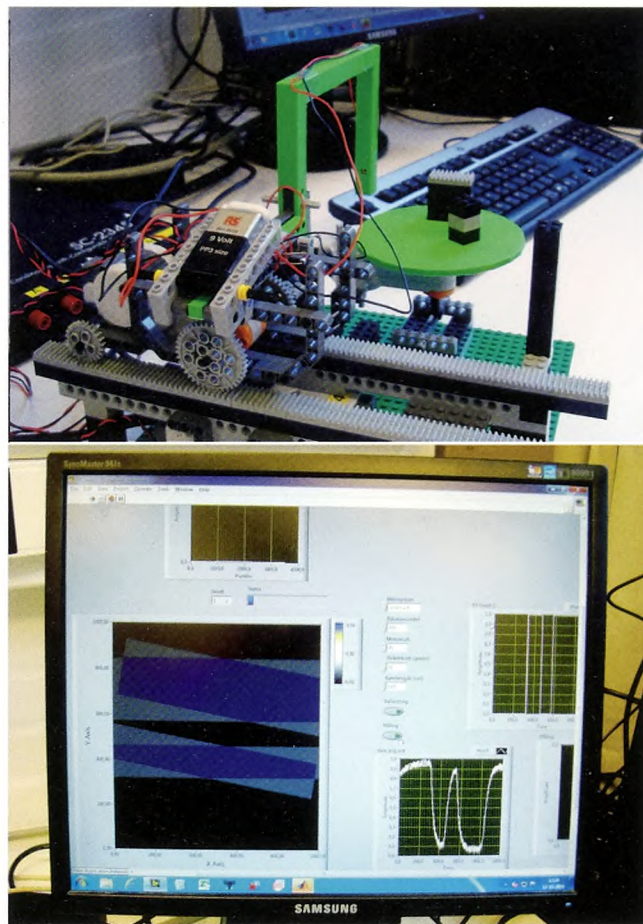
Ved at gennemlyse emnet fra mange forskellige retninger fås en 3D-rekonstruktion ud fra absorptionsloven

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}. \quad (1)$$

Her er I intensiteten efter passage af materiale med tykkelsen x og absorptionskoefficient μ . Derudover anvendes en såkaldt invers radontransformation.



Figur 4. Klassisk røntgenbillede taget med fluorescerende skærm monteret i apparatet i stedet for den elektroniske skærm i figur 1.



Figur 5. a) (Øverst): CT-skanner til 2D-rekonstruktion. Skannehovedet består af den portformede bjælkekonstruktion, som er sat fast på LEGO-bilen. I porten sidder en infrarød diode i venstre side over for en fotoreistor i den højre side. Hver gang skannehovedet har kørt frem og tilbage, drejes bordet et bestemt antal grader, og et nyt skan foretages. Begge motorer styres af robotten, mens signalet fra fotoreistoren sendes til computeren til videre behandling. b) (Nederst): På computerskærmen ses skyggestriber fra to skan drejet i forhold til hinanden.

Geometrisk tomografi

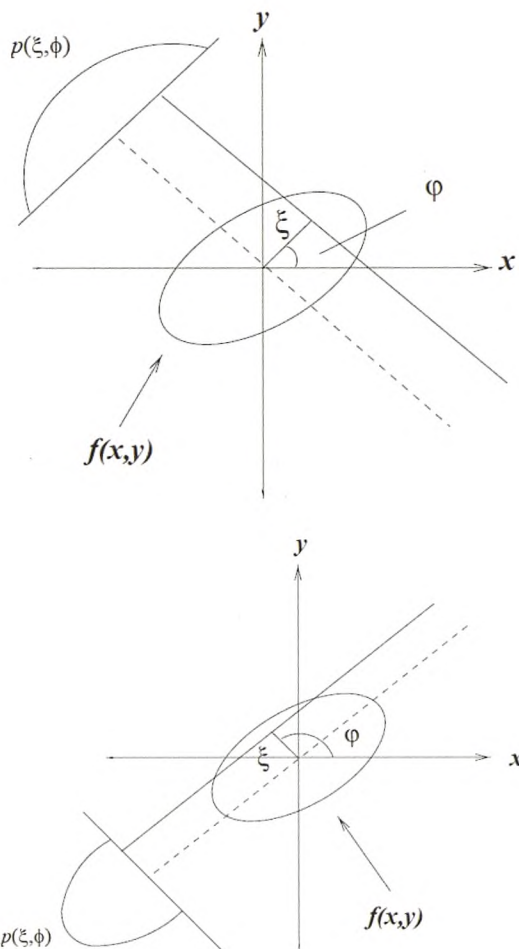
Hvordan ser figuren mon ud i 3D, hvis man kun kan se dens skygge fra forskellige sider? I denne indledende øvelse deles gruppen i to. En person bygger en model, som placeres bag et klæde og belyses bagfra. Modellen roteres bag klædet. Foran klædet er resten af gruppen, som skal prøve at bygge i 3D det, de forestiller sig ud fra skygebillederne, se figur 3.

