

KVANT

Oktober 2020 3

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 31. årgang

- 
- JAGTEN PÅ ANTITYNGDEKRAFT •
 - ØRSTEDSATELLITTEN • ØRSTED OG ENHEDERNE •
 - NICER HAR MÅLT EN NEUTRONSTJERNES DIAMETER •
 - ØRSTEDMEDALJER FOR FREMRAGENDE FORMIDLING •
 - BREDDEOPGAVE • KVANT-NYHEDER • AKTUELLE BØGER •
 - ER TYNGDEKRAFTEN ENDELIG BLEVET KVANTEMEKANISK? •
 - BEREGNING AF JORDENS TEMPERATURSTIGNING VED EN FORDOBLING AF CO₂ •

Løssalgspris: 50 kr.

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](https://www.facebook.com/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

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 Søgård (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 annon-
cer til redaktøren på: kvant@kvant.dk

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 4-2020 udkommer ca. 15. december

Nr. 1-2021 udkommer ca. 15. marts

Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Ørstedssatellitten

Flemming Hansen 3

Ørsted og enhederne

Jens Ramskov 10

Jagten på antityngdekraft og forklaringen på vores eksistens

Peter Granum 15

Nyt fra Astronomisk Selskab 18

NICER har målt en neutronstjernes diameter

Henning Heiselberg 19

Beregning af Jordens middeltemperaturstigning ved en fordobling af
CO₂-indholdet i atmosfæren

*Torben Lund, Emil Storr-Hansen, Victor Valdemar Eierslev Chri-
stensen, Caspar Helge Ulla Nilsson, Daniel Vestmar Norén og Sebastian
Helboe Empacher* 21

Nyt fra SNU 26

“Spooky action at a distance”: Er tyngdekraften endelig blevet kvante-
mekanisk?

Daniel Skipper Rasmussen 27

Hvilemasse – breddeopgave 88

Jens Højgaard Jensen 31

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson 33

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen 35

Kommende foredrag 35

Ørstedmedaljer for fremragende formidling Bagsiden

Billedet på forsiden forestiller Danmarks første sa-
tellit, Ørstedssatellitten, der blev opsendt for 21 år
siden. Ørsted er stadig i live og kan måske bidrage
med yderligere videnskabelige data (grafik af Jan
Erik Rasmussen, DTU Space). Læs mere i artiklen af
Flemming Hansen, side 3.



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).

Ørstedsatellitten

Flemming Hansen, RadioLab Consulting

Ørstedsatellitten, Danmarks første satellit, blev skabt i et enestående, gensidigt inspirerende samarbejde mellem danske rumforskere og dansk rumindustri, og gav Danmark en førerposition inden for forskning i Jordens magnetfelt. Denne position blev videreført med Swarm-satellitterne. Nu 21 år efter opsendelsen er Ørstedsatellitten stadig i live og kan måske bidrage med yderligere videnskabelige data.

Danmark som rumnation

Omkring 1990 begyndte forskere ved Niels Bohr Institutet, Danmarks Meteorologiske Institut (DMI), Dansk Rumforskningsinstitut (DSRI – nu en del af DTU Space) og Danmarks Tekniske Universitet (DTU) samt ledelse og ingeniører hos Computer Resources International (CRI — nu en del af Terma A/S) at udforme idéerne til en dansk videnskabelig mikrosatellit.

DSRI havde været engageret i udvikling af bygning af satellitinstrumenter allerede få år efter rumalderens begyndelse, og dansk rumindustri tog sin spæde begyndelse i første halvdel af 1970'erne. Måling af og forskning i Jordens magnetfelt og magnetosfæren havde i 100 år været forankret på Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) og var derfor en dansk styrkeposition. Erfaringsgrundlaget til at bygge en hel satellit og ikke kun små ruminstrumenter var derfor til stede. Derfor foreslog man en mission til kortlægning af Jordens magnetfelt, hvilket ikke var gjort siden NASA's MagSat i 1979–80.

I december 1991 fik man af Forskningsministeriets Rumudvalg bevilget 1,3 mio. kr. til et forstudie, som i oktober 1992 mundede ud i en anbefaling til at fortsætte projektet. Det faldt helt naturligt at navngive satellitten efter H.C. Ørsted.

Et "kludetæppe" af bevillinger fra Erhvervs-, Forsknings- og Trafikministerierne blev stykket sammen i juni 1993, og med egenfinansieringsbidrag fra de implicerede forskningsinstitutter og industrivirksomheder og bidrag fra European Space Agency (ESA), det franske rumagentur CNES, det tyske rumagentur DLR og endelig med en opsendelse og et instrument sponsoreret af NASA, faldt det hele på plads, og der var dækning for udviklingsomkostningerne [1–5].

Ørsted ville blive sendt op med en DELTA-II-raket fra Vandenberg-raketbasen i Californien i september 1995 sammen med ARGOS-satellitten fra U.S. Air Force og en anden ekstrapassager, SUNSAT, fra det sydafrikanske Stellenbosch University.

Der var uhyggeligt kort tid til september 1995, og alle sejl blev sat for at kunne nå i mål. Heldigvis for Ørsted blev den amerikanske satellit forsinket, først til 1996, hvor Ørsted egentlig var klar til opsendelse, men derefter i flere omgange indtil slutningen af 1998, hvor ARGOS endelig var klar.

Opsendelse med komplikationer

Tirsdag den 23. februar 1999 kl. 11:29:55 markerede en milepæl for dansk rumforskning, dansk rumindustri og

Ørstedteamet. Klokken var 02:29:55 californisk tid, da DELTA-II-raketens motorer tændtes og oplyste nattemørket, mens den løftede tre satellitter i kredsløb om Jorden. 100 minutter efter "lift-off" blev Ørsted sat fri og kunne begynde sin mission.

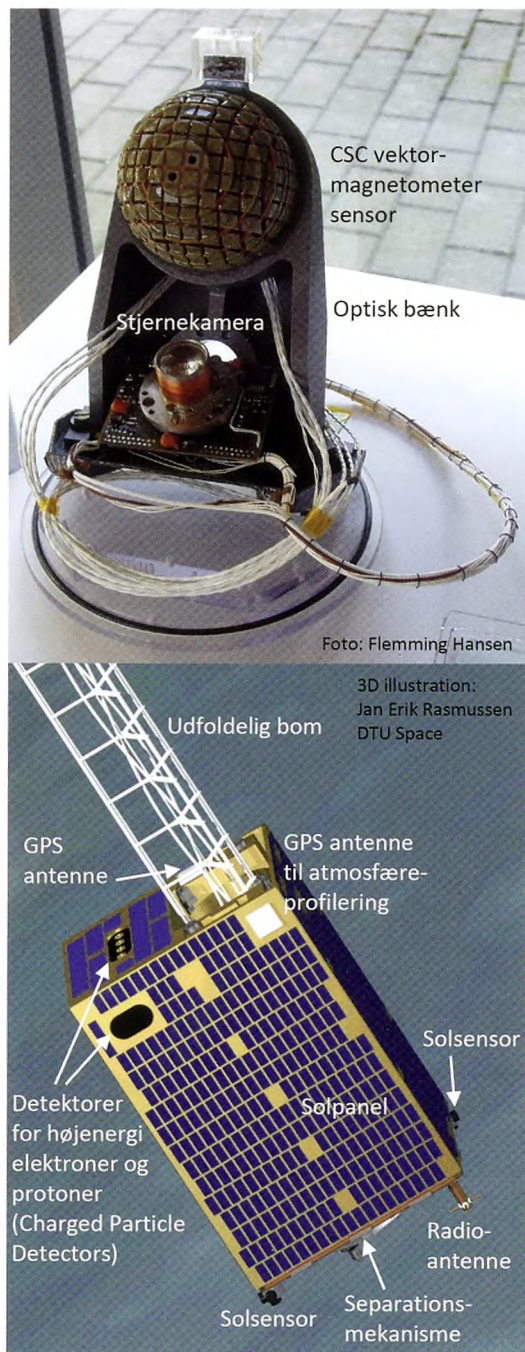
Forud for denne succes gik næsten seks uger med ti forgæves opsendelsesforsøg, hvor nedtællingen blev afbrudt på grund af fejltilstande i raketten, som opstod under nedtællingen, eller vejrliget, som ændrede sig til det værre. Én af gangene var man nået så langt i nedtællingen, at man havde antændt de såkaldte "vernier engines", små raketmotorer, som kontrollerer rakettenes rulning under opstigningen, hvorefter man konstaterede en fejl og måtte afbryde og slukke motorerne igen, lige før hovedmotorerne skulle tændes. For os, der bed negle under hvert nedtællingsforsøg, blev begrebet "launch scrub" (annulleret eller skrottet opsendelse) en del af dagligsproget. De mange udsættelser gav også anledning til en del satiriske kommentarer i medierne.

Ørstedsatellittens anatomi

Inden historien foldes ud, skal Ørstedsatellittens konstruktion lige beskrives. Se illustration i figur 1 og på forsidebilledet. Med en masse på 61 kg og en størrelse som et par rammer øl: 34 × 45 × 72 cm var Ørsted absolut blandt de allermindste videnskabelige satellitter i 1999, men faktisk rummer den fire videnskabelige instrumenter:

- Compact Spherical Coil (CSC)-vektormagnetometer, opfundet og bygget af forskere på DTU og DSRI.
- Overhauser-skalarmagnetometret (OVH), som måler styrken af Jordens magnetfelt uanset magnetfeltets retning. OVH-magnetometret er udviklet og bygget af det franske institut LETI og betalt af det franske rumagentur CNES. OVH-magnetometret er langtidstabilit og bruges til at kalibrere CSC-vektormagnetometrets målinger, og bruges som videnskabeligt instrument i perioder, hvor stjerne-kameraet er faldet ud.
- Charged Particle Detectors (CPD) er detektorer for højenergetiske elektroner og protoner, som findes i van Allen-strålingsbælterne rundt om Jorden, og som har stor betydning for levetiden af elektronik i kredsløb om Jorden. CPD er bygget af forskere på DMI.
- TurboRogue-GPS-modtageren er udviklet af forskere ved NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) specielt til at måle profiler af temperatur og vandindhold i atmosfæren ved at observere GPS-satellitterne, når de går ned mod horisonten set fra Ørstedes kredsløb.

Stjernekameraet (Star Imager – SIM), ligeledes opfundet og bygget af forskere på DTU, er for så vidt ikke et videnskabeligt instrument, men er nødvendigt for præcist at bestemme vektormagnetometrets orientering, så den tredimensionelle måling kan placeres korrekt i rummet. Det samme gælder GPS-modtagerne, som giver satellittens præcise position i rummet for hver magnetfeltmåling.



Figur 1. Ørstedsatellitten.

For at opnå den høje nøjagtighed af kortlægningen af Jordens magnetfelt, var det nødvendigt at placere magnetometrene så langt fra satellitkroppen som muligt. Derfor blev der af ingeniørerne på Per Udsen Aircraft Industries i Grenå (nu en del af Terma A/S) udviklet en 8 meter lang udfoldelig bom bestående udelukkende af umagnetiske materialer (glasfiber, epoxy og plastic) – se forsidebilledet. Yderst på bommen sid-

der Overhauser-skalarmagnetometret, og 2 meter derunder sidder gondolen med CSC-vektormagnetometret og stjernekameraet. Dertil kommer, at der under satellittens konstruktion omhyggeligt blev taget vare på magnetisk renhed af alle elektroniske kredsløb, ledningsføring og materialer, så magnetiske forstyrrelser fra satellitkroppens systemer blev holdt på et absolut minimum.

En detaljeret beskrivelse af Ørstedmissionen findes i ref. [1].

Panik-telekonference

Efter den nervepirrende opsendelse lod Ørsted høre fra sig allerede under andet omløb, hvor den passerede over Danmark omkring kl. ca. 14:30, og alt syntes OK om bord. Sådan gik det også de følgende par dage, men ved den forventede passage fredag morgen, der skulle begynde kl. 04:16, forblev Ørsted tavs. Hurtigt bredte tvivlen sig: Havde vi tabt satellitten, var der noget galt med radioen om bord, var computerne gået ned og ikke automatisk genstartet, som de var bygget til ... og utallige andre spekulationer. I løbet af lørdagen begyndte panikken at snige sig ind. Min familie og jeg var ved at pakke til skiferie i La Plagne i de franske alper. Vi ankom dertil stærkt forsinket ved 01-02-tiden natten til søndag, og mens jeg slæbte kufferter op til vores lejlighed med den ene hånd, var der med mobilen i den anden hånd krise-telekonference om, hvad vi skulle gøre.

Jeg husker ikke, hvad konklusionen blev, men efter nogle dage fandt man ud af, at der var en trådningsfejl i Ørstedes ur-kredsløb, som bevirkede, at det nulstillede hvert ca. 2½ døgn. Hvis der stod kommandoer i kø til eksekvering, når det nulstillede, gik der kuk i proceduren, og Ørsted kunne ende i en udefineret tilstand. Kuren var nede på jorden at holde nøje kontrol med urets visning og undlade at have kommandoer i kø på det kritiske tidspunkt.

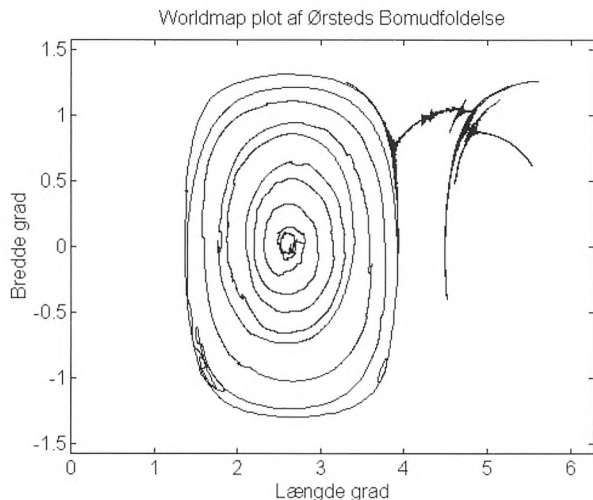
Udfoldelse af bommen

Herefter gik det strygende med opstartsfasen, at checke at alle delsystemer og instrumenter fungerede og gøre klar til udfoldningen af den 8 meter lange bom. Det vil sige med hensyn til magnetometre og stjernekamera, kunne man kun konstatere, at de var i live, men ikke lave målinger, da de sammen med bommen var stuvet i en cylinder i Ørstedes krop.

Den 14. marts kl. 13:05 startede bomudfoldningen, mens Ørsted passerede ækvator for nordgående på vej mod Danmark. 12 minutter senere var den manøvre overstået med succes. Ørsted lå under bomudfoldningen vandret, hvorefter den rejstes til lodret stilling med kroppen nederst, så radioantennerne vendte mod Jorden. Denne stilling er stabil og kaldes tyngdegradient-stabilisering, se faktaboks med forklaring.

Selve bomudfoldelsen blev overvåget ved hjælp af CSC-vektormagnetometret, og dets målinger er vist på figur 2. Under udfoldelsen roterer cylindren med stjernekamera og CSC-vektormagnetometer. Selv om retningen af Jordens magnetfelt med tilnærmelse er konstant under processen, kommer målingerne i plottet

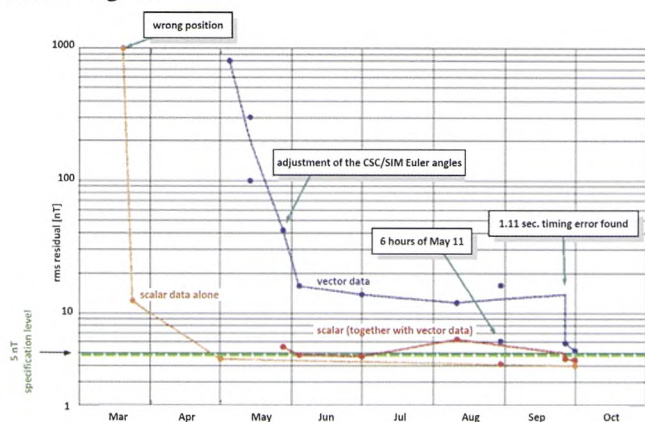
til at ligne en spiral. Efter ca. 10 omdrejninger er bommen udfoldet, og de "spjæt", man ser i kurven yderst, skyldes, at det giver et sæt i bommen i det øjeblik, den retter sig helt ud, indtil den falder til ro.



Figur 2. CSC-magnetometrets "spiral" under udfoldningen.

Ørstedes pirouetter – datakvalitet

Kvalerne var endnu ikke overstået. Ørstedes attitudekontrollsystem havde problemer med at få satellitten til at lade være med at rotere omkring sin akse, og undgå at solen skinnede ind i stjerne kameraet. Efter nogen tid lykkedes det at få attitudekontrollsystemet til at fungere som ønsket og fastholde Ørstedes orientering i rummet. Der var dog andre kvaler med kvaliteten af de magnetfeltsdata, der kom ned. Oprindeligt havde man regnet med, at to måneder til opstartsfasen, "commissioning phase", var nok til at få alle systemer til at makke ret og få magnetfeltsdata med den forventede kvalitet. Sådan gik det ikke. Det tog syv måneder. Udviklingen i målefejlene i magnetfeltsdata er vist i figur 3. Først med udgangen af september 1999 var alt på plads, alle fejl forstået og afhjulpnet/omgået, og datakvaliteten som ønsket og forudset.



Figur 3. Udviklingen i fejlene i Ørstedes magnetfeltsdata under "commissioning phase" i 1999.

Med en design-levetid på 14 måneder for Ørsted var der nu kun halvdelen tilbage til at nedtage videnskabelige data, men heldigvis viste Ørsted sig særdeles sejlivet, så den videnskabelige ambition med kortlægning af Jordens magnetfelt blev opfyldt langt ud over forventningerne.

Ørstedes attitudekontrollsystem fungerer ved, at der er indlagt tre magnetpoler langs perimeteren af hver af kroppens tre sider, så der er en X-, en Y- og en Z-spole. Styringen af satellittens attitude (orientering i rummet) kan ses som en omvendt udgave af H.C. Ørstedes forsøg i 1820. Han fik en kompasnål til at dreje sig ved at påvirke den med et magnetfelt, skabt ved at sætte strøm på en ledning i nærheden af kompasset. Ved at styre strømmene i X-, Y- og Z-spolerne kan man lave en "kompasnål" der peger i en vilkårlig retning i forhold til satellitkroppen. Denne "kompasnål" vil så rette sig ind efter Jordens magnetfelt, der hvor satellitten befinder sig, og på denne måde kan man styre og stabilisere satellittens attitude.

International Geomagnetic Reference Field (IGRF) Model

Siden 1965 har International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) hvert femte år udgivet en matematisk model af Jordens magnetfelt, International Geomagnetic Reference Field (IGRF), [6], og den stod til opdatering i 2000. Ambitionen hos Ørstedforskerne var naturligvis, at årgang 2000 af IGRF skulle baseres på Ørsteddata, og i et kapløb med tiden lykkedes det. Ørstedmodellen af Jordens magnetfelt blev indsendt til IAGA inden tidsfristen, og IGRF2000, gældende fra 1. januar 2000, er for langt størstedelen produceret ud fra Ørsteddata, og repræsenterede et kvantespring i nøjagtighed. Siden 2000 er alle IGRF-modeller blevet til med Ørsteddata og sidenhen med data fra dens efterfølgere: Swarm-satellitterne.

Ørstedes 20 års fødselsdag -- død eller levende?

I sommeren 2018, da Ørstedesatellittens 20-års fødselsdag i februar 2019 nærmede sig, begyndte jeg at spekulere på, om der mon stadig var liv i Ørsted. Uden en brugbar jordstation, måtte der tænkes kreativt.

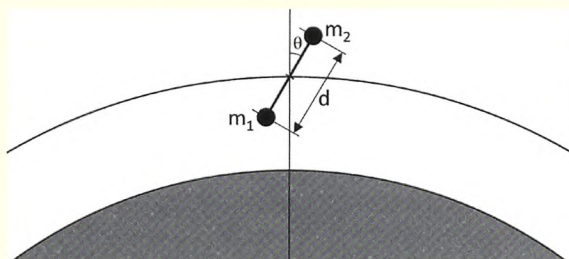
Jeg byggede derfor en såkaldt helix-antenne, som består af en cirkulær plade (reflektor) og en spiralsnoet kobbertråd, der peger ud fra reflektorpladen, se figur 4 og ref. [14]. Det er relativt enkelt at fremstille den ud fra materialer, der kan købes i ethvert byggemarked, undtagen konnektoren, som fås hos firmaer, der sælger elektronikkomponenter.

Da Ørstedjordstationen blev udviklet, krævede det mange kilogram elektronik og mange måneders udviklingsarbejde at få det hele til at spille. I vore dage består en satellitmodtager, foruden en god antenne, af en lavstøjsforstærker, der sikrer et godt signal-støjforhold af det modtagne signal. Denne efterfølges af et såkaldt Software Defined Radio (SDR)-modul og en computer, der kan være en almindelig Windows-PC. Lavstøjsforstærkeren koster ca. 1.000 kr, SDR-modulet cirka det samme og dækker frekvensområdet 10–3500 MHz, hvilket er mere end rigeligt til en Ørstedjordstation. Resten af jordstationen er software, der foretager dataprocesseringen for at demodulere, dekode og udpakke data.

Den 30. august 2018 lykkedes det at fange signalet fra Ørsted på dens sendefrekvens 2215 MHz, men signalet var svagere end beregnet, og derfor var systemet

Tyngdegradientstabilisering

Ørstedssatellitten kan holde sig oprejst, dvs. med bommen i lodret stilling, pegende væk fra Jorden ved hjælp af tyngdegradientstabilisering. Satellitten består simplificeret set af to klumper m_1 og m_2 med en stang imellem med længden d . Kroppen er den ene klump og de to instrumenter på bommen den anden. Den simplificerede model er vist på figuren, og vi nøjes med at betragte en cirkulær bane, selv om den elliptiske bane er det generelle tilfælde.



Satellitbanen bestemmes af dens tyngdepunkt. For en cirkulær bane er Jordens tyngdekraft altid i perfekt balance med centrifugalkraften. Hastigheden i banen er bestemt af:

$$v = \sqrt{\frac{\mu}{r}} \quad (1)$$

Hvor μ er den geocentriske gravitationskonstant, $\mu = 3,986004418 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$, og r er banens radius.

Den geocentriske gravitationskonstant μ er produktet af Jordens masse m_e og den universelle gravitationskonstant G , som forekommer i Newtons gravitationslov. Hver for sig er de kun kendte med 5-6 betydende cifre, mens produktet er bestemt uhyre præcist med 10 betydende cifre.

Af formelen ser man, at banehastigheden aftager med baneradius. Således vil den yderste klump i den simplificerede Ørstedmodel have for meget fart på og den inderste klump for lidt fart på i forhold til tyngdepunktets bane. Derfor vil den yderste klump have "overskud" af centrifugalkraft og den inderste klump et "underskud". Er stangen ikke lodret, vil der komme et drejningsmoment, som prøver at rette satellitten op i lodret stilling.

Hertil kommer, at den yderste klump påvirkes af en lidt mindre tyngdekraft end den inderste, hvilket også virker til at rette satellitten op. Under påvirkning af de to kræfter vil der være et samlet træk i stangen, og dette kan i andre sammenhænge udnyttes således, at man faktisk kan nøjes med en line mellem de to klumper.

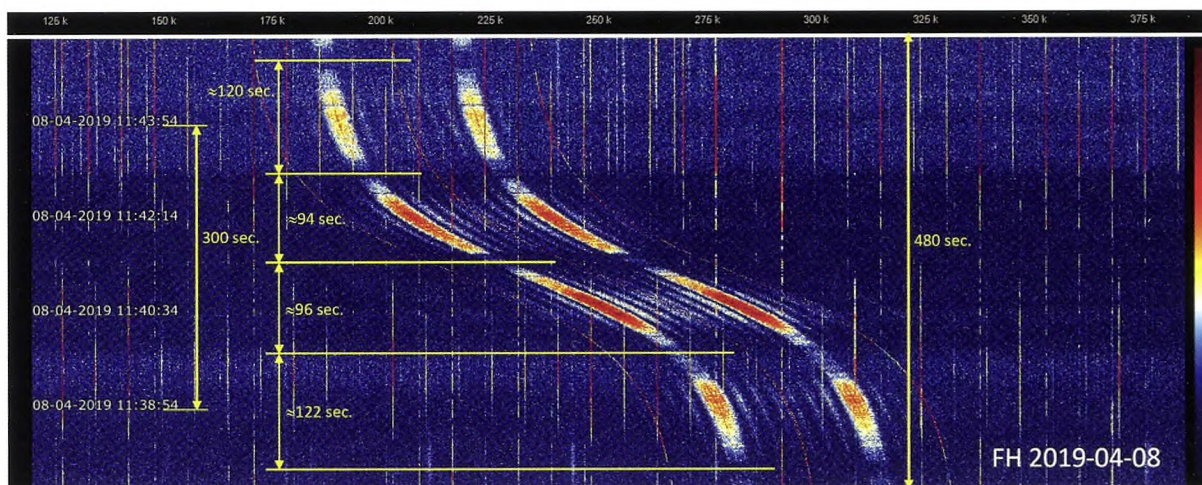
På denne måde virker Ørsted som et pendul, der også vil rette sig op til lodret stilling, hvis det slippes løs i en vinkel væk fra lodret, men der er en afgørende forskel: Pendulet oplever sin største "restoring force", den kraft, der prøver at få det tilbage til lodret, når det er i vandret stilling. Med vores satellitmodel i vandret stilling er der ingen "restoring force". Derfor er det principielt også forkert at tale om en pendulbevægelse af Ørsted, da kræfterne ikke virker på samme måde. På engelsk kalder man satellittens bevægelser under tyngdegradientstabilisering for "librations". En detaljeret analyse af tyngdegradientstabilisering findes i ref. [13].

ikke følsomt nok til at vise, om der også var modulation på bærebølgen og dermed data, der kunne afkodes. Yderligere forsøg i efteråret 2018 under passage, hvor Ørsted gik gennem Zenith, viste, at forløbet af Dopplervariationen af signalfrekvensen nøje svarede til det forventede, så der var ingen tvivl om at det var Ørsted jeg modtog, og at den var i live.



