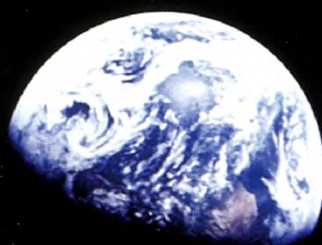


KVANT December 4 2018

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 29. årgang



- PLANETKALENDER FOR 2019
- HISTORIEN OM ELEKTROMAGNETISMEN
- GRAVITATIONSBØLGER OG TYNGDEBØLGER
- DET AKTIVE ATOMUR • HUBBLE-LEMAÎTRE-LOVEN
- OPDAGELSEN AF EN SUPERNOVA MED GRAVITATIONEL LINSEEFFEKT
- NOBELPRISEN I FYSIK 2018: OPTISKE PINCETTER OG CHIRPED PULSE AMPLIFICATION

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

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

Udgives af

Astronomisk Selskab
Dansk Fysisk Selskab
Dansk Geofysisk Forening
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space
Michael Cramer Andersen,
Christianshavns Gymnasium
Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Elektro
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Dorte Olesen (SNU),
DTU Compute
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Julie 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 an-
noncer til redaktøren på: kvant@kvant.dk
(tlf. 28 91 87 74).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2500.

Produktionsplan

Nr. 1-19 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-19 udkommer ca. 15. juni
Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Historien om elektromagnetismen <i>Laila Zwisler</i>	3
Om valg af ord <i>Finn Berg Rasmussen</i>	8
Optiske pincetter – en hyldest til Nobelprisen i Fysik 2018 <i>Lene B. Oddershede</i>	9
Foreningsnyt – kommende foredrag	12
Chirped pulse amplification – Nobelprisen i Fysik 2018 <i>Peter Uhd Jepsen</i>	13
Gravitationsbølger og tyngdebølger <i>Holger Nielsen</i>	17
Det aktive atomur – en laser i sin reneste form <i>Mikkel Tang og Stefan Alaric Schäffer</i>	20
Opdagelsen af en supernova med gravitationel linseffekt – en ny æra inden for kosmologien <i>Ariel Goobar</i>	24
Hubble-Lemaître-loven? <i>Helge Kragh</i>	27
Dansk Videnskab på Youtube	28
Korrektion	28
Planetkalender for 2019 <i>Martin Götz</i>	29
Aktuelle bøger <i>Finn Berg Rasmussen og Jens Olaf Pepke Pedersen</i>	30
Videnskabelige vikinger	32
KVANT-nyheder <i>Christine Pepke Gunnarsson</i>	33
Korrespondens mellem Doppler- og Compton-effekt breddeopgave 78 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	34
Forsidebilledet	35
Ørsted-medaljen uddelt til Ole Bakander <i>Dorte Olesen</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden er det ikoniske "Earthrise"-foto, som blev taget af astronauten Bill Anders, da han var i kredsløb omkring Månen ombord på Apollo 8 i juli-dagene i 1968. Med billedet markerer vi derfor også 50-året for Apollo 8, der var det første bemandede rumskib, som fløj ud til og gik i kredsløb om Månen. Apollo 8 undersøgte også mulige landingsområder og var således med til at bane vejen for den første månelanding et halvt år senere. Læs mere side 35.



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).

Historien om elektromagnetismen

Af Laila Zwisler, Teknologihistorie DTU

For snart 200 år siden – i 1820 – opdagede Hans Christian Ørsted, at en elektrisk strøm, der løb i en ledning henover et kompas, kunne påvirke magnetnålen. Dermed fandt han en sammenhæng mellem elektricitet og magnetisme, som han kaldte elektromagnetisme, og det åbnede nye felter inden for fysikken og teknologien. Her gennemgås en del af elektromagnetismens historie som optakt til fejringen af 200-året for Ørsteds opdagelse.

Indledning

I 1820 opdagede den danske videnskabsmand Hans Christian Ørsted noget nyt, da han lod en elektrisk strøm løbe gennem en platintråd hen over et kompas under en forelæsning. Strømmen fik magnetnålen i kompasset til at bevæge sig en lille smule. Ørsted havde fundet en sammenhæng mellem elektricitet og magnetisme, som han kaldte elektromagnetisme. Hermed havde Ørsted åbnet op for en række fremtidige opfindelser og et nyt forskningsfelt. Men det vidste man selvfølgelig intet om i Ørsteds samtid, hvor opdagelsen kom som et chok for mange fremtrædende forskere, fordi den fuldstændig modsagde deres teorier. Hovedpersonen selv var nok ikke overrasket. Ørsted havde længe leget med idéen om, at en elektrisk strøm kunne påvirke en magnet. Han skrev det direkte i 1812 i bogen "Ansicht Der Chemischen Naturgesetze":

"Samtidig skulle man forsøge, om man ikke i en af de tilstande, hvori elektricitet er meget forbunden, kunne frembringe en virkning på magneten som magnet. Sagen ville ikke være uden vanskeligheder, fordi elektriciteten ville virke på det magnetiske legeme som på det umagnetiske; måske var det dog muligt at få noget information herom gennem sammenligning af magnetiske og ikkemagnetiske nåle."

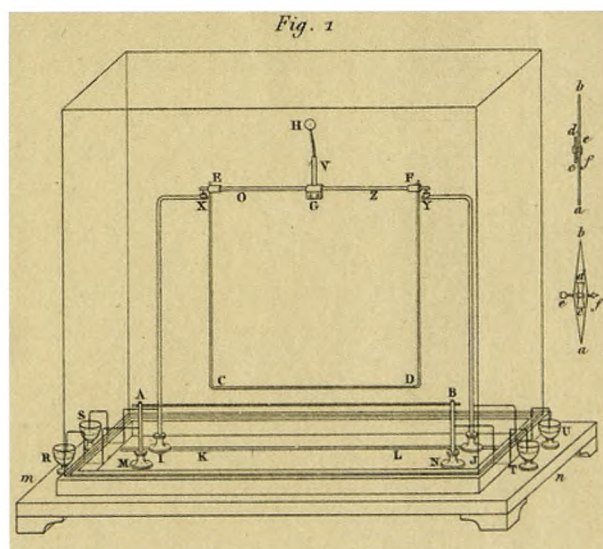


Figur 1. H.C. Ørsted holder en ledning over en kompasnål på mindepladen, som blev sat op i Nørregade, hvor Ørsted opdagede elektromagnetismen. Foto: Teknologihistorie DTU.

Forventningen om elektromagnetismens eksistens var også i overensstemmelse med Ørsteds livsfilosofi.

Ørsted var inspireret af den tyske romantiske skole inden for naturfilosofien. Romantikerne mente, at der var en fundamental enhed i naturen, og at alt i verden var forbundet. Verden var dynamisk, og fænomener skulle forstås som vekselvirkning mellem modsatte kræfter, som hele tiden søgte at opnå balance gennem konflikt. For Ørsted var fænomener som elektricitet og magnetisme manifestationer af denne enhed.

Romantikken stod i skarp kontrast til den matematiske naturbeskrivelse, som var toneangivende inden for fysikken i begyndelsen af 1800-tallet, specielt i Frankrig. Forbindelsen mellem elektricitet og magnetisme var så stor en overraskelse, fordi de førende forskere mente, at elektricitet og magnetisme bestod af helt forskellige typer partikler – kaldet Subtile Fluida – der umuligt kunne påvirke hinanden.



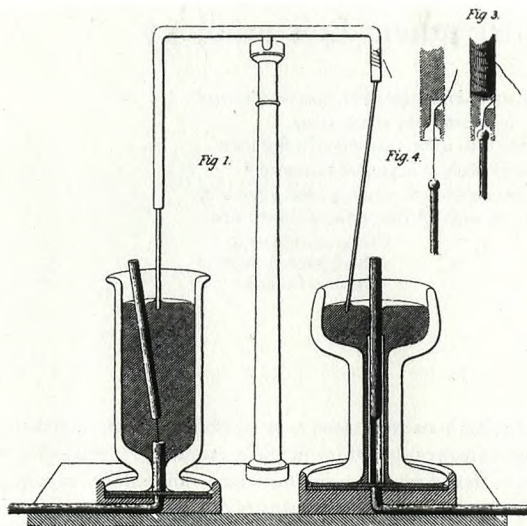
Figur 2. Når man sender en strøm gennem de to ledere i dette apparat, vil den ene bevæge sig. Fra Ampères *Recueil d'observations électro-dynamiques*, 1822. Foto: Teknologihistorie DTU.

Fransk skepsis

I Paris blev nyheden om Ørsteds opdagelse af en elektromagnetisk effekt mødt med skepsis. Var det et romantisk drømmeri? Det franske akademi satte en gruppe forskere til at efterprøve Ørsteds forsøg, og en uge senere demonstrerede de, at den var god nok – en strømførende ledning kunne påvirke en magnet.

En række franske videnskabsmænd, bl.a. André-Marie Ampère, kastede sig ud i arbejdet med at undersøge det nye fænomen. Han troede ikke på, at Ørsteds forsøg beviste en forbindelse mellem elektricitet

og magnetisme. Ifølge Ampère handlede fænomenet kun om strøm, og han fremstillede et apparat, hvor to strømførende ledninger tiltrak eller frastødte hinanden. Ampère mente, at der var små elektriske strømme i en magnet, og at det var dem, der var på spil. Det havde slet ikke noget med magnetisme at gøre.



Figur 3. Faradays apparat, hvor en strømførende ledning roterede om en magnet og omvendt. Fra *Experimental Researches in Electricity*, 1844. Foto: Wikicommons.

Med sin store indsats på området lagde Ampère fundamentet for mange senere teorier om elektromagnetisme, og han begyndte den matematiske udvikling på feltet.

Ørsteds opdagelse vakte også englænderen Michael Faradays interesse. I 1821 fandt Faraday ud af, at en magnet og en strømførende ledning kunne rotere om hinanden, og ti år senere opdagede han induktionen – at en magnet kunne skabe strøm i en ledning, hvis de bevæger sig i forhold til hinanden. Amerikaneren Henry Joseph opdagede i øvrigt denne effekt samtidig med Faraday.

Ørsted selv bidrog ikke meget til det videnskabelige arbejde med elektromagnetismen efter 1820. Måske havde han fundet det, der interesserede ham. Men den berømmelse, som fulgte med opdagelsen, gav Ørsted indflydelse. I sin samtid var han Danmarks førende naturvidenskabsmand.

Ørsted og den effekt, han havde påvist, begyndte nu hver deres rejse. Ørsteds næste store opdagelse blev inden for kemien, hvor han fandt en metode til at isolere aluminium. Det vakte dog ikke den helt store interesse i Ørsteds livstid.

H. C. Ørsteds baggrund

Hans Christian Ørsted blev født i 1772 i Rudkøbing. Hans far var apoteker, og det var helt naturligt, at unge Hans Christian fulgte i faderens fodspor og arbejdede i dennes forretning. I 1797 tog han den farmaceutiske embedseksamen, men Ørsted ville mere end det, og allerede i 1799 afleverede han sin doktordisputats i naturfilosofi på Københavns Universitet. Ud over at bestyre Løve Apoteket i København arbejdede han ulønnet som adjunkt ved Det Medicinske Fakultet på Københavns

Universitet og gennemførte fra 1801 studier i kemi og fysik i udlandet.



Figur 4. Ørsted som ung. Kobberstik af Gilles-Louis Chrétien, ca. 1800. Foto: Teknologihistorie DTU.

Ørsted mødte romantikkens idéverden i København, bl.a. gennem naturfilosoffen Heinrich Steffens foredrag. Det lykkedes Ørsted at sikre sig en position ved Københavns Universitet i 1806, hvor han blev ekstraordinær professor i fysik, og i 1817 blev han ordinær professor i fysik. Da Ørsted opdagede elektromagnetismen, havde han en god akademisk position og indflydelse i Danmark. Førende internationale forskere var dog skeptiske over for Ørsteds romantiske videnskab.

Den altfavnende Ørsted og teorien om alting

Ud fra nutidens snævre akademiske specialisering kan man måske undre sig over, at en farmaceut og kemiker blev professor i fysik. Men Ørsted var meget bredt orienteret, og vores faggrænser ville ikke give mening for ham. Han anså sig selv for naturgransker og så en sammenhæng mellem naturlove, moral, sandhed og æstetik. *“Videnskab, kunst og moral giver indsigt i det sande, det skønne og det gode og fører derved, hver på sin måde, til erkendelse af Gud”*, skrev Ørsted i sin bog *Ånden i Naturen*. For Ørsted var der en dyb fornuft i naturen, og indsigt i denne fornuft kunne opnås på mange måder.