Computed tomography

På rekonstruktionen af fjerbolden i figur 2 ser man intensitetsforskelle afhængig af materialernes gennemtrængelighed for røntgenstråling. Man nøjes ikke med kun at konstatere skygge eller ikke-skygge som i den geometriske tomografi i figur 3. At kunne se intensitetsforskelle som i figur 4 er karakteristisk for klassiske røntgenbilleder.

Ved at rotere emnet skannes skyggen fra forskellige vinkler og sammenstykes ved hjælp af en computer til et tredimensionalt tomogram. Databehandlingen er helt tilsvarende det, der foregår i hospitalernes CT-skannere. Den eneste væsentlige forskel er, at her ligger patienten

stille, mens apparatet roterer rundt om patienten! Den inverse radontransformation er en "tilbageregning" fra skyggen til det computerberegnete tomogram. Vi illustrerer princippet med en model med en LEGO-robot som vist i figur 5.



Figur 6. Radontransformation p for et ellipseformet snit gennem et emne set fra forskellige drejninger ϕ i forhold til et fast (x, y) -koordinatsystem i emnet. Figur redigeret fra [2]. Se evt. også [3].

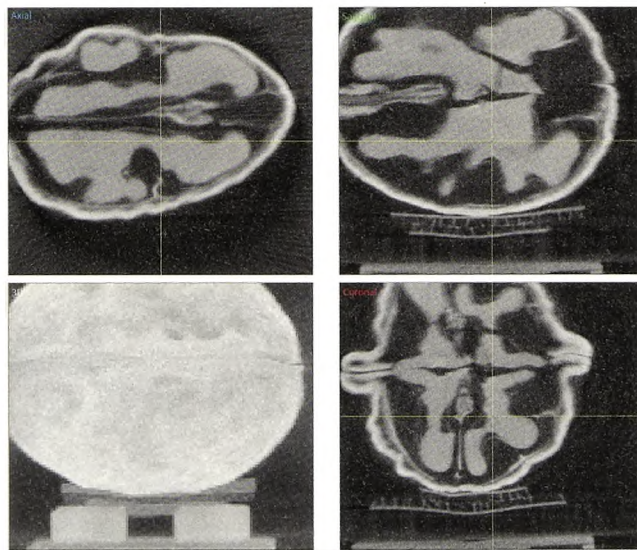
Radontransformationen i 2D

Tætheden af materiale i emnet i et plant snit beskrives ved en funktion f af to koordinater x og y i et koordinatsystem, som ligger fast i forhold til emnet, se figur 6. Tæthedens skygge kan opfattes som en projektion på en linje uden for emnet. Skyggens værdi ("dybde") findes ved at integrere langs sigtelinjen gennem emnet, vinkelret på den linje, der skal projiceres på. Projektionslinjens beliggenhed i forhold til emnets koordinatsystem beskrives ved en vinkel ϕ , og positionen langs linjen beskrives ved en længdekoordinat ξ . Transformationen p bliver da (se figur 6)

$$p(\xi, \phi) = \int f(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - \xi) dx dy \quad (2)$$

Skyggestriberne på skærmen i figur 5b kan opfattes som to tabeller skrevet på et gennemsigtigt, ternet papir og lagt oven på hinanden med samme drejning, som bordet foretog mellem de to skan. Ved geometrisk

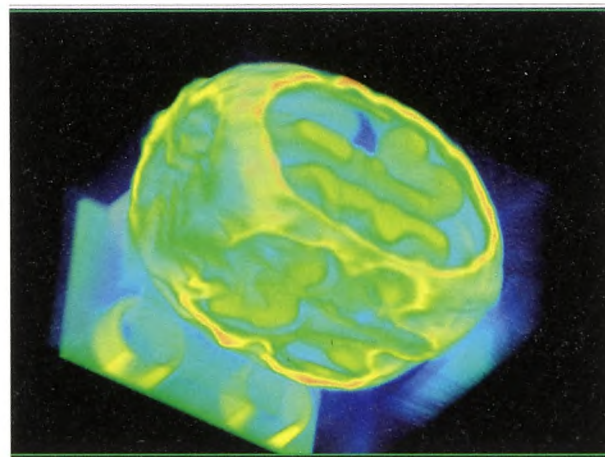
tomografi skriver man 1 i alle de tabelrækker, hvor der er mørke, og 0 i alle de tabelrækker, hvor der er lys. Laver man fx 100 skan, vil skyggerækkerne dreje i forhold til hinanden, og kun de tern, hvor emnet "er", vil vise skygge fra alle sider. Det betyder, at hvis 1-tallerne i disse tern adderes for alle 100 skan, kan stoftætheden sættes til 100 her og markeres på et tomogram. Hvis man vil tage højde for varierende stoftæthed, skal man skrive tal mellem 1 og 0 svarende til et varierende signal fra fotodetektoren ligesom projektionen i figur 6.