Figur 4. Modtagning af Ørsted signaler med håndholdt helix-antenne (privatfoto).

I foråret 2019 fik jeg hjælp af Jesper Abildgaard Larsen, Satlab A/S i Aalborg, der på taget af NOVI Science Park, hvor de bor, havde en nyopstillet 2,4 meter parabol, som kunne modtage Ørstedes frekvens. Den 8. marts 2019 nedtog de data fra en zenithpassage, og dels gav den datapakker, som kan udpakkes, når jeg får den gamle jordstationssoftware til at fungere, og dels bekræftede den, hvad jeg fik mistanke om under modtagelse med den håndholdte antenne: Signalstyrken varierer periodisk.



Figur 5. Signalstyrkevariationer over 8 minutter under zenithpassage den 8. marts 2019.

Gyngerne og karrusellerne

Hvor Ørsted i starten af sit liv var lidt for glad for karruselture, ser det nu ud til, at den foretrækker gyngerne. Figur 5 viser signalstyrkevariationerne. Diagrammet er et såkaldt “waterfall plot”. X-aksen repræsenterer frekvensen, og man skal forestille sig en papirbane, der kører nedad, og som der sprøjtes farve på alt efter signalstyrken ved en given frekvens: Blå for svagt eller intet signal og via hvidt, gult og over i rødt alt efter signalstyrken. De to farvede spor skyldes Ørstedssignalets modulationsform, som frembringer to sidebånd. Kigger man godt efter, kan man midt imellem de to sidebånd se bærebølgen som en tynd rød streg. Dopplerforløbet af signalfrekvensen passer igen fuldstændigt med det forudberegnete, men det er tydeligt, at signalstyrken varierer periodisk.

En tyngdegradientstabiliseret satellit som Ørsted har som nævnt visse ligheder med et pendul. Dette kunne forklare variationerne, hvis Ørsted var kommet i svingninger, men perioderne i plottet har ikke samme varighed: De to midterste er ca. 95 sek. og de to yderste ca. 120 sek. Et pendul har en konstant periode, så pendulforklaringen kan ikke stå alene. Jeg har foretaget en simulering af de geometriske forhold mellem jordstation og satellit, som ændrer sig konstant under passagen, og en Ørsted, der gynger med en amplitude på omkring 35° og en periode på 122 sek., og den kan forklare den tilsyneladende ændring i periodetiden – men det kræver, at Ørsted “står på hovedet” med bommen pegende nedad! Der er ikke noget fysisk i vejen for dette, men det er højst bizart. Det kan også forklare, hvorfor jeg ikke fik så kraftigt signal som beregnet på den håndholdte antenne, hvis Ørstedes antenne peger væk fra Jorden.

Hvis vi igen kan få kontakt med Ørsted og nedtage attitudedata fra solsensorerne (såfremt de stadig virker) kan vi verificere, om min analyse er korrekt. En anden mulighed er at observere Ørsted med et teleskop under en passage, hvor der er nat hernede og sol på Ørsted, og under geometriske forhold, hvorunder Ørsted ses delvist fra siden. Da Ørstedes 8 meter bom ses under en vinkel på et par busekunder, vil det kræve et teleskop

med en apertur på mindst 25 cm og helst det dobbelte, og som automatisk kan tracke Ørsted.

Ørsted som et smukt stjernesud – ikke i vores levetid

I en artikel i Ingeniøren i den 8. februar 2010, [7], falder udtalelsen: “Når den [Ørsted] om 25 til 30 år brænder op i atmosfæren, vil det ligne et stjernesud”. Det er 10 år siden nu, og det holder ikke. I Ørstedes banehøjde med apogæum (det fjerneste punkt) 831 km, perigæum (det nærmeste punkt) 632 km, er der vakuum i jordisk forstand, men der er alligevel en lille bitte smule luft, som bremser Ørsted, så den langsomt spiraliserer indad og en dag brænder op som et stjernesud.

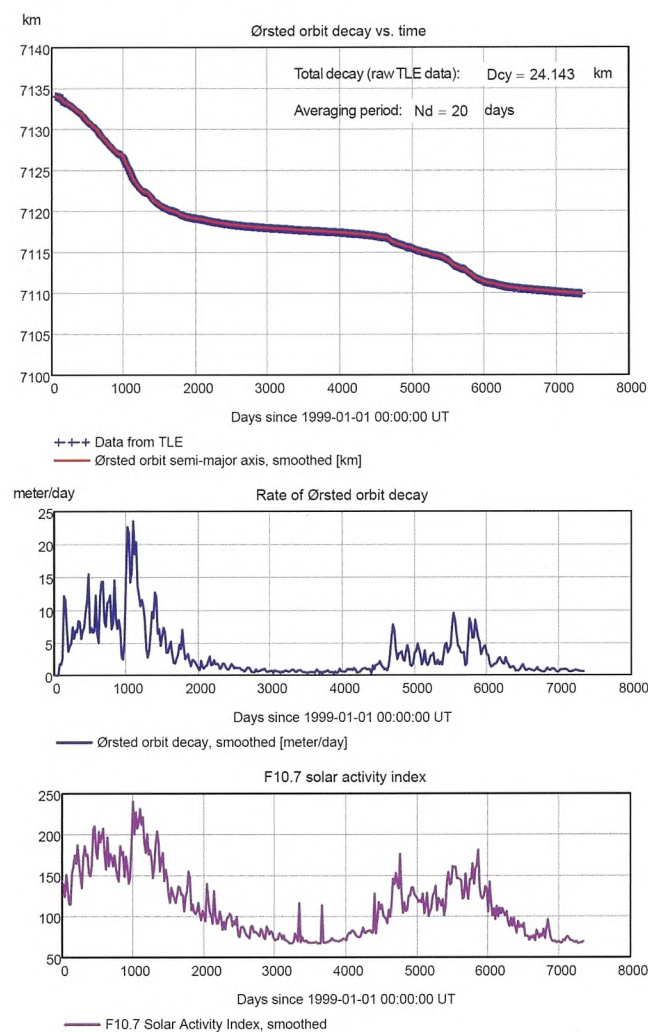
Tætheden af atmosfæren i satellithøjder varierer med solaktiviteten over den 11-årige solpletcyklus. Når solen er meget aktiv og har mange solpletter, tilføres der energi til den øverste atmosfære, som svulmer op og giver højere tæthed i en given højde. Dermed taber satellitterne hurtigere højde end under solpletminimum. Ørsted blev opsendt ca. 2½ år inde i solcyklus 23 og mærkede ret hurtigt dette i form af højdetab. For at få en idé om tidspunktet for Ørstedes endeligt, lavede jeg op til 20-års fødselsdagen en analyse af 20 års banedata, som er vist i figur 6.

Den øverste graf viser udviklingen i ellipsebanens halve storakse (semi-major axis). Det er tydeligt, at højdetabet ikke er konstant. Midterste graf viser højdetabet pr. dag. Den nederste graf, som viser F10.7-solaktivitetsindekset, en stedfortræder (proxy) for solplettallet, indikerer, at højdetabet er kraftigt korreleret med solaktiviteten. Solcyklus 23 var kraftigere end solcyklus 24, som vi for nyligt har lagt bag os, og højdetabet tilsvarende kraftigere i solcyklus 23 end i 24.

Over Ørstedes første 20 år i kredsløb og næsten to solcykler er højdetabet 24 km. Siden den 12. februar 2019, hvor analysen slutter, til primo august 2020, har Ørsted tabt 282 m højde. Når Ørsted kommer ned i omkring 300 km højde, går det rigtigt stærkt, og den har så kun uger eller få måneder tilbage at leve i.

Ørstedes middelbanehøjde på grundlag af den halve storakse er i dag ca. 731 km. Der er således ca. 430

km for nedadgående, til banehøjden bliver kritisk. Med ca. 12 km højdetab pr solcyklus, vil der gå ca. 36 solcykler eller 396 år, før vi når dertil. Dette er dog stærkt simplificeret. Jo længere Ørsted kommer ned, jo hurtigere går højdetabet, så det er en accelererende effekt. Skulle det så kun tage halvdelen af de 396 år, bliver det under alle omstændigheder ikke i dette århundrede, at vi kommer til at se Ørsted som et stjernesud. Der findes endnu ikke modeller, som med sikkerhed kan forudsige solaktiviteten i de kommende cykler, så den er en stor ubekendt i en simulering af højdetabet og tidspunktet for en satellits endeligt.



Figur 6. Ørsteds højdetab fra opsendelsen frem til 12. februar 2019.

Ørsteds bedrifter og efterfølger

Ørsted blev i december 2000 af medlemmerne af Ingeniørforeningen i Danmark (IDA) kåret som det 20. århundredes fjerdestørste ingeniørbedrift [8]. Det er ganske godt gået af en mikrosatellit, og dens betydning for Danmark som rumnation kan næppe overdrives. Der skal ikke her bruges plads på at opliste alt, hvad der er kommet ud af Ørstedmissionen, men det er på sin plads at nævne, at Ørstedteamet også kom til at sætte scenen for dens efterfølger. Allerede i december 1998, nogle måneder inden opsendelsen af Ørsted, indleverede et internationalt konsortium under ledelse af Danmarks Rumcenter (tidligere DSRI og nu en del af DTU Space)

et forslag til ESA om Ørsteds efterfølger: Swarm med tre satellitter. De to satellitter flyver side om side i 450 km højde og den tredje i et andet baneplan og 530 km højde, og alle i polært kredsløb. Efter flere udvælgelsesrunder i ESA blev satellitterne designet og bygget, og nu med næste generations vektormagnetometre og stjernekameraer fra DTU Space [9–12]. Satellitterne blev opsendt den 22. november 2013 med en Rockot-løfteraket fra Plesetsk Kosmodromen ca. 800 km nord for Moskva.

Ørsted fungerede stadig efter, at Swarm-satellitterne kom i drift, således at der var et langt overlap i magnetfeltdata fra de to missioner indtil maj 2015, hvor de sidste Ørsteddata blev nedtaget. Dette sikrede kontinuiteten i tidsserierne.

Uddrag af H.C. Ørsteds tale ved indvielsen af Polyteknisk Læreanstalt 5. nov. 1829

(Overskrifterne er forfatterens påfund)

Forskningens betydning for erhvervslivet

I de fleste tilfælde er det videnskabsmanden, der skal gøre de store og vidtudseende opfindelser for næringsbrugeren; men denne må have videnskabelig indsigt for at forstå disse opfindelser og påskønne deres værdi; og han må selv gøre en mængde små efteropfindelser.

Hvis man vil være på forkant, må man selv forske

Aldrig vil et folk kunne nå et andet ved blot efterligninger, skal det stå ved siden af dem, som forbedrer næringsvejene ved opfindelser, må det selv opfinde, ellers bliver det altid en menneskealder tilbage.

Videnssamfundet

De mænd, som udgår herfra, vil hver på sit sted i fædrelandet, selv om de ikke lægger an derpå, danne nye udgangspunkter for nyttige kundskabs udbredelse. Nationalånden vil efterhånden få en mere praktisk retning. Opfindelsesånden vil hæve sig, fædrelandets naturfrembringelser vil bedre udnyttes, fremmede opdagelser hurtigere komme i omløb. Derved vil velstanden mere og mere blomstre, fædrelandskærligheden og borgersindet næres og vokse.

Fremtiden for Ørsted

Efter at Ørsted i 2015 blev overladt til sig selv i stærkt alderdomssvækket tilstand, er spørgsmålet, om den nu bare er et stykke rumskrot. Stjernekameraet ophørte med at fungere flere år tidligere på grund af strålingsskader fra soludbrud og højenergetiske protoner og elektroner i van Allen-bælterne. CSC-vektormagnetometret var også delvist defekt, men Overhauser-skalarmagnetometret fungerede og ligeledes Charged Particle Detectors. De første forsøg med modtagelse af Ørsteds signal viser, at den er aktiv, men da vi endnu ikke har kunnet pakke de modtagne data ud, kender vi endnu ikke til fulde Ørsteds helbredstilstand.

Jordstationen på DMI's tag fejlede i 2016 på grund af mekanisk svigt i de motorer, der drejer parabolantennen og henstod derefter uvirksom. I februar 2019 overtog DTU Space jordstationen minus antennen, da DMI skulle flytte til en ny adresse på Østerbro i København. Al sender/modtager-elektronikken og de gamle computere ser ud til at fungere, og vi håber i løbet af efteråret at få en 1,2 meter styrbar parabol på taget af DTU bygning 348 rigget til som antenne.

Hvis det lykkes, og Ørstedes instrumenter og systemer viser sig at have det nogenlunde godt, som beskrevet ovenfor, er der mulighed for stadig at nedtage videnskabelige data og at benytte Ørsted som platform for studenterprojekter.

Hvad ville H.C. Ørsted sige?

Når man læser de tre uddrag af H.C. Ørstedes tale til indvielsen af Polyteknisk Lærestanstalt den 5. november 1829 i faktaboksen, tror jeg, at Ørsted ville ikke anerkende til Ørstedteamet og tænke: "Ja, de har lyttet til mine formaninger og handlet derefter. De gør mit navn ære". H.C. Ørsted var uhyre fremsynet i sin indvielsestale, og citaterne holder den dag i dag, selv om sproget er lidt anderledes, end vi ville udtrykke os på nutidigt dansk.

Forskningen, der er udført på grundlag af Ørsted-satellitens data og senere Swarm-satellitterne, satte Danmark i en førende position i den geomagnetiske forskning. Alle firmaer og forskningsinstitutioner, der deltog i projektet, fik et gevaldigt løft af deres kompetencer inden for rumteknologi, som blev omsat til kontrakter på leverancer til store satellitmissioner. Alle forskere, ingeniører og studerende, der deltog i projektet og bidrog på hver sin måde, fik også et kæmpe kompetenceløft, som de har båret videre ud i samfundet, og som har medvirket til både at styrke Danmark som rumfartsnation og løfte kompetencerne i de virksomheder og institutioner, de har deres virke i. Referencerne [1–5] giver en mere detaljeret beskrivelse af Ørstedes resultater og nøglepersonerne i Ørstedprojektet.

Litteratur

- [1] Ørsted: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/o/oersted>
- [2] P. Stauning (2004) Ørsted – 5 års succes i rummet, *Vejret*, bind 100, august 2004, side 37–48.
<https://docplayer.dk/14059894-Oersted-5-aars-succes-i-rummet.html>
- [3] P. Hoffmeyer (2000) The Ørsted Satellite Project, *Air & Space Europe*, bind 2, nr. 5, side 74–79.
- [4] P. Stauning (2013) Ørsted Satellite – The Danish Miracle in Space, <https://nordicspace.net/wp-content/uploads/2013/07/NSA189.pdf>.
- [5] C. Autzen (2004) Den lille seje satellit, (Bog + DVD video) ISBN 87-91592-01-1, 87-91592-00-3, STV Education, Geografforlaget.
- [6] International Geomagnetic Reference Field https://en.wikipedia.org/wiki/International_Geomagnetic_Reference_Field.
- [7] Skrantende Ørsted-satellit bliver selv til rumskrot næste år, <https://ing.dk/artikel/skrantende-orsted-satellit-bliver-selv-til-rumskrot-naeste-ar-106166>.
- [8] 20. århundredes største danske ingeniørbedrifter https://da.wikipedia.org/wiki/20._%C3%A5rhundredes_st%C3%B8rste_danske_ingeni%C3%B8rbedrifter.
- [9] Swarm – satellit-sværme måler Jordens magnetfelt <https://www.space.dtu.dk/Forskning/Projektliste/Swarm>.
- [10] Swarm (Geomagnetic LEO Constellation) <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm>.
- [11] Swarm <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/swarm>.
- [12] Exploring Earth's Magnetic Field – Three make a SWARM, *Spatium*, No. 43, June 2019, http://www.issibern.ch/publications/pdf/spatium/spatium_43.pdf.
- [13] R.B. Kershner og R.E. Fischell (1965) Gravity-Gradient Stabilization of Earth Satellites, *Proceedings of the First IFAC Symposium on Automatic Control in the Peaceful Uses of Space*, 21.-24. juni, Stavanger, Norge, side 249–267 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701769092X>.
- [14] Helical (Helix) Antenna https://en.wikipedia.org/wiki/Helical_antenna.



Flemming Hansen er ph.d. og seniorkonsulent indenfor satellitkommunikation, satellitnavigation og rumteknologi. Indehaver af RadioLab Consulting.

PFEIFFER VACUUM

Vacuum pumper



To-trins olielamelpumper
Promotionpris fra DKK 8.000

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

Ørsted og enhederne

Jens Ramskov, Ingeniøren

I 1930 lykkedes det efter lang tids forarbejde danske ingeniører og fysikere at få enheden for magnetisk feltstyrke opkaldt efter H.C. Ørsted. Men glæden blev kort, for enheden var en del af cgs-systemet, der snart efter blev erstattet af MKSA-systemet, forløberen for nutidens *Système International d'Unités* (SI). Enhedsmæssigt trak Ørsted en nitte i sammenligning med Ampère, Volta, Ohm, Faraday m.fl.

Tal og enheder spiller en afgørende rolle, når nye opdagelser inden for fysikken skal beskrives.

Tænk på opdagelsen af Higgsbosonen i 2012, hvor den afgørende nyhed – udover evidensen for selve partiklens eksistens – var bestemmelsen af dens masse til at være 125 GeV – opgjort i energienheder – eller opdagelsen i 1998 af, at neutrinoer ikke er masseløse, som ellers var opfattelsen i mange år. Her er problemet dog, at vi stadig ikke kender neutrinoernes meget lille masse særligt godt.

H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820 blev af gode grunde præsenteret i et skrift stort set uden tal og enheder, for der fandtes ingen elektriske enheder eller standarder på dette tidspunkt.

80 år senere havde man fastlagt en lang række relevante enheder og opkaldt dem efter videnskabsmænd, der spillede en afgørende rolle for udviklingen af elektroteknikken i perioden fra slutningen af 1700-tallet til midten af 1800-tallet. Vi kender dem alle: volt, ampere, ohm, watt osv. En helt afgørende person for fremkomsten af elektroteknikken manglede dog stadig i begyndelsen af 1900-tallet at få en enhed opkaldt efter sig. Det var H.C. Ørsted.

Det kan man godt kalde en uretfærdighed, men retfærdighed er ikke naturgiven. Det er Higgsbosonen også et eksempel på, for dens navn reducerer jo andre fremtrædende forskere som bl.a. Peter Higgs' Nobelprismodtagerfælle François Englert til statister fremfor de hovedpersoner, de retteligt er.

Men i 1930 lykkedes det endeligt danske fysikere og ingeniører efter ihærdigt forarbejde at bringe Ørsteds navn til ære, da enheden for magnetisk feltstyrke fik betegnelsen oersted. Men glæden blev kort, for oersted er i dag sjældent brugt, da den ikke er en SI-enhed som ampere, volt, coulomb osv.

Lad os skruetiden tilbage i et forsøg på at finde en forklaring på, hvorfor Ørsted i første omgang blev helt udeladt, da enhederne skulle have deres navne, og derefter se, hvordan det alligevel med diplomatisk snilde trods modstand lykkedes at få den magnetiske feltstyrke navngivet efter Ørsted.

Alt hænger sammen

H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820 var drevet af hans naturfilosofiske idé om, at alt i naturen er forbundet med hinanden.

Dette synspunkt havde han allerede forfægtet i 1812 i *Ansicht der chemischen Naturgesetze die neueren Entdeckungen* (Overvejelser over de kemiske naturlove

på grundlag af nyere opdagelser).

Men det var gode evner ud i eksperimenter, der i juli 1820 endelig fik Ørsted til at konkludere, at der i en strømførende elektrisk ledning opstår en "elektrisk vekselkamp", der udbreder sig i det omliggende rum, og som kan påvirke en magnetnål i ledningens nærhed.

I sit latinske skrift på fire sider beskriver Ørsted detaljeret sine forsøg, så andre kunne eftergøre disse og kontrollere, at iagttagelserne og konklusionerne var korrekte. Det var ikke mindst det, som overbeviste skeptikerne om, at elektricitet og magnetisme var forenet i det, som snart efter fik betegnelsen elektromagnetisme.

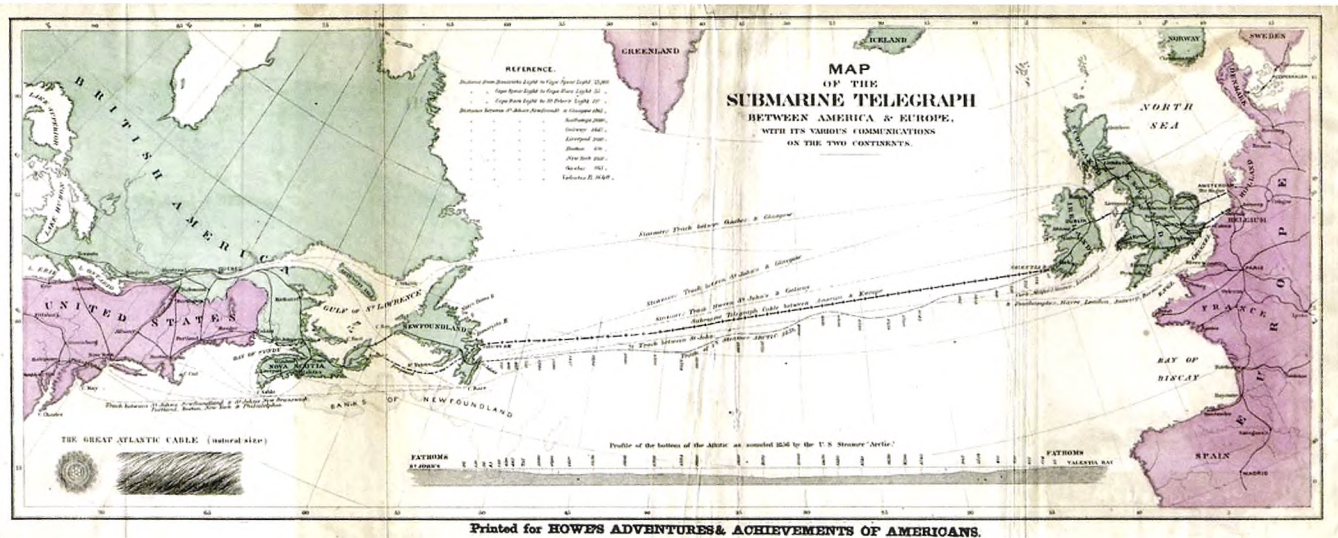
På to områder er skriftet dog meget forskelligt fra nutidens videnskabelige artikler. Der er ingen matematiske ligninger eller beregninger, og der er ingen tal udover angivelse af dimensionerne for det galvaniske apparat, som Ørsted benyttede, og en bemærkning om, at hvis afstanden mellem ledning og magnetnål ikke overstiger 3/4 tomme, så vil magnetnålen opnå en afvigelse på op til 45 grader.

Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen satte dog gang i en teknologisk udvikling, som hurtigt gjorde det tvingende nødvendigt at have standardiserede størrelser for spænding, strømstyrke, modstand osv.



Figur 1. Charles Tilston Bright (1832–88) var en britisk ingeniør, som havde ansvaret for det første transatlantiske kabel.

Det blev ikke mindst synliggjort i 1858, da det første transatlantiske kabel blev lagt mellem Valentia Island ved Irlands vestkyst og Trinity Bay i New Foundland. I spidsen for projektet stod den britiske elektroingeniør



Figur 2. Det første transatlantiske kabel (1858).

Charles Tilston Bright, som blev slået til ridder for sin præstation. Med til historien hører, at kablet kun fik kort levetid. Det var fremstillet i hast og blev udsat for al for stor spænding efter en måned. Det var dog ikke noget, Charles Bright kunne lægges til last for. Hans indsats var uplettet.