Med sit brede udsyn blev Ørsted en af den danske guldalders ledende kulturpersonligheder. Gennem hele sit liv kæmpede han for at styrke naturvidenskabernes i Danmark, og han var en af hovedkræfterne bag oprettelsen af Den Polytekniske Læreanstalt (nu DTU).

Ørsted udviklede også det danske sprog. Han mente, at ord af nordisk oprindelse ville skabe et stærkere og klarere indtryk på menneskets fantasi og intuition. Derfor stod Ørsted bag indførelsen af mange nye danske ord som fx brint, ilt, rumfang og ildsjæl. I hans vennekreds var vigtige danske forfattere som Adam Oehlenschläger og H. C. Andersen.

Idéen om ånden i naturen førte til en tro på naturvidenskabernes folkeopdragende betydning og til

oprettelsen af Selskabet for Naturlærens Udbredelse, hvorigennem Ørsted og andre udbredte viden om fysik og kemi til den almene befolkning.



Figur 5. Den Polytekniske Læreanstalt set fra Studiestræde. Ørsteds professorgård blev en del af Læreanstalten. Foto: Teknologihistorie DTU.

Ørsted kastede sig også ud i en langvarig debat med Grundtvig. Den folkelige Grundtvig brød sig ikke om tidens elitære lærde, som bl.a. ville finde Gud i naturen. Efter Grundtvigs opfattelse fandt man Gud i biblen. Religion stod helt centralt i den kristne Ørsteds liv, og han krydsede klinger med Grundtvig mere end én gang.

Men Ørsteds handlinger var ikke alene forenelige med romantikkens idéer, hvor man kun fandt viden gennem fornuften. I sit naturvidenskabelige virke var Ørsted en flittig og grundig eksperimentator, og han søgte empirisk bekræftelse på hypoteser i den omgivende verden. Herved forbandt han romantikken med oplysningstidens idealer.

Ørsteds naturfilosofiske holdninger fik ham til at nedtone betydningen af matematik i naturvidenskaberne. Med Ørsteds betydelige magt fik det betydning for både forskning og undervisning i Danmark. Ørsteds efterfølger som professor i fysik, Carl Valentin Holten, var heller ikke matematisk orienteret. Danmark stod derfor uden for udviklingen af den nye matematiske fysik. I dag, hvor naturvidenskab og matematik nærmest er synonyme, hører man nogle gange, at Ørsted ikke var særlig videnskabelig, fordi han ikke brugte matematik.

Var Ørsted den første?

Var Ørsted den første, der så en elektromagnetisk effekt? Spørgsmålet om, hvem der er den første, er oftest komplekst, og der er da også forskellige fortolkninger af, hvordan elektromagnetismen blev opdaget og af hvem. Mange fremstillinger af opdagelsen inkluderer

italieneren Gian Romagnosi, der eksperimenterede med voltasøjles effekt på et kompas i 1802 og publicerede sine fund i en lokal avis. Men man kan ikke være sikker på, at Romagnosi opdagede elektromagnetismen, fordi beskrivelsen af hans eksperimenter er uklar. Så man kan ikke afgøre, om den effekt, han observerede, nu også var en elektromagnetisk effekt. Han fortalte heller ikke om sine eksperimenter i internationale videnskabelige kredse.



Figur 6. Ørsted tegnet af Eckersberg i 1822. Man kan se en magnetnål på billedet. Foto: Teknologihistorie DTU.

Ørsted derimod var professor i fysik ved Københavns Universitet og en del af det videnskabelige samfund på sin tid. Med sin viden om tidens videnskabelige teorier, vidste Ørsted, at han havde set noget betydningsfuldt, som modsagde dominerende teorier. Ørsted vidste også, at det var vigtigt at offentliggøre opdagelsen i videnskabelige kredse. Han kendte de videnskabelige metoder og udførte grundige systematiske eksperimenter og beskrev dem så detaljeret, at de kunne efterprøves af andre. Derfor er det helt klart, at Ørsted så et elektromagnetisk fænomen og erkendte dets særlige karakteristika. Det er derimod uklart, om Ørsted kendte til Romagnosis arbejde.

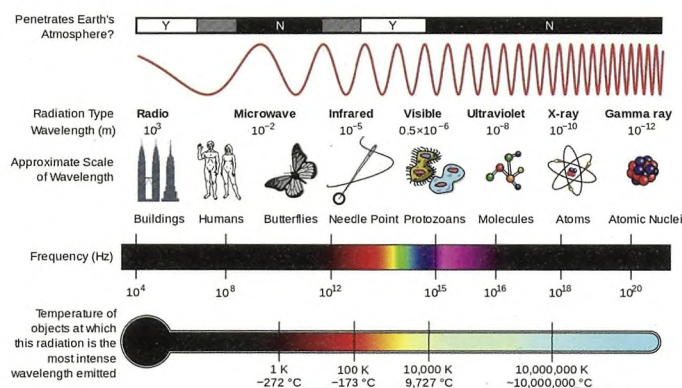
Elektromagnetisme og verdensbillede

Opdagelsen af elektromagnetismen kom til at påvirke vores forståelse af verden. En af de forskere, som arbejdede videre på den teoretiske forståelse af elektromagnetismen, var James Clerk Maxwell. I midten af 1800-tallet formulerede han en teori som forenede elektricitet, magnetisme og lys samt viste teoretisk, at de var manifestationer af det samme fænomen. Maxwell viste også, at elektromagnetiske felter ikke kun virker lokalt, men at elektromagnetisk stråling kan rejse gennem rummet med lysets hastighed. I 1886 observerede fysikeren Hertz disse bølger, og med tiden blev det almindeligt at opfatte lys som elektromagnetisk stråling.



Figur 7. Er dette elektromagnetismens retmæssige opdagelse? Gian Romagnosi af E. Moscatelli, som har kopieret et værk malet af Giuseppe Molteni. Foto: Wikicommons.

Lys viste sig at have flere overraskende aspekter. Forskere havde nemlig fundet lys – ultraviolet og infrarødt – som mennesket ikke kan se med det blotte øje. Efterhånden så man et helt spektrum af elektromagnetisk stråling med forskellige bølgelængder. Det har man bl.a. brugt til at udforske mælkevejen og til at få informationer om det, vi ikke kan se. Fx beskriver NASA, hvordan man har observeret baggrundsstråling i mikrobølgeområdet, som man fortolker som rester fra Big Bang.



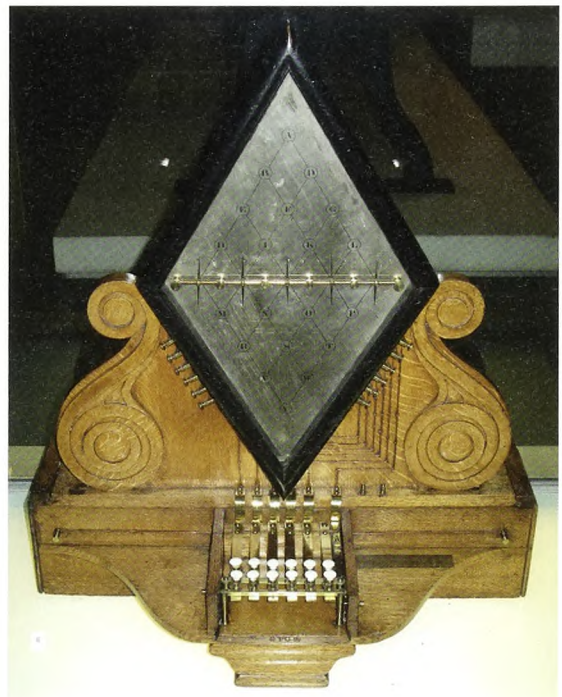
Figur 8. Det elektromagnetiske spektrum. Kilde: NASA.

Med fremkomsten af kvantefysikken omkring 1900-tallets begyndelse fik lyset, og dermed elektromagnetismen, en mere og mere central rolle i fysikfagligheden. Elektromagnetisme regnes i dag for en af de fire fundamentale vekselvirkninger, som holder vores verden sammen. Den mest kendte af vekselvirkningerne er tyngdekraften. Mange fysikere forventer, at de fire fundamentale vekselvirkninger kan forenes til en teori – de tre er forenet, mens tyngdekraften stritter imod. Disse bestræbelser ville sikkert være faldet i Ørstedes smag.

Elektromagnetisme og teknologi

Ørstedes opdagelse blev hurtigt hvirvlet ind i hans samtidens teknologiske udvikling. Et stort antal teknologier kom til at bruge elektromagnetismen, og her følger blot nogle eksempler på brugen af elektromagnetisme inden for kommunikation, elektriske motorer og vedvarende energi.

På kommunikationsområdet viste elektromagnetismen sig brugbar inden for telegrafi. Mange forbinder måske telegrafi med morsekode, men punkt-til-punkt-kommunikation med synlige signaler er en gammel praksis. Man har fx kommunikeret med flag. Da Ørsted opdagede elektromagnetismen, havde flere opfindere allerede forsøgt at bruge elektricitet til telegrafi, og snart forsøgte man at anvende elektromagnetisme til dette formål. Det blev englænderne William Cooke og Charles Wheatstone, der udviklede det første kommercielle elektromagnetiske telegrafsystem til jernbanelinjen Great Western Railway i 1838. Amerikanske Samuel Morse udviklede sit system på samme tid. De korte beskeder, som man sendte gennem telegrafsystemet, var vigtige både til politiske og forretningsmæssige formål. Såvel magthavere som entreprenører investerede i systemet, og et vidtforgrenet net af telegrafkabler formede sig.

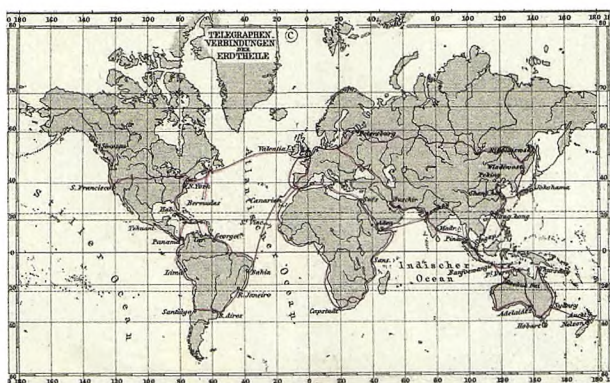


Figur 9. Cooke og Wheatstone brugte den elektromagnetiske effekt til at bevæge nåle i deres telegraf. Denne har fem nåle, som ved fælles hjælp kan pege på ethvert bogstav i alfabetet. Foto: Wikicommons.

Med den store interesse for kommunikation kom der mange bud på, hvordan man kunne forbedre telegrafen. Kunne man fx overføre et telegram gennem luften? Flere opfindere arbejdede på overførsel af lyd uden et kabel – med elektromagnetismen som én af medspillerne. Der blev skarp konkurrence mellem forskellige teknologier, der udsendte elektromagnetiske radiobølger, fx mellem en gnistsender fra italienske Marconi og en buesender fra danske Valdemar Poulsen. Enhver, der havde det

rette apparatur, kunne lytte med på trådløse meddelelser. Det var en udfordring for militæret, som helst ikke delte oplysninger med eventuelle fjender, mens det blev til glæde for mange i det civile liv. De bød gerne radioudsendelser med musik og nyheder fra den store verden ind i stuerne.

Opfindere arbejdede også med en talende telegraf, som man senere kaldte en elektromagnetisk telefon. Mange ventede, at telefonen ville blive brugt til korte beskeder blandt forretningsmænd, men til deres overraskelse anvendte fx kvinder den til at vedligeholde relationer til familie og venner. Igen fik en kommunikationsteknologi en uventet rolle i privatlivssfæren.



Figur 10. Hovedtelegraflinjerne i 1891 ifølge Stiellers Hand-Atlas. Næsten hele kloden var forbundet og med de mindre linjer kunne et telegram komme langt omkring. Foto: Wikicommons.