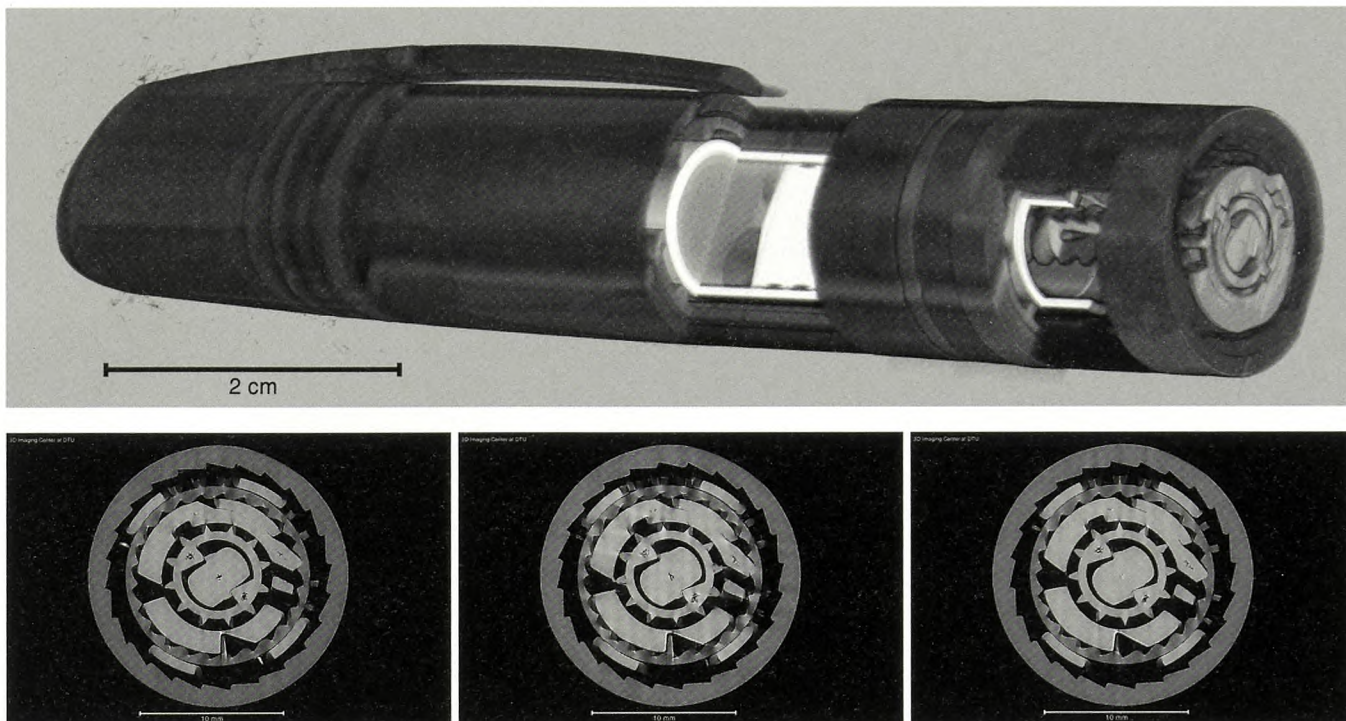
Figur 7. Rekonstruktion af en valnød med snit i tre vinkelrette planer.

Transformationen (2) bærer sin opdagers efternavn, Radon [1]. Bemærk, at $\mathbf{n} = (\cos \phi, \sin \phi)$ er normalvektor til sigtelinjen, så deltafunktionen plukker funktionsværdier ud, som ligger i afstanden ξ fra sigtelinjen gennem $(0,0)$, idet $\mathbf{n} \cdot (x, y) = \xi$ er ligningen for sigtelinjen. Sluttelig adderes funktionsværdierne langs denne linje ved hjælp af integralet.

Rekonstruktion består dermed i at bestemme $f(x, y)$ ud fra måling af $p(\xi, \phi)$. Rekonstruktion er altså kort sagt en invers radontransformation.



Figur 8. Billedbehandling med beskæring i 3D. Toppen er åben, fordi nødden rager ud af billedfeltet (figur 7 nederst til venstre). Derudover er billedet beskåret i to herpå vinkelrette planer for et kig ind i nødden.



Figur 9. Skanning af NOVO-insulinpen med 0,3 sekunders mellemrum. Det lyse felt øverst i midten er stemplet, som trykker insulin ud. Billederne nederst viser en tandhjulsmekanisme, som drejer sneglen, der presser stemplet. Tak til Novo Nordisk for tilladelse til at vise skanningerne, som blev optaget på European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) i samarbejde med 3D Imaging Centret på DTU som en del af Innovationsfond-projektet LINX.

Billedbehandling – ind i nødden

For at kigge ind i emnet, kan rekonstruktionen billedbehandles med snit i tre forskellige planer som vist for en valnød i figur 7. Endvidere kan man lave beskæring i 3D og således kigge ind i nødden som vist i figur 8.

Den fjerde dimension, skanning i 4D

Med kraftige røntgenkilder kan man få den fjerde dimension med, nemlig tiden. Det vil sige, at man fx kan visualisere mekanismen i en insulinpen og se, om den virker som tiltænkt, se figur 9.

Litteratur

- [1] Johann Radon (1986) "On the Determination of Functions From Their Integral Values Along Certain Manifolds", *IEEE Transactions on Medical Imaging*, bind **MI-5**, nr. 4, december 1986. Oversættelse af P. C. Parks fra originalen "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten", offentliggjort i *Berichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaft*, bind **69** (1917), side 262–277.