De eminente filosoffer

Det praktiske ingeniørarbejde må have tydeliggjort for Bright behovet for at have veldefinerede elektriske enheder. Det redegjorde han for sammen med Josiah Latimer Clark i september 1861 på årsmødet for British Association for the Advancement of Science i Manchester i et indlæg med titlen *Measurement of Electrical Quantities and Resistance*.

Indlægget blev kort refereret i årsrapporten og gengivet i fuld længde i *The Electrician* [1], hvor Clark og Bright indledte med at forklare, at den elektriske videnskab og telegrafiens kunst nu har nået et niveau, hvor det er nødvendigt at have universelle standarder for elektriske størrelser.

Der fandtes allerede på dette tidspunkt forskellige standarder for modstand, men ingen havde bred udbredelse. De to engelske elektroingeniører forklarede, at der især var behov for standarder for fire forskellige elektriske størrelser – som alle afhænger af hinanden – spænding, ladning, strømstyrke og modstand.

Clark og Bright argumenterede for, hvordan man skulle vælge og standardisere disse enheder bl.a. ud fra de produkter som eksempelvis Daniells batteri, der allerede var meget benyttet. For vores historie er det mest interessante dog, at de to ingeniører foreslog, at enhederne for disse størrelser burde opkaldes efter "eminente filosoffer".

Uden at begrunde nærmere hvorfor pegede de på Georg Ohm (1789-1854) der i 1827 havde opdaget den empiriske Ohms lov, Michael Faraday (1791-1867), der i 1831 havde opdaget magnetisk induktion, Luigi Galvani, der i 1786 med en svag strøm havde fået et frølår til at spjætte og dermed fejlagtigt mente at have fundet en form for dyrisk elektricitet, og endelig

Alessandro Volta (1745-1827), der havde fremstillet det første batteri, voltasøjlen, i 1800. Af disse var kun Faraday levende på dette tidspunkt.

Clark og Bright foreslog, at enhederne skulle have betegnelser, der var afledt af personnavnene: Ohma skulle således være enheden for elektrisk spænding, farad for ladning, galvat for strømstyrke og volt for modstand.

Man kan kun gisne om, hvorfor de hverken tænkte på Ørsted eller Ampère? Måske lød oerst eller noget i den stil blot for underligt?

Thomson (Kelvin), Maxwell og Siemens går i aktion

Uafhængigt af Bright og Clark havde William Thomson, den senere Lord Kelvin, som også havde været involveret i telegrafkablet, interesseret sig for elektriske enheder og standarder.

På Thomsons foranledning blev det besluttet på årsmødet at nedsætte en komite, der i første omgang skulle definere en standard for elektrisk modstand.

Ni år senere i 1872 blev den suppleret med en komite [2] med deltagelse af bl.a. William Thomson, James Clerk Maxwell og Werner Siemens, der skulle komme med forslag til en nomenklatur for elektriske enheder.

Allerede året efter kunne denne komite fremlægge sit forslag [3].

Clark og Brights gamle idé om, at de elektriske enheder skulle opkaldes efter personer, fik lov at leve videre. Komiteen holdt således fast i navnene farad og volt, men ændrede ohma til blot ohm. Desuden lød forslaget nu, at volt skulle være enheden for spænding, ohm enhed for modstand og farad enhed for kapacitans. Præcist som det er gældende i dag.

Komiteen foreslog ikke en enhed for strømstyrke, men den kunne jo også beskrives som volt/ohm og var derfor i princippet ikke nødvendig. Galvat gik dermed i glemmebogen.

Det kan tilføjes, at komiteen derudover også foreslog enheder for kraft og arbejde. Men her valgte den ikke at hædre "eminente filosoffer". I stedet lød forslaget, at enheden for kraft skulle betegnes dyne (dyn

på dansk) efter det græske ord $\deltaύναμις$, og at enheden for arbejde skulle kaldes erg efter det græske ord $\epsilonργον$.

Flere enheder defineres

Der var dog behov for at definere flere elektriske enheder. Opgaven hermed blev taget op af International Electrical Congress, hvis første møde blev afholdt i Paris i 1881.

Her blev enhederne ohm, volt og farad konfirmeret, og der blev indført enheder for strømstyrke og elektrisk ladning, som, måske ikke så overraskende, når nu kongressen fandt sted i Paris, til fransk glæde blev opkaldt efter henholdsvis André-Marie Ampère og Charles-Augustin de Coulomb.

På International Congress of Electricians i Paris i 1889 blev disse enheder yderligere suppleret med joule og watt for henholdsvis energi og effekt. Så fik briterne lidt tilbage. Endelig blev det på en ny International Electrical Congress i 1893 vedtaget at opkalde enheden for selvinduktion efter amerikaneren Joseph Henry. Dette møde blev holdt i Chicago, så her var der også en lille gave til værtslandet.

Der manglede dog stadig betegnelser for de magnetiske enheder. Det blev fastlagt på International Electrical Congress i Paris i 1900, hvor det bl.a. blev besluttet at kalde enheden for magnetisk flux for maxwell og enheden for den magnetiske feltstyrke for gauss.

Nu var der ved at være udsolgt, og Ørsted var stadig ikke kommet rigtigt ind i varmen. Var det for sent?



Figur 3. Peder Oluf Pedersen (1874-1941), ingeniør, opfinder og fysiker, samt direktør og rektor for Den Polytekniske Læreanstalt.

Danskerne går i aktion

1920 var 100-året for Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen, og det blev fejret i stor stil i Danmark.

Professor P.O. Pedersen fandt de helt store ord frem, da han beskrev opdagelsen i Ingeniøren [4]:

“Klart er det nu, at Ørsted’s Opdagelse af Sammenhængen mellem Elektricitet og Magnetisme er det i sine følger betydningsfuldeste Fund, der er faldet i nogen Danskers Lod at gøre, ja et af de betydningsfuldeste i hele Menneskehedens Historie”

Slutningen af artiklen var mindst lige så vidtløftig:

“Ingeniøren, der arbejder på Elektroteknikkens vidtstrakte og dragende Felt, kan ikke andet end bøje Hovedet i Ærbødighed og Taknemmelighed ved Mindet om Ørsted’s Daad, der danner Grundlaget for hans Virke.”

100-året blev bl.a. markeret med et nordisk H.C. Ørstedmøde i København og en række delmøder for forskellige tekniske discipliner.

På det nordiske elektroteknikermøde berettede professor Absalon Larsen fra Polyteknisk Læreanstalt [5] om de “skridt der fra dansk side påtænkes for at søge Ørsteds navn knyttet til international, elektroteknisk enhed”.

Absalon Larsens eget forslag var, at enheden for elektrisk feltstyrke, som i cgs-systemet er V/cm, skulle navngives efter Ørsted.

Det var et forslag, som P.O. Pedersen selv var fremkommet med i 1914 [4, 6], da man begyndte forberedelserne til fejring af 100-års jubilæet. Han havde oprindeligt håbet, at en enhed opkaldt efter H.C. Ørsted kunne blive vedtaget ved en international elektroteknisk kongres i København i 1920. Den plan havde Første Verdenskrig forhindret.

Nu måtte sagens gennemførelse udskydes til bedre tider, mente P.O. Pedersen.

Andre forslag blev bragt på bane, men på P.O. Pedersens foranledning blev der udarbejdet og vedtaget følgende resolution [5], som ikke lagde sig fast på en bestemt størrelse:

”Det nordiske H.C. Ørsted-Møde i København 1920 udtaler sin Sympati for, at Ørsteds Navn knyttes til en i Praksis anvendt elektromagnetisk Enhed.”

Rod i de magnetiske enheder

De internationale elektrotekniske kongresser var i 1904 blevet afløst af en formel organisation International Electrotechnical Commission (IEC). Det var her, man skulle påvirke.

På en måde var det heldigt, at der var opstået rod og misforståelser i magnetiske enheder og ikke mindst om vedtagelsen i 1900 af enheden gauss.

For at forstå dette må vi gå lidt dybere ind i magnetiske felter og Maxwell-ligningerne, der beskriver relationen mellem elektriske ladninger og felter og magnetiske felter, og som også sætter H.C. Ørsteds opdagelse af, hvordan en elektrisk strøm giver et magnetfelt, på en præcis matematisk formel.

I Maxwell-ligningerne optræder to magnetiske felter. Det ene kaldes **B**-feltet og betegnes almindeligvis som den magnetiske fluxtæthed. Det andet kaldes **H**-feltet og benævnes den magnetiske feltstyrke. Fed skrift indikerer på vanlig vis, at disse er vektorfelter.

De to felter er relateret til hinanden ved ligningen $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mathbf{M}$, hvor μ er permeabiliteten, og $\mathbf{M}$ er magnetiseringsfeltet, der kan findes i magnetiske materialer. I vakuum er der intet **M**-felt, og i cgs-systemet er $\mu = 1$ i vakuum, hvilket indikerer, at $\mathbf{B} = \mathbf{H}$.

Det er således let at blive forvirret. Er der rent faktisk tale om to forskellige felter? Selv eksperter har haft svært hermed, som vi vil se senere.

Under 1900-kongressen havde mange opfattet, at

det var enheden for **B**-feltet, der skulle opkaldes efter Gauss, andre havde opfattet det som værende **H**-feltet. Problemet var, at referatet fra mødet i 1900 var uklart.

Professor A.W. Marke fra Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole beskrev forvirringen i Ingeniøren i 1930 [7], som var opstået ved, at ifølge referatet fra kongressen var gauss betegnelsen for champ magnetique.

Det havde amerikanerne, der deltog i kongressen, opfattet som værende **B**-feltet, og det kom bl.a. til udtryk i et amerikansk referenceværk forfattet af Carl Hering i 1904. Her havde amerikanerne i øvrigt også egenhændigt besluttet sig for at betegne den magnetiske modstand eller magnetiske reluktans med oersted.

Så Ørstedes navn var sådan allerede i brug i forbindelse med en magnetisk enhed ved 100-års jubilæet i 1920. Det havde måske være relativt uproblematisk at få dette vedtaget internationalt, men at Ørstedes navn skulle bruges i forbindelse med magnetisk reluktans, som ikke er en meget benyttet størrelse, var dog ikke noget, danskerne var interesseret i.

Derfor kom Absalon Larsen i stedet med forslaget om den elektriske feltstyrke, og derfor blev det i resolutionen i 1920 pointeret, at Ørstedes navn skulle knyttes til en i praksis anvendt enhed.

Herings amerikanske referenceværk fra 1904 fik fem år efter en tilsvarende fransk pendant. Her var gauss anført som enheden for l'intensity champ magnetique. Med den lille tilføjelse af ordet intensitet, som ikke fandtes i den officielle rapport fra 1900, var der ingen tvivl om, at gauss var enheden for **H**-feltet. Så nu rådede der for alvor forvirring.

Et udvalg nedsættes for at rydde op

Problemstillingen blev taget op af IEC på et plenarmøde i Bellagio i Italien i 1927. Her blev det besluttet at nedsætte en specialkomite for magnetiske enheder med den amerikanske elektroingeniør Arthur E. Kennelly som formand for at få styr på forvirringen. Kennelly havde deltaget på mødet i 1900 og kendte derfor forhistorien og problemstillingen særdeles godt.

I denne komite var der overvejende stemning for at reservere gauss til **B**-feltet. Fra fransk side foreslog man, at så kunne man give **H**-feltet enheden mascart efter Éleuthère Mascart (1837-1908). Han havde været præsident for kongressen i 1900 og var en fremragende forsker inden for en lang række discipliner herunder elektricitet og magnetisme, men dog ikke kendt for de allerstørste opdagelser.

Men specielkomiteen måtte opgive at komme til enighed [8] og lod det være op til det næste store IEC-møde at træffe en afgørelse.

Nu var det så heldigt, at dette skulle holdes i Skandinavien i 1930 med åbningsmøde i København 27. juni, komitemøder i Stockholm og afslutningsmøde i Oslo 9. juli.

Først skulle der her opnås enighed om, at permeabiliteten μ var en størrelse med eller uden fysiske dimensioner – eller med andre ord om **B**- og **H**-felterne i vakuum var forskellige eller ens. Afgørelsen blev, at permeabiliteten havde en fysisk dimension, så **B** og **H** skulle have forskellige betegnelser.

Den danske komite fik herefter den norske komite til at stille forslaget om, **H**-feltet skulle have enheden oersted, og da Frankrig accepterede at trække deres forslag om mascart, og amerikanerne indvilgede i, at reluktansen ikke skulle kaldes oersted, blev det norske forslag “vedtaget enstemmigt og med hjerteligt bifald”, som A.W. Marke skrev i sin artikel [7], som han indledte på denne måde:

“Der er i Sommer sket det for Danmark og dansk Videnskab saa overordentlig ærefulde, at H.C. Ørstedes Navn er bleven knyttet til en fundamental elektromagnetisk Enhed”.

I en artikel [9] om den nye enhed oersted roste Arthur E. Kennelly Ørsted for at have udført et bemærkelsesværdigt eksperiment i 1820, som Kennelly forklarede lagde grunden for at andre kunne gøre yderligere opdagelse inden for elektromagnetismen, som dybtgående har påvirket samfundet. Amerikanerne var godt bekendte med Ørstedes indsats.

Fortsat fransk modstand

Var sagen så overstået? Ikke helt.

For det første havde IEC, som Marke også bemærkede det, ikke direkte myndighed til at beslutte navne. Men Marke havde dog konkluderet, at oersted utvivlsomt ville vinde indpas i hele den elektrotekniske litteratur og praksis, og at andre derfor måtte gøre det samme for at undgå forvirring.

Men der kom modstand – ikke mindst fra fransk side – som beskrevet af Arthur E. Kennelly [8].

Kritikken blev fremført af den franske ingeniør og formand for den franske elektrotekniske kommission Émile Brylinski i tidsskriftet Revue Générale de l'Electricité. Han mente, at enheden for **H**-feltet skulle være gauss i overensstemmelse med den almindelige brug ved magnetiske observatorier.

Kritikken var måske ikke helt uventet, for det var velkendt, at franskmændene kunne stille sig på bagbenene i standardiseringsarbejde. Det fremgår bl.a. af et brev fra formanden for den amerikanske elektrotekniske kommission, Cyprien O. Mailloux, til Émile Brylinski tilbage fra 1918 [10].

Kennelly afviste de franske indvendinger med, at det gennem mange år havde været almindeligt at måle Jordens magnetfelt i gauss i luft, som er et magnetiserbart medium omend meget svagt. Så man havde retteligt målt den magnetiske fluxtæthed eller **B**-feltet.

Omend der fra et praktisk synspunkt kun er meget lille forskel på **H** og **B** i luft, så er der ikke noget principielt problem i at tale om jordens felt i gauss med reference til **B**, mente Kennelly.

Sagen blev nu taget op af International Union of Pure and Applied Physics på et møde i Bruxelles i juli 1931, hvor der blev oprettet en komite for Symbols, Units and Nomenclature (S.U.N.) med den engelske fysiker Richard Glazebrook som formand og den waliske fysiker Ezer Griffiths som sekretær.

Denne komite holdt et møde i Paris i juli 1932, hvor spørgsmålet om **B**- og **H**-felterne igen kom op. Her blev det med stemmerne 9 mod 3, hvor fire afstod fra at stemme, vedtaget [11], at disse var forskellige, som

også ingeniørerne var blevet enige om i 1930.

Under diskussionen fremførte Richard Glazebrook, at han var en af de sidste overlevende af Maxwells studerende, og han var overbevist fra Maxwells undervisning om, at felterne er forskellige.

Kennelly [12] kunne derfor konkludere, at eftersom både elektroingeniørerne i IEC og fysikerne nu var enige om at bruge de samme betegnelser, var tve-tydigheden og forvirringen de seneste 30 år om de magnetiske enheder væk.

Endelig havde enheden oersted fået sin blåstem-pling, og det danske ønske om en enhed opkaldt efter H.C. Ørsted var gået i opfyldelse.

Magnetiske måleenheder			
Størrelse		cgs	SI
Flux	Φ	maxwell (Mx)	weber (W)
Fluxtæthed	B	gauss (G)	tesla (T)
Magnetisk feltstyrke	H	oersted (Oe)	A/m
Magnetisk dipolmoment	m	emu	Wm og Am ²
Permeabilitet	μ	–	H/m

Farvel til cgs og oersted

En lang beretning nærmer sig sin ende. Men slutningen er ikke helt lykkelig.

For allerede i 1935 gik IEC over til at anbefale, at cgs-systemet ikke skulle være fundamentet for enheds-systemet. Det skulle erstattes af MKS (meter-kilogram-sekund), som ikke mindst den italienske fysiker og elektroingeniør Giovanni Giorgi havde argumenteret ivrigt for siden 1901.

Dette system skulle også have en elektromagnetisk basisenhed. Der var i princippet frit valg. Om man valgte coulomb eller ampere kunne eksempelvis være hip som hap, da de er direkte forbundet via enheden sekund.

Da den internationale komite for vægt og mål, kendt som CIPM efter sin franske forkortelse, lagde sig fast på, at den elektromagnetiske basisenhed skulle være ampere, blev MKSA-systemet født i 1948. Dette udviklede sig i 1960 til Système International d'Unités (SI).

I dette system er enheden for den magnetiske fluxtæthed tesla, og den magnetiske feltstyrke måles i ampere pr. meter.

I praksis fik enheden oersted derfor en meget be-grænset levetid.

Man kan stadig se enheden gauss i den viden-skabelige litteratur, men det er sjældent at støde på enheden oersted. Når det gælder den lagrede energi i magneter, kan man dog stadigt undertiden støde på udtrykket megagauss-oersted (MGOe), hvor 1 MGOe er lige under 8 J/m³.

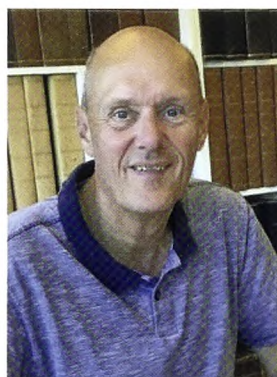
Selv om det i 1930 lykkedes danske ingeniører og fysikere med aktiv norsk hjælp og amerikansk opbak-ning at overkomme fransk modstand og få en elektro-magnetisk enhed opkaldt efter H.C. Ørsted, må vi nok konstatere, at de ramte et forkert tidspunkt i historien.

Enten skulle de havde presset på i slutningen af 1800-tallet, da mange flere enheder var i spil, eller de

skulle have ventet til indførelsen af SI i 1960 – så kunne enheden tesla måske i stedet have heddet oersted.

Litteratur

- [1] L. Clark og C. Bright (1861) "Measurement of Electrical Quantities and Resistance", The Electrician, 9. november 1861, side 3–4. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=nyp.33433090837166&view=lup&seq=15>.
- [2] "Report of the Forty-Second Meeting of the British Association for the Advancement of Science" (1872), side: lvi. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/94434#page/62>.
- [3] W. Thomson, C.G. Foster, J.C. Maxwell m.fl. (1873) "First report of the Committee for the Selection and Nomenclature of the Dynamical and Electrical Units" Report of the Forty-Third Meeting British Association for the Advancement of Science, side 222. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/94452#page/322>.
- [4] P.O. Pedersen (1920) "Ved Hundreåret for Elektromagnetismens Opdagelse" Ingeniøren, 1. september 1920, <https://www.e-pages.dk/ingarkiv/3853/24>.
- [5] Ingeniøren 2. oktober 1920, <https://www.e-pages.dk/ingarkiv/3862/?page=21>.
- [6] Ingeniøren 1. juli 1914 <https://www.e-pages.dk/ingarkiv/3210/?page=11>.
- [7] A.W. Marke (1930) "En ny elektromagnetisk enhed: En Ørsted", Ingeniøren, 1930, nr. 45, side 1930 <https://www.e-pages.dk/ingarkiv/4467/?page=1>.
- [8] A.E. Kennelly (1932) "The present status of the magnetic-circuit units" The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan, bind 52, nr. 524, side 197–209 og af samme forfatter samme år "Recent Developments in Magnetic Units", Electrical Engineering, bind 51m, side 343–345.
- [9] A.E. Kennelly (1931) "The Oersted Considered as a New International Magnetic Unit" The Scientific Monthly, bind 32, nr. 4, side 378–380.
- [10] V. Dray (2007) "La diffusion internationale des technologies. La construction des échanges techniques franco-américains : sources, interdépendances et influences de 1914 à 1940", http://recits.utbm.fr/upload/gestionFichiers/LesCahiersDeRECITSn5_743.pdf, side 181.
- [11] E. Griffiths (1932) "Electrical and Magnetic Units", Nature, bind 130, side 987–989
- [12] A.E. Kennelly (1933) "Conference of the symbols, units and nomenclature (S. U. N.) commission of the International Union of Pure and Applied Physics (I. P. U.) at Paris, in July 1932, and its results" Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, bind 19, nr. 1, side 144–149.



Jens Ramskov er videnskabs-redaktør ved Ingeniøren. Han er uddannet som civilingeniør og ph.d. med speciale i optisk kommunikation fra Danmarks Tekniske Universitet.

Jagten på antityngdekraft og forklaringen på vores eksistens

Peter Granum, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Fysikkens Standardmodel forudsiger, at antistof, der er "spejlbilledet" af stof, som vi kender det, er et *nøjagtigt* spejlbillede. Dette kan dog konkluderes at være i uoverensstemmelse med vores blotte eksistens. Ved ALPHA-eksperimentet ved CERN måler vi egenskaberne af antibrint for at kunne lave en direkte sammenligning med brint og derved komme tættere på at besvare nogle af fysikkens ubesvarede spørgsmål.

Opdagelsen af antistof

I starten af 1900-tallet havde man ikke nogen god model for atomet. Ernest Rutherford foreslog i 1911 en model, hvor elektroner kredser omkring en atomkerne, men hans model havde store problemer. Det blev Niels Bohr, der løste disse problemer ved at foreslå, at elektronerne er begrænset til at bevæge sig i bestemte baner eller skaller – svarende til bestemte energier – omkring kernen. Atomets energispektrum er derfor kvantiseret.

En vigtig forudsætning for Bohrs model var Max Plancks arbejde fra 1900. Planck forsøgte at forklare et andet af datidens problemer i fysikken¹ ved at foreslå, at energien af lys er kvantiseret. Baseret på denne idé beskrev Albert Einstein i 1905, hvordan fotoner kan forårsage overgange af elektroner mellem energiniveauer, hvis fotonens energi svarer til forskellen mellem

niveauerne. Ved hjælp af lys kan man altså undersøge et stofs energispektrum, som er unikt for stoffet – det er en slags fingeraftryk. Einstein forklarede herved den fotoelektriske effekt. Kvantiseringen af energien af lys og atomets energitilstande var vigtige elementer i fødslen af et nyt felt: kvantemekanikken.

Kvantemekanikken skulle vise sig at forårsage et paradigmeskift i fysikken. Den var langt fra komplet ved fødslen, men tog mange år at udvikle. Paul Dirac arbejdede i slutningen af 1920'erne på at indkorporere relativitetsteorien i kvantemekanikken. I sit arbejde kom Dirac frem til en ligning, der havde løsninger med både "positiv og negativ masse eller energi". I fysikken er vi vant til at forkaste matematiske løsninger, der ikke giver fysisk mening, men Dirac holdt fast i sine løsninger med negativ energi, og han endte med at forudsige eksistensen af antistof i 1928.

Fysikere med historisk centrale roller for nutidens antistofforskning



Paul Dirac (t.v.) var en engelsk teoretisk fysiker født i 1902. Han er kendt for at inkorporere relativitetsteorien i kvantemekanikken og forudsige eksistensen af antistof. For sit arbejde modtog han Nobelprisen i fysik i 1933.

I 1905 blev Carl Anderson (midt) født af svenske immigranter i New York. Han skulle senere, i 1932, bekræfte eksistensen af positronen ved at undersøge kosmisk baggrundsstråling i et tågekammer. For sin opdagelse modtog han Nobelprisen i fysik fire år senere. Samme år opdagede han også myonen.

Andrei Sakharov (t.h.) blev født i Moskva i 1921 og arbejdede med kernefysik, partikelfysik og kosmologi. Han er kendt for at opstille kriterierne opkaldt efter ham, men han er måske mest berømt for at være "den sovjetiske brintbombs fader". Han markerede sig senere som systemkritiker og menneskerettighedsforkæmper og modtog Nobels fredspris i 1975.

¹Et problem med sort-legeme-hulrumsstrålingen også kaldet den ultraviolette katastrofe.

Antistof er i følge Dirac et slags spejlbillede af "normalt" stof. Hver type partikel har således en slags partner, der ligner partiklen selv, men har modsatte egenskaber. For eksempel skal der eksistere en antiproton med samme masse som protonen, men med modsat ladning. Ligeledes skal der eksistere en antielektron (kaldet en positron af historiske årsager), en antineutron og så videre. Med sin forudsigelse fordoblede Dirac på en måde størrelsen af det kendte univers! Da folk blev opmærksomme på den mulige eksistens af antistof, varede det ikke længe, før dets eksistens blev bekræftet. Det skete ved Carl Andersons opdagelse af positronen i 1932.