Elektromagnetisme blev altså en del af standardarsenalet for teknologer, der lavede apparater til massekommunikation. Men det har også ført til bekymring. Det moderne menneske lever livet med elektromagnetisk stråling, fx fra mobiltelefoner og andre apparater, og man diskuterer, om det har en helbredseffekt.

Elektromagnetismen kunne ikke kun anvendes til kommunikation, men også til motorer. Faradays rotationsprincip fra 1821, hvor en strøm får en magnet til at bevæge sig, omdanner elektricitet til bevægelse. Man kan sige, at Faraday skabte den første elektromotor, som dog ikke havde et praktisk sigte. Både opfindere og forskere arbejdede med motorer, men selvom mange udviste stor opfindsomhed, skulle der gå lang tid, før de fik den store udbredelse.

Batterierne var én af de begrænsende faktorer. De var store og dyre, og med dem var motorerne ikke en fordelagtig konkurrent til andre kraftkilder. For eksempel fik Thomas Davenport i 1837 patent på en motor, som han havde udviklet i samarbejde med sin kone Emily. Men ægteparrets opfindelse floppede kommersielt, og de gik fallit.

Elektromotorerne vandt dog for alvor indpas efter 1880'erne, hvor de elektriske forsyningssystemer vandt frem. Nu var fleksibilitet elektromotorens styrke. Med en elektromotor behøvede man ikke overføre bevægelse med bælter eller remme fra en central kraftkilde som en dampmaskine eller et vandhjul. Efterhånden som elektriciteten vandt frem, blev elektromotoren en fast favorit, og elektriske motorer fandt vej til bl.a. en række husholdningsapparater. Men elektromotoren vandt ikke på alle felter. Da bilerne kom frem i slutningen af

1800-tallet, brugte opfindere både damp-, elektro- og forbrændingsmotorer. Forbrændingsmotoren blev industristandarden, mens elmotoren fandt vej til nicher som mælkevogne.



Figur 11. Vindturbiner på Risø. Møller kan bruge elektromagnetisk induktion til at lave elektricitet. Foto: Teknologihistorie DTU.

Elektromotorer, elektricitetsværker og telefoner forbruger energi, og den udbredte brug af dem har været med til at gøre vores samfund dybt afhængigt af fossile brændstoffer. Men elektromagnetisme kan også udnyttes til at lave vedvarende energi gennem induktion. Hvis man kan få fx vind eller vand til at bevæge en magnet i forhold til en spole, opstår der en elektrisk strøm i spolen.

Elektromagnetismen viste sig i det hele taget brugbar i mange teknologier, mange flere end der er beskrevet her. Den er en del af vores teknologiske standardarsenal, ganske som søm og tandhjul, og forskere og opfindere arbejder til stadighed på nye anvendelser. Et eksempel fra DTU er et projekt, som skal udnytte, at vand er elektromagnetisk. Vand kan let polariseres, dvs. et elektrisk felt kan bruges til at ændre fordelingen af ladning i væsken. Det forventer man at kunne bruge til at lave kunstige materialer med helt nye egenskaber, som ellers ikke findes i naturligt forekommende materialer.

Hvis ikke Ørsted havde fundet elektromagnetismen

Hvordan ville vores verden se ud, hvis Ørsted ikke havde opdaget elektromagnetismen? Det er nærliggende at tænke, at opdagelsen af elektromagnetismen lå lige til højrebænet efter opfindelsen af batteriet, og mange

historikere mener, at hvis ikke Ørsted havde lavet forsøget, havde en anden nok fundet elektromagnetismen inden for relativt kort tid. I nyere tid ser man meget ofte, at videnskabelige opdagelser gøres af flere personer næsten samtidig, og man kan hævde, at opdagelsen af elektromagnetisme næsten automatisk ville følge efter opfindelsen af batteriet.

Men der kunne være gået lang tid, og så ville verden i dag måske befinde sig i en anderledes teknologisk situation, hvor andre teknologier, end dem, der anvender elektromagnetismen, havde vundet frem. Og måske havde vi haft en anden videnskabelig forståelse af vores verden. Enkelte observatører har fremsat scenarier, hvor den teknologiske udvikling nærmest ville være stoppet omkring 1820, hvis elektromagnetismen ikke var blevet opdaget. Men vi må ikke undervurdere menneskets evne til at finde på.

Litteratur

- [1] Dan Charly Christensen (2009) "Naturens tanke-læser. En biografi om Hans Christian Ørsted", Museum Tusculanums Forlag.
- [2] Christopher Cooper (2015) "The Truth about Tesla", Race Point Publishing.
- [3] Anja Skaar Jacobsen (2006) "Propagating Dynamical Science in the Periphery of German Naturphilosophie: H. C. Ørsted's Textbooks and Didactics", *Science & Education*, bind 15, side 739–760.
- [4] Ole Knudsen (1991) "Elektromagnetisme 1820-1900", Steno Museets Venner.

- [5] Helge Kragh (2002) "Quantum Generations. A history of physics in the twentieth century", Princeton, New Jersey.
- [6] Helge Kragh (2005) "Natur, Nytte og Ånd", Dansk Naturvidenskabs Historie, bind 2, side 229–264.
- [7] Kirstine Meyer (red.) (1920) "H. C. Ørsted Naturvidenskabelige Skrifter", bind II.
- [8] Gudrun Wolfschmidt (red.) (2007) "Von Hertz zum Handy. Entwicklung der Kommunikation", Nuncius Hamburgensis. Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften, bind 6.
- [9] magine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrumobservatories1.html, tilgået 9. maj 2018
- [10] *Nyt fra Teknologihistorie DTU* (2018), nr. 1, side 14, Teknologihistorie DTU, Kgs. Lyngby, ISSN 2446-354X



Laila Zwisler er leder af Teknologihistorie DTU og arbejder med ingeniørvidenskabernes historie.

Om valg af ord

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

Inden for naturvidenskaben kender vi tilfælde, hvor ordvalget kan skabe et forkert indtryk. Skulle vi ikke overveje, hvornår vi siger -teori, -lære eller -lov?

Kreationister lever tilsyneladende højt på udtrykket "Darwins evolutionsTEORI". Det er jo bare en teori! Selv om der kan være diskussion om evolutionens mekanismer, i detaljer, er der da tale om en evolutions-LÆRE.

RelativitetsTEORIERNE kan stadig appellere til optimistiske amatører, der mener at finde fejl i eller behov for modifikation af Einsteins lære. Hvorfor taler vi om Newtons love, men ikke om Einsteins første, anden, tredje... lov? Hans love har jo vist sig at være den hidtil bedste beskrivelse af de fysiske fænomener.

For eksempel kommer enhver, der bruger GPS, jo ikke uden om det faktum, at tidssignalerne fra satelliternes atomure skal korrigeres i overensstemmelse med

Einsteins ligninger; ellers ville systemerne være helt ubrugelige.

Langt mere uskyldigt er det, når det drejer sig om at finde et navn til et eller andet fænomen. I dette nummer af KVANT er der et aktuelt eksempel (se Holger Nielsens artikel side 17), nemlig ordet "tyngdebølger". De nyligt opdagede gravitationsbølger omtales hyppigt som tyngdebølger (de optræder jo som en forstyrrelse i tyngdefeltet). I oceanografi bruger man imidlertid ordet i forbindelse med bølger i fx en væskeoverflade, hvor der skelnes mellem tyngdebølger og kapillarbølger.

Når der går politik i valget af betegnelser, kan det gå helt galt. Tænk bare på, hvordan republikken Makedonien bliver holdt uden for EU, fordi Grækenland frygter konsekvenserne af dette navn. Og det fortælles, at Kina begrundet krav på et vist havområde, fordi navnet "Det Sydkinesiske Hav" klart viser, at det er kinesisk territorialfarvand.

Optiske pincetter – en hyldest til Nobelprisen i Fysik 2018

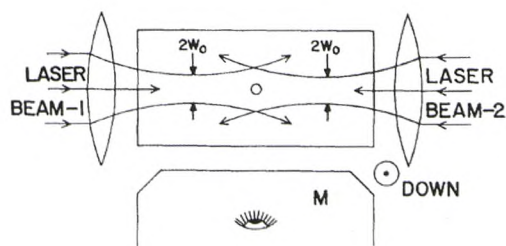
Af Lene B. Oddershede, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

De opfindelser, som fik årets Nobelpris i Fysik, har revolutioneret anvendelser af laseren. Ikke bare fysik, men også kemi, biologi og medicin har fået præcisionsinstrumenter, som har været revolutionerende for vores forståelse af livets fundamentale byggesten og har haft vigtige praktiske anvendelser.

Kære læser, forestil dig, at du kan tage fat i enderne på et enkelt molekyle og strække og bøje det, præcist som man strækker og bøjer et gummibånd – er det fantasi eller virkelighed? Det er faktisk virkelighed, og man kan gøre det med noget så simpelt som en laser, der er fokuseret af en linse, en såkaldt optisk pincet.

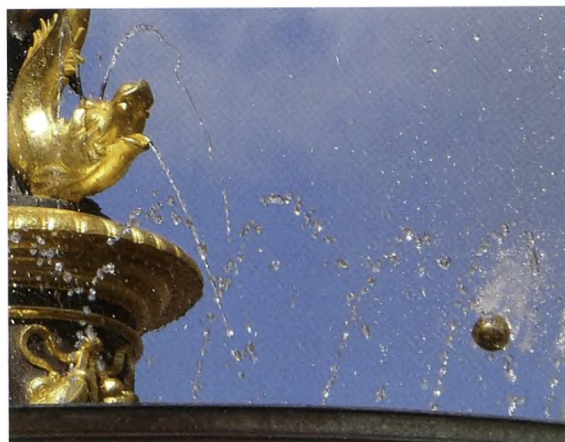
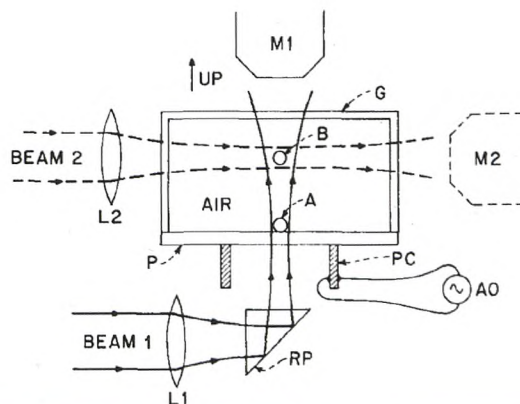
Allerede længe inden laserenes opfindelse, noterede Johannes Kepler i 1619, at kometernes haler peger væk fra Solen og han foreslog, at det er strålingstrykket fra Solen, som er stærkt nok til at skubbe støvpartikler i retning af lysets udbredelsesretning. Men solskin er ikke kohærent og intenst nok til at skabe en optisk pincet, i hvert fald ikke med de linser, vi råder over i dag.

Opfindelsen af laseren var et ganske instrumentelt skridt, også for opfindelsen af optiske pincetter. Essentielt for opfindelsen af laseren var en artikel af Einstein fra 1917 [1], hvori han beskrev teorien bag stimuleret emission. Der skulle gå yderligere over 30 år inden det lykkedes at skabe stimuleret emission i praksis. Den første beskrivelse af et instrument, som kaldtes en *maser*, men som reelt var, hvad vi kender som en laser i dag, blev skrevet af Schawlow og Townes fra Bell Labs i 1958, og det var Maiman fra Hugest Research Laboratories, som var den første, der i praksis demonstrerede kohærent stimuleret emission fra en rubinkrystal.



Figur 1. Schematisk tegning af en optisk pincet dannet af to lasere (BEAM 1 og BEAM 2), som udbreder sig i retninger mod hinanden. Strålingstrykket fra begge lasere sørger for, at partiklen er fanget stabilt i midten [2].

Maiman indsendte sine resultater til Physical Review Letters (PRL), der blev anset som det ypperste fysik-tidsskrift, men redaktøren på PRL gav et historisk afslag på at offentliggøre dette banebrydende arbejde. Dernæst sendte Maiman sin artikel til Nature, der offentliggjorde den straks, hvorefter laseren holdt sit indtog og efterhånden blev et af de vigtigste instrumenter for vores dagligdag.