- [2] "Tomographic Image Reconstruction", <https://aapm.org/meetings/99AM/pdf/2806-57576.pdf> (Forfatter: riviére@imaging.bsd.uchicago.edu). 25. juni 1999.

- [3] Gengsheng L. Zeng, Ya Li og Alex Zamyatin (2013) "Iterative total-variation reconstruction versus weighted filtered-backprojection reconstruction with edge-preserving filtering", *Physics in Medicine and Biology*, bind **58**, side 3413–3431.



Ole L. Trinhammer er cand. scient. Leder af Nanoteket, DTU Fysik. Nanoteket tilbyder ca. 15 forskellige gymnasieøvelser til forskellige klassetrin og niveauer.

Den danske Lorenz

Anja Skaar Jacobsen, Københavns VUC

Det er ukendt for mange, at Danmark i 1800-tallet havde en betydningsfuld og internationalt anerkendt teoretisk fysiker ved navn Ludvig Valentin Lorenz (1829-1891). Hans vigtigste bidrag var inden for optikken og elektrodynamikken. Hans navn forveksles ofte med den samtidige og langt mere kendte hollandske fysiker og senere nobelpristager, Hendrik Antoon Lorentz, som tilmed arbejdede inden for de samme områder af fysikken som den danske Lorenz. Årsagen til forvekslingen er dels navnesammenfaldet, dels at den danske Lorenz er ret ukendt, og dels misforståelser i forhold til prioriteten af en række videnskabelige opdagelser. Det er derfor på sin plads, at der kastes nyt lys over den betydningsfulde, men ofte glemte, danske Lorenz i form af en biografi, skrevet af Helge Kragh [1]. Biografien bør stå på enhver dansk fysikers hylde. Der findes en anden biografi om Lorenz, skrevet på tysk af fysikhistorikeren Mogens Pihl helt tilbage i 1939. Derudover findes der en række artikler af Kragh, Pihl og andre fysikhistorikere om Lorenz' forskellige fysiske arbejder, alle nævnt i bogens omfattende bibliografi. Kraghs biografi er skrevet på engelsk for at udbrede kendskabet til Lorenz ikke bare i Danmark men også blandt fysikhistorikere internationalt.

Bogen er primært en videnskabelig biografi, dvs. den handler først og fremmest om Lorenz' videnskabelige og teknologiske arbejder, og det synes også at være det mest interessante ved ham. Lorenz var den første egentlige matematiske fysiker i Danmark, for der var på det tidspunkt ingen tradition i Danmark for matematisk fysik. Tværtimod cementerede den magtfulde H. C. Ørsted sin ikke-matematiske tilgang til fysikken gennem sin efterfølger på universitetet og den Polytekniske Læreanstalt, C. V. Holten. Lorenz fulgte bl.a. Ørsteds forelæsninger i fysik og kemi på den Polytekniske Læreanstalt og var matematisk autodidakt. Der skulle et studieophold i Paris til at omvende Lorenz til matematisk fysik. På det tidspunkt var Lorenz omkring 30 år gammel. Han fik sin første stilling på den Kongelige Militære Højskole som 35-årig og blev, som 37-årig, medlem af det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Som 58-årig fik han tildelt Carlsbergfondets livslange støtte, som blev givet til "Mænd af anerkendt Dygtighed", hvilket gav ham mulighed for at forske på fuld tid (Niels Bohr modtog dette stipendium i 1924).

Hvis man ser bort fra Lorenz' videnskabelige arbejder, giver biografien et indtryk af ham som en usædvanligt kedelig mand: En introvert og sky, selvlært videnskabsmand uden ambitioner; en ikke særlig god studerende og en uninspirerende lærer. Han havde ingen vennekreds og tog ikke del i det københavnske sociale liv. Ægteskabet med den smukke Agathe Fogtmann i 1862 beskrives i en enkelt sætning. Der er intet om, hvordan de mødtes eller deres barnløse liv sammen. Det sidste skyldes, ifølge Kragh, at der ikke længere

findes arkivmateriale til den del af Lorenz og Agathe Fogtmanns liv. Til gengæld spænder biografien bredt over Lorenz' forskelligartede videnskabelige bidrag; fra den rene matematiske fysik til de eksperimentalfysiske opdagelser og endelig til Lorenz' teknologiske opfindelser. Kragh bevæger sig elegant og ubesværet mellem de forskellige fagområder, som optog Lorenz, og Kragh får samtidigt sat Lorenz' bidrag ind i den rette fysik- og kemihistoriske kontekst i det 19. århundrede. Kragh er måske den eneste, der er i stand til at spænde så vidt, og biografien hænger derfor rigtig godt sammen. Bogen indeholder bonusmateriale i form af tre meget interessante tekster fra Lorenz' egen hånd: en upubliceret selvbiografi skrevet af Lorenz i 1877; en kort, upubliceret forelæsningsnote om matematikkens betydning for den del af fysikken, hvor sanserne ikke rækker, dvs. i beskrivelsen af lys, varme, elektricitet, magnetisme samt stofs atomare opbygning. Endelig er der en artikel fra 1867 om Lorenz' elektriske teori for lys.