Einsteins berømte ligning $E = mc^2$ fortæller os, at der er en ækvivalens mellem energi og masse. Det vil sige, at hvis en partikel møder sin antipartikel, vil de annihilere og derved omdannes til ren energi. Omvendt kan man med nok energi danne et partikel-antipartikel-par! Dette er, hvad der skete ved universets fødsel, hvilket vil sige, at der bør være lige meget stof og antistof i universet. Kigger vi omkring os – ikke blot på Jorden, men i universet – ser vi dog primært stof. Det rejser det åbenlyse spørgsmål²: hvor er alt antistoffet henne? Burde Universet ikke have annihileret for længe siden?



Figur 1. Antistoffabrikken på CERN.

I 1987 opstillede Andrei Sakharov tre kriterier for vores univers' eksistens kendt som Sakharovkriterierne. Lidt forsimplet siger kriterierne, at der skal være en asymmetri mellem stof og antistof, som har tilladt stof at komme til at dominere over antistof i universet. Det synes logisk, men problemet er, at Standardmodellen, der er fysikkens bedste bud på en model for universet, forudsiger, at der er komplet symmetri mellem stof og antistof. De bør altså være hinandens perfekte spejlbil- leder, og der bør eksistere lige meget stof og antistof.

Man fristes måske til at krølle Standardmodellen sammen og smide den i skraldespanden, men Standardmodellen er en utroligt succesfuld model, der blandt andet forudså eksistensen af Higgspartiklen, der blev opdaget ved CERN i 2012. Den er resultatet af alt det arbejde, der er udført siden udviklingen af kvantemekanikken for over 100 år siden. Så hvordan løses denne uenighed mellem Standardmodellen og Sakharovkriterierne? Det åbenlyse svar synes at være at undersøge antistofs egenskaber grundigt og sammenligne dem

Antistof ved CERN

CERN er nok mest kendt for den 27 km lange acceleratorring, LHC, der løber under jorden uden for Genève, men der foregår meget andet på CERN. Ved at bombardere en blok lavet af iridium kan den samme protonstråle, der løber i LHC'en, bruges til at danne antiprotoner. Det er udnyttelse af Einsteins $E = mc^2$. Antiprotonerne indfanges og bremser i CERN's "Antimatter Factory". I antistoffabrikken er der endnu en ring kaldet Antiproton Deceleratoren (AD'en). Som navnet antyder er AD'ens formål at decelerere antiprotonerne til lavere energi. Dette er modsat de fleste andre accelerators, som for eksempel LHC'en, der accelererer partikler op til høj energi.

AD'en kan levere antiprotonerne videre til de forskellige eksperimenter i AD-hallen: AEGIS, ALPHA, ASACUSA, BASE og GBAR. BASE undersøger antiprotonens egenskaber, mens de resterende eksperimenter arbejder med antibrint. ASACUSA arbejder desuden med antiprotonisk helium. Udover antiprotoner kræves der naturligvis positroner for at lave antibrint. I ALPHA får vi vores positroner fra en Na-22-kilde, der er β^+ -radioaktiv. Omkring tre millioner positroner og 100.000 antiprotoner kan blandes ad gangen til at give blot 20 antibrintatomer i ALPHA's atomfælde. Fælden er det eneste apparat i verden, hvor antibrint kan dannes og efterfølgende holdes fanget.

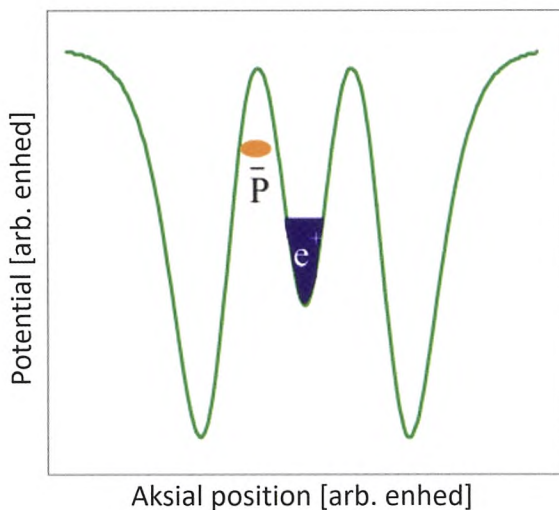
ALPHA-kollaboration blev stiftet af Jeffrey S. Hangst, som leder eksperimentet. Der kan læses mere om ALPHA og forskningen i antistof i [6].

med stofs. Det er netop, hvad vi gør ved ALPHA-eksperimentet ved CERN.

ALPHA-eksperimentet

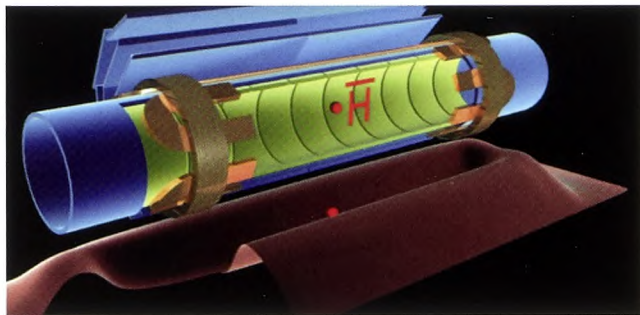
I ALPHA-eksperimentet kontrolleres de elektrisk ladede positroner og antiprotoner med elektromagnetiske felter, mens det elektrisk neutrale antibrint kontrolleres med magnetfelter genereret af superledende magneter kølet til 4 K med flydende helium. I vores atomfælde, hvor positronerne mødes med antiprotonerne, danner elektroderne et "nested" potential (se figur 2), der kan holde både de positive positroner og de negative antiprotoner fanget. Ved at justere potentialet kan partiklerne bringes til at overlappende, så de kan binde sig til hinanden og danne antibrint. En octupolmagnet sørger for den radiale indeslutning af antibrintatomerne ved at interagere med deres magnetiske dipolmoment, mens "spejlspoler" (korte solenoider) indeslutter dem aksialt. Tilsammen danner magneterne et "badekarformet" potential, som det er illustreret på figur 3. Potentialt kan fange de langsomste af de dannede antiatomer.

²Dette spørgsmål har tidligere været behandlet i en artikel i KVANT [8]



Figur 2. Det aksiale potential, der bruges til at holde positroner og antiprotoner fanget og blande dem for at få antibrint.

Ved at holde antibrint fanget i et ultrahøjt vakuum og lyse på det med lasere med den rette bølgelængde, er det lykkedes os at måle flere overgange i antibrints energispektrum. Vi har for nyligt offentliggjort en måling af finstrukturen i 2P-niveaue [2]. Den mest nøjagtigt målte overgang er mellem 1S- og 2S-niveauerne, og den er målt med en relativ præcision på omkring 10^{-12} [1]. Til sammenligning er præcisionen for brint omkring 10^{-15} [7]. Den væsentligste konklusion er, at der selv med denne præcision ikke har vist sig at være nogen forskel på energispektrene for brint og antibrint – indtil videre.



Figur 3. Skitse af atomfælden i ALPHA-2. To spejlspoler i enderne og en octupol (orange) skaber tilsammen et badekarformet potential, der kan holde antibrint fanget. Elektroder (gul) og detektor (blå) er også vist.

Det er dog ikke givet, at det er i energispektret, at en eventuel forskel mellem stof og antistof skal findes. En anden mulighed er, at deres interaktion med tyngdekraften er forskellig. Et lidt naivt argument kan konstrueres ved at sammenligne Coulombs lov med Newtons tyngdelov. Coulombs lov giver kraften, $\vec{F}$, mellem to ladninger, q_1 og q_2 , som en funktion af afstanden mellem ladningerne, $\vec{r}$

$$\vec{F} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

Denne kraft kan som bekendt være frastødende, hvis de to ladninger har samme fortegn. Ligeledes er den

gravitationelle kraft mellem to masser, m_1 og m_2 , givet ved

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (2)$$

Proportionalitetskonstanterne k_e og G er forskellige, men ellers ligner de to udtryk hinanden. Dog har man indtil videre ikke observeret en “negativ masse”, så kraften vil altid være tiltrækkende. Tingene er mere komplicerede end som så, men det er en interessant tanke, at antistof ikke behøver at falde nedad. Faktisk er der forskere, der hævder, at det blandt andet ville forklare mørkt stof og mørk energi, hvis antistof så at sige “faldt opad” i Jordens tyngdefelt [5]. Det er dog en kontroversiel holdning.

ALPHA demonstrerede i 2013 en metode til at bestemme accelerationen af antibrint i Jordens tyngdefelt [4]. Metoden er simpel: at fange og holde antibrint, slippe det, og se, hvor det går hen. Metoden blev demonstreret i ALPHA-2-atomfælden beskrevet tidligere, men det er en horisontal fælde. Målingen vil kræve en vertikal version af fælden, hvor faldvejen er længere. Derfor begyndte vi i 2018 konstruktionen af ALPHA-g, som er en tilføjelse til det eksisterende eksperiment.

Antager vi, at Jordens tyngdefelt genererer en nedadrettet kraft på antibrint, vil antibrint se et lineært potential som det på figur 4. To spejlspoler placeret i forskellige højder genererer den aksiale indeslutning, der ses som to barrierer. Sendes den samme strøm gennem de to spoler, dannes lige høje barrierer (blåt potential på figur 4). Hvis man fanger antibrint med lav energi i dette potential og derefter gradvist sænker barriererne, vil langt de fleste antiatomer undslippe til venstre/nedad.

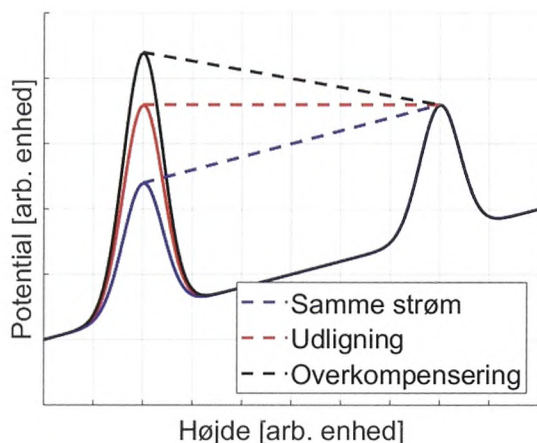
Er strømmen i den nederste spole derimod højere end i den øverste, så det totale potential ved de to spoler bliver lige stort, er der en lige stor sandsynlighed for, at antibrinten undslipper opad eller nedad. Ved at detektere, hvor antibrinten undslipper og annihilerer, kan man bestemme, hvornår man har kompenseret for tyngdekraftens effekt!

Fordi tyngdekraften er en meget svag kraft sammenlignet med den elektromagnetiske, er det praktisk talt umuligt at bestemme tyngdeaccelerationen af elektrisk ladet stof/antistof på samme måde, som vi planlægger i ALPHA. Interaktionen mellem ladede partikler og elektrisk støj genereret af udstyr er simpelthen meget større end tyngdekraftens effekt. Eftersom ALPHA indtil videre er den eneste gruppe i verden, der kan danne elektrisk neutralt antistof og fange det, er der ikke nogen, der hidtil har kunnet lave en sådan måling.

Udvidelse af Standardmodellen

Selvom Standardmodellen er meget succesfuld, er der mange tilfælde, hvor den kommer til kort. Arbejdet med at udvide Standardmodellen er derfor et stort felt. At udvide modellen er egentlig “ligetil”, men en teori skal også kunne testes eksperimentelt. Ofte er størrelsen af nye, forudsagte effekter ukendt, og eftersom eksperimenter aldrig er 100% nøjagtige, sætter de altid blot en øvre grænse for disse effekter. Når vi har målt

en overgang mellem to energiniveauer med en relativ præcision på 10^{-12} , kan vi derfor kun udelukke effekter af en tilsvarende størrelse. Desuden er det kun effekter, der ville vise sig i den givne overgang, vi tester for. En række udvidelser af Standardmodellen, der er relevante for antibrint, er beskrevet i [3].



Figur 4. Potentialet set af antibrint som funktion af højde. De to endebARRIERER er genereret af spejlspoler. Ved at sende en stærkere strøm gennem for eksempel den nederste spole, kan tyngdekraftens effekt udlignes (rød kurve). Den blå kurve illustrerer identiske strømme i spolerne, mens den sorte kurve illustrerer overkompensering.

En mulig udvidelse forudsiger eksistensen af en såkaldt "gravivector", der skulle være årsag til en tyngdekraft, der virker ud over den "normale" tyngdekraft. Til forskel fra den normale tyngdekraft, der kobler til bindingsenergien af for eksempel kvarkerne i en proton, ville gravivektoren udelukkende koble til hvilemassen. I protonens tilfælde udgør kvarkernes hvilemasse omkring 1% af den samlede masse. Gravivektoren ville have den modsatte effekt på stof og antistof, og tyngdekraftens totale effekt på antiprotonen kunne derfor være omkring 1% forskellig fra effekten på protonen. Hvis vi i ALPHA skulle måle en forskel i accelerationen af antibrint i Jordens tyngdefelt, kunne eksistensen af en gravivector være en mulig forklaring.

Fremtidens antistof på CERN

CERN er i øjeblikket midt i en planlagt toårig nedlukning, der varer indtil sommeren 2021. Formålet er at opgradere acceleratorinfrastrukturen. I antistoffabrikken er en ny lavenergigiring, ELENA, ved at bli-

ve installeret. Den vil levere antiprotoner med lavere energi til eksperimenterne, når nedlukningen er ovre. Derved vil flere antiprotoner kunne indfanges. Sammen med nyudviklede teknikker til køling af antibrint tror vi på, at vi i ALPHA har værktøjerne til at matche præcisionen af spektroskopi af brint samt bestemme accelerationen af antistof i Jordens tyngdefelt med 1%’s nøjagtighed. Derved vil vi forhåbentlig blive klogere på, hvorfor vores eksistens overhovedet er mulig.

Litteratur

- [1] M. Ahmadi m.fl. (2018) Characterization of the 1S–2S transition in antihydrogen, *Nature*, bind 557, side 71–75.
- [2] M. Ahmadi m.fl. (2020) Investigation of the fine structure of antihydrogen. *Nature*, *Nature*, bind 578, side 375–380.
- [3] M. Charlton, S. Eriksson og G. M. Shore (2020) Testing fundamental physics in antihydrogen experiments. <http://arxiv.org/abs/2002.09348v1>.
- [4] A.E. Charman m.fl. (2013) Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen, *Nature Communications*, bind 4, side 1785.
- [5] D.S. Hajdukovic (2014) Virtual gravitational dipoles: The key for the understanding of the universe? *Physics of the Dark Universe*, bind 3, side 34–40.
- [6] J. Hangst (2018) Illuminating antimatter, *CERN Courier*, bind 58, side 30.
- [7] A. Matveev m.fl. (2013) Precision measurement of the hydrogen 1S–2S frequency via a 920-km fiber link, *Physical Review Letters*, bind 110, side 230801.
- [8] B.L. Schistad (2019) Antimaterien, der blev væk, *Kvant*, bind 30, nr. 2, side 22.



Peter Granum er ph.d.-studerende ved Aarhus Universitet under vejleder Jeffrey S. Hangst. Han arbejder ved ALPHA-kollaborationen, der undersøger antibrint, ved CERN. Hans fokus er udviklingen af magnetsystemet til ALPHA-g-eksperimentet, der skal undersøge, hvordan antibrint påvirkes af Jordens tyngdefelt.

Lars Occhionero, suppleant
Peter Andreassen, suppleant

Tak til Majken

Bestyrelsen vil gerne rette en stor tak til afgangende formand Majken Brahe Ellegaard Christensen for hendes store arbejde for Astronomisk Selskab, herunder hendes arbejde med sikring af selskabets arkivalier og mediedækningen af Einsteinbrevene. Bestyrelsen ser frem til at følge Majken i hendes fortsatte arbejde med astronomiformidling.

Nyt fra Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab har efter generalforsamlingen den 5. september afholdt konstituerende bestyrelsesmøde, og bestyrelsen består nu af følgende:

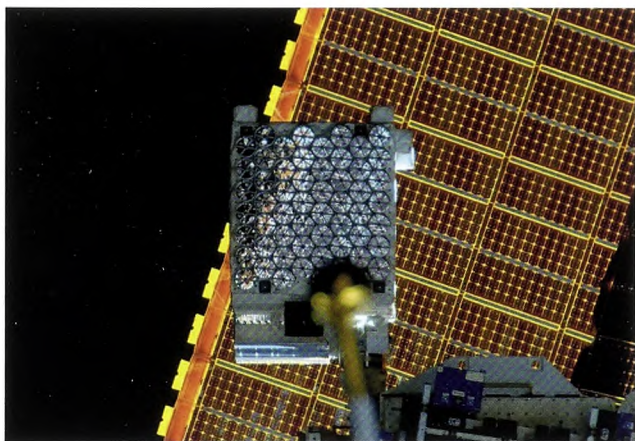
Andreas Kjær Dideriksen, formand
Johan Fynbo, næstformand
Peter Stub Jørgensen, kasserer
Julie Søgaard, bestyrelsesmedlem
Christina Toldbo, bestyrelsesmedlem
Søren K. Lynggaard, bestyrelsesmedlem

NICER har målt en neutronstjernes diameter

Henning Heiselberg, DTU Space og Security DTU

NASA's satellit NICER har netop målt en neutronstjernes diameter til 25 km. Efter 100 års spekulationer og modelberegninger har vi nu et mål for størrelsen og dermed tilstandsligningen for det tætte kernestof i neutronstjerner. Vi kan også bedre forstå supernovaers kollaps, kollisioner mellem binære neutronstjerner målt af LIGO, og dannelsen af tunge grundstoffer i universet – stjernestøvet som vi er lavet af.

NASA's NICER (Neutron star Interior Composition Explorer) har netop målt diameteren for en neutronstjerne 1.100 lysår væk i stjernebilledet Fiskene [1]. To forskellige analyser af røntgenprofiler fra pulsaren PSR J0030+0451 giver en diameter på 25–26 km for en masse på ca. 1,4 solmasser [2,3]. Dette er en milepæl efter 100 års spekulation over neutronstjernens størrelse, hvor meget den presses sammen, og dermed tilstandsligningen for kernestof og de stærke kræfter mellem neutroner og protoner (nukleoner)¹.



Figur 1. NICER-røntgenteleskopet foran et af solpanelerne på rumstationen ISS.

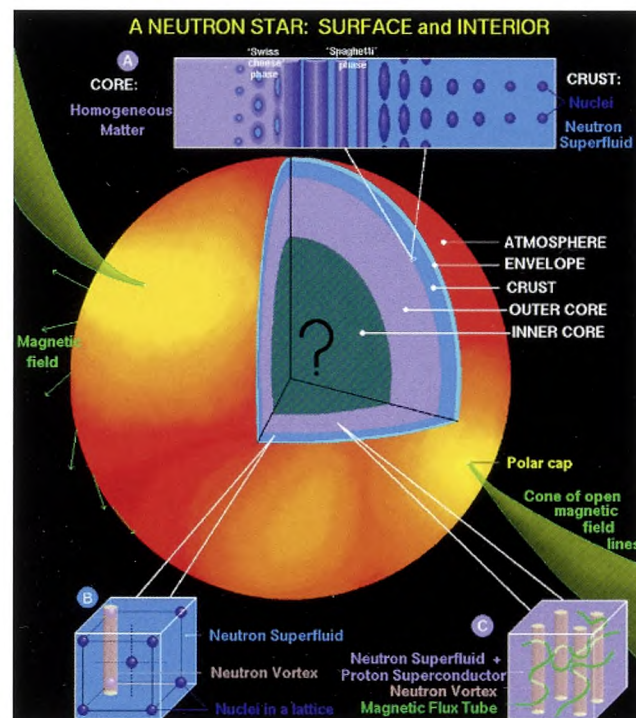
Jérôme Chenevez fra DTU Space deltager i NICER-eksperimentet. Detektoren sidder på Den Internationale Rumstation. Jérôme lokker mig hvert år til at gæsteforelæse om neutronstjerner på hans kursus. Da Nordita (Nordic Institute for Theoretical Physics) lå i København for mange år siden, var vi nemlig en gruppe teoretikere, der forskede i neutronstjerner og bl.a. beregnede diameteren til omkring 25 km [4].

Måden, hvorpå NICER måler diameteren, er spektakulær: Stof falder ned på neutronstjernen, ved at gasser spiralerer ned langs magnetfeltlinier nær dens magnetiske poler (ligesom nordlys på Jorden). Her dannes hotspots, der fusionerer i gigantiske udbrud af røntgenstråler. Disse udbrud detekteres af NICER, som også kan se dem oscillere med neutronstjernens rotation på 205 Hz, deraf navnet millisekundpulsar. Imidlertid afbøjer neutronstjernens stærke tyngdefelt strålingen, så vi faktisk ser noget af dens bagside. En mindre diameter eller tungere masse giver mere afbøjning, som udjævner

oscillationsspektret. De to uafhængige analyser [2,3] er godt nok ikke enige om antal og form af disse hotspots, men begge finder en diameter mellem 25 og 26 km.

Millisekundpulsarer er hurtigt roterende neutronstjerner, som ville slynge masse ud i rummet, hvis ikke de var så små og kompakte. De roterer så hurtigt (op til ca. 500 gange i sekundet), fordi de har ædt af en nabostjerne og derved fået tilført impulsmoment. Pulsarerne er kraftigt magnetiserede og udsender radiobølger som en roterende antenne eller "fyrtårn", og disse radiopulser kan vi måle tværs over galaksen med høj præcision. Binære pulsarer er to sådanne neutronstjerner i rotation om hinanden. De spiralerer langsomt mod hinanden, præcist som forudsagt af Einsteins generelle relativitetsteori, og man kan måle masserne præcist.

Enkelte pulsarer får stjerneskelv eller "hiccups". Disse skyldes, at neutronstjernen langsomt taber sin rotation og gerne vil være mindre fladtrykt, ligesom Jorden. Dette kan kun ske, hvis skorpen krakelerer i et stjerneskelv, hvorved inertimoment og rotationsfrekvens ændres i et spring.



Figur 2. Skitse af en neutronstjernes struktur og faser.

¹De fleste neutronstjerner har en masse omkring 1,4 solmasser og alle målte mellem 1,2–2,2 solmasser. For disse masser giver beregninger for de fleste tilstandsligninger en næsten konstant radius for neutronstjerneerne.

Disse præcise målinger fortæller dog ikke noget om neutronstjernens radius eller indre tilstand. Der har været mange beregninger af neutronstjernens struktur og forudsigelser af diametre på alt mellem 15 og 30 km. NICER-målingen udelukker de fleste. Vijay Pandharipande og hans gruppe fra University of Illinois stod for de mest omfattende beregninger baseret på al viden om kræfterne mellem nukleoner og data fra kerner energitilstande og nukleonspredningseksperimenter [4]. Samtidigt skal kræfterne opfylde bestemte symmetri-egenskaber og relativistisk invarians.



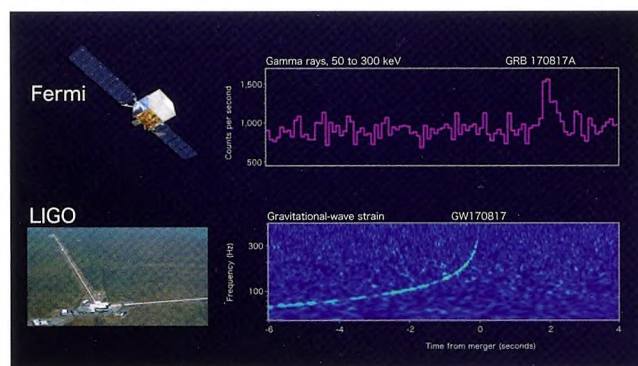
Figur 3. Skitse af to neutronstjerner, der spiralerer mod hinanden.

Illinois-gruppen lavede også beregninger af hele neutronstjernens struktur [4,5]. Yderst ligger et gitter af neutronrige kerner, som en halv kilometer nede drypper neutroner ud i en blandingsfase. Lidt længere inde i skorpen dannes boble-, rør- og pladelignende strukturer, som vi i et sultent øjeblik døbte “the pasta in pulsars”. Dybere inde presses kernestoffet sammen til en neutronrig væske, og i centrum bliver trykket måske så højt, at kvarkerne frigøres [5]. Her bliver forudsigelserne dog usikre, fordi “kvarkindespærring” (engelsk quark-confinement) i nukleoner ikke kan beregnes (kvantekromodynamikken er ikke-lineær og non-perturbativ). Derfor er vores viden om nukleoners vekselvirkning baseret på empirisk viden fra spredning og kernefysik. Disse måler dog kun på næsten-frie nukleoner, så det vides ikke, hvordan de opfører sig ved højt tryk, hvor deres indre kvarkstruktur ændres. Dette influerer igen på vekselvirkningen med andre nukleoner. Disse trelegeme-vekselvirkninger var netop, hvad Vijay forudsagde ud fra symmetri, isospin og relativitet. Neutronstjernens diameter gør os dermed klogere på kernefysik, nukleoner, kvarker og de grundlæggende stærke kræfter.