Figur 2. Optisk levitation. Den øverste skitse er taget fra [3] og viser princippet bag Ashkins optiske levitationspincet, som blev dannet ved at balancere spredningskraften fra en laser (BEAM 1) med tyngdekraften på partiklen (B). Den anden laser (BEAM 2) er ganske svag og bruges blot til at detektere positionen af den fangne partikel. Pincetten lades ved, at en partikel (position A) ligger på en plade, som vibreres, hvorved partiklen kastes op i positionen B. Det nederste billede er af Caritas-springvandet i København, som til Dronningens fødselsdag "fanger" guldæbler ved hjælp af et tilsvarende princip, hvor trykket fra en vandstråle balancerer tyngdekraften på guldæblet.

Straks efter laserenes opfindelse begyndte Arthur Ashkin, som var ansat ved Bell Labs, at eksperimentere med dette nye instrument. Han opdagede, at mikroskopiske glaskugler kunne skubbes i laserens udbredelsesretning. Ydermere observerede han, at kuglerne, hvis de havde et brydningsindex, der var højere end det omkringliggende medie, blev draget ind imod midten af laserstrålen, altså imod den mest intense del. Denne observation førte til den første version af en optisk pincet, som blev dannet af to lasere, som udbredte sig i retninger imod hinanden, se figur 1.

Umiddelbart herefter realiserede Ashkin optiske pincetter i en anden geometri, nemlig hvor spredningskraften fra en laser blev balanceret af tyngdekraften, se figur 2 [3]. Dette princip kaldes optisk levitation og er meget lig princippet bag Caritas-springvandet i det centrale København, hvor guldæbler til Dronningens fødselsdag er stabilt fanget i en ligevægt mellem det opadgående tryk fra en vandstråle og den nedadvirkende tyngdekraft, se figur 2.

Den til dato mest anvendte form af optiske pincetter blev realiseret af Ashkin og medforfattere i 1986; det er en relativt simpelt konstruktion, hvor en enkelt laserstråle med en Gaussisk intensitetsprofil fokuseres kraftigt (se figur 3). Det vigtige er, at fokuseringen af laseren skaber en intensitetsgradient ikke blot i planen ortogonalt på udbredelsesretningen, men også i udbredelsesretningen. Den såkaldte gradient kraft, F_{grad} , er proportional med intensitetsgradienten, $F_{\text{grad}} \propto \nabla I$, og for at opnå en stabil optisk pinct kræves, at F_{grad} er større end spredningskraften, F_{scat} :

$$F_{\text{grad}} \geq F_{\text{scat}} \quad (1)$$

Dette kan opnås ved at fokusere laseren med en linse med høj numerisk apartur (NA) [4]. En optisk pinct med denne geometri udøver et harmonisk potentiale på det fangne objekt:

$$F_{\text{grad}} = -\kappa x, \quad (2)$$

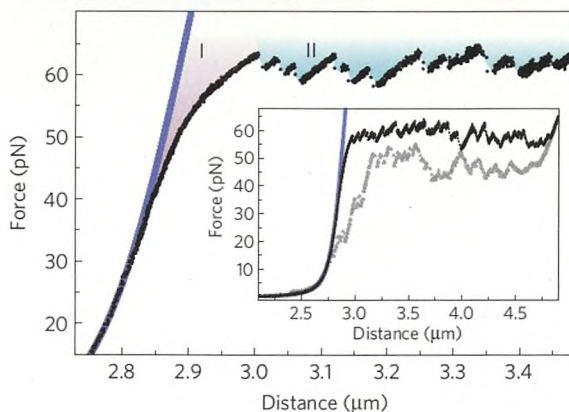
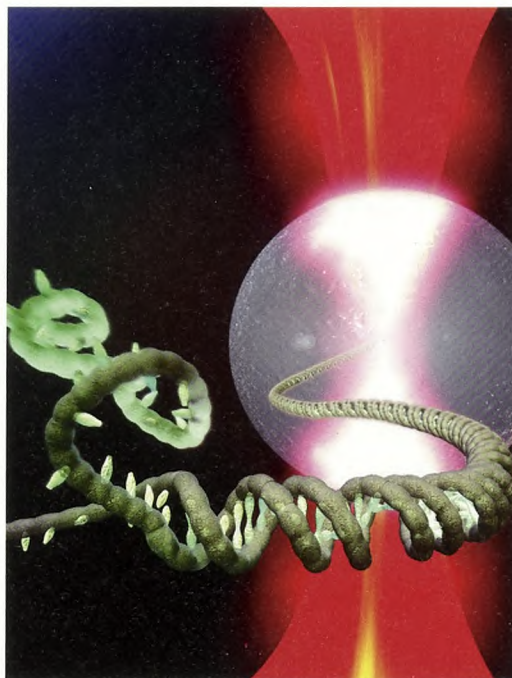
hvor κ er fjederkonstanten, der karakteriserer potentialet, og x er afvigelsen fra ligevægtspositionen. Relationen beskrevet i ligning (2) er for x -retningen, men tilsvarende relationer gælder i alle 3 translationelle retninger.

Denne type af optiske pincetter, baseret på en fokuseret laser med en Gaussisk intensitetsprofil, viste sig hurtigt i stand til at fange kugler af størrelsesordenen nano- til mikrometer. En modificeret version af pincetten blev også anvendt med stor succes til atomar køling, hvilket udløste Nobelprisen i 1997 til Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji og William D. Phillips. Arthur Ashkin opdagede, at en optisk pinct kan fastholde ikke blot kugler fx af glas eller plastik, men også biologiske molekyler eller organismer uden at skade dem.

Denne opdagelse var faktisk resultatet af et fejlslagent eksperiment; i kølvandet på successen for den atomare køling forsøgte Ashkin at fange mindst mulige objekter, og han forsøgte sig med vira og lod prøven stå natten over. Næste dag vrimlede pincetten med liv – det var bakterier, som havde inficeret prøven. Da Ashkin skiftede sin grønne laser ud med en infrarød, opdagede han, at bakterierne havde det strålende i pincetten, selv om de var fanget. De kunne sågar formere sig [5]. Dette var en kæmpe opdagelse, fordi det muliggjorde, at man kunne bruge en optisk pinct til at undersøge biologiske systemer, stort set uden at ødelægge dem med laseren, og igen var Ashkin pioner i at vise, hvordan man kunne måle kræfter udført af enkelte biologiske molekyler inden i en levende celle [6].

En optisk pinct er i stand til at måle sammenhængende værdier af kræfter og afstande. Den opererer

i pN- og nm-regimerne, hvilket netop er relevante måleområder for processer på enkelt-molekyle- eller enkelt-celle-niveau. Et vigtigt aspekt i tildelingen af Nobelprisen til en opdagelse er, at den skal have vist sig anvendelig. Specielt har optiske pincetter vist sig fænomenele til at afdække kinetik og dynamik af molekulære motorer.



Figur 3. Optiske pincetter fanger og strækker et DNA-molekyle. Øverst ses en skitse af, hvordan et DNA-molekyle er limet fast på en kugle, som manipuleres af en optisk pinct dannet af en enkelt kraftigt fokuseret laserstråle. Når der hives tilstrækkeligt hårdt i DNA-molekylet, begynder brintbindingerne, som holder de to DNA-streng sammen, at brydes (taget fra phys.org/news/2011-05-dna-falls.html). Nederst ses en graf af kraft-versus-afstand, som måles, når man strækker et enkelt DNA-molekyle med optiske pincetter. Grafen består af to dele, i del I strækkes den intakte DNA-streng og i del II begynder brintbindingerne at brydes [9].

En molekulær motor foretager en lineær eller rotationel bevægelse, mens den bruger energi, præcist som en makroskopisk motor. Polymerasen, som bevæger sig langs DNA, mens den transkriberer informationen i DNA til en RNA-kopi, er et eksempel på en molekulær motor. Ved hjælp af optiske pincetter fandt man ud af, at Polymerasen bevæger sig skridtvis, et basepar ad gangen, med en typisk hastighed på 5–10 nm/sekund,

og den er i stand til at udøve kræfter op til ca. 25 pN [7]. Termiske fluktuationer har stor betydning på nanometer-skala ved fysiologiske temperaturer; potentialet fra en optisk pincet er større end $k_B T$ og således større end typiske termiske molekylære fluktuationer, og en nødvendighed for at studere biologiske molekyler på enkeltmolekyle-skala er netop, at man kan holde dem i ro i forhold til termiske fluktuationer, hvilket præcist er muligt med en optisk pincet.

En anden klasse af studier, som optiske pincetter har været meget succesfulde til, er studiet af de mekaniske egenskaber af enkelte molekyler, som fx RNA og DNA. For at kunne strække, bøje eller twist RNA og DNA er det nødvendigt at sætte "håndtag" på molekylerne i form af mikroskopiske refraktive partikler, som de optiske pincetter kan holde fast i, se figur 3 [8]. Ud over at forstå DNAs elastiske egenskaber, så er det også blevet vist, at DNA faktisk twister, når det strækkes, hvilket er vigtigt at tage med i matematisk modellering af DNAs mekaniske egenskaber, samt at hvis man "overstrækker" DNA, så kan man mekanisk brække de brintbindinger, som holder de to strenge sammen, se figur 3. Man kan måske spørge sig selv, om de mekaniske egenskaber af DNA og RNA er vigtige, eller om det kun er skøre fysikere med et nyt instrument i hånden, som kan finde på at strække, bøje og rotere DNA og RNA? Men faktum er, at de molekylære motorer, som arbejder på RNA og DNA, præcist strækker, bøjer og roterer DNA og RNA, mens der foretages processer, som er absolut livsnødvendige, og dermed er disse studier yderst relevante.

I Danmark blev den første optiske pincet opbygget på Niels Bohr Institutet i 1999. Denne pincet var baseret på en enkelt nær-infrarød laser og blev specialiseret til at kunne foretage kvantitative målinger på biologiske systemer. Hurtigt herefter blev der på Risø bygget en optisk pincet, som var baseret på en grøn laser, og som havde den egenskab, at laserstrålen deltes op i flere individuelle stråler, og dermed kunne flere partikler manipuleres samtidigt [10]. Begge typer af opstillinger er siden blevet meget udbredte og bruges i biologiske sammenhænge, men også i form af robotter, der kan anvendes på ekstrem lille skala.

En unik egenskab ved optiske pincetter er, at de er de eneste nanoredskaber, som er i stand til at foretage kvantitative målinger inde i levende celler, og sågar inden i levende organismer, uden at forårsage fysiologisk skade på de biologiske systemer. På Niels Bohr Institutet specialiserede vi os i præcist at udnytte denne egenskab af optiske pincetter, og har fx undersøgt dynamikken af enkelte molekyler i bakteriemembraner og af organeller i eucaryote celler [11]. Specielt er pincetten også anvendelig til at karakterisere de mekaniske egenskaber inden i celler, og de nyeste resultater viser, hvordan cellers mekaniske egenskaber har betydning fx for stamcellers differentiering, samt for bevægelsen og modning af organer i et foster.

Optiske pincetter kan fange ganske små metalliske nanopartikler, med diameter ned til ca. 10 nm [12]. Sådanne nanopartikler har ofte en resonans og dermed en øget absorption af lys i et bestemt bølgelængdeområde.

Hvis størrelsen af nanopartiklen vælges korrekt, vil en væsentlig del af lyset fra den optiske pincet absorberes af partiklen og frigives i form af varme, hvilket varmer partiklen og omgivelserne gevaldigt op. Hvis nanopartiklerne vælges, så de opvarmes af en infrarød laser, som kan trænge dybt i biologisk væv, kan denne fototermske effekt anvendes til at minimere tumorer. I praksis gøres dette ved at levere nanopartiklerne i blodbanen på patienten, hvorefter de automatisk finder vej til tumoren, hvor de så bestråles udefra af en nær-infrarød laser. Denne nye type terapi har vist sig effektiv i mus [13] og står nu på spring til at videreudvikles til mennesker. Således kan man sige, at optiske pincetter også ligger til grund for udviklingen af nye terapier mod cancer.

Optiske pincetter har vist sig fænomenale til at afdække fundamentale fysiske egenskaber af biologiske molekyler og har endvidere fundet mange andre anvendelser, fx som mikrorobotter og som basis for terapier. Af disse årsager er Arthur Ashkin ofte blevet indstillet til Nobelprisen, og nu er det endeligt lykkedes, han er 96 år gammel, og heldigvis får han denne ære, mens han endnu er iblandt os – det er utroligt velfortjent.