Figur 1. Ludvig Valentin Lorenz (1829–1891).

I optikken har Lorenz slået sit navn fast med Lorenz-Lorentz-loven og Lorenz-Mie-spredning. Lorenz fremsatte i 1863 en elastisk lysteori, og på den baggrund udledte han en brydningslov, der viser sammenhængen mellem brydningsindeks og densiteten af stof. Lorenz publicerede denne lov i 1875. Den hollandske fysiker H. A. Lorentz udledte den samme lov i 1878, men ad en anden vej. Kragh argumenterer for, som andre før ham, at loven bør kaldes Lorenz-Lorentz-loven, men historisk blev rækkefølgen af de to fysikers navne vendt om i takt med den stigende berømmelse af den hollandske Lorentz i starten af det 20. århundrede. Formlen nævnes således også som Lorentz-Lorenz-formlen i Jan W. Thomsens forelæsningsnoter: *A First Course in Optics* [2]. I 1890 udviklede Lorenz en matematisk teori for spredning af lys på en gas af kugleformede molekyler. Med teorien bestemte han som en af de første en værdi

for det, vi i dag kalder Avogadros konstant ved at se på sollysets spredning i atmosfæren. Lorenz' teori er i det store hele ækvivalent med en teori fremsat af Gustav Mie i 1908, hvorfor teorien i dag kaldes Lorenz-Mie-spredning.

Lorenz gik sine egne veje. For eksempel troede han ikke på, at varme kan associeres med molekylerne bevægelse, og han troede heller ikke på en lysæter. At lysbølger krævede et medium i form af en æter til sin udbredelse, var ellers den dominerende opfattelse på den tid. Navnlig byggede J. C. Maxwells elektromagnetiske teori fra starten af 1860'erne på den antagelse. Lorenz fremsatte i 1867 en elektrodynamisk teori for lys, der var baseret på idéen om, at lys' vibrationer var identiske med elektriske strømme. Lorenz var ikke bekendt med Maxwells teori. Han var i stedet inspireret af Gustav Robert Kirchhoffs teori om elektriske strømme, som han kombinerede med sin egen elastiske teori for lys. I erkendelsen af, at lys og elektriske virkninger har en endelig udbredelseshastighed, som, han fandt, var meget tæt på lysets fart, indførte Lorenz som den første brugen af såkaldt retarderede potentialer i elektrodynamikken. De retarderede potentialer (i vakuum) kan med nutidig notation skrives som:

$$\phi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dv' \quad (1)$$

og

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dv' \quad (2)$$

hvor t' er den retarderede tid: $t' = t - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|/c$. Potentialerne afspejler, at det elektromagnetiske felt i punktet $\mathbf{r}$ til tidspunktet t er forårsaget af strøm- og ladningskilder ($\mathbf{J}(\mathbf{r}', t')$ og $\rho(\mathbf{r}', t')$) i et andet punkt i rummet $\mathbf{r}'$ på et tidspunkt i fortiden t' . Tidspunktet t' er netop retarderet i forhold til t med den tid, det har taget at rejse fra kilden til feltpunktet $\mathbf{r}$ med lysets fart c . I fastlæggelsen af ovennævnte potentialer indførte Lorenz den betingelse, der nu bærer hans navn: Lorenz-gauge, som senere blev vist at være relativistisk invariant. Dvs. at denne gauge gælder i alle inertialsystemer, og den er dermed i overensstemmelse med relativitetsteorien. Maxwell benyttede i stedet betingelsen, som er kendt som Coulomb-gauge. Pudsigt nok kaldes en relativistisk invariant teori – og denne gang retmæssigt – også for en Lorentz-invariant teori. Det skyldes, at man anvender Lorentz-transformationen som forbindelsen mellem inertialsystemerne.

Kragh kortlægger i store detaljer, hvordan Lorenz' elektrodynamiske teori blev modtaget blandt datidens fysikere, inkl. Maxwell. Han diskuterer de mulige årsager til, at Lorenz' teori, på trods af international interesse og almen anerkendelse, hurtigt blev glemt, endda tilsyneladende af Lorenz selv, og at det alene blev Maxwells teori, der overlevede til i dag. Kragh vover dog ikke en forenklet årsagsforklaring. At Lorenz ikke selv promoverede sin teori, udover at han publicerede den internationalt, har uden tvivl haft betydning for kendskabet til den. At Maxwell kritiserede Lorenz' teori, har sikkert også haft stor betydning. Dertil kommer, at de magnetiske virkninger ikke nævnes eksplicit i Lorenz' teori, og at vektorpotentialer altså ikke

associeres med det magnetiske felt. Sandsynligvis var det også en medvirkende årsag, at fysikerne sent i det 19. århundrede var optagede af at studere lysæterens egenskaber, og æterens fysik var stort set synonym med Maxwells elektrodynamik.