Det er bemærkelsesværdigt, at stjerner, hvide dværge, neutronstjerner, quarkstjerner og sorte huller alle kan have masser på ca. en solmasse. De består alle af nukleoner (quarks) og elektroner, men i vidt forskellige faser og tilstandsligninger. Så selvom massen er ens, er tæthed og radius og dermed tyngdefeltet meget forskellige.

Diameteren er også relevant for de gigantiske eksplosioner, der følger kollisioner mellem to neutronstjerner. I 2017 målte LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) gravitationelle bølger

fra en sådan kollision. To neutronstjerner spiralerer mod hinanden med en frekvens, der vokser kraftigt, indtil de rører hinanden, kolliderer og smelter sammen. En gigantisk eksplosion udløses, der får rummet til at skælve med tyngdebølger, der kan måles mange galakser væk af LIGO. Efterfølgende kunne man i teleskoper også se eftergløden.



Figur 4. LIGO-chirp-frekvensen målt sekunder før kollision.

Man mener nu, at de tungeste grundstoffer i universet dannes efter sådanne neutronstjerner sammen-smeltninger og eksplosioner. De mellemte grundstoffer dannes derimod i supernovaeksplosioner, mens de lette grundstoffer helium og lithium blev dannet i Big Bang. Planeter – og dermed vi mennesker – er altså delvist lavet af stjernestøv fra neutronstjerner eksplosioner, der starter i en afstand på 25 km mellem to neutronstjerner – deres diameter!

Litteratur

- [1] www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-s-nicer-delivers-best-ever-pulsar-measurements-1st-surface-map
- [2] T.E. Riley m.fl. (2019) *Astrophys. J. Letts.*, bind **887**, side L21.
- [3] M.C. Miller og N. Yunes (2019) *Nature*, bind **568**, side 469–476.
- [4] A. Akhmal, V.R. Pandharipande og D.G. Ravenhall (1998) *Phys. Rev. C*, bind **58**, side 58; H. Heiselberg og V.R. Pandharipande (2000) *Ann. Rev. Nucl. Part. Phys. Sci.*, bind **50**, side 481.
- [5] G.A. Baym og C.J. Pethick (1979) *Ann. Rev. Astron. Astrophysics*, bind **17**, side 415; H. Heiselberg, C.J. Pethick og E.F. Staubo (1993) *Phys. Rev. Lett.*, bind **70**, side 1355.
- [6] LIGO (2017) *Phys. Rev. Lett.*, bind **119**, side 161101.



Henning Heiselberg er ph.d. i fysik og B.Sc. i matematik fra Aarhus Universitet. Tidligere lektor på Nordita, Staff Scientist på Lawrence Berkeley Laboratory, seniorforsker ved Forsvarets Forskningstjeneste og nu centerleder på Security DTU.

Beregning af Jordens middeltemperaturstigning ved en fordobling af CO₂-indholdet i atmosfæren

Torben Lund, Emil Storr-Hansen, Victor Valdemar Eierslev Christensen, Caspar Helge Ulla Nilsson, Daniel Vestmar Norén og Sebastian Helboe Empacher, Institut for Naturvidenskab og Miljø, Roskilde Universitet

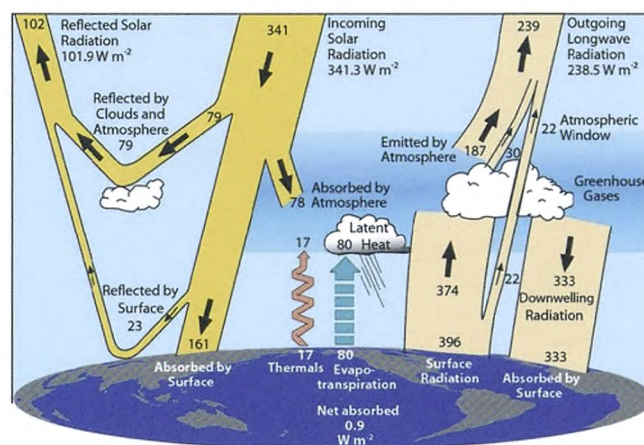
I artiklen opstilles en simpel model til beskrivelse af drivhusgassen CO₂'s indflydelse på Jordens middeltemperatur. Modellen er baseret på strålingsligevægtsmodellen og med en opdeling af atmosfærens første 10 km (troposfæren) i lag på 1 km og konstant temperatur for stratosfæren på 220 K. Ved en fordobling af CO₂-koncentrationen fra 400 til 800 ppm forudsiger modellen en forøget opvarmning (radical forcing, RF) af Jorden på 6,9 W/m², som kan omregnes til en global middeltemperaturstigning på 1,9°C, for den isolerede virkning af CO₂. Modellen beskriver fint den logaritmiske lineære sammenhæng mellem RF og CO₂-koncentrationen i atmosfæren og kan afvise CO₂-hypotese-skeptikernes argument om den allerede "mættede CO₂-atmosfære".

Ved et middagsselskab sidste år i juni efter klimavalget, hvor denne artikels førsteforfatter deltog, blev regeringens ambitiøse CO₂-reduktionsmål på 70 % livligt diskuteret. Til min overraskelse erklærede en af mine gode venner og kemiker, at han ikke troede på det herskende paradigme om, at den globale opvarmning skyldes menneskehedens udledning af CO₂ til atmosfæren. Jeg blev henvist til CO₂-hypotese-skeptikerne Ole Humlum og Johannes Krügers velskrevne bøger [1, 2] samt henvisninger til internettet, at atmosfæren allerede er "mættet" med CO₂ [3]. Mætningsargumentet går ud på, at infrarød varmestråling udsendt fra Jorden i det bølgelængdeinterval, hvor CO₂ absorberer (14–15 μm), ikke når længere op i atmosfæren end ca. 250 m, før 99 % af strålingen er absorberet. En øget CO₂-koncentration vil derfor ikke gøre fra eller til og derfor ikke øge den globale opvarmning. Min egen daværende forståelse af klimaproblematikken byggede på den simple drivhusmodel, der beskriver, hvorledes Solens kortbølgede, synlige lys passerer stort set uhindret gennem atmosfæren, mens den langbølgede varmestråling fra Jorden delvist tilbageholdes af drivhusgasserne H₂O og CO₂ i atmosfæren – altså analogt til varmeskabelsen i et drivhus, hvor atmosfæren er "erstattet" af glas.

Drivhusmodellen er formidlet i en fremragende pædagogisk fremstilling til gymnasiet af Laura M. Jensen og Hans B. Jensen [4]. Modellen er rent kvalitativ og kan ikke kvantitativt forudsige stigningen i den globale middeltemperatur ved en forøgelse af CO₂-koncentrationen i atmosfæren, ej heller kan den argumentere imod påstanden om den CO₂-mættede atmosfære. Jeg var derfor ikke i stand til at give min ven igen med videnskabelige modargumenter og besluttede efterfølgende at forsøge at nå et spadestik dybere i forståelsen af CO₂'s indvirkning på klimaet ved at udbyde klimaproblematikken som et 3. semester-projektforslag på den naturvidenskabelige bacheloruddannelse på Roskilde Universitet [5].

I projektet har vi valgt at anvende den relativt simple strålingsligevægtsmodel [6] til beregning af temperaturstigningen ved en fordobling af CO₂-koncentrationen i atmosfæren og via modellen argumentere for, at CO₂-mætningshypotesen er forkert. Det

har været et mål for projektet at forsøge at formidle modellen og beregningerne pædagogisk, så fremstillingen med lidt lærerhjælp forhåbentlig vil kunne være til inspiration for gymnasieelever med højt niveau i matematik og fysik. Klimaproblematikken har tidligere været behandlet i en række Kvantartikler [6-9], men til vores overraskelse er der ikke tidligere skrevet formidlingsartikler på dansk, der kvantitativt forsøger at beregne den isolerede effekt af en øget CO₂-koncentration i atmosfæren på Jordens middeltemperaturstigning.



Figur 1. Årligt gennemsnit af Jordens energiflow for 2000-2005 [10]. Tallet 341,3 W/m² er den indgående solstråling, 101,9 W/m² er den reflekterede solindstråling og 238,5 W/m² er den udgående, langbølgede stråling fra Jordens overflade.

Figur 1 viser energistrømmene på Jorden [10]. Netto-solindstrålingen S er givet ved

$$S = \frac{S_0}{4} \cdot (1 - \alpha) = 239 \text{ W/m}^2, \quad (1)$$

hvor S_0 er solkonstanten (1364 W/m²) og α er albedo-effekten (0,30), der angiver den del af solindstrålingen, som reflekteres af Jorden og atmosfæren. Jorden kan tilnærmelsesvis betragtes som et sort legeme med en udstråling $R_{jord} = \sigma T^4$, hvor T er Jordens overfladetemperatur og $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$ er Stefan-Boltzmanns konstant.

Af denne varmestråling er det kun brøkdelen ϵ , som passerer Jordens atmosfære, således at udstrålingen i toppen af atmosfæren er $R = \epsilon \sigma T^4$. Ifølge strålingsligevægtsmodellen skal Jordens udsendelse af infrarød varmestråling R i toppen af atmosfæren være den samme som netto-solindstrålingen fra Solen, dvs.:

$$R = \epsilon \sigma T^4 = \frac{S_0}{4} \cdot (1 - \alpha) = 239 \text{ W/m}^2. \quad (2)$$

Med en gennemsnitstemperatur af Jorden på 15°C ($T = 288 \text{ K}$) kan ϵ beregnes til 0,62. Hvis Jorden ikke havde en atmosfære, ville $\epsilon = 1$, og Jordens overfladetemperatur ville være -18°C .

Hvis CO_2 -koncentrationen i atmosfæren stiger, vil absorptionen af infrarød stråling fra Jorden øges, og ϵ vil blive mindre. For at strålingsligevægten kan opretholdes, må Jordens overfladetemperatur derfor øges med ΔT . Ved at differentiere udtrykket (2) og antage at netto-solindstrålingen er konstant, kan den nødvendige temperaturstigning ΔT beregnes:

$$\Delta R / \Delta T = 4\epsilon \sigma T^3 + \left(\frac{\Delta \epsilon}{\Delta T} \right) \sigma T^4 = 0 \quad (3)$$

Den infrarøde strålingseffekt pr. m^2 , som CO_2 isole-ret set absorberer i atmosfæren og opvarmer kloden ekstra med, benævnes CO_2 's "radial forcing", RF . Øges CO_2 -koncentrationen fra et niveau c_1 til et højere c_2 , øges RF med ΔRF . Ved samme overfladetemperatur af Jorden T bliver udstrålingen i toppen af atmosfæren mindre og $R_2 < R_1$

$$\Delta RF = R_1 - R_2 > 0 \quad (4)$$

Indsættes $\Delta RF = -\Delta \epsilon \sigma T^4$ i (3), kan ΔT beregnes af (5), hvor λ_0 betegnes som standard klimafølsomhedsfaktoren $\lambda_0 = \epsilon \sigma T^3$. Med $T = 288 \text{ K}$ fås $\lambda_0 = 3,6 \text{ Wm}^{-2}$,

$$\Delta T = 4\Delta RF / \epsilon \sigma T^3 = \Delta RF / \lambda_0. \quad (5)$$

Vi ønsker at beregne ΔT ved en fordobling af CO_2 -koncentrationen i atmosfæren, fra de nuværende 400 ppm til 800 ppm. Dette gøres ved at beregne udstrålingen i toppen af atmosfæren, R_1 og R_2 , i det bølgelængdeinterval (14–15 μm), hvor CO_2 absorberer og herigennem bestemme ΔRF .

Plancks strålingslov udtrykker den strålingsintensitet $B(\tilde{\nu}, T)$, der udsendes af et sort legeme med overfladetemperaturen T som funktion af den elektromagnetiske strålings bølgetal $\tilde{\nu} = 1/\lambda$ i cm^{-1} .

$$B(\tilde{\nu}, T) = 2hc^2 \cdot \tilde{\nu}^3 \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc\tilde{\nu}}{k_b T}} - 1} \quad (6)$$

Enheden er $\text{W/m}^2/\text{cm}^{-1}$ pr. rumvinkelenhed. Den monokromatiske stråling $R(\tilde{\nu})$, som passerer gennem atmosfæren med bølgetallet $\tilde{\nu}$, er givet ved (7) [11].

$$R(\tilde{\nu}) = \int_0^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T) \cdot e^{-\tau} d\tau \quad (7)$$

Her betegner τ den optiske dybde, der angiver, hvor meget af strålingen I_0 , som absorberes ved passage af en given luftsøjle og er ækvivalent til absorptionsen A , i Lambert-Beers lov

$$\tau = \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) = A \cdot \ln(10) \quad (8)$$

Den optiske dybde for en foton med bølgetallet $\tilde{\nu}$, som udsendes fra højden z fra jordoverfladen og skal passere atmosfæren og videre ud i verdensrummet, er givet ved følgende udtryk

$$\tau_{\tilde{\nu}} = \int_z^\infty c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu}) \cdot dz = \epsilon'(\tilde{\nu}) \cdot \int_z^\infty c(z) dz \quad (9)$$

Her er $c(z)$ koncentrationen af CO_2 i højden z fra jordoverfladen, og $\epsilon'(\tilde{\nu})$ er absorptionskoefficienten for CO_2 , $\epsilon'(\tilde{\nu})$ ganget med $\ln(10)$, som antages at være uafhængig af højden fra jordoverfladen. Integralet i (9) angiver, hvor mange CO_2 -molekyler, der er i luftsøjlen fra højden z og til atmosfærens top. $c(z)$ er proportional med partialtrykket af CO_2 i højden z , som med god tilnærmelse kan udtrykkes som [14]

$$p(z) = p_0 \cdot e^{\left(-\frac{gzM}{T_0 R_0} \right)} \quad (10)$$

Her er p_0 trykket ved jordoverfladen, g er tyngdeaccelerationen ($9,82 \text{ m/s}^2$), z er højden i m fra jordoverfladen, M er den molære masse for CO_2 (44 g/mol), T_0 er overfladetemperaturen (288 K) og R_0 er gaskonstanten (8,31 J/mol·K). For at gøre udtrykket mere enkelt indføres konstanten a

$$a = g \cdot \frac{M}{T_0 \cdot R_0} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}. \quad (11)$$

Derudover erstattes partialtrykket med koncentrationen c , så udtrykket nu ser således ud:

$$c(z) = c_0 \cdot e^{-a \cdot z}. \quad (12)$$

Nu kan $c(z)$ substitueres ind i ligning (9). Løsningen af integralet i (13) giver udtrykket (14) for den optiske dybde for en foton med bølgetallet $\tilde{\nu}$, som udsendes fra højden z i atmosfæren

$$\tau_{\tilde{\nu}} = c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu}) \int_z^\infty e^{-a \cdot z} \cdot dz \quad (13)$$

$$\tau_{\tilde{\nu}} = \frac{c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu})}{a} \cdot e^{-a \cdot z}. \quad (14)$$

Det ses, at ved højden $z = 0$ vil $e^{-a \cdot z}$ give 1, så udtrykket for den optiske dybde ved jordoverfladen, $\tau(s)$, kan skrives:

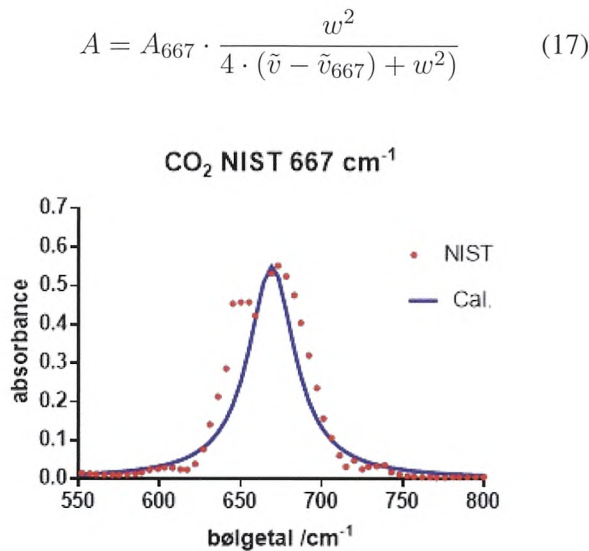
$$\tau(s) = \frac{c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu})}{a}. \quad (15)$$

Nu kan det endelige udtryk for alle optiske dybder opstilles:

$$\tau = \tau(s) \cdot e^{-a \cdot z}. \quad (16)$$

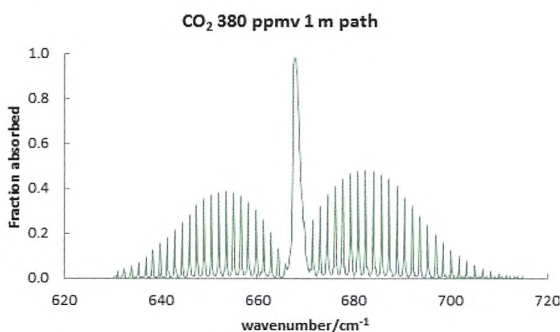
Metode

CO₂ har fire vibrationsbånd, hvor ↓O-C-O↓-bøjningsbåndet omkring 667 cm⁻¹ (15 μm) er langt det vigtigste i drivhusgasvirkningen af CO₂. Figur 2 viser et lavresolutions-infrarødt spektrum (IR) af en CO₂-gasprøve optaget af National Institute of Standards (NIST) [12]. En typisk absorptionstop i IR kan beskrives ved et Lorentzudtryk, hvor $\tilde{\nu}$ er bølgetallet, $\tilde{\nu}_{667}$ og A_{667} er henholdsvis bølgetallet og absorbanzen ved topmaksimum, og w er halvværdibredden i cm⁻¹. I figur 2 er NIST-spektret simuleret med $w = 35$ cm⁻¹. Ud fra NIST-spektret kan man beregne en absorptionskoefficient ved 667 cm⁻¹ på $\epsilon_{667} = 2,1 \cdot 10^{-5}$ ppm⁻¹m⁻¹. I en atmosfære med 400 ppm CO₂ vil 99 % af 667 cm⁻¹-fotonerne udsendt fra Jorden være absorberet efter blot 240 m.



Figur 2. Kurver, der viser den eksperimentelle absorptionsmåling af CO₂ (røde punkter) og en simuleret kurve (blå). Spektret er optaget af en CO₂-gasprøve med partialtrykket pCO₂ = 200 mmHg og pCO₂+pN₂ = 600 mmHg og en optisk vejlængde på 0,1 m.

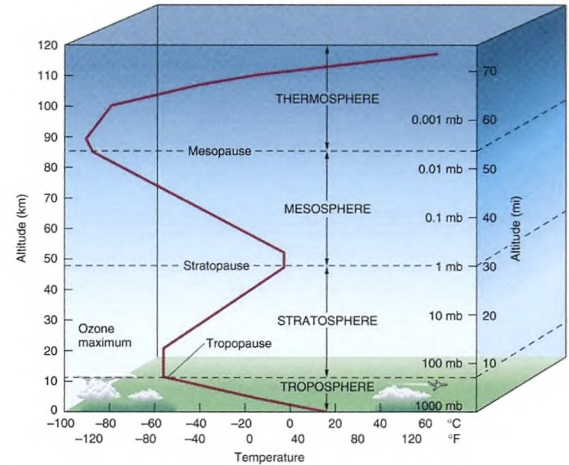
I kommende udregninger er en w -værdi på 17 cm⁻¹ blevet valgt, da dette svarer til halvdelen af den fundne. Et højopløsende IR-spektrum af CO₂ er vist i figur 3. Her ses bøjningsbåndet overlejret af mange rotationsovergange i CO₂-molekylet. Der ses "huller" i det højopløsende spektrum sammenlignet med NIST-spektret.



Figur 3. Højopløsende IR-spektrum af CO₂ med alle dets individuelle rotationsovergange [13].

Figur 4 viser temperaturen op gennem atmosfæren. Op gennem troposfæren (0–10 km) falder temperaturen fra ca. 288 K til 220 K, hvorefter temperaturen i stratosfærelaget fra 10–20 km er konstant 220 K. Vi har valgt at medtage de første 20 km af atmosfæren og opdele troposfæren i 10 lag af tykkelse på 1 km. Hvert atmosfærelag antages at kunne beskrives som et sort legeme, der udsender lys givet ved lagets temperatur T_z ,

$$T_z = 288 - 7 \cdot z. \quad (18)$$



Figur 4. Atmosfærens temperatur og tryk som funktion af højden z fra jordoverfladen [14].

Vi kan nu beregne integralet for den monokromatiske strålings flux $R(\tilde{\nu})$ i (7) ved at opdele atmosfæren i tropospausen og stratosfæren, som vi antager har en konstant temperatur $T = 220$ K (18). Dette er ikke helt korrekt, men over 20 km er atmosfæren meget tynd og betyder relativt lidt.

$$\begin{aligned} R(\tilde{\nu}) &= \int_0^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T) \cdot e^{-\tau} d\tau \\ &= \int_{\tau_{10}}^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T(\tau)) \cdot e^{-\tau} d\tau \\ &\quad + \int_0^{\tau_{10}} B(\tilde{\nu}, 220) \cdot e^{-\tau} d\tau. \end{aligned} \quad (19)$$

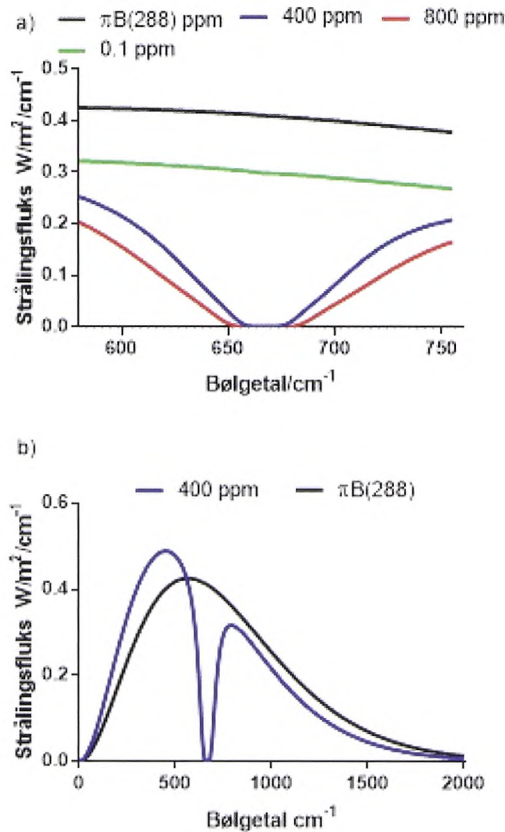
$$\int_{\tau_{10}}^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T(\tau)) \cdot e^{-\tau} d\tau = \sum_{i=1}^{10} B(\tilde{\nu}, T_i) \cdot e^{-\tau_i} \cdot w_i d\tau. \quad (20)$$

$$w_i = \frac{\tau(i) - \tau(i+1)}{\tau(s) - \tau(10)}. \quad (21)$$

$$\begin{aligned} &\int_0^{\tau_{10}} B(\tilde{\nu}, 220) \cdot e^{-\tau} d\tau \\ &= B(\tilde{\nu}, 220) \cdot \int_0^{\tau_{10}} e^{-\tau} d\tau \\ &= B(\tilde{\nu}, 220) \cdot (1 - e^{-\tau}). \end{aligned} \quad (22)$$

Integralet fra 10 km til uendeligt langt væk, hvor den optiske dybde er tilsvarende 0, kan løses analytisk (22). Integralet fra jordoverfladen (τ_s) til 10 km (τ_{10}) foretages som en sum af bidragene fra de 10 atmosfærelag.

De enkelte bidrag multipliceres med en vægtfaktor w_i , der angiver det i 'te atmosfærelags relative andel af troposfærens optiske dybde ($\tau_s - \tau_{10}$). Det skal bemærkes, at alle udtrykkene for R skal multipliceres med faktoren π for at tage hensyn til, at strålingen udsendes i alle retninger i en halvkugle. I studenterprojektet blev $R(\tilde{\nu})$ -værdierne beregnet i et Excel-regneark for hver cm^{-1} i bølgetalsintervallet $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$, svarende til CO_2 -båndets omtrentlige udstrækning [5]. I beregningerne blev både CO_2 -absorptionsbåndets linjebredde w samt atmosfærens CO_2 -indhold i ppm varieret.