Nobelprisen i Fysik 2018 blev ligeligt delt mellem opfindelsen af optiske pincetter (Arthur Ashkin) og generationen af højintensitets ultrakorte pulser (Gérard Mourou og Donna Strickland). At denne artikel primært handler om optiske pincetter skyldes alene forfatterens nære forhold til denne teknik, den anden halvdel af Nobelprisen er givet til en mindst lige så imponerende og anvendelig opfindelse og er omtalt i artiklen i dette nummer af KVANT af Peter Uhd Jepsen.

Litteratur

- [1] A. Einstein (1917) "Zur Quantentheorie der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift*, bind 18, side 121–128.
- [2] A. Ashkin (1970) "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure", *Phys. Rev. Lett.*, bind 24, side 156.
- [3] A. Ashkin og J. M. Dziedzic (1971) "Optical levitation by radiation pressure", *Appl. Phys. Lett.*, bind 19, side 283.
- [4] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm og S. Chu (1986) "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", *Opt. Lett.*, bind 11, side 288.
- [5] A. Ashkin og J. M. Dziedzic (1987) "Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria", *Science*, bind 235, side 1517.
- [6] A. Ashkin, K. Schütze, J. M. Dziedzic, U. Euteneuer og M. Schliwa (1990) "Force generation of organelle transport measured in vivo by an infrared laser trap", *Nature*, bind 348, side 346.
- [7] M. D. Wang, M. J. Schnitzer, H. Yin, R. Landick, J. Gelles og S. M. Block (1998) "Force and Velocity Measured for Single Molecules of RNA Polymerase", *Science*, bind 282, side 902.

- [8] M. D. Wang, H. Yin, R. Landick, J. Gelles og S. M. Block (1997) "Stretching DNA with optical tweezers", *Biophys. J.*, bind 72, side 1335.
- [9] P. Gross, N. Laurens, L. B. Oddershede, U. Bockelmann, E. J. G. Peterman og G. J. L. Wuite (2011) "Quantifying how DNA stretches, melts and changes twist under tension", *Nature Physics*, bind 7, side 731–736.
- [10] R.L. Eriksen, P. C. Mogensen og J. Glückstad (2002) "Multiple-beam optical tweezers generated by the generalized phase-contrast method", *Optics Letters*, bind 27, side 267–269.
- [11] I. M. Tolic-Nørrelykke, E.-L. Munteanu, G. Thon, L. Oddershede og K. Berg-Sørensen (2004) "Anomalous diffusion in living yeast cells", *Physical Review Letters*, bind 93, side 078102.
- [12] P. M. Hansen, V. K. Bhatia, N. Harrit og L. Oddershede (2005) "Expanding the optical trapping

range of gold nanoparticles", *Nano Letters*, bind 5, side 1937–1942.

- [13] J. Tranekjaer Joergensen, K. Norregaard, P. Tian, P. M. Bendix, A. Kjaer og L. B. Oddershede (2016) "Single Particle and PET-based platform for identifying optimal plasmonic nanoheaters for photothermal cancer therapy", *Scientific Reports*, bind 6, side 30076-(1-10).



Lene B. Oddershede er leder af Grundforskningscentret StemPhys og professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Foreningsnyt – kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Januar				
21/1	19.15	Solar activity and cosmic rays	Heidi Korhonen	AS (Kbh)
28/1	19.15	Solar activity and cosmic rays	Heidi Korhonen	AS (Aarh)
28/1	19.30	Udforskningen af Mars – to nye missioner	Morten Bo Madsen	SNU
Februar				
18/2	19.15	ICECUBE	Morten Ankersen Medici	AS (Kbh)
25/2	19.15	ICECUBE	Morten Ankersen Medici	AS (Aarh)
25/2	19.30	Kepler-missionen: Stjernesang og planetdans	Jørgen Christensen-Dalsgaard	SNU
Marts				
11/3	19.15	Kosmiske stråler	Jens Olaf Pepke Pedersen	AS (Kbh)
18/3	19.15	Kosmiske stråler	Jens Olaf Pepke Pedersen	AS (Aarh)
18/3	19.30	ASIM – Jagten på de magiske lyn	Per Lundahl Thomsen	SNU
April				
1/4	19.15	Miyake-begivenheder	Christoffer Karoff	AS (Kbh)
8/4	19.15	Miyake-begivenheder	Christoffer Karoff	AS (Aarh)
8/4	19.30	Vores nye Jupiter som observeret fra Juno	John Leif Jørgensen	SNU
		Efter foredraget afholdes generalforsamling		
29/4	19.15	Den kosmiske baggrundsstråling	Michael J.D. Linden-Vørnle	AS (Kbh)
30/4	15.00	Virksomhedsbesøg på Terma	(Kun for medlemmer af SNU)	
Maj				
6/5	19.15	Den kosmiske baggrundsstråling	Michael J.D. Linden-Vørnle	AS (Aarh)
6/5	19.30	Biologi i rummet	Christina Toldbo	SNU
27-28/5		Dansk Fysisk Selskabs Årsmøde Fænø Sund		DFS
Juni				
30/6		Asteroidedag	Tid og sted oplyses senere	SNU

Wieth-Knudsen Observatoriet, Margot Nyholms Vej 19, 3220 Tisvildeleje, har åbent den anden og den sidste lørdag i hver måned. I januar, februar og marts er der åbent fra kl. 21-23, i april fra kl. 22-24 og i maj, juni og juli fra kl. 23-24.

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (astronomisk.dk).
AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Institut, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, Aud.F/G122, 8000 Aarhus C.
SNU: Aud. 1, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (naturvidenskab.net, facebook.com/SNU1824).
DFS: dfs.nbi.dk

Chirped pulse amplification – Nobelprisen i Fysik 2018

Af Peter Uhd Jepsen, Institut for Fotonik, Danmarks Tekniske Universitet

Hvordan laver man en laser, der er så kraftig, at intet kendt materiale kan overleve at blive ramt af lyset? Og som samtidig laver så korte lysglimt, at det bliver muligt at fastfryse elektroners bevægelse rundt om atomer? Årets Nobelpris i Fysik blev givet for den opfindelse, der gør alt dette muligt. Læs med, og få indblik i femtosekund-verdenen.

Den 2. oktober 2018 blev årets Nobelpris i Fysik offentliggjort, og det blev klart, at det var inden for optikkens verden, at årets vindere var blevet fundet. Tre videnskabsfolk modtog i fællesskab prisen for deres banebrydende arbejde med vigtige optiske teknikker. Den ene halvdel af prisen gik til Arthur Ashkin, som blev hædret for sin opfindelse af den optiske pincet – en hyldest til denne fantastiske opfindelse, skrevet af en af verdens førende specialister inden for dette område, er at finde andetsteds i dette nummer af KVANT. Den anden halvdel af prisen gik til Donna Strickland og Gérard Mourou for deres banebrydende teknik til forstærkning af ultrahurtige laserpulser. I denne artikel går jeg lidt i dybden med Strickland og Mourous opfindelse af Chirped Pulse Amplification (CPA), som teknikken kaldes.

Hvorfor har verden brug for en lysforstærker?

Hvorfor får man Nobelprisen, verdens mest prestigefyldte videnskabelige pris, for opfindelsen af en forstærker til laserlys? Laseren blev opfundet og demonstreret i starten af 1960'erne, og forkortelsen LASER står jo for "Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation" – og Nobelprisen i år er givet for arbejde, som Strickland og Mourou publicerede i en kort artikel i 1985 [1]. Så det lader til, at man i mange år har kunnet forstærke lys. Laser-virkningen opstår, når man lagrer tilstrækkelig energi i et lasermateriale, som under de rette betingelser frigiver denne energi ved hjælp af stimuleret emission. Placeres lasermaterialet mellem to spejle, kan man opnå en stabil laservirkning.

For at forstå behovet for en egentlig laserforstærker, skal vi lige et smut omkring nogle basale begreber. For en fysiker er det rigtig interessant at have adgang til laserlys med ekstrem høj intensitet (se Faktaboks 1). En pulseret laser giver mulighed for at levere en veldefineret mængde energi over et kort tidsrum til en prøve, og dermed bliver det muligt at undersøge vekselvirkningen mellem lys og stof meget præcist og med utrolig stor tidsopløsning.

Jo højere intensitet af lyset, jo mere eksotiske fænomener kan man få adgang til at undersøge – det bliver for eksempel muligt at arbejde med højenergifysik og relativistiske partikler uden nødvendigvis at skulle have adgang til en stor accelerator (se Faktaboks 2). Så det er klart, at så snart laseren var opfundet, så startede kapløbet om at nå højere og højere intensiteter. I starten gik det meget hurtigt, og inden for få år efter laserens opfindelse havde man øget intensiteten med

mange størrelsesordner ved hjælp af opfindelser som Q-switching og mode-locking, som muliggjorde korte laserpulser af nano-, pico-, helt ned til femtosekundlængde. Snart nåede man dog en grænse for, hvor meget man kan forstærke lys – af flere årsager. For det første når man til et punkt, hvor forstærkermediet simpelthen mættes. Der kan så sige ikke absorberes energi og udsendes lys fra materialer med uendeligt mange fotoner per sekund. For det andet begynder ikke-lineære effekter at spille en afgørende rolle for laserens, blandt andet i form af selvfokusering, som er en effekt, der skyldes, at materialer har et intensitetsafhængigt brydningsindex.

Faktaboks 1: Effekt og intensitet af lys

Der er flere måder, hvorved man kan beskrive, hvor kraftigt lys fra en laser (eller andre lyskilder) er. Mest fundamentalt er at måle, hvor mange fotoner, der ankommer til detektoren per sekund. Hver foton har en energi, der svarer til dens frekvens ($E = h\nu = hc/\lambda$), og ankommer der R fotoner per sekund, så er effekten af lyset $P = h\nu \cdot R$, udtrykt i enheden watt [W eller J/s]. Fokuseres dette lys til en plet med areal A , så er intensiteten $I = P/A$, udtrykt i enheden W/m^2 . En simpel laserpointer med grønt lys giver typisk en effekt på 5 mW, hvilket svarer til $1,3 \cdot 10^{16}$ fotoner per sekund. Fokuseres lyset fra laserpointeren med en standardlinse, kan pletten få en diameter på omtrent $10 \mu m$. Intensiteten af lyset i denne plet er derfor $60 MW/m^2$. Dette tal kan sammenlignes med sollys, hvor der midt på dagen ved ækvator indstråler en effekt på omtrent $1 KW/m^2$. En moderne table-top-femtosekundlaser leverer pulser med 35 fs længde og en pulsenergi på 6 mJ, svarende til en spidseffekt på 170 GW – selv om den gennemsnitlige effekt i laserstrålen kun er nogle få watt. Fokuseret til samme pletstørrelse som laserpointerens leverer en sådan laser en svimlende intensitet på $2 \cdot 10^{21} W/m^2$.

Plane, optiske elementer begynder at opføre sig som linser ved høje intensiteter, og det betyder i praksis en katastrofal fokusering af lyset inde i laserens. Dette leder til uforudsigelig opførsel af laserens og til sidst permanente skader på de optiske elementer (spejle, krystaller) ved de høje intensiteter. En mulig udvej ville være simpelthen at gøre laserstrålen større – og

dermed få lavere intensitet af lyset. Dette blev forsøgt i lang tid (frem til 1985), hvilket resulterede i ekstremt store, dyre og komplicerede lasersystemer med optik og forstærkningskrystaller i kvadratmeterstørrelse, som er blevet brugt til forskning i laserdrevet fusion (Nova og NIF).