Udover at være en eminent matematisk fysiker, var Lorenz også en fremragende eksperimentalfysiker, og parallelt med de teoretiske udledninger lavede han præcisionseksperimenter med optisk brydning og til bestemmelse af metallers specifikke termiske og elektriske modstand. Lorenz nåede frem til, at forholdet mellem et metals varmeledningsevne og elektriske ledningsevne er proportionalt med den absolutte temperatur; en empirisk lov, der refereres til som Wiedeman-Franz-Lorenz-loven, da Gustav Wiedeman og Rudolph Franz før Lorenz fandt proportionaliteten ved stuetemperatur. Lorenz' bidrag til denne lov er altså temperaturafhængigheden, og proportionalitetsfaktoren kaldes Lorenz-tallet.

I 1873 publicerede Lorenz, hvad der senere blev til Lorenz-metoden til bestemmelsen af modstandsenheden ohm. Ohm blev på det tidspunkt (og indtil 1948) fastlagt ud fra en kviksølvøjle med faste dimensioner (betegnelsen Ω blev fastlagt i 1867 baseret på den fonetiske lighed mellem ordene ohm og omega). Lorenz udviklede et genialt apparat, der involverede en roterende kobberplade omsluttet af en spole i kredsløb med den kviksølvøjle, der skulle måles på. Ved at variere rotationshastigheden af kobberpladen kunne man finde det punkt, hvor den skabte, elektromotoriske kraft over kobberpladen balancerede spændingsfaldet over kviksølvøjlen. Lorenz' metode blev efterfølgende den industrielle standardmetode i England. Blandt Lorenz' teknologiske bidrag kan også nævnes den bemærkelsesværdige elektromagnetiske dynamo, som han konstruerede i samarbejde med instrumentmageren Christopher Peter Jürgensen i 1880. Dynamo, der havde en virkningsgrad på 97%, fik guldmedalje på den første internationale elektricitetsudstilling i Paris i 1881, men den blev aldrig sat i produktion.

Desværre nåede Lorenz ikke at få megen glæde af sit livslange Carlsberg-stipendium. Han var kun 62 år gammel, da han døde af et hjerteanfald.

Litteratur

- [1] Helge Kragh (2018) *Ludvig Lorenz. A Nineteenth-Century Theoretical Physicist*, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, 280 s.
- [2] Jan W. Thomsen (2010) *A First Course in Optics*, The Niels Bohr Institute, s. 35.



Anja Skaar Jacobsen er ph.d. og dr.scient. i videnskabs-historie og arbejder som fysik- og kemilærer på Københavns VUC. Hun er p.t. også tilknyttet Niels Bohr Arkivet i forbindelse med det internationale forsknings-projekt: History of Interpretations of Quantum Mechanics.

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

SNU har holdt generalforsamling den 8. april 2019. Her redegjorde Dorte Olesen for årets foredrag, der i foråret 2018 havde budt på en foredragsrække over temaet "Hjernen og den menneskelige og kunstige intelligens", mens efterårets tema var "Naturkatastrofer". Alle foredrag havde været velbesøgte med 250 tilhørere i gennemsnit, og mange af foredragene kan genses på YouTube-kanalen "Dansk Videnskab".

Foråret bød også på en afslutning af Lundbeck-fonden-projektet "Meteoritfaldet i Ejby – og hvordan verden blev til", hvor Henning Haack havde været på sidste runde gymnasiebesøg. I alt nåede Henning at tale for over 5.000 elever og lærere på 30 gymnasier, samt at holde offentlige foredrag i Viborg, Aalborg og Birkerød.

SNU påtog sig også i 2018 et mere aktivt ejerskab af den fine H.C. Ørsted Samling, som siden midten af 1980'erne er blevet opbevaret på Teknisk Museum i Helsingør. Denne samling indgår nu i planerne for fejring af 200-året for Ørstedes opdagelse af elektromagnetismen.

SNU har også igangsat et arbejde for at få mulighed for at ansætte en person i selskabets sekretariat, gerne i samarbejde med andre tilsvarende foreninger. Dette arbejde var blevet stærkt aktualiseret af de mange ambitioner om deltagelse i fejringen af 200-året for elektromagnetismens opdagelse. Den nye samarbejdsaftale med Ørsted A/S giver mulighed for en delvis aflønning af en sådan person i SNU i 2019, og dette har givet et betydeligt løft til arbejdet med at færdiggøre den nye hjemmeside (www.naturlaeren.dk), som har været stærkt tiltrængt.

På generalforsamlingen blev Dorte Olesen genvalgt til direktionen med akklamation.

200-året for opdagelsen af elektromagnetismen

SNU har i 2018 som nævnt udvidet sine aktiviteter for at kunne deltage mere aktivt i fejringen af 200-året for opdagelsen af elektromagnetismen, som førte direkte videre til Ørstedes grundlæggelse af Selskabet. SNU er her blevet medlem af Referencegruppen for en samlet fejring af Ørsted 2020, som DTU koordinerer på vegne af Danske Universiteter, og er kommet med i 4 af de i alt 12 signaturprojekter, som DTU søger midler til fra en række danske fonde.

Det drejer sig om:

1) En stor vandreudstilling "Ørsted på ny" i samarbejde med Danmarks Tekniske Museum og DTU, som skal starte i Rundetårn den 1. juli 2020 og derefter flytte videre til Odense og sikkert flere andre steder, for til sidst at ende på Teknisk Museum.