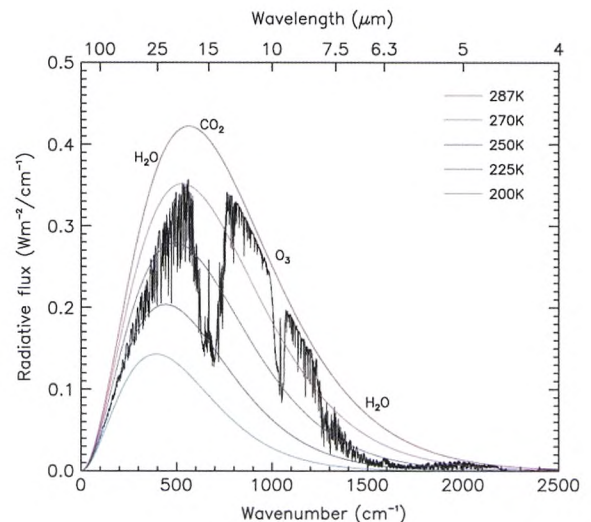
Figur 5. Strålingsemissionen fra toppen af atmosfæren $R(\tilde{\nu})$ beregnet med den simple atmosfærelagsmodels forskellige CO_2 -koncentrationer.

Resultater og diskussion

Figur 5a viser de beregnede infrarøde strålingsflukser $R(\tilde{\nu})$ i bølgetalsintervallet $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$ for en 0,1, 400 og 800 ppm CO_2 -atmosfære. Dyk i $R(\tilde{\nu})$ omkring CO_2 -absorptionsbåndets center ved 667 cm^{-1} ses tydeligt. Omkring centerbåndet er der ingen infrarøde fotoner, som slipper igennem atmosfæren, og først omkring $30\text{--}40\text{ cm}^{-1}$ fra centertoppens maksimum slipper strålingen for alvor igennem. Det er her, hvor forskellen på 400 og 800 ppm-kurverne for alvor viser sig og giver anledning til en øget opvarmning af Jorden med værdien ΔRF . Figur 6 viser state of the art beregninger af $R(\tilde{\nu})$ foretaget af Zhong og Haigh [10]. Reduktionen i udstråling ved 667 cm^{-1} , den såkaldte radiative forcing RF af CO_2 , er i artiklen opgivet til 16 W/m^2 ved 389 ppm. I vores simple model beregnes RF ved 400 ppm til henholdsvis 23 og 31 W/m^2 for CO_2 -linjebredderne

10 og 17 cm^{-1} (se tabel 1). I figur 6 ses det, at der faktisk slipper centerfotoner igennem atmosfæren et sted oppe i stratosfæren ved en temperatur $T = 220\text{ K}$, hvilket der ikke gør i vores meget simple model. I figur 5a er indtegnet $R(\tilde{\nu}) = \pi B(\tilde{\nu}, 288)$, som er udstrålingen uden atmosfære. Denne kurve ligger samlet set 3 W/m^2 over udstrålingen beregnet med en meget lav CO_2 -koncentration (0,1 ppm). Resultaterne af de simple modelberegninger er vist i tabel 1. R -værdierne afhænger af den valgte linjebredde w , mens ΔRF er relativt ufølsom overfor ændringer i w . Selv om beregningerne har svært ved at reproducere den korrekte RF -værdi ved 400 ppm, som kan beregnes ved avancerede beregninger [10] eller bestemmes via satellitmålinger [15], viser tallene den korrekte logaritmiske lineære sammenhæng, som vist i figur 7. Denne intuitivt overraskende sammenhæng viser, at ΔRF og dermed den globale temperaturstigning er ens, uanset om atmosfærens CO_2 -indhold øges fra 400 til 800 ppm eller fra 800 til 1600 ppm. Vores beregninger giver følgende sammenhæng, hvor c_1 og c_2 angiver CO_2 -koncentration i atmosfæren.

$$\Delta RF = 9,9 \cdot \ln\left(\frac{c_2}{c_1}\right) \text{ W/m}^2. \quad (23)$$



Figur 6. Den sorte kurve er et model-genereret spektrum af strålingsfluksen udsendt til rummet i toppen af atmosfæren. De røde kurver angiver sortlegeme-udstrålingen ved de angivne temperaturer [10].

Ved en fordobling af CO_2 -indholdet i atmosfæren kan ΔRF beregnes til $6,9\text{ W/m}^2$. Denne værdi kan ifølge (5) omregnes til en global temperaturstigning på $\Delta T = 6,9/\lambda_0 = 6,9/3,6 = 1,9\text{ K}$. Faktoren 9,9 i udtrykket (22) er noget højere end de 5,35, som er bestemt af Myhre m.fl. i 1998 [16], og som giver en $\Delta RF = 3,7\text{ W/m}^2$ og en global temperaturstigning på $1,0^\circ\text{C}$, isoleret set. Vores ΔRF er således omtrentlig en faktor 2 for høj og beror på, at det lavt opløste NIST IR-spektrum (figur 2) ikke er tilstrækkeligt godt til at kunne foretage en præcis beregning. I det højt opløsende spektrum er der små bølgetals-“huller”, som tillader fotoner at passere

Tabel 1. Modelberegning af R , RF og ΔRF i bølgetalsintervallet $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$ som funktion af $[\text{CO}_2]$ og $\text{CO}_2\text{-IR-top-linjebredden } w$.

	$w = 10\text{ cm}^{-1}$			$w = 17\text{ cm}^{-1}$		
$[\text{CO}_2]/\text{ppm}$	$R/\text{W/m}^2$	$RF^a/\text{W/m}^2$	$\Delta RF^b/\text{W/m}^2$	$R/\text{W/m}^2$	$RF^a/\text{W/m}^2$	$\Delta RF^b/\text{W/m}^2$
$\pi \cdot B(288)^a$	56,4	-	-	56,4	-	-
0,1	53,6	0	-	53,6	0	-
100	42,6	10,9	-	36,2	17,3	-
200	38,2	15,4	4,5	29,8	23,7	6,4
400	32,6	20,9	5,5	22,7	30,9	7,2
800	26,1	27,5	6,5	15,4	38,1	7,2
1600	18,9	34,6	7,1	9,2	44,4	6,3

^a $RF = R - R(0,1)$ ^b $\Delta RF = R_1 - R_2$ beregnet for forskellene i R for 100–200, 200–400, 400–800 og 800–1600 ppm.

uhindret gennem atmosfæren. Hvis vi antager, at halvdelen af de infrarøde fotoner i bølgelængdeintervallet $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$ kan finde vej gennem "hullerne", ja så vil ΔRF halveres. I princippet kunne vores regnearksmetode benyttes for hvert skarpe bånd i figur 3 – men i praksis er det ikke muligt, og mere avanceret programmering er nødvendig, for at behandle det langt mere komplekse figur 3-spektrum. IPCC har i deres seneste rapport estimeret en global middeltemperaturstigning fra $1,5\text{--}4,5^\circ\text{C}$ ved en fordobling af CO_2 -koncentrationen fra 400–800 ppm, som er væsentlig højere end de 1°C , som beregnes som den isolerede effekt af CO_2 . Årsagen er, at en stigning af landjordens og havenes temperatur som følge af CO_2 -øgningen vil give afledte effekter såsom øget fordampning af drivhusgasen vand fra verdenshavene, afsmeltning af polerne og reduktion i albedoeffekten, optøning af permafrosten med udledning af metan til følge m.m. Det vanskelige er således ikke at estimere effekten isoleret set af en CO_2 -koncentrationsøgning, men at kunne beregne og forudsige alle de afledte sideeffekter. IPCC opererer med en klimafølsomhedsfaktor, som er betydelig lavere end standard klimafølsomhedsfaktoren på $\lambda_0 = 3,6\text{ W/m}^2$. De nyeste videnskabelige undersøgelser viser, at klimafølsomheden øges ved stigende global middeltemperatur [9].

Konklusion

I artiklen opstilles en simpel model til beskrivelse af drivhusgassen CO_2 's indflydelse på Jordens middeltemperatur. Den simple model benytter fysik og matematik, som ligger inden for højniveaupensum for de to fag i gymnasiet. Modellen er baseret på strålingsligevægtsmodellen og med en opdeling af atmosfærens første 10 km (troposfæren) i lag på 1 km og konstant temperatur for stratosfæren på 220°K . Alle beregninger er udført i regneark. I det infrarøde bølgetalsområde $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$, hvor CO_2 har sin væsentligste drivhusgasabsorption, beregnes en absorption af infrarød stråling (radiative forcing, RF) på 31 W/m^2 for en CO_2 -koncentration på 400 ppm, hvor satellitmålinger giver 16 W/m^2 . Ved en fordobling af CO_2 -koncentrationen til 800 ppm forudsiger modellen en forøget absorption ΔRF på $6,9\text{ W/m}^2$, som kan omregnes til en global middeltemperaturstigning på $1,9^\circ\text{C}$ for den isolerede

virkning af CO_2 . Selv om den simple model overestimerer både R og ΔRF med ca. en faktor 2 i forhold til mere avancerede beregninger, beskriver modellen fint den logaritmiske lineære sammenhæng mellem RF og CO_2 -koncentrationen i atmosfæren og viser, hvorledes emissionen af infrarød stråling $30\text{--}40\text{ cm}^{-1}$ fra centerabsorptionen (667 cm^{-1}) reduceres ved en fordobling af CO_2 -koncentrationen. Modellen kan således klart afvise CO_2 -hypotese-skeptikernes argument om, at atmosfæren allerede er mættet med CO_2 , og at en øget CO_2 -koncentration ikke vil påvirke middeltemperaturen på Jorden.

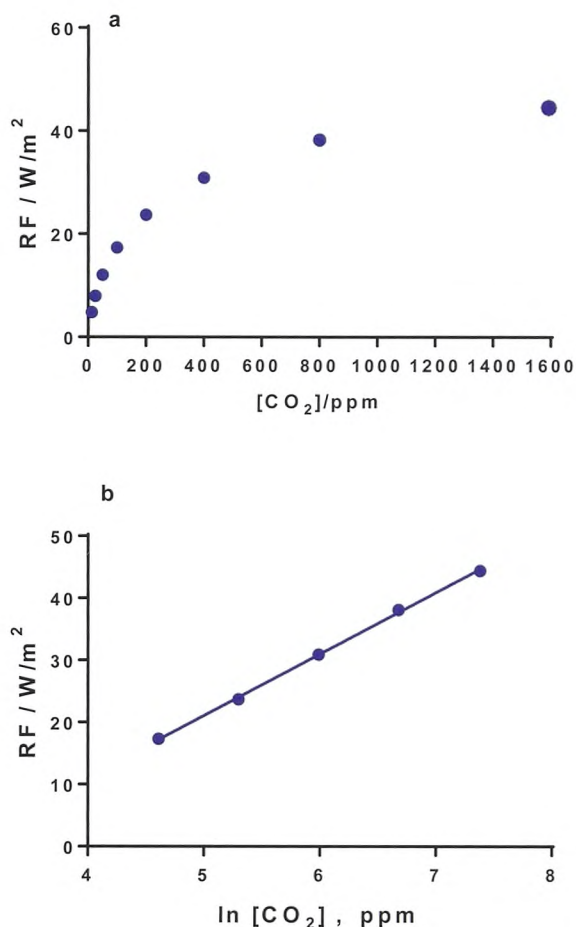


Figure 7. Radiative forcing (RF) beregnet ved den simple atmosfærelagsmodel som funktion af $[\text{CO}_2]$ og $\ln[\text{CO}_2]$.

Litteratur

- [1] O. Humlum (2010) Det ustyrlige klima. Eksperternes vej fra forskere til flagellanter, 2. udgave, Trykkefrihedsselskabets Bibliotek.
- [2] J. Krüger (2016) Klimamyten. Et opgør med tidens CO₂-panik, 1. udgave, People'sPress.
- [3] [www.skepticalscience.com/saturated-CO₂-effect-intermediate.htm](http://www.skepticalscience.com/saturated-CO2-effect-intermediate.htm).
- [4] L.M. Jensen og H.B. Jensen (2020) Global opvarmning, Systime A/S.
- [5] V. Christensen m. fl. (2019) CO₂'s indflydelse på Jordens gennemsnitstemperatur – en formidling af tallene bag klimadebatten, RUC.
- [6] J.U. Andersen (2010) Om klimamodeller og satellitmålinger, *Kvant*, bind 21, nr. 2, side 28–32.
- [7] J.H. Christensen (2015) Klimaforandringer set gennem FN's klimapanel 5. hovedrapport, *Kvant*, bind 26, nr. 3, side 23–29.
- [8] J.O.P. Pedersen (2011) Solaktivitet og klimaforandringer, *Kvant*, bind 22, nr. 4, side 26–31.
- [9] J.O.P. Pedersen (2017) Drivhuseffekten, *Kvant*, bind 28, nr. 3, side 31–34.
- [10] W. Zhong og J. D. Haigh (2013) The greenhouse effect and carbon dioxide, *Weather*, bind 68, nr. 4, side 100–105.
- [11] Y. Huang og M. B. Shababdi (2014) Why logarithmic? A note on the dependence of radiative forcing on gas concentration, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, bind 119, nr. 24, side 13.683–13.689.
- [12] NIST (2018) Carbon dioxide (online).
- [13] B. Bellamy, Barrett Bellamy Climate – Greenhouse gas spectra, <http://www.barrettbellamyclimate.com/page15.htm>.
- [14] www.en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_pressure.
- [15] <http://clivebest.com/blog/?p=4597>.
- [16] G. Myhre, E.J. Highwood, K.P. Shine og F. Stordal (1988) New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases, *Geophysical Research Letters*, bind 25, nr. 14, side 2715–2718.

Nyt fra SNU

H.C. Ørsted på ny – skønheden i naturen

Som omtalt i *Kvant* nr. 1 fra april 2020 har SNU skabt en vandrestilling i forbindelse med den nationale fejring af 200-året for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen.

Udstillingen har været i Rundetaarn fra 1. juli – 27. september i år og er nu vandret videre til Odense, hvor den åbnede hos Syddansk Universitetsbibliotek den 5. oktober. Det forventes, at udstillingen i Odense er åben for offentligheden mandag–fredag fra kl. 10–14.

I Rundetaarn har udstillingen været åben fra kl. 10–20 alle ugens syv dage, og der var alene i juli måned næsten 60.000 besøgende, fordelt på alle aldersklasser. I august–september måned har der været mange klassebesøg, fra alle klassetrin fra 4. klasse og opefter.



Fra venstre ses Dorte Olesen, Jens Breinegaard, Gregers Mogensen, Hans Buhl, Johannes Brøndsted og Peter Stauning.

Åbningen af udstillingen i Rundetaarn blev grundet COVID-19 holdt for 50 inviterede gæster den 1. juli og

50 andre den 2. juli, hvor videnskabsredaktør Jens Ramskov fra Ingeniøren fik overrakt H.C. Ørstedmedaljen i sølv i forbindelse med åbningen.

Ved begge åbninger takkede Dorte Olesen også Gregers Mogensen, Jens Breinegaard, Peter Stauning og Hans Buhl for deres indsats med at få udstillingen etableret. Som tak modtog de alle en vindmølle af strategi- og kommunikationsdirektør Johannes Brøndsted fra energiselskabet Ørsted A/S.



DTUs prorektor og formand for HCØ2020-styregruppen, Rasmus Larsen, lagde også vejen forbi Ørstedudstillingen på åbningsdagen.

Generalforsamling

Den 21. september lykkedes det at holde den fra foråret udskudte generalforsamling i Auditorium 1 i H.C. Ørstedbygningen. Man kan se referatet på SNUs hjemmeside www.naturlæren.dk.

Det kan her kort nævnes, at kontingentet for 2021 er uændret, og at SNU i 2020 har en væsentligt forøget aktivitet grundet sin aktive deltagelse i fejringen af 200-året for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen. Endelig stillede Ole Mørk Lauridsen sit mandat til rådighed og blev genvalgt.

“Spooky action at a distance”: Er tyngdekraften endelig blevet kvantemekanisk?

Daniel Skipper Rasmussen

I jagten på at finde en kvantemekanisk teori for gravitationskraften har en ny idé meldt sig på banen. I denne nye teori er tyngdekraften slet ikke fundamental, men emergent. Hvis teorien er sand, vil den løse et af de største problemer inden for fysikken.

Seniorforsker i fysik Jens Olaf Pepke Pedersen beskriver i sin artikel “Jagten på urkraften”, udgivet den 19. december 2019 i Weekendavisen, naturvidenskabens ønske om at forene naturens kræfter i en simpel helhed. Den teori venter vi stadig på, og måske er en del af årsagen hertil en forfejlet reaktion på et velkendt fænomen inden for fysikken: teorier, der synes at virke med god tilnærmelse i én størrelsesorden, bryder ned, når teorien flyttes til en anden størrelsesorden. I jagten på at finde en kvantemekanisk teori for tyngdekraften har en række forskere fremsat en ny idé: Måske er løsningen ikke at dykke stadigt dybere ned i jagten på universets enhed, men at bevæge os højere op?

Det uendelige tårn af skildpadder

Fysikken har længe søgt at studere stadigt mindre afstande i jagten på det fundamentale i universet. Partikelacceleratoren Large Hadron Collider (LHC) er manifestationen af dette ønske. Ved at slå partikler sammen ved ekstremt høje energier undersøger acceleratoren stadigt mindre skalaer i universet. Men der er både et praktisk og et filosofisk problem med den reduktionistiske hypotese og metode. Det praktiske problem er, at det kræver omvendt proportionalt meget energi at studere de mindste afstande i universet. I skrivende stund kan LHC studere afstande ned til 10^{-19} m. Den mindste målbare skala i universet, den såkaldte Planck-skala, måler 10^{-35} m. At studere denne skala kræver så meget energi, at processen uundgåeligt skaber et sort hul. At studere højere energiniveauer og mindre størrelsesordener, vil blot skabe et større sort hul. På dette plan gælder fysikkens love, som succesfuldt beskriver fænomener større end Planckskalaen, ikke længere, og Planckskalaen sætter således en praktisk øvre grænse for, hvor langt ned vores forståelse af universet rækker med vores nuværende teorier.

Men der er også et andet, mere drilsk problem: for hvad vil det overhovedet sige at nå det “laveste niveau”, og er der i det hele taget et sådant (reduktionistisk) hierarki? Problemet er ofte afbildet som et uendeligt tårn af skildpadder. Med andre ord: hvis enhver skildpadde er støttet af en anden skildpadde, når vi så nogensinde bunden? Hvis vi for et øjeblik forestiller os, at der rent faktisk findes en skildpadde nederst i hierarkiet, som ikke støttes af andet end den selv, så siger den reduktionistiske hypotese, at hele skildpaddetårnet kan bygges fra bunden, skildpadde for skildpadde. Men begge hypoteser – at større størrelsesordener bygges op

af mindre størrelsesordener på lineær vis, og at der rent faktisk er noget sådant som den mindste størrelsesorden – er netop kun hypoteser og derfor åbne for kritik. At den reduktionistiske metode døjer med disse problemer har givet forskere den idé, at svaret måske slet ikke skal findes i jagten på det mindste element, hvorfra alt andet opstår og bygges. Måske er svaret i stedet, at universets fænomener er emergente nærmere end fundamentale.

Emergente fænomener skiller sig ud ved, at de ikke kan forklares alene ved nogle af egenskaberne hos dets mindre dele og byggesten. Der dukker nye, overraskende “emergente” egenskaber op ved samspillet mellem delene. Fænomenet beskriver eksempelvis, hvorfor stæreflokke bevæger sig i tilsyneladende koordinerede og komplekse mønstre på trods af, at den enkelte stær ikke har noget begreb om den større struktur, den er en del af. Men er tyngdekraften et sådant fænomen? Det er i hvert fald, hvad en række prominente forskere fra forskningsgruppen *It from Qubit* nu arbejder på at finde ud af. Ifølge denne forskningsgruppe er tyngdekraften ikke én skildpadde i det tårn, der forklarer naturens fænomener, eller én skildpadde, der forklarer skildpadden ovenover. Vi må nærmere forstå tyngdekraften som et fænomen, der opstår på et højere makroniveau som en relation mellem de forskellige skildpadder i tårnet. Dette står i direkte modsætning til Einsteins teorier, som ser tyngdekraften som værende en af de fire fundamentale kræfter i universet. Hvis den nye teori er sand, vil det revolutionere vores forståelse af universets love.

Tyngdekraften som emergent

En af de store opdagelser i det 20. århundredes fysik var idéen om *renormalisering* – den proces, hvor en teori ændres i takt med, at størrelsesordenen for de fænomener, den skal beskrive, ændrer sig. Renormalisering var en nødvendig introduktion i kvantefeltteorier for at slippe af med uendeligheder på det mikroskopiske plan. Renormalisering kan illustreres som en si af mere eller mindre grovkornet art, som filtrerer de informationer væk, der ikke er relevante for den givne størrelsesorden. Ved denne filtreringsproces skabes en såkaldt *effektiv teori*, som via renormalisering er i stand til at skabe robuste forudsigelser henover et større spektrum af observationer. Standardmodellen for partikelfysik plus Einsteins generelle relativitetsteori, som redegør for tyngdekraften, udgør tilsammen en effektiv teori for alle naturens fænomener. At dette er tilfældet hænger sam-

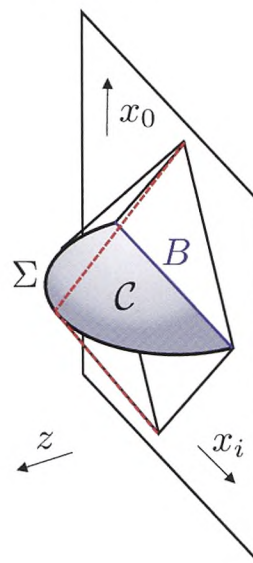
men med, at kvanteeffekter er ubetydelige henover store afstande, mens tyngdekraften er ubetydelig henover små afstande. Men selvom vores klassiske teori for tyngdekraften og vores kvantefeltteori for partikelfysik tilsammen udgør en effektiv teori, er den ikke komplet – den virker med god præcision i praksis, men ikke henover alle skalaer. Ideelt set vil forskerne gerne finde en teori, som ikke blot virker på effektiv vis, men som også er komplet. En sådan teori, der virker gnidningsfrit henover både den makroskopiske og mikroskopiske skala, kaldes en UV-komplet teori. Men hvis tyngdekraften er emergent, så indeholder denne UV-komplette teori slet ikke tyngdekraften. I stedet må tyngdekraften ses som et emergent resultat af en effektiv teori, hvis UV-komplette teori ser ganske anderledes ud. Idet vi ved, at det mikroskopiske plan i universet er styret af kvantemekaniske processer, er opgaven, fysikerne står overfor, lige så svær, som den er veldefineret: hvorledes kan det gå til, at vores kurvede, klassiske rumtidsgeometri opstår ud fra kaotiske kvantefænomener på mikroplanet? Man kan se på problemet på følgende vis: hvis vores virkelighed er kvantemekanisk, så er problemet med at trække klassisk geometri ud af kvantefænomener et problem, naturen selv har skullet løse. Men hvilken algoritme har naturen anvendt? Hvis man skal tro forskningsgruppen *It from Qubit*, er fænomenet kvantemekanisk sammenfiltring en vigtig brik.

Kvantemekanisk sammenfiltring som basis for vores rumtid

Kvantemekanikken er fundamentalt forskellig fra vores klassiske univers. Partikler og partikelinteraktioner er lokale forstyrrelser i et underliggende, fluktuerende kvantefelt eller “skum”, som på rodet, kaotisk og kompleks vis langt fra ligner det klassiske univers, vi observerer i vores dagligdag. Schrödingers såkaldte bølgefunktion beskriver, hvorledes disse felter udvikler sig. Til forskel fra klassiske teorier beskriver denne funktion dog ikke systemets tilstand som sådan, men en sandsynlighed for, at et system er i en bestemt tilstand. En partikel har altså ikke en bestemt position, men forskellige mulige positioner på samme tid. Men dette er blot én type af spøjs adfærd, vi må døje med på kvanteplanet. Tænk nu, at vi vil beskrive blot en del af systemet. Vi kan spørge: ved vi alt om delsystemet, hvis vi kender alt om det fulde system? Nej! Vi kan vide alt om det fulde system uden at vide alt om delsystemet.

Årsagen er, at det at vide noget om én partikels tilstand kan have direkte effekt på vores viden om en anden partikels tilstand. Som Schrödinger formulerede det: “the best possible knowledge of a whole does not necessarily include the best knowledge of its parts” [1]. Dette kaldes entanglement eller kvantemekanisk sammenfiltring. Ironisk nok var det Einstein selv, der opdagede fænomenet. Einstein var skeptisk og kaldte fænomenet “spooky action at a distance”, men dets eksistens er senere påvist eksperimentelt. I den nye teori om tyngdekraften er vores rumtidsgeometri et direkte produkt af dette sammenfiltringsfænomen. For at kunne se, hvorledes sammenfiltring kan lede til lokal rumtidsgeometri, må vi træde et skridt tilbage og forklare tre

store fund i fysikken i de seneste 20 år.