Faktaboks 2: Ponderomotiv energi

Lys beskrives matematisk som en oscillerende elektromagnetisk bølge, der udbreder sig i rummet. Hvis en elektron (masse m , ladning $-e$) udsættes for det elektriske felt fra lyset, vil den blive accelereret og derved opnå kinetisk energi. Den gennemsnitlige kinetiske energi i løbet af lysets oscillationsperiode ($T = 1/\nu$) kaldes for den ponderomotive energi,

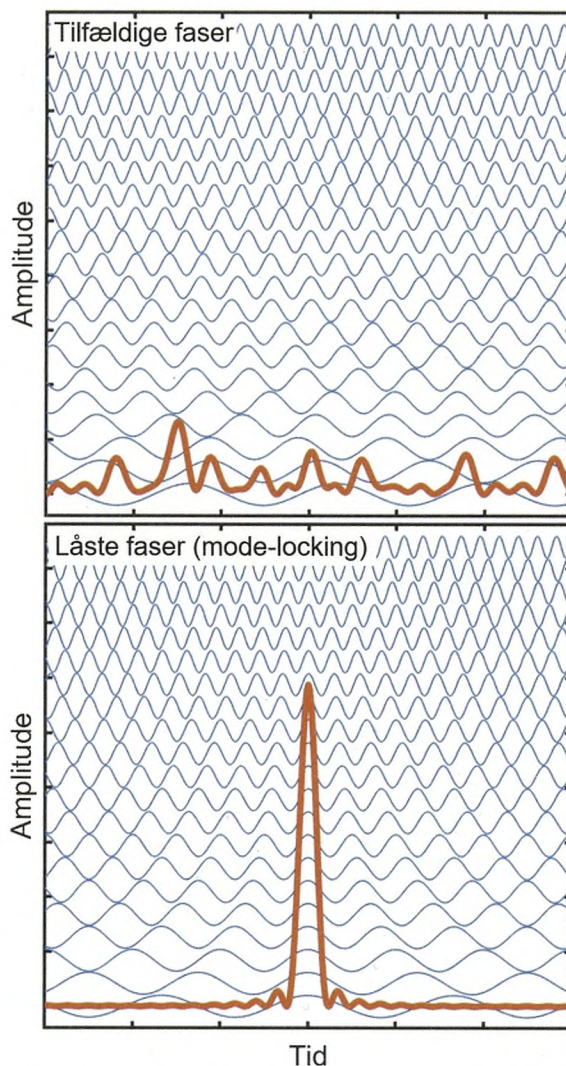
$$U_p = \frac{e^2 I}{2c\epsilon_0 m \omega^2}. \quad (1)$$

Denne energi skal sammenlignes med fotonens energi, $U_{h\nu} = h\nu$. For små intensiteter er fotonens energi meget større end den ponderomotive energi, og lys vekselvirker med stof ved udveksling af fotoner. I eksemplet med laserpointeren (Faktaboks 1) er fotonenergien 2,3 eV, mens den ponderomotive energi kun er 10^{-9} eV – aldeles ubetydelig. På den anden side, hvis vi fokuserer femtosekund-laseren fra Faktaboks 1 til en pletstørrelse på $1 \mu\text{m}$, vil lyset tilføre elektroner en ponderomotiv energi på over 2 MeV, omtrent seks størrelsesordener over fotonernes energi, og langt inde i det relativistiske regime – elektronernes gennemsnitlige fart er 97% af lysets. I dette tilfælde vil vekselvirkningen med materialer være domineret af denne energi, og de enkelte fotoners energi er ubetydelig. Som et sjovt kuriosum kan nævnes, at elektroner i sådanne lysfelter udsættes for usandsynligt store accelerationer: $a = -eE/m = 3 \cdot 10^{22} g$. Den vilde acceleration skyldes, at elektronen opnår sin kinetiske energi på ekstremt kort tid – en brøkdel af lysets oscillationsperiode, som for laseren i eksemplet er 2,3 fs.

Femtosekund-lasere

Vi skal lige have på plads, hvordan man laver en laser, der udsender lysglimt, der kun er få femtosekunder lange. Teknikken bag denne fantastiske bedrift kaldes for mode-locking, som hentyder til, at man låser faser af mange egensvingninger, eller modes, i laserens kavitæt. Lyset fra laseren er summen af alle de mange modes i laserens kavitæt, og hvis faserne af alle disse mange modes er låst til hinanden, bliver resultatet en sekvens af korte lyspulser i stedet for en kontinuerlig stråle. På denne måde kan man samle al laserens energi i meget korte pulser, som derfor får en meget høj spidseffekt – se figur 1. De korteste laserpulser med denne teknik er i dag 5 femtosekunder lange – 0,000000000000005

sekunder. Låsningen og specielt stabiliseringen af alle frekvenserne i en laserkavitæt resulterer i en såkaldt frekvenskam – et ekstremt bredt spektrum af laserfrekvenser med ekstremt præcise intervaller, som i dag bruges til absolutte frekvensstandarder og nøjagtige tidsmålinger – og blev belønnet med Nobelprisen i Fysik i 2005 til Hall og Hänsch.



Figur 1. Illustration af mode-locking i en laser. De blå bølger illustrerer en serie sinus-formede elektriske felter, der repræsenterer lysbølger med stigende frekvens i en laserkavitæt. Summen af disse bølger giver det lys, der kommer ud af laseren, hvis intensitet er vist med den røde kurve. I det øverste panel er faserne af de forskellige lysbølger tilfældige, og intensiteten af laseren fluktuerer derfor tilfældigt over tid. I det nederste panel er faserne af lysbølgerne låst til hinanden, og summen bliver derfor en velordnet, kort puls. Jo flere frekvenser, jo kortere bliver pulsen.

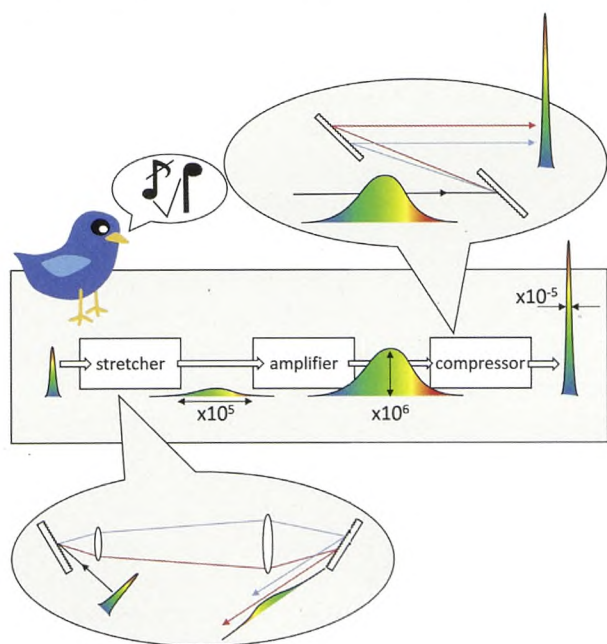
En kort laserpuls består altså af mange frekvenser – eller farver. Jo kortere laserpulsen er, jo bredere er dens spektrum. I samme tråd som kvantemekanikkens usikkerhedsrelationer gælder der, at produktet af pulsens tidslige længde og bredden af dens spektrum er en konstant – skrevet som $\Delta\tau \cdot \Delta\nu = K$.

CPA-princippet

Princippet bag CPA er egentlig simpelt nok – så simpelt og genialt, at det kunne tiltrække en Nobelpris! For at undgå for høj intensitet af laserlyset under forstærkningen, så skal pulsen simpelthen gøres længere inden den

bliver forstærket. Med en given samlet energi af pulsen, vil dette naturligvis betyde en mindre intensitet. Men hvordan gør man en laserpuls længere? Her skal man bruge laserpulsens brede spektrum – som beskrevet i forrige afsnit. For den kortest mulige laserpuls er alle farverne i laserlyset samlet i det kortest mulige tidsrum. Hvis man sender en ultrakort laserpuls gennem et dispersivt medium (for eksempel et stykke glas, eventuelt i form af en optisk fiber, eller ved hjælp af optiske gitre, som vist i figur 2), vil de forskellige farver udbrede sig med forskellig fart – og derved bliver pulsen længere, og dens energi spredes ud over længere tid. Kigger man på laserlysets øjeblikkelige bølgelængde, vil man nu se, at de lange bølgelængder kommer først, og derefter ankommer de kortere bølgelængder. Havde lyspulsen været en lydbølge, ville man høre en tone med stigende frekvens, i stil med fuglekvidder. Af denne grund bruger man det engelske ord chirp til at beskrive effekten med.

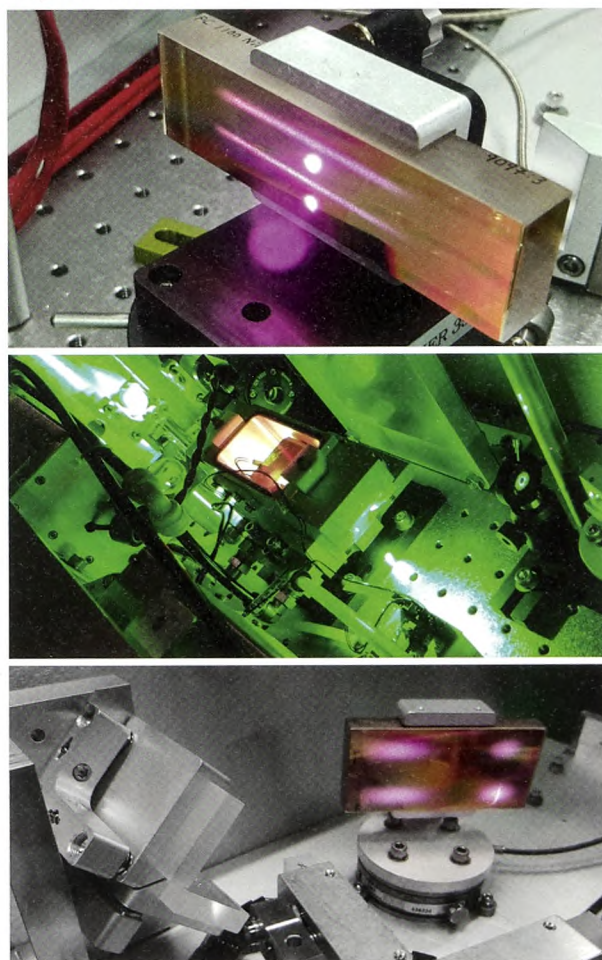
Den forlængede laserpuls kan nu forstærkes uden at ødelægge forstærkermaterialet og optikken, og resultatet er en meget kraftig, men stadig lang laserpuls. Det sidste skridt er at gøre pulsen kort igen ved at sende den igennem et optisk system, der forsinker de lange bølgelængder i pulsen i forhold til de korte bølgelængder. Resultatet bliver så, at pulsen igen bliver kortest mulig, men nu med en meget stor spidsintensitet – klar til brug i alverdens spændende eksperimenter.



Figur 2. Princippet bag Chirped Pulse Amplification (CPA). En femtosekund-laserpuls gøres en faktor 100.000 længere ved hjælp af dispersion på optiske gitre i en stretcher. Herefter forstærkes den, så pulsenergien øges en million gange. Til sidst trykkes pulslængden tilbage til den oprindelige længde i en kompressor, ligeledes bygget ved hjælp af optiske gitre. Lyset i den udstrakte laserpuls har en stigende frekvens, i stil med fuglekvidder – deraf navnet Chirped Pulse Amplification.

I figur 3 giver jeg et lille indblik i, hvordan CPA-princippet ser ud i praksis. På DTU Fotonik har vi en lang række femtosekund-lasere baseret på CPA-princippet, og figur 3 viser de vigtige komponenter: De

optiske gitre, der henholdsvis strækker og komprimerer laserpulserne, og forstærkeren, der muliggør de ekstreme lysintensiteter.



Figur 3. De centrale elementer i en CPA-femtosekund-laser på DTU Fotonik. Øverst ses det gitter, som udstrækker den svage laserpuls. I midten ses forstærkeren, som øger energien af den lange laserpuls. Nederst ses det optiske gitter, som efterfølgende komprimerer den forstærkede laserpuls tilbage til sin oprindelige længde – her 35 fs.

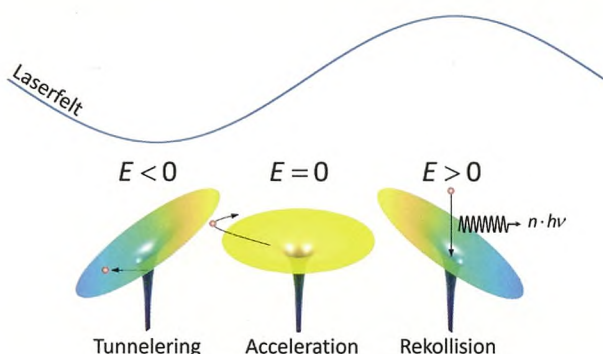
Anvendelser

Forstærkede femtosekund-laserpulser har mange og meget alsidige anvendelser – både i praktisk henseende og inden for den fundamentale videnskab. Den mest kendte praktiske anvendelse af intense laserpulser er uden tvivl til øjenoperationer, hvor den fokuserede stråle af korte pulser fungerer som en uhyre præcis kniv. Præcisionen skyldes dels selve laserplettens lille størrelse, men også, og mindst lige så vigtigt, at det med de korte pulser bliver muligt at have en ekstremt høj intensitet af lyset til skæreprocessen, og samtidig en forholdsvis lav middeleffekt, som minimerer skader på vævet. Af samme grund finder femtosekund-lasere også anvendelser inden for materialeforarbejdning (micromachining).