2) En stor offentlig foredragsrække om Ørsted og hans opdagelse, i samarbejde med Videnskabernes Selskab (se oversigten på næste side).

3) Uddeling af Ørsted-medaljen i guld, både i 2019 og 2020 i samarbejde med Videnskabernes Selskab og

sponsoreret af firmaet Ørsted A/S.

4) En eller flere særlige jubilæumspublikationer/e-bøger i 2020, i samarbejde med Videnskabernes Selskab og Syddansk Universitet.

Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab (DFS) afholdt sit årsmøde den 27.–28. maj på Sund & Skov ved Middelfart. Årsmødet var igen i år i det nye format, med fokus på især nyetablerede forskere i den danske fysikverden samt inviterede foredragsholdere. Som altid spændte emnerne vidt, fra kvantitative undersøgelser af studerendes udbytte af eksperimenter i undervisning over THz-nanoskopi af ledningsbærer-dynamik til klimamodeller for exoplaneter.



Figur 1. Poster-session ved DFS's årsmøde. Foto: Kristoffer Haldrup.

Der var derudover paneldebat med Villum- og Novo Nordisk-fondene samt parallelsessioner om både høj- og lavenergetisk plasmafysik såvel som om faststoffysik. NICE (det Nationale Infrastrukturcenter for CERN) fik også afholdt sit årlige møde.

Mødets første dag blev rundet af med den traditionsrige og livlige poster-session, hvor årets vinder af førsteprisen på 2.000 kr. (sponsoreret af DFS, JJ X-ray og Grazow) blev Anine Borger fra Niels Bohr Institutet. Hun vandt med en julekalender-inspireret poster, der introducerede de interesserede til "Spherical harmonics expansion: An excellent tool for analysis of anisotropic small-angle scattering data".

Udover den kontante præmie får vinderen også mulighed for at præsentere sin forskning med en artikel i KVANT.

Årsmødet blev vanen tro rundet af med Generalforsamling i DFS, og bestyrelsens beretning kan findes på selskabets hjemmeside dfs.nbi.dk.

Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab (AS) har afholdt generalforsamling den 27. april 2019. Her blev formanden Majken Christensen genvalgt med stor applaus. Til bestyrelsen

var der genvalg til Julie Søgaard, mens Christina Toldbo og Andreas Kjær Dideriksen er nyvalgte medlemmer.

Referat fra generalforsamlingen ligger på AS's hjemmeside (astronomisk.dk/foreningen/referater).

Efterårets forelæsningsserie har temaet "Måneud-

forskning siden Neil Armstrong gik på Månen for 50 år siden". Der vil bl.a. være foredrag om udforskningen af vores egen Måne, måner i andre solsystemer, måner om andre planeter i vores eget solsystem og meget mere (se nedenfor).

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Jun 2019				
25/6	17.00	Asteroid Day Arrangementet holdes på Geologisk Museum	Line Drube og Henning Haack	SNU
Sep 2019				
2/9	19.15	Et lille skridt frem – og så ikke så meget mere!	Ole J. Knudsen	AS (Kbh)
9/9	19.15	Et lille skridt frem – og så ikke så meget mere!	Ole J. Knudsen	AS (Aarh)
16/9	19.30	Socialt intelligente robotter Efter foredraget uddeles Ørsted-medaljen i sølv	Thomas Bolander	SNU
23/9	19.15	Månens dannelse (på engelsk)	Sanna Alwmark	AS (Kbh)
30/9	19.15	Månens dannelse (på engelsk)	Sanna Alwmark	AS (Aarh)
Okt 2019				
7/10	19.30	Hvad laver vi i GOMspace?	Dan Ulrich	SNU
14/10	19.15	Andre måner i solsystemet (tentativ dato)	Morten Bo Madsen	AS (Kbh)
21/10	19.15	Andre måner i solsystemet	Morten Bo Madsen	AS (Aarh)
28/10	19.30	Foredrag ved guldmedaljemodtager i kemi	NN	SNU
Nov 2019				
11/11	19.15	Månens betydning for Jorden	Ib Lundgaard Rasmussen	AS (Kbh)
18/11	19.15	Månens betydning for Jorden	Ib Lundgaard Rasmussen	AS (Aarh)
18/11	19.30	Første mand på Månen – 50 år efter	Michael Linden-Vørnle	SNU
25/11	19.15	Exomåner	Simon Albrecht	AS (Kbh)
Dec 2019				
2/12	19.15	Exomåner	Simon Albrecht	AS (Aarh)
9/12	19.30	H. C. Ørsted: forskning, almendannelse og æstetik	Dan Charly Christensen	SNU
Jan 2020				
27/1	19.30	H. C. Ørsted-introduktion	Helge Kragh	SNU
Feb 2020				
17/2	19.30	SWARM-satellitter, der måler Jordens magnetfelt	Nils Olsen	SNU
Mar 2020				
9/3	19.30	Ørsteds rejsebreve	Andrew Jackson	SNU
30/3	19.30	Ørsted og farmacihistorien	Poul Kruse	SNU
Apr 2020				
20/4	19.30	De 2000 ord, som Ørsted indførte i det danske sprog	Frans Gregersen	SNU
Sep 2020				
21/9	19.30	Hvad er magnetisme, og hvad er elektromagnetisme	Steen H. Hansen	SNU
Okt 2020				
19/10	19.30	Foredrag ved guldmedaljemodtager i fysik (tentativt) Alternativt "Ørsted og lyset"	NN Anja C. Andersen	SNU SNU
Nov 2020				
2/11	19.30	Om magnetometer	Chris Finlay	SNU
23/11	19.30	Ørsteds erkendelsesteori og metafysiske erindringer	Anja Skaar Jacobsen	SNU
Dec 2020				
14/12	19.30	Ørsted, Tesla og Faraday	Hans Buhl	SNU