Figur 1. Illustration af Takanagis opdagelse. Ethvert lokalt punkt i rumtiden C kan beskrives udelukkende via ikke-lokalt fordelt information på overfladen B. Information indkodes altså på redundant vis. Dette har den fordel, at hvis information slettes i ét område, er informationen stadig tilgængelig globalt set.

Universet som et hologram

Det største frø blev sået i 1997 af den argentinske fysiker Juan Maldacena, som viste, at vores klassiske rumtidsgeometri, som lever i tre dimensioner, kan beskrives som en kvanteteori uden tyngdekraft på et holografisk 2D-plan – eksempelvis på overfladen af vores rumtid [2]. Dette går derfor under navnet *det holografiske princip*. Vi kan altså begynde at ane en sammenhæng mellem geometri og kvantefænomener. Længere tilbage, i 1972, viste fysikeren Jacob Bekenstein [3], at entropien af et sort hul – altså den mængde af information, som et sort hul kan indeholde – ikke afhænger direkte af hullets volumen, men af dets overfladeareal. Dette kan være svært at finde intuitivt. Hvor mange ærter, en skål kan indeholde, afhænger af volumen, ikke areal. Men dette gælder altså ikke for sorte huller. I 2006 blev noget endnu mere bemærkelsesværdigt vist, nemlig at Bekensteins teori kan generaliseres til alle typer af rumtid. Den såkaldte Ryu-Takayanagi-sætning viste, at den kvantemekaniske entropi af overfladen af ethvert stykke rumtid er ansvarlig for, eller “indkoder”, en bestemt del af den geometriske 3D-struktur:

$$S_A = \frac{Y_A}{4G}. \quad (1)$$

I formlen ovenfor er S_A den kvantemekaniske 2D-overfladeentropi, mens Y_A er overfladearealet af den korresponderende 3D-rumtid og G er gravitationskonstanten.

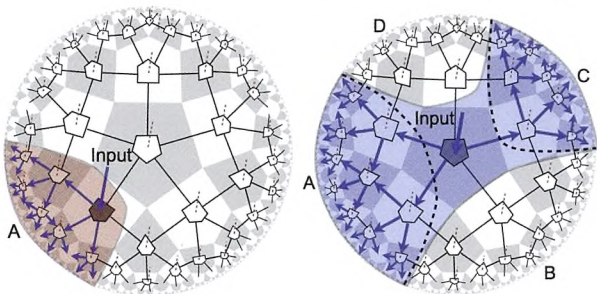
Vi har altså med andre ord en direkte måde at udvinde geometri ud fra en kvanteteori. Det næste skridt, som bragte forskerne tættere på en fuld teori, var opdagelsen, at entropi i en kvantefeltteori på direkte vis skalerer med mængden af sammenfiltring. Ved at kombinere dette med Takanagis opdagelse kan

vi se, at forskellige grader af sammenfiltrering leder til forskellige typer af geometri. Der er altså evidens for, at vores rumtidsgeometri opstår ud fra kvantemekanisk sammenfiltrering på overfladen af vores rumtid.

Sammenfiltrering bygger rumtiden op bid for bid

Spørgsmålet er nu, hvorledes denne sammenfiltrering kan beskrives, og hvorledes forskellige grader af sammenfiltrering på kvanteplanet leder til forskellige geometriske former i vores rumtid. Problemet er, at kvantemekaniske systemer er ekstremt svære at beskrive på klassisk vis. Mindstedelen i et kvantemekanisk system er den såkaldte *qubit*, der til forskel fra en klassisk bit kan befinde sig i en *superposition* af de to klassiske tilstande 1 og 0. Denne forskel har dog eksponentiel betydning. Et n -qubit system indeholder 2^n mulige konfigurationer, og et 300-qubit kvantesystem kræver altså flere klassiske bits at beskrive end der findes atomer i vores synlige univers!

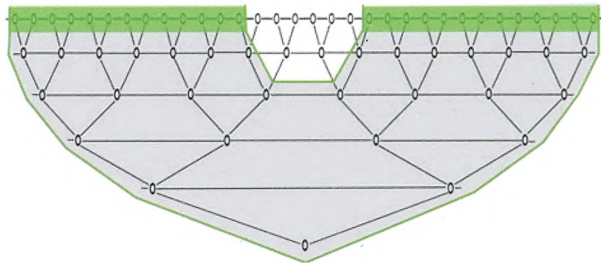
Forskergruppen *It from Qubit* har dog for nyligt foreslået en ny metode til at indkode sådanne astronomiske mængder af information. Idéen er, at man i stedet for at indkode informationen på klassisk vis, repræsenterer den som en kondenseret form for kvanteinformation distribueret i et såkaldt *tensor network*. Ved trinvis at sammenfiltrere de enkelte kvantetilstande opbygges den komplekse bølgefunktion bid for bid, repræsenteret som et netværk af sammenfiltrede kvantetilstande. Sammenfiltreringsprocessen foregår på følgende måde: Start med en simpel tilstand af usammenfiltrede tilstande, fx 8 qubits, som vi kan kalde A, B, C, D, E, F, G, H . Vi sammenfiltrer nu gradvist de enkelte qubits med hinanden på en måde, så kun korrelationerne (altså sammenfiltringerne) mellem kvantesystemerne gemmes fra trin til trin. Forbind først A med B , C med D , osv.



Figur 2. Illustration af tensor netværk. Overfladen af cirklen repræsenterer kvantesystemet. Arealet repræsenterer rumtiden.

Dernæst, forbind AB med CD og til sidst $ABCD$ med $EFGH$. Via denne iterative proces af sammenfiltrering bygger vi et komplekst kvantenetværk op på simpel vis. Ved at smide al den information væk, som ikke er væsentlig for den givne størrelsesorden, foretager netværket en type af renormalisering. I figur 2 illustreres det, hvorledes denne renormaliseringsproces gradvist bygger rumtiden op. Renormaliseringen af de to kvantesystemer A og C fører de to korresponderende rumtider sammen. Vi har dog endnu ikke beskrevet den måske største fordel ved at føre kvantesystemer og rumtid sammen på denne vis. Vi må her først beskrive fænomenet *decoherence*, som vi blot her vil kalde

kvantefejl. (Her skal det pointeres, at rumtiden altså kan opbygges ved hjælp af tensor netværk, og en geometrisk struktur kan opstå ud fra komplicerede vekselvirkninger mellem informationen fra mange mindre dele).



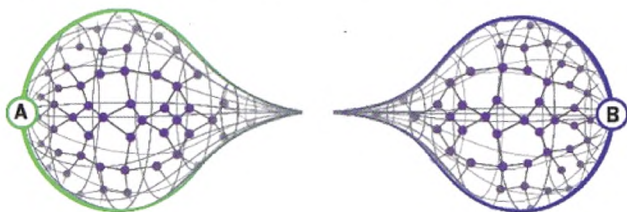
Figur 3. Vi ser her, at to regioner hurtigt vil overlappe rent geometrisk efter blot et par renormaliseringsskridt, hvor de gradvist sammenfiltreres. Altså kan (mindre områder af) uforenethed på kvanteplanet godt lede til sammenhængende geometri på det klassiske plan. Situationen ser dog noget anderledes ud, hvis sammenfiltreringen fjernes helt.

Kvantefejl bliver udjævnet

Kvantesystemer er ikke blot komplekse at håndtere, fordi de indeholder astronomiske mængder af information. De er også svært u håndterbare, fordi den information, de indeholder, er notorisk ustabil. Årsagen er, at enhver uønsket interaktion mellem en qubit og dets miljø "kollapser" dens sammenfiltrede tilstand og får den til at agere som en klassisk bit. Dette fænomen er den primære årsag til, at vi endnu ikke har formået at bygge en kvante computer med over 50 bits. Hvis det, som beskrevet, er tilfældet, at sammenfiltrering er vores rumtids byggesten, så har rumtiden nødvendigvis måttet beskytte sig selv mod disse uønskede kvantefejl. Idéen er, at netop den sammenfiltreringsproces, vi beskrev ovenfor, kan agere som en sådan beskyttelseskode. Ved at sammenfiltrere de enkelte qubits indkodes de enkelte korrelationer mange gange, altså "redundant", på overfladen. Med andre ord: hvis en enkelt qubit kollapser og mister en del af sin kvanteinformation, er denne information stadig tilgængelig et andet sted på overfladen. Des mere sammenfiltret, kvantesystemet er, des bedre beskyttet er det mod kvantefejl, og des bedre beskyttet er vores rumtid mod "huller" i dens geometri.

I figur 2 gælder således følgende: Jo tættere vi er på overfladens usammenfiltrede kvantesystem, des mere usikker og distribueret er informationen, og jo tættere vi er på den maksimalt sammenfiltrede tilstand i midten, des bedre beskyttet er informationen mod kvantefejl på overfladen. Dette korresponderer med det, vi observerer i vores fysiske virkelighed, nemlig, at der er mange kvantefluktuationer på det mikroskopiske plan, men meget lidt fluktuation på det makroskopiske plan. Rumtiden har altså "sikret" sig selv mod kvantefejl ved at indkode kvanteinformation redundant på overfladen via sammenfiltrering. Det er en ret vild idé. Vi kan nu se, hvorledes sammenfiltrede tilstande på overfladen kan forbinde geometrier i 3D-rummet og dermed "lime" vores rumtid sammen. Takayanagi [4] viste, at sammenfiltrering på overfladen ledte til geometrier i rumtiden. Hvis vi sammenfiltrer to systemer på overfladen, er resultatet, at de to korresponderende rumtidsgeometrier overlapper eller "limes" sammen.

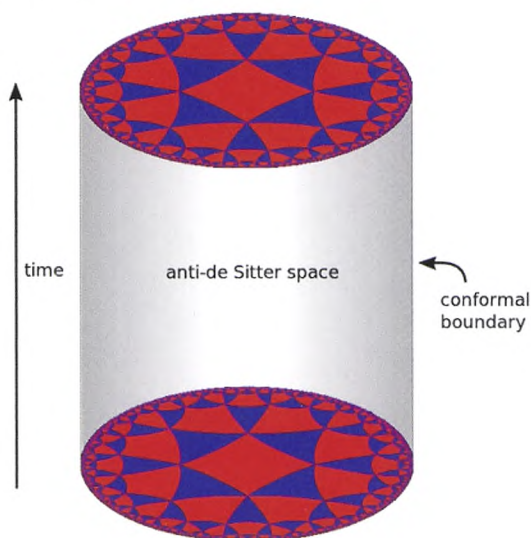
Men dette må lede til det naturlige spørgsmål: bryder vores rumtid sammen, hvis vi fjerner sammenfiltreringen helt mellem de underliggende kvantesystemer?



Figur 4. Uden sammenfiltrering på kvanteplanet bryder vores rumtid sammen. Figuren her illustrerer det tilfælde, hvor sammenfiltrering fjernes helt, hvorved en førhen sammenhængende rumtid nu rives fra hinanden.

Kan vores rumtid bryde sammen?

Hvis sammenfiltrering mellem to kvantesystemer på overfladen af vores rumtid forsvinder helt, vil den lokale information i rumtiden ikke længere være beskyttet mod fejl på kvanteniveauet. Konsekvensen er, at geometrierne ikke længere vil overlappe, og at vores rumtid rives fra hinanden. Vi kan altså forestille os, at den delte geometri mellem de to løsrevne rumtider bliver mindre og mindre i takt med, at sammenfiltreringen fjernes, indtil sammenfiltreringen forsvinder helt og de to klassiske rumtider ikke længere overlapper. Konklusion er, at sammenfiltrering af kvantemekanisk kaos på mikroplanet i vores rumtid er nødvendigt for at skabe lokalitet og forbundethed på makroplanet. Tyngdekraften, når den ses som emergent, nærmere end fundamental, er ikke længere i modstrid med kvantemekanikken – men er blevet direkte afhængig af den.



Figur 5. Illustration af AdS-rumtid. Tiden løber opad. Kvantemekanisk sammenfiltrering på overfladen af rumtiden leder til klassisk geometri inde i rumtiden.

Har teorien hold i virkeligheden?

Forskergruppen *It from Qubit* har fremsat et bud på, hvorledes Einsteins generelle relativitetsteori kan forenes med kvantemekanikkens love. I denne teori er

tyngdekraften ikke længere en af de fire fundamentale kræfter i universet, men et emergent produkt af renormaliserede, sammenfildrede kvantesystemer. Der er dog en hage ved teorien. Maldacenas korrespondance mellem et holografisk kvantesystem og en 3D-rumtid, som meget af denne nye teori bygger på, gælder nemlig kun for en bestemt type rumtid – en såkaldt hyperbolsk rumtid kaldet Anti-de Sitter- eller AdS-rumtid.

Idet vores egen rumtid er de Sitter- eller dS-rumtid, og har positiv krumning, gælder teorien ikke for det univers, vi lever i. Det er et åbent spørgsmål, i hvilken grad teorien kan overføres til vores egen rumtid. AdS-rumtid er praktisk at arbejde med, fordi den med sin naturlige overflade egner sig godt til holografiske teorier. For yderligere bemærkninger om arbejdet med at overføre denne teori til vores egen rumtid, se da artiklen [8] af Swingle m.fl. Hvis dette arbejde giver frugt, og teorien påvises i laboratoriet, er tyngdekraften endelig blevet kvantemekanisk.

Litteratur

- [1] E. Schrödinger (1935) Discussion of Probability Relations between Separated Systems, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, bind **31**, side 555–563.
- [2] J. Maldacena (1999) The large-N limit of superconformal field theories and supergravity, *International Journal of Theoretical Physics*, bind **38**, side 1113–1133.
- [3] J. Bekenstein (1973) Black holes and entropy, *Physical Review D*, bind **7**, side 2333.
- [4] S. Shinsei og T. Takayanagi (2006), Holographic derivation of entanglement entropy from the anti-de sitter space/conformal field theory correspondence, *Physical Review Letters*, bind **96**, side 181602.
- [5] F. Pastawski m.fl. (2015) Holographic Quantum Error-Correcting Codes: Toy Models for the bulk-boundary correspondence, *Journal of High Energy Physics*, bind **2015**, side 149.
- [6] M. van Raamsdonk (2010) Building up Spacetime with quantum entanglement. *General Relativity and Gravitation*, *Gen Relativ Gravit*, bind **42**, side 2323–2329.
- [7] B. Swingle (2012) Entanglement Renormalization and Holography, *Physical Review D*, bind **86**, side 065007.
- [8] B. Swingle (2019) Quantum gravity in the lab: Teleportation by size and traversable wormholes, arXiv:1911.06314.



Daniel Skipper Rasmussen er videnskabsjournalist og freelance skribent. Han er særligt optaget af kvantemekaniske fænomener og spørgsmålet om, hvilken rolle information spiller i vores univers. I forhold til nærværende artikel gør han opmærksom på, at sammenfiltrering ikke er en fysisk materie, men abstrakt information, som lejres i et fysisk system.

Hvilemasse – breddeopgave 88

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, Institut for Naturvidenskab og Miljø, Roskilde Universitet

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 88 i rækken her i Kvant):

Breddeopgave 88. Hvilemasse

En snurretop på en vægt vejer mere, jo hurtigere den snurrer. Hvor hurtigt skal den snurre, for at det kan måles? Begrund svaret.

Løsning

Ifølge Einsteins $E = mc^2$ ligning er et systems hvilemasse ækvivalent med dets energi i det referencesystem, hvor systemets samlede impuls er nul.

Når snurretoppen ligger stille på vægten, er dens masse $m_0 = E_0/c^2$, hvor c er lyshastigheden og E_0 den indre energi af snurretoppen, når den ikke roterer. Når snurretoppen snurrer, øges dens energi i nul-impulssystemet med $\frac{1}{2}I\omega^2$, hvor I er snurretoppens inertimoment og ω vinkelfrekvensen, den snurrer med. Størrelsesordensmæssigt er forøgelsen lig med $m_0 R^2 \omega^2$, hvor R angiver snurretoppens udstrækning. Snurretoppens masse er da ifølge masse-energi ækvivalensen:

$$m_\omega \approx (E_0 + m_0 R^2 \omega^2)/c^2. \quad (1)$$

Den relative vægtforøgelse af snurretoppen, når den snurrer, er derfor:

$$(m_\omega - m_0)/m_0 \approx (R\omega/c)^2. \quad (2)$$

Lad os antage, at vi til måling af vægtforøgelsen, kan finde en vægt, som kan måle med 8 betydende cifre. Så er den mindste vinkelfrekvens, $\omega_{\min}$, hvor der kan måles en vægtforøgelse af snurretoppen:

$$\omega_{\min} \approx 10^{-4} c/R, \quad (3)$$

svarende til $(R\omega_{\min}/c)^2 \approx 10^{-8}$. Med $R = 30$ cm giver det $\omega_{\min} \approx 10^5$ s⁻¹.

Måling af, at snurretoppens vægt forøges, når den snurrer, ser ud til at være noget af en udfordring.

Kommentar

Både i gymnasiet og på universiteterne undervises der i sammenhængen mellem en atomkernes bindingsenergi E_{binding} og kernens massedefekt $m_{\text{defekt}} \equiv (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{kerner}}$ (Z er antallet af protoner i kernen, hver med massen m_p ; N er antallet af neutroner i kernen, hver med massen m_n):

$$E_{\text{binding}} = m_{\text{defekt}} c^2 \quad (4)$$

Ligningen udtrykker, at energien, der skal tilføres en hvilende kerne for at splitte den i henholdsvis

dens Z og N hvilende protoner og neutroner, er lig med masseforøgelsen herved gange kvadratet på lysets hastighed. Altså at masseændring og energiændring hænger sammen, når en atomkerne splittes ad i sine bestanddele.

Den samlede energi af en bevæget partikel,

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (5)$$

hvor m_0 er partiklens hvilemasse og v dens fart, sammenfattes ofte ved hjælp af den "relativistiske masse" $m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ til $E = mc^2$. Da den således definerede relativistiske masse er proportionalitetsfaktoren imellem impuls og hastighed, $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, kan begrebet, forstået således, udvides til også at inkludere fotoner og andre partikler uden hvilemasse. Her er $\mathbf{p} = E/c^2 \cdot \mathbf{c}$, og altså $m = E/c^2$, eller igen $E = mc^2$. Denne ligning bør imidlertid ikke forveksles med Einsteins ækvivalensligning mellem energi og hvilemasse med det samme udseende.

I 1906 beskrev Einstein et tankeeksperiment, hvor en foton udsendes fra den ene endevæg inden i en kasse for siden at blive absorberet i kassens anden endevæg [1]. Kassen står på et glat underlag. Kassen flytter sig derfor, medens fotonen bevæger sig fra den ene endevæg til den anden, idet summen af fotonens og kassens impuls skal være den samme før, under og efter fotonbevægelsen. Men da der ikke har været nogen ydre påvirkning, kan tyngdepunktet af det isolerede system ikke have flyttet sig. Derfor må vi gå ud fra, at der i sammenhæng med fotonens energioverførsel fra den ene endevæg til den anden også har fundet en overførsel af masse sted. Dette kvalitative ræsonnement forudsætter ikke relativitetsteori. Og ved at benytte den i forvejen kendte sammenhæng imellem impuls og energi i elektromagnetisk stråling kunne han med en tilnærmet beregning, igen uden brug af relativitetsteori, finde sammenhængen til at være $E = mc^2$.

Ved vintereksamen 2002 på breddekurset på RUC drejede en af eksamensopgaverne sig om eftervisning af Einsteins regnestykke. Opfølgende skrev jeg en breddeopgaveartikel i Kvant, hvor jeg undrede mig over, at regnestykket ikke kunne gennemføres relativistisk og uden tilnærmelser uden at løbe ind i en modstrid [2]. Kunne den specielle relativitetsteoris måske mest afgørende resultat ikke eftervises eksakt? Hvor lå fejlen? Ulrik I. Uggerhøj (UIU) kom mig til undsætning med en reference, der viste, at der principielt set ikke kan regnes eksakt på Einsteins kasse [3]. Begrebet stift legeme er eksakt set ikke af denne verden. I tilfældet Einsteins kasse kan man således ikke gå ud fra, at bevægelsen af lysafsendelsessvæggen momentant kan

forplante sig til bevægelse af den modsatte endevæg. Den anden endevæg kan tidligst registrere, at lyskvantet blev afsendt, når det når frem til den.

Undervejs til denne afklaring havde UIU og jeg en indbyrdes diskussion af Einsteins kasse problem i Kvant [4]. UIU fokuserede i farten på fotonen som massetransportør, og fandt eksakt $E = mc^2$ for sammenhængen imellem fotonens energi og dens "relativistiske masse". Men det vidste vi jo godt i forvejen. Det følger, som vist ovenfor, direkte af definitionen på relativistisk masse. Derimod fokuserede jeg med Einstein på hvilemassen, der slutteligt var blevet flyttet fra den ene væg til den anden. Og jeg opretholdt min påstand om modstrid, indtil UIU's reference og forkastelsen af begrebet stift legeme. Episoden viser, at det er vigtigt at understrege, at Einsteins berømte ligning handler om hvilemasse og ikke om relativistisk masse.

Helt generelt, altså ikke blot i sammenhæng med formel (4) og Einsteins kasse, gælder, at lysets hastighed i anden potens gange massen af et vilkårligt fysisk system i et koordinatsystem, hvori det fysiske systems samlede impuls er nul, er lig med det fysiske systems energi i koordinatsystemet. Det er den generelle betydning af Einsteins ligning $E = mc^2$. Hvilemassen er generelt et mål for energiindholdet i et isoleret system, uanset om der er tale om bindingsenergi, termisk energi, strålingsenergi eller rotationsenergi, hvis systemets samlede impuls er nul.

Selvom $E = mc^2$, forstået generelt, nok er det væsentligste resultat af den specielle relativitetsteori, lever beviset herfor en noget tilbagetrukket rolle i universiteternes indledende undervisning i speciel relativitetsteori. I 1937 i Fysisk Tidsskrift leverer Chr. Møller et bevis [5]. Det bygger på energibevarelse og impulsbevarelse for isolerede fysiske systemer og Lorentztransformationen af impuls og energi mellem et nul-impuls koordinatsystem og et koordinatsystem med konstant hastighed i forhold til det. Beviset behøvede måske ikke at være uden for rækkevidde ved den indledende universitetsundervisning.

Måske skyldes tilbageholdenheden med at levere bevis for masse-energi-ækvivalensen for alle energiformer, at beviset oprindeligt var forbundet med fødselsveer? Omfanget af masse-energi ækvivalensen stod først klart i 1908, selvom Einsteins første artikel om den specielle relativitetsteori er fra 1905. Så sent som i 1937 blev det i en artikel i Fysisk Tidsskrift, med inspiration fra slagsmålet om "arisk fysik" kontra "jødisk fysik" blandt fysikere i nazitidens Tyskland, forsøgt at skabe usikkerhed om sagen. Chr. Møllers artikel i det samme nummer af Fysisk Tidsskrift var et svar herpå.

Modsat den almindelige tilbageholdenhed forholder det sig for Eugene Hecht [6]. Han advokerer i en nylig artikel for, at det svært definerbare energibegreb i fysik, som udgangspunkt for undervisning bør forstås som hvileenergi, $E_0 = mc^2$, og bevægelsesenergi. Punktum. I stedet for at være tøvende over for tolkningen af masse som hvileenergi generelt. Det mener han, vil skabe begrebslig klarhed. Og det skal der til:

"Clearly, we have been able to successfully do physics without being overly careful about defining the foundational basics, but teaching physics without conceptual rigor is a different matter."

Selvom jeg synes, at Eugene Hecht i sin artikel giver et godt overblik over energibegrebets historie både i fysik og i fysikundervisning, deler jeg ikke det citerede synspunkt, at undervisning, til forskel fra forskning, kræver præcist definerede begreber. Tværtimod vil jeg advare imod synspunktet.

Hverken forskning eller læring i en undervisningssituation foregår som aksiomatisk deduktive processer. Begreber udvikles og udbygges ved erfaring med deres brug i forskellige slags sammenhænge. Jo flere forskellige slags erfarede sammenhænge et begreb har vist sig produktivt i, des dybere forstås begrebet. Begreber udvikles i høj grad induktivt.

Vi har ikke undervist i det generelle bevis for $E = mc^2$ på breddekurset. I forhold hertil er opgaven om snurretoppens hvilemasse ment som en introduktion. Først når dette og andre eksempler på anvendelsen af $E = mc^2$ er forstået og erfaret, er vejen banet for den deduktivt sammenfattende forståelse af $E = mc^2$, fx gennem Chr. Møllers bevis. Først når det forstås, hvad det er, der skal bevises, kan beviset forstås.

Breddeopgave 89. Varmehjælp til naboen.

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen juni 2015, nr. 89 i rækken her i Kvant):

I et dobbelthus, bestående af to ens sammenbyggede huse ved siden af hinanden, er det ene hus i en periode ubeboet, med lukkede radiatorer. Alene ved samtidigt at måle temperaturerne, dels udendørs, dels indendørs i hvert af de to huse, kan det udregnes, hvor stor en del af varmemeforbruget i det dobbelte hus, der går til opvarmning af det ubeboede hus. Hvordan?

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

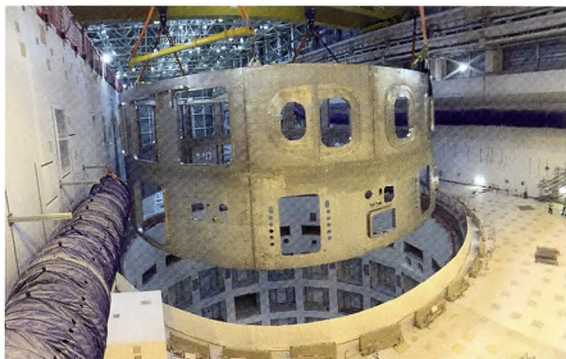
- [1] A. Einstein (1906) Das Prinzip von Erhaltung der Scherpunktsbewegung und die Trägheit der Energie, *Annalen der Physik* bind. bind 20, side 627.
- [2] J.H. Jensen (2004) Opgavehjørnet – Relativistisk tyngdepunktsflytning, *Kvant*, bind 15, nr. 4, side 28–30.
- [3] A.P. French (1968) Special Relativity, M. I. T Introductory Physics Series, side 27.
- [4] U.I. Uggerhøj (2005) Relativistisk tyngdepunktsforskydning, og J.H. Jensen (2005) Svar til Ulrik I. Uggerhøj, *Kvant*, bind 16, nr. 2, side 23–25.
- [5] C. Møller (1937) Sætningen om Massens og Energiens Ækvivalens, *Fysisk Tidsskrift*, bind 35, side 59–71.
- [6] E. Hecht (2019): Understanding energy as a subtle concept: A model for teaching and learning energy, *Am. J. Phys.*, bind 87, side 495–503.

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, *Kvant*

Verdens største fusionsreaktor bygges

KERNEFYSIK. Den 28. juli 2020 startede fase 1 i byggeprocessen af verdens største tokamak "ITER" i Frankrig officielt. Pga. Covid-19 var "kick-off"-ceremonien lille, men den blev streamet til mange seere. I alt er 35 lande involveret i projektet, der først ventes at stå færdigt i 2025, hvor forskerne også forventer at kunne skabe det første plasma.



Fusion er som bekendt den proces, der foregår i Solen og andre stjerner, hvor brintkerner smelter sammen til heliumkerner, hvilket frigiver enorme mængder bindingsenergi. Fusionsprocesser kan dannes i et plasma under højt tryk og temperatur, hvor atomerne er varmet op til så høje temperaturer, at elektronerne adskilles fra kernerne. Denne ioniserede gas af kerner og elektroner kaldes et plasma. I plasmaet kan de positivt ladede kerner overkomme deres indbyrdes elektriske frastødning, og de kan derfor kolliderer med høj fart i sammenstød, hvor de enorme energimængder frigøres.

For at skabe fusion på Jorden kræves høje temperaturer i størrelsen 150 millioner grader celsius (Solen er til sammenligning "kun" 15 millioner grader celsius varm), en høj plasmadensitet, for at øge sandsynligheden for at skabe kollisioner mellem atomkernerne, samt kraftige magnetfelter, for at kunne holde plasmaet sammen på et begrænset volumen. ITER er som nævnt en tokamak, hvilket er en donutformet maskine, der er designet til at holde plasmaet sammen. Magneterne i tokamakken danner et donutformet magnetfelt, således at de ladede partikler bevæger sig i helixer omkring magnetfeltlinjerne, og plasmaet indesluttet i tokamakken.

Fusion som energikilde er CO₂-neutral, hvilket bl.a. er motivationen for at lave fusionskraftværker på Jorden. I første omgang er ITER dog primært et forskningsprojekt, som skal vise, at fusion som energikilde fungerer godt, sikkert og effektivt, og at det er muligt at skabe et energioverskud fra fusionsprocessen, hvilket endnu ikke er vist. ITER er designet til at generere 500 MW ud fra et input på 50 MW (den energi, der tilføres for at opvarme plasmaet), dvs. ITER's effektivitet er en faktor 10. Til sammenligning har den hidtil bedste tokamak, JET i England, vist en effektivitet på 0,67 (JET har dannet 16 MW fusionsenergi ud fra et input på 24 MW).

Forskning i fusionsprocesser har vist, at den mest energieffektive fusionsproces er reaktionen mellem de to hydrogenisotoper deuterium og tritium. Denne fusionsproces skaber en heliumkerne og en neutron samt frigiver en stor mængde bindingsenergi. Heliumkernen bærer ca. 20% af den frigivne bindingsenergi, og da den er elektrisk ladet, kan den kontrolleres og afbøjes af magnetfelterne i tokamakken, mens neutronen, der bærer de resterende 80% af bindingsenergien er neutral og derfor absorberes af tokamakens væg, hvor dens energi omdannes til varme. Varmen kan så

bruges til at opvarme kølevand, og vanddampene kan drive turbiner, som producerer elektricitet. Da deuterium-tritium-fusionsprocessen skaber den højeste energi ved laveste temperatur, skal ITER lave fusion baseret på deuterium-tritium-reaktioner, hvilket – hvis alt går efter planen – bliver en realitet i år 2035.

Kilde: iter.org

Mest massive gravitationsbølgekilde

ASTROFYSIK. Gravitationsbølgedetektorerne LIGO og VIRGO har detekteret den hidtil mest massive gravitationsbølgekilde GW190521. Detektorerne målte gravitationsbølger (krusninger i rumtiden) fra kilden i maj 2019, og har nu bestemt GW190521 til at være en sammensmeltning af to sorte huller, der skete 5 Gpc (Gigaparsec, 1 pc = 3,3 lysår) fra os, hvilket er en af de fjerneste kilder til gravitationsbølger, der er observeret. Det ene sorte hul havde en masse på 85 solmasser, mens det andet havde en masse på 66 solmasser, hvilket også er den mest massive sammensmeltning af to sorte huller, der er observeret. Sammensmeltningen resulterede i et kæmpe sort hul med en masse på 142 solmasser og udløste en energimængde svarende til 8 solmasser i form af gravitationsbølger. Fra generel relativitetsteori ved vi, at et system bestående af to sorte huller med meget forskellige masser ved sammensmeltning vil producere gravitationsbølger, der svinger med højere frekvenser, og det er netop, hvad detektorerne for første gang observerede.



Men det resulterende 142 solmasser tunge sorte hul var en overraskelse, da det er midt i et interval, hvor det ikke var forventet, at der ville være sorte huller. Sorte huller fordeles i to kategorier: en gruppe, som er få solmasser tunge, og som skabes fra kollapsede stjerner; og en gruppe supermassive sorte huller, der er flere millioner gange tungere end Solen. Da de to sorte huller, der smeltede sammen, er for tunge til at være skabt fra en kollapsende stjerne, så forskerne tror de blev skabt på en anden måde.

Normalt skabes et sort hul af en stjerne, der efter at have fusioneret sit materiale fra hydrogen til helium osv. op til jern, ikke længere kan opretholde et strålingstryk, der er rettet bort fra centrum (modsat tyngdekraften), og derfor kolliderer under sin egen vægt i en supernova, som kan efterlade et sort hul. Denne proces kan dog kun forklare, hvordan sorte huller på op til 65 solmasser kan dannes. For tungere stjerner (på mere end 130 solmasser) er der et fænomen, der kaldes "par-ustabilitet", hvor højenergifotoner fra stjernen omdannes til elektron-antielectronpar, som skaber et mindre tryk end fotonerne, og gør stjernen ustabil, så den eksploderer uden at efterlade et sort hul. Endnu tungere stjerner (200 solmasser) kan kollapse direkte til et sort hul med en masse på mindst 120 solmasser.

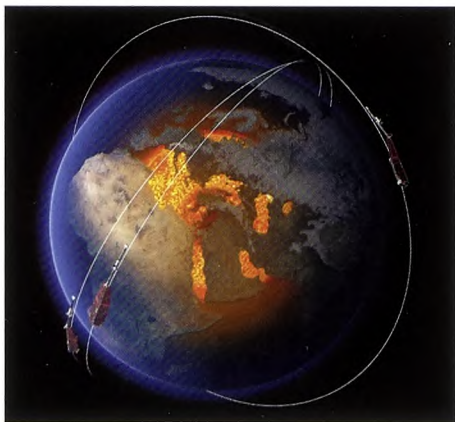
Ifølge teorien burde kollapsende stjerner derfor ikke kunne skabe sorte huller med en masse mellem 65 og 120 solmasser. Derfor undrer det forskerne, hvor især det ene sorte hul på 85 solmasser kommer fra. Forskernes teori er derfor, at de tunge sorte huller, i hvert fald det tungeste af

dem, blev dannet ved sammensmeltningen af andre lettere sorte huller.

Forskerne overvejer dog stadig, om signalet kan komme fra en helt anden kilde. Data fra LIGO og VIRGO bliver undersøgt af algoritmer, der kigger efter to ting: specifikke mønstre i gravitationsbølgesignaler, der kan skyldes sammensmeltning af to systemer, og alle signaler, der stikker ud fra de almindelige data. GW190521 blev netop detekteret, fordi signalet var anderledes, og det åbner muligheden for, at det kan komme fra en anden begivenhed end sammensmeltningen af to systemer, fx en kollapsende stjerne eller en kosmisk streng, som blev skabt lige efter universets inflationsperiode. Men det, der passer bedst med data, er stadig sammensmeltningen af to sorte huller, og det er derfor den begivenhed, forskerne har identificeret GW190521 med. Kilde: R. Abbott m.fl., *GW190521: A Binary Black Hole Coalescence with a Total Mass of 150 Solar Masses*, Phys.Rev.Lett. (2020), **125**, 101102, og R. Abbott m.fl., *Properties and Astrophysical Implications of the 150 Solar Mass Binary Black Hole Merger GW190521*, ApJL. (2020), **900** (1) L13.

Jordens magnetfelt bliver svagere

GEOFYSIK. ESA's Swarm-satellitter, som studerer Jordens magnetfelt, har vist, at det gradvist aftager i et område mellem Afrika og Sydamerika. Det er kendt, at Jordens magnetfelt ændrer sig både i styrke og i retning, men forskerne undrer sig over de nye målinger af det svagere magnetfelt, som giver tekniske problemer for satellitter i området. Aftagningen af magnetfeltets styrke skaber ikke nogen fare her på Jorden, men da flere ladede kosmiske partikler nu kan trænge gennem magnetosfæren i det udsatte område, oplever satellitter og fly, der bevæger sig her, oftere tekniske fejl, da partiklerne kan forstyrre deres elektronik.



Magnetfeltet kan illustreres som en stangmagnet, der går gennem Jorden, og har byttet om på polerne flere gange. Magnetfeltets nuværende sydpol befinder sig fx ca. 11 grader fra den geografiske nordpol, mens magnetfeltets nordpol er ca. 11 grader fra den geografiske sydpol. Magnetfeltet er stærkest ved polerne og svagest ved ækvator, men stangmagnetmodellen er alt for simpel til at beskrive magnetfeltet, hvilket den nyeste måling også bekræfter. Magnetfeltet dannes af elektriske strømme i Jordens roterende og delvist smeltede jernkerne, og er Jordens skjold mod kosmisk stråling, der består af høj-energetiske, ladede partikler fra Solen og rummet. Magnetfeltet afbøjer partiklerne væk fra Jorden, men nogle få trænger igennem magnetosfæren (området, hvor Jordens magnetfelt dominerer over det interplanetariske magnetfelt), hvorefter de bevæger sig i spiraler omkring magnetfeltets linier mod polerne. Her kolliderer de med atomer i atmosfæren, hvilket danner de smukke aurora borealis/australis også kaldet nordlys/sydlys.

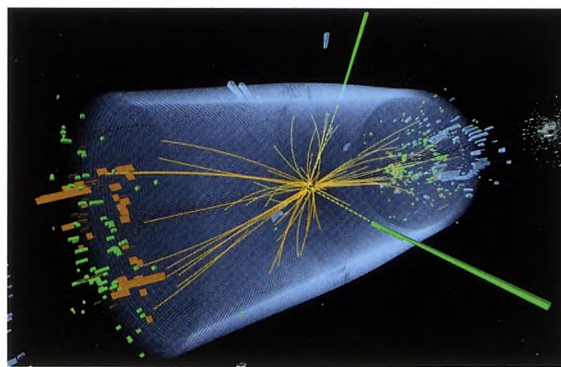
Gennem de sidste 200 år er magnetfeltets styrke aftaget over hele Jorden med i gennemsnit 9%. Særligt i området omkring Sydamerika og Afrika er feltet aftaget i styrke. Forskerne har overvejet, om aftagningen i magnetfeltets styrke

er et tegn på, at Jorden igen er ved at skifte poler, således at den magnetiske nordpol bytter plads med sydpolen. I de sidste 20 millioner år er den begivenhed sket ca. hver 250.000 år, men vi er faktisk gået en del over tiden nu, da det er omkring 780.000 år siden sidste gang (dog stadig inden for de normale fluktuationer). En kommende pol-ombytning kunne være en mulig forklaring på det svagere magnetfelt, men vi må nok vente på flere målinger fra Swarm-satellitterne, for at forstå hvad det er, der helt præcist foregår.

Kilde: ESA.int (20. maj)

Sjældent Higgsboson-henfald

PARTIKELFYSIK. CERN har målt en indikation af et sjældent henfald af Higgsbosonen til et myonpar. Higgsbosonen er forudsagt af standardmodellen og blev detekteret i 2012 på CERN i proton-proton-kollisioner, og med en masse på $125 \text{ GeV}/c^2$ er det mest sandsynlige henfald til et kvark-antikvark-par. Higgspartiklen kan desuden henfalde til et par W- og Z-bosoner (som formidler den svage kernekraft), og i 2018 målte man henfald til top- og bottom-kvarker. Henfaldet af Higgsbosonen til to myoner er et meget sjældent fænomen, som kun 1 ud af 5000 Higgsbosoner vil henfalde til. Observationen er særlig interessant, da den indikerer, at Higgsbosonen interagerer med de såkaldte andengenerationspartikler.



Andengenerationspartikler i standardmodellen er fx myoner, mens elektroner er af første generation. Generationer er en måde at opdele elementarpartiklerne på, og partiklernes vekselvirkning inden for hver generation er ens. Anden- og tredjegenerationspartiklerne ses kun i høj-energimiljøer, som fx partikelacceleratorer og kosmisk stråling, og de henfalder til førstegenerationspartikler.

Higgspartiklen giver via Higgsfeltet masse til de elementarpartikler, som den vekselvirker med. Higgsbosonen henfalder meget hurtigt til andre partikler, men man kan få en ide om styrken af partiklernes vekselvirkning med Higgsbosonen ved at måle hastigheden, hvormed Higgsbosonen henfalder til de forskellige partikler. En højere henfaldsrate til en bestemt partikel indikerer, at partiklen vekselvirker kraftigt med Higgsfeltet. Myoner er meget lette i forhold til de tunge top/bottomkvarker og W/Z-bosoner, så deres vekselvirkning med Higgsfeltet er svag, og derfor er de ikke før blevet observeret.

Det er desuden svært at måle Higgshenfaldet til myoner, da der er tusinder af myoner i baggrundsstøjen, som ligner det forventede henfald. Myonparret fra Higgshenfaldet adskiller sig ved at have en masse omkring Higgsmassen på $125 \text{ GeV}/c^2$. Der blev brugt to detektorer til målingen: CMS og ATLAS, som begge målte energi, bevægelsesmoment og vinkel af myonerne, og som sammen med avancerede teknikker fx maskinlæringsalgoritmer forbedrede analyserne, og gjorde det muligt at observere henfaldet.

Nu skal acceleratorerne bare samle mere data for at nå den målefølsomhed på 5σ , som kræves.

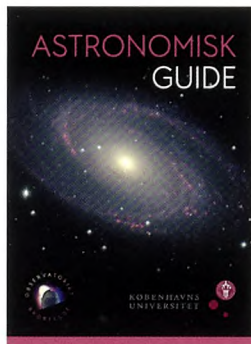
Kilde: ATLAS Collaboration: A search for the dimuon decay of the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector, arxiv.org/abs/2007.07830.

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen, Kvant

Astronomisk Guide 2020

Redaktion Johan Fynbo, Julie K.L. Bouchet og Lone Bruun, "Astronomisk Guide", Forlaget Epsilon, 2020, 76 sider. Udleveres gratis ved arrangementer med astronomi. Primær kontakt til bestilling af eksemplarer er brorfelde@holb.dk.



Mange læsere, der er interesserede i astronomi, vil kende Astronomisk Guide, som senest blev udgivet af Astronomisk Selskab i 2012, og som desuden findes elektronisk (<https://astronomisk.dk/astronomisk-guide/>). Nu kommer den igen i en trykt udgave. Astronomisk Guide 2020 udgives af Københavns Universitet og Observatoriet i Brorfelde i samarbejde med Forlaget Epsilon.

Guiden kan være en god hjælp for nybegyndere i astronomi, som vil lære at finde rundt på stjernehimlen, og måske besøge en astronomisk forening eller et observatorium. Begge dele findes spredt ud over hele landet, og man kan finde adresserne i guiden. Man kan også lære om kikkerter, inden man investerer i én selv.

Teksten er blevet opdateret, og mange billeder er udskiftet. Indholdet dækker nu følgende afsnit:

- Astronomi for begyndere, der giver en indføring i udvalgte stjernebilleder og de objekter, man kan finde i dem.
- Astronomi med øjet, der bl.a. beskriver forskellige kikkerttyper.

- Stjernerne på himlen, der beskriver Solen, Månen, stjernerne, kometer, galakser og kosmologi.
- Menneskeskabte stjerner, der beskriver satellitter.
- Observatoriet i Brorfelde, som beskriver observatoriets historie, teleskoper og fredning.
- N.P. Wieth-Knudsen Observatoriet, der beskriver observatoriet i Tisvilde, som ejes af Astronomisk Selskab.
- Observatorier, planetarier og museer.
- Planetstier.
- Astronomiske foreninger.
- Foredrag og kurser.
- Forskning og undervisning, beskriver astronomiske institutioner og uddannelsesmuligheder.
- Astronomisk ordbog med forklaring af astronomiske begreber.

Blandt de nye afsnit er beskrivelsen af Observatoriet i Brorfelde meget interessant. Den 3 sider lange astronomiske ordbog bagerst i hæftet kan også være til nytte for begyndere.

Den nye udgave af Astronomisk Guide er blevet til i et samarbejde mellem Johan Fynbo, professor ved Niels Bohr Institutet, og Julie Bouchet, leder af Observatoriet i Brorfelde. De håber, at guiden kan være med til at stimulere både børn og voksnes naturlige nysgerrighed over for rummeligheden, der omgiver os, og få dem til at gå ud i mørket og kigge op! Guiden er udgivet af Forlaget Epsilon med økonomisk støtte fra Fonden Dr. N.P. Wieth-Knudsen Observatorium. Guiden er gratis og vil blive uddelt i forbindelse med aktiviteter og arrangementer med fokus på astronomi rundt om i landet.

Astronomisk Guide 2020 hilses velkommen!

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Okt 2020				
15/10	19.15	Syngende stjerner og exoplaneter – rumteleskoperne	Rasmus Handberg	AS (Aarh)
19/10	19.00	Ørsted to Bohr to now	Charles Marcus	SNU
Nov 2020				
2/11	19.30	Our magnetic Earth	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 (Aarh): Astronomisk Selskab (Aarh), Matematisk Institut, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, 8000 Aarhus C.

SNU: Aud. 1, H.C. Ørstedbygningen, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturlaeren.dk, facebook.com/SNU1824).

Dansk Fysisk Selskab

DFS's årsmøde 2020, som blev flyttet til oktober/november, er aflyst. DFS's årsmøde 2021 vil blive afholdt i maj/juni 2021 (dfs.nbi.dk).

I forlængelse af foredragsserien "Rumfart før, nu og i fremtiden" arrangeres 3.-11. april 2021 en rejse til Baikonur for at se en bemanded raketopsendelse til ISS. Se mere på atlantisrejsen.dk/hoteller/i-fodsporene-paa-andreas-mogenssen.

Ørstedmedaljer for fremragende formidling

Ørstedssølvmedalje til Jens Ramskov

Selskabet for Naturlærens Udbredelse har den 2. juli 2020 tildelt videnskabsjournalist hos Ingeniøren, Jens Ramskov, en Ørstedmedalje i sølv for forbilledlig formidling.

I den forbindelse sagde SNU's præsident Dorte Olesen blandt andet: "Jens Ramskov startede som ung elektroingeniør fra DTU selv som forsker og tog en ph.d. inden for optisk telekommunikation. Derefter blev han post.doc. ved University of Southampton og senere udviklingsingeniør hos NKT, men gled så over i marketing og formidling. Dette førte efter nogle år til en stilling som elektronikredaktør hos Ingeniøren i 1998 og siden som videnskabsredaktør, hvor Jens Ramskov har ydet en utroligt imponerende indsats med at gøre et for ikke-eksperter uforståeligt fagsprog tilgængeligt med almindelige ord og billeder. Det kan aldrig blive præcist – men som allerede Ørstedes store arbejde med at danne nye danske ord viser, kan den begavede "oversætter" lykkes med at skabe sådanne associationer, at der alligevel fremstår et forståeligt hele, som afspejler den faglige kerne.

Jens Ramskovs store og frugtbare indsats som formidler af naturvidenskabelig og teknisk forskning gør ham til en oplagt modtager af Ørstedssølvmedaljen netop i år, hvor vi fejrer 200-året for Ørstedes opdagelse af elektromagnetismen."

Jens Ramskov holdt efterfølgende et foredrag om forsøgene på at få Ørstedes navn forbundet med en fysisk enhed, som man kan læse på side 10 i dette blad!

Sølvmedaljen og overrækkelsesceremonien var sponsoreret af energiselskabet Ørsted A/S.

Ørstedmedaljer for formidling af naturvidenskab i grundskolen

Den 7. september 2020 uddelte SNU to Ørstedmedaljer i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab i grundskolen til lærer Stefan Lemser Eychenne fra Den dansk-franske Skole på Tagensvej i København og lærer Claus Rintza fra Bagsværd Kostskole og Gymnasium. Med hver medalje fulgte et rejselegat på 25.000 kr. og et legat til medaljemodtagerens skole på 25.000 kr. til brug for et naturfagligt projekt, sponsoreret af firmaet Haldor Topsøe.

Om medaljemodtagerne sagde formanden for bedømmelsesudvalget, Erland Andersen fra Danmarks Fysik- og Kemilærerforening:

"Lærer Stefan Lemser Eychenne er en ung og entusiastisk lærer, der formår at engagere og motivere alle elever i arbejdet med naturfag. Gennem en spændende og virkelighedsnær undervisning vækker han interessen hos elever i alle aldre, fra børnehaven til afgangsklasserne, og en både hos drenge og piger.



Fra venstre ses Erland Andersen, Ole Stahl, Stefan Lemser Eychenne, Claus Rintza og Dorte Olesen.

I løbet af sine relativt få år som naturfagsunderviser har Stefan taget initiativ til utroligt mange forskellige tiltag som deltagelse i Artis-konkurrencen, hvor science og kunst går op i en højere enhed. I 2016 vandt skolen The Young ART-Scientists Prize og med Stefan som initiativtager deltog skolen i "Flying Hacker Lab" i Italien og vandt i 2019 "The Ultimate Arduino Challenge". Det betød, at skolen skulle vise sit produkt ved "Maker Faire Rome" – Europas største innovationsmesse med 130.000 deltagere.

Claus Rintza fra Bagsværd Kostskole og Gymnasium er en erfaren lærer, der udvikler en livslang interesse for naturvidenskab hos sine elever, ved at skabe en innovativ, inspirerende og samtidig tryk undervisningssituation. Han pirrer elevernes nysgerrighed, får dem til at samarbejde og kaste sig over "vilde" eksperimenter i et trykt miljø.

Han følger ikke altid de standardiserede forsøg/eksperimenter, men udtænker selv nye opstillinger i den praktiske naturfagsundervisning. Han har også startet et samarbejde med erhvervslivet og eksterne naturfaglige miljøer. Vestforbrændingen, Zoologisk Museum, Kemi på KU og Epilepsihospitalet Filadelfia indgår derfor nu som en integreret del af undervisningen".

Ole Stahl fra Haldor Topsøe sagde til medaljemodtagerne, at "naturvidenskab ligger os meget på sinde i Topsøe, for vi har brug for kompetencerne fremover. Og det hele starter i grundskolen, hvor man første gang stifter bekendtskab med naturvidenskaben. Derfor sætter vi virkelig stor pris på det, I kan og det, I gør. Vi har derfor gennem mange år haft tæt samarbejde med grundskolelærere, og har givet dem og deres elever mulighed for at se og høre, hvordan naturvidenskab bruges i virkeligheden".