I den mere fundamentale retning, så er der for tiden meget stort fokus på grundvidenskabelige anvendelser af intense femtosekund-lasere inden for et forskningsfelt, som beskæftiger sig med frembringelsen af endnu kortere lysglimt – attosekund-videnskab [2].

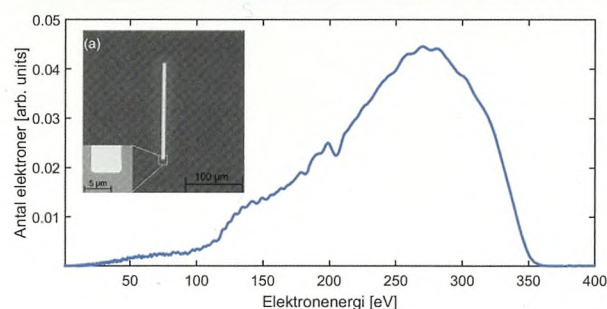
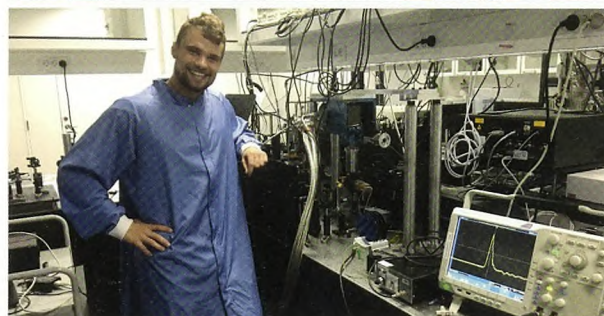
En af attosekund-videnskabens grundpiller er tretrins-modellen (three-step model), oprindeligt ud-

viklet af fysikeren Paul Corkum, og som er vist i figur 4. Her skal man forestille sig et isoleret atom i vakuum, hvor elektronerne er bundet til atomkernen med det atomare Coulomb-potentiale. Udsættes atomet for et meget kraftigt elektrisk felt, så tipper det atomare potentiale, og det bliver muligt for de bundne elektroner at undslippe atomet ved hjælp af tunnelering. Disse frie elektroner bliver nu accelereret af laserfeltet – og opnår en høj kinetisk energi (se faktaboks 2). Når det oscillerende laserfelt skifter retning, accelereres elektronen tilbage mod atomet og kan rekollidere med atomkernen. Hermed frigives den kinetiske energi som en foton med høj energi – det vil sige kort bølgelængde. Denne bølgelængde svarer til de harmoniske overtoner af laserfeltet, og processen kaldes derfor High Harmonic Generation (HHG) [3]. Kigger vi tilbage på figur 1, så kan man måske overbevises om, at de mange harmoniske overtoner, hvis de ellers har låste faser, kan summeres til en helt ekstrem kort laserpuls, som er få attosekunder lang.



Figur 4. Corkums tretrins-model for frembringelse af attosekund-pulser. Det kraftige elektriske felt fra laserpulsen tipper atomets Coulomb-potentiale, så elektroner kan tunnelere ud i vakuum, og atomet ioniseres ($E \leq 0$). Elektronerne accelereres af laserfeltet, og når feltet skifter fortegn ($E = 0$), vender elektronen tilbage til atomet og kan frigive sin ponderomotive energi som en foton med meget høj energi, ved rekollision med atomet.

I min gruppe på DTU Fotonik arbejder vi ikke direkte med attosekund-pulser, men vi udnytter de samme koncepter, som findes i tretrins-modellen. Vi arbejder med femtosekund-pulser til frembringelse af meget korte elektronpulser, som vi gerne vil bruge til at starte og studere kemiske reaktioner med [4]. Vi udsætter metalliske strukturer for meget kraftige optiske pulser ved lange bølgelængder (såkaldte terahertz-pulser), og ved samme tunnelprincip som i tretrins-modellen får vi en kort puls af elektroner frigivet. Det interessante ved disse elektroner er, at de frigives inden for en brøkdel af et picosekund, og laserfeltet accelererer dem til energier mellem 10 og 500 eV. Elektroner med disse energier reagerer kraftigt med vand, DNA-molekyler, og andre biologiske materialer [5]. Vi håber derfor på, at vi med tidsopløst femtosekund-spektroskopi for første gang bliver i stand til at følge, hvordan elektroner slår biologiske molekyler i stykker – og måske finde ud af, hvordan disse processer kan kontrolleres, for eksempel til gavn for forståelsen af strålingsterapi og beskyttelse mod strålingsskader.



Figur 5. Øverst: Fokusering af intens femtosekund-laserpuls i luft. Den ekstreme intensitet ioniserer luftens molekyler, og de frie elektroner accelereres af laserens hurtigt oscillerende elektriske felt. Resultatet er et farverigt spektrum af IR-, synligt, og UV-lys fra plasmaet. Foto: © Joachim Rode, Rode Images. Midt: Ph.d.-studerende Simon Lange foran sit eksperiment med felt-induceret tunnelering af elektroner, drevet af fjerninfrarøde (THz) optiske pulser. Nederst: Energispektrum af elektroner fra optisk drevet tunnelering. Foton-energien er 4 meV, elektronerne opnår op til 350 eV ponderomotiv energi.

Jeg håber, at jeg har kunnet give et lille indblik i den spændende femtosekund-verden, som i år har fået et stort klap på skulderen i form af Nobelprisen til Gérard Mourou og Donna Strickland. Det er et felt, som stadig er i hastig udvikling, og det skyldes primært CPA-teknikken. EU satser meget stort på intense lasere, for eksempel i form af ELI (Extreme Light Infrastructure), med en investering på over 850 millioner euro. I de kommende år kan vi forvente at se lasersystemer, der er så kraftige, at de bliver vigtige værktøjer for kernefysik på de allerhurtigste tidsskalaer.

Litteratur

- [1] D. Strickland og G. Mourou (1985) "Compression of amplified chirped optical pulses", *Opt. Comm.*, bind 55, side 447–449.
- [2] P. B. Corkum og F. Krausz (2007) "Attosecond science", *Nat. Phys.*, bind 3, side 381–387.
- [3] P. M. Paul, E. S. Toma, P. Breger, G. Mullot, F. Augé, P. Balcou, H. G. Muller og P. Agostini (2001) "Observation of a Train of Attosecond

Pulses from High Harmonic Generation”, *Science*, bind 292, side 1689–1692.

- [4] K. Iwaszczuk, M. Zalkovskij, A. C. Strikwerda og P. U. Jepsen (2015) “Nitrogen plasma formation through terahertz-induced ultrafast electron field emission”, *Optica*, bind 2, side 116–123.
- [5] C. R. Arumainayagam, H.-L. Lee, R. B. Nelson, D. R. Haines og R. P. Gunawardane (2010) “Low-energy electron-induced reactions in condensed matter”, *Surf. Sci. Rep.*, bind 65, side 1–44.



Peter Uhd Jepsen er professor og vicedirektør på Institut for Fotonik, Danmarks Tekniske Universitet. Han forsker i ultrahurtige optiske fænomener, med speciale i ikke-lineær optik, femtosekund-lyskilder og deres anvendelser i terahertz-området, som ligger i grænselandet mellem mikrobølger og infrarødt lys.

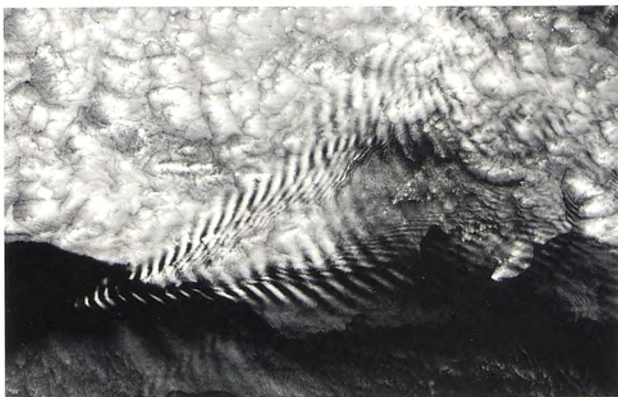
Gravitationsbølger og tyngdebølger

Af Holger Nielsen, Støvring

Gravitationsbølger og tyngdebølger beskriver vidt forskellige fænomener. I artiklen forklares forskellen, og der gives eksempler på tyngdebølger, og hvad man kan bruge observationer af dem til.

Hvad er gravitationsbølger?

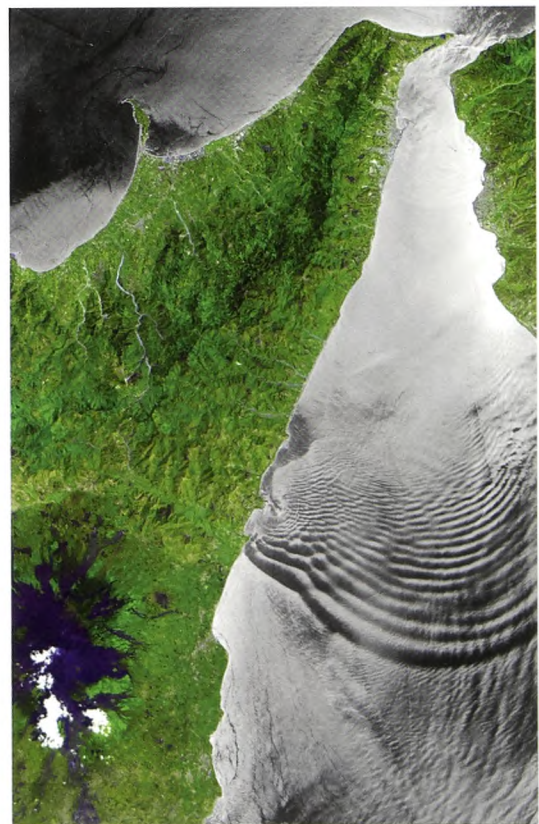
Gravitationsbølger er forstyrrelser i rumtidens struktur, der opstår når en masse udsættes for acceleration. Analogt hermed er elektromagnetiske bølger elektriske og magnetiske felter, der kan dannes, hvis et elektrisk ladet legeme udsættes for acceleration; det kan f.eks. gøres ved at udsætte elektronerne i en metalstang for vekselstrøm, metalstangen kaldes så en antenne. I vakuum udbreder begge bølgetyper sig med lysets fart c .



Figur 1. Tyngdebølger i et skylag dannet ved luftens passage hen over den lille ø L'Île Amsterdam, som i dag er en fransk besiddelse i det sydlige Indiske Ocean. Øen kan skimtes nederst til venstre. Den er opkaldt efter det besøgende nederlandske skib Nieuw Amsterdam, som var opkaldt efter byen Nieuw Amsterdam (i dag New York), som var opkaldt efter ... Foto: Jeff Schmaltz, NASA, GSFC.

Ved passage af en gravitationsbølge øges og formindskes afstanden mellem nærliggende objekter, eller, om man vil, svulmer og krymper selve rummet. Men effekten er på en subatomar skala og derfor yderst vanskelig at påvise. Eksistensen af gravitationsbølger blev postuleret af Albert Einstein i 1916 som en konsekvens af den almene relativitetsteori, han havde udviklet året forinden, og som er den hidtil bedste teori for gravitation [1]. Ganske vist kom Einstein i tvivl og

tilbagekaldte i 1936 denne forudsigelse, for dog senere at tage den op igen.



Figur 2. Tyngdebølger dannet i farvandet syd for Messina-strædet mellem Sicilien og det italienske fastland. I strædet optræder kraftige tidevandsstrømninger. Billedet dækker et areal på 58×90 km. Foto: NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS.

I 2015 påviste man definitivt gravitationsbølger fra to kolliderende sorte huller med masser på 35 og 30 solmasser ($M_{\odot}$). Ved sammensmeltningen dannedes et sort hul med en masse på $62 M_{\odot}$, således at en energi svarende til ikke mindre end $3 M_{\odot}$ blev bortstrålet som

gravitationsbølger. Efter en rejsetid på 1,25 milliarder år (fundet ud fra en målt luminositetsafstand på 440 megaparsec) nåede forstyrrelsen frem til Jorden, hvor den blev påvist af instrumentet LIGO [2]. Opdagelsen er tidligere blevet udførligt beskrevet i [3].

Hvad er tyngdebølger?

Tyngdebølger er forstyrrelser, som optræder inden for fluidmekanik (hydrodynamik og aerodynamik), og som udbreder sig styret af det lokale tyngdefelt [4]. Ganske almindelige havbølger er tyngdebølger, og det gælder også for den mere voldsomme variant, tsunamier. Det er derfor inden for videnskabsområder som oceanografi og meteorologi, at man mest arbejder med tyngdebølger. Men de optræder også i astronomisk sammenhæng.

Tyngdebølger kan udbrede sig på grænsefladen mellem to fluider, f.eks. havoverfladen og lufthavet, eller inde i et kontinuert medie, f.eks. atmosfæren. Ikke alle vandbølger er dog tyngdebølger: Hvis bølgelængden er under ca. 1 cm, er det vandets overfladespænding, som præger bevægelsen snarere end tyngdefeltet, og man taler da om *kapilarbølger*.

Eksempler på tyngdebølger

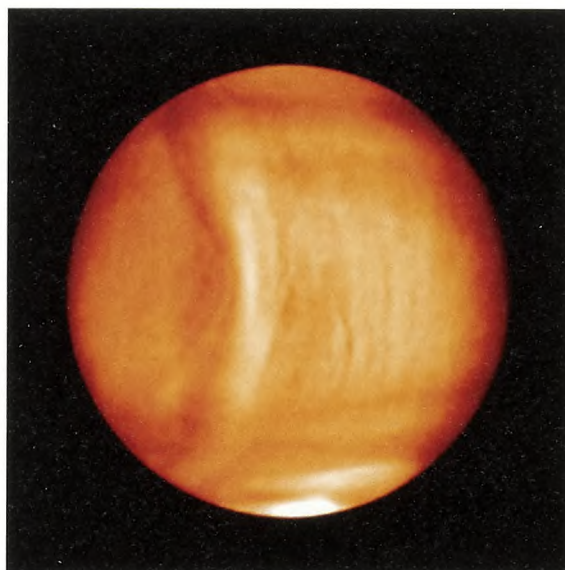
Figur 1 viser tyngdebølger dannet på læsiden af en 881 m høj vulkantop på øen *L'Île Amsterdam*. Luften løftes op over vulkanen, hvorved der med tyngdens hjælp dannes en bølge bag den. Når luften hæves op mod en bølgetop, afkøles den, og det får vanddamp til at kondensere i form af en sky. Når luften herefter synker ned i en bølgedal, opvarmes den, og skyen fordamper. Resultatet er en vekslen mellem striber af skyer og striber af klar himmel, hvor skyerne markerer bølgetoppene. Højere oppe i atmosfæren kan der i forbindelse med en jetstrøm dannes skyformationen *cirrus vertebratus*, hvor tyngdebølger danner et cirrusskymønster, som kan minde om et fiskeskelet. Et eksempel på markante tyngdebølger i havet ses på figur 2.

Gravitationsbølger og tyngdebølger er begge styret af gravitationskraften og er begge bølger, men bortset herfra er der tale om vidt forskellige fænomener. Når en gravitationsbølge passerer, sker der en deformation af rummet, medens en tyngdebølge forårsager en forstyrrelse af stof i rummet. Den første type bevæger sig problemfrit gennem det tomme rum, den anden kræver et stoffigt medium. Medens gravitationsbølger har baggrund i en kompliceret teori og påvisning af dem kræver avanceret teknik og omfattende databehandling, så er tyngdebølger en dagligdags oplevelse.

Det er altså vigtigt at skelne mellem de to fænomener, hvilket da også sker på en lang række sprog, se nedenstående tabel.

Sprog		
Engelsk	Gravitational wave	Gravity wave
Tysk	Gravitationswelle	Schwerewelle
Fransk	Onde gravitationelle	Onde de gravité
Norsk	Gravitasjonsbølge	Tyngdebølge

Man kunne tilføje spansk, portugisisk og russisk til listen. Svensk danner dog en undtagelse, her bruges *gravitationsvåg* uheldigvis for begge fænomener, selv om betegnelsen *tyngdvåg* står til rådighed [5].



Figur 3. Den japanske Venus-rumsonde Akatsuki ("Dag-gry"), som har kredset om planeten siden den 7. december 2015, fotograferede 12. december samme år denne bueformede struktur i planetens skylag. Billedet er optaget i infrarødt lys ved en bølgelængde på 10 μm . Nord er opad. Foto: JAXA.

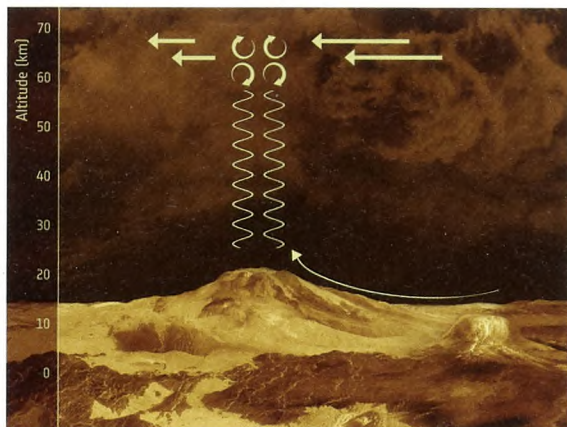
Tyngdebølger på Venus

Som bekendt kan man ikke i synligt lys se planetens overflade, fordi den globalt er dækket af et tykt skylag bestående af dråber af svovlsyre. Skylaget har en tykkelse på op til 20 km, og dets overside befinder sig i en højde af 65 km over overfladen. Mens Venus selv roterer meget langsomt, så bevæger de øverste skyer sig med en fart på omkring 100 m/s ("superrotation"). I 2015 opdagede man på fotografier optaget af den japanske rumsonde *Akatsuki* [6] i kredsløb om Venus nogle skyformationer, som i kontrast hertil i flere døgn holdt sig næsten fast over et underliggende højland på planetens overflade [7]. Figur 3 viser fænomenet, der fortolkes som en tyngdebølge opstået ved passagen af dybereliggende skyer hen over det bjergrige område *Aphrodite Terra*, se figur 4. Fortolkningen støttes af numeriske beregninger. Et problem for udlægningen er dog, at det normalt antages, at der er nærmest vindstille helt nede ved overfladen, men dette er måske alligevel ikke tilfældet.

Tyngdebølger i Solen

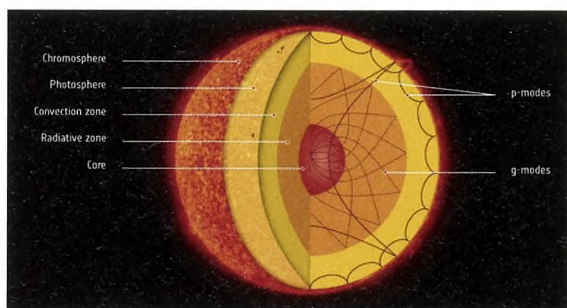
Solens overflade bølger op og ned på en forholdsvis lille skala, og det sker ved mange forskellige frekvenser. Disse svingninger rummer imidlertid en stor righoldighed af information om forholdene i Solens indre. Observationer og teoretisk behandling af svingningerne kaldes *helioseismologi*. Svingninger med høj frekvens skyldes *trykbølger* (p-bølger), som forplanter sig i Solens øvre lag og er lette at observere. Men herudover dannes der lavfrekvente *tyngdebølger* (g-bølger) i Solens kerneområde. Disse sætter dog ikke noget tydeligt

aftryk på forholdene ved Solens overflade og er derfor vanskelige at måle på, se figur 5.



Figur 4. Tegningen viser et snit gennem Venus' atmosfære og antyder, hvordan vinde lavt i atmosfæren ved passage over et bjerg kan frembringe svingninger i det øverste skylag, der udefra ses som en tyngdebølge. Grafik: ESA.

Med solobservatoriet SoHO, som styres af ESA og NASA og som stedse befinder sig nær det solvendte første lagrangepunkt (L1), hvor den har samme omløbstid som Jorden, er det imidlertid lykkedes at finde og analysere g-bølger. En gruppe astronomer, ledet af franskmænden Eric Fossat, har benyttet sondens observationer gennem 16,5 år i analysen [8]. Overraskende nok viser det sig, at Solens kerne roterer med en periode på kun 7 døgn i kontrast til overfladen, som ved ækvator bruger 25 og nær polerne 35 døgn om at snurre én gang rundt. Kernen menes at have roteret uændret siden Solens dannelse for 4,6 milliarder år siden, medens koblingen mellem magnetfeltet i de ydre lag og solvinden med tiden har bremset rotationen i disse lag.



Figur 5. I helioseismologien studerer man trykbølger ("p-modes"), som fortrinsvis bevæger sig nær Solens overflade, og tyngdebølger ("g-modes"), som udbreder sig i dens kerne. De observeres ved hjælp af den dopplerverskydning, der opstår, når bølgerne sætter skvulp i Solens fotosfærelag. Grafik: ESA.

Tyngdebølger i neutronstjerner?

Helioseismologi (altså studiet af Solens svingninger) har med stort udbytte kunnet udvides til nogle af de nærmeste sølignende stjerner under navnet *asteroseismologi* (aster = stjerne). Også neutronstjerner forventes at udvise svingninger, men deres meget større densitet

bevirker, at svingningstiderne for tyngdebølger forventes at have værdier på mellem 10 og 400 ms. Neutronstjerner menes på overfladen at indeholde normale atomkerner, der jo består af protoner og neutroner, som igen består af up- og down-kvarker. Disse kerner er fastlåst i et krystalgitter, som også indeholder elektroner, der frit kan bevæge sig gennem gitteret. Bevæger man sig ind i neutronstjernen, støder man på atomkerner med et voksende antal neutroner. Længere inde presses frie neutroner ud af kernerne og til sidst nås en tilstand, hvor der næsten kun er neutroner til stede. Den nøjagtige sammensætning af stoffet i centret af neutronstjerner er ukendt, fordi tilstandsligningen for stof under så ekstreme tryk er ukendt. Måske indeholder centret mere eksotiske former for elementarpartikler, så som pioner og kaoner eller sære kvarker. En påvisning af tyngdebølger i neutronstjerner vil kunne give værdifulde informationer om deres centralområde.

Litteratur

- [1] Temanummer om den almene relativitetsteori (2015) *Kvant*, bind 26, nr. 4.
- [2] www.ligo.org/detections/GW170814.php
- [3] J. O. P. Pedersen og M. C. Andersen (2016) "Tyngdebølger observeret for første gang", *Kvant*, bind 27, nr. 1, side 8–12.
- [4] H. M. Hansen (1967) "Lærebog i fysik", NNF Arnold Busck, side 159.
- [5] [sv.wikipedia.org/wiki/Gravitationsvåg_\(flødesdynamik\)](http://sv.wikipedia.org/wiki/Gravitationsvåg_(flødesdynamik))
- [6] Rumsonden Akatsuki kan tages i særligt øjesyn med dette link:
akatsuki.isas.jaxa.jp/en/gallery/papercraft/images/akatsuki_PaperCraft.pdf
- [7] www.nature.com/articles/ngeo2873
www.theverge.com/2017/1/16/14264886/japanese-spacecraft-akatsuki-gravity-wave-venus-atmosphere
- [8] phys.org/news/2017-08-sun-core-rotates-faster-surface.html



Holger Nielsen er cand. scient. i astronomi og fhv. lektor i fysik, matematik og astronomi ved Støvring Gymnasium. Han medvirkede i 1990'erne i arbejdet med at få indført astronomi som gymnasiefag. Han har i 28 år deltaget i forevisninger ved Urania Observatoriet i Aalborg.

Det aktive atomur – en laser i