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 1, H. C. Ørsted Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (astronomisk.dk).
AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Institut, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, 8000 Aarhus C.
SNU: Aud. 1, H. C. Ørsted Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturlaeren.dk, facebook.com/SNU1824).
 Bemærk, at Asteroid Day holdes på Geologisk Museum.

H. C. Ørsted-medalje til grundskolelærer

Af Jens Olaf Pepke Pedersen, KVANT



Figur 1. Jeannette Overgaard Tejlmann Madsen fra Asgård Skole med Ørsted-medaljen, som blev overrakt af Dorte Olesen, SNU (th.), og Ole Stahl, Haldor Topsøe (tv.).

Selskabet for Naturlærers Udbredelse (SNU) har nu også sat fokus på den vigtige formidling i grundskolen ved at uddele en Ørsted-medalje i bronze til en inspirerende grundskolelærer inden for SNU's fagkreds. Den første medalje blev uddelt den 6. maj 2019 til lærer Jeannette Overgaard Tejlmann Madsen, der i en årrække har undervist på Asgård Skole i Køge. Firmaet Haldor Topsøe har støttet initiativet ved at give et medfølgende rejselegat på 50.000 kr., så der er gode muligheder for at komme til fagligt inspirerende arrangementer i både ind- og udland.

SNU's præsident Dorte Olesen motiverede valget med bl.a. at citere fra indstillingen, som er skrevet af Jeanette Overgaard Tejlmann Madsens nuværende 9. klasse, som hun har haft siden 6. klasse:

“Hendes undervisning er livlig og spændende. Der er både det teoretiske, altså det faglige, på et niveau alt efter, hvor dybt inde i emnet vi er. Der er selvfølgelig også det mere praktiske. Vi laver mange forsøg i fysik-lokalet, som understøtter den faglige viden, vi har fået fra det boglige. Det kunne for eksempel være, at vi lige har læst og fået noget viden omkring galvanisering og dermed metaller, derefter praktiserede vi det, vi har læst, ved rent faktisk at galvanisere. Ofte i fysik/kemistimen får vi uddelt nogle forskellige forsøg,

som vi hver især skal afprøve og derefter fremlægge, ikke kun konklusionen af det, men også hele processen af det. Det gør både, at vi øger samarbejdet mellem os i klassen, og at vi ved at fremlægge vores konklusioner og påvisninger for hinanden bliver klogere. Jeannette guider os gennem vores forsøg og påvisninger ved at stille kritiske spørgsmål, som øger vores faglige niveau.”

Dorte Olesen tilføjede, at medaljemodtageren “samtidig har sat den faglige standard højt, og det har bl.a. vist sig ved, at hendes 9. klasse i 2018 fik Køge Kommunes højeste gennemsnit. Hendes faglige vifte spænder vidt, over fysik, kemi, astronomi, biologi og geografi, og hendes elever oplever hende lige engageret på alle disse områder. Hun udvider hele tiden sin faglige horisont ved at deltage i faglige arrangementer, som en nylig tur til atomfysikernes store eksperimentelle facilitet i Geneve, CERN”.

I sin tale til medaljemodtageren sagde Ole Stahl fra Haldor Topsøe, at firmaet glæder sig over at være med til at anerkende hendes fantastiske indsats med formidlingen af naturvidenskab: “For du formidler naturvidenskab, så den er interessant og nærværende for dine elever. Noget som er meget vigtigt – da mange af de unge har en opfattelse af, at naturvidenskab er meget svært og næsten uopnåeligt at kunne lære – og i det hele taget at kunne forstå. Mange har også rigtig svært ved at se, hvad det kan bruges til. Men der gør du jo det helt rigtige – nemlig at koble det teoretiske med det praktiske, så man ved selvsyn kan se, hvordan naturvidenskabelige teorier og metoder kan anvendes i praksis. På denne måde er jeg også sikker på, at du pirrer både nysgerrigheden og en undren hos dine elever – og dermed også lysten til at lære mere.

Der er jo sikkert mange af de elever, som du underviser eller har undervist, der skal være med til gøre en forskel lokalt og globalt med naturvidenskaben i fremtiden. De vil måske komme til at gøre vores verden til et bedre sted gennem naturvidenskaben. Du og dine kolleger udfører derfor et enormt vigtigt stykke formidlingsarbejde, hver evig eneste gang I underviser i naturvidenskabelige fag på skolerne. Og det sætter vi stor pris på i Haldor Topsøe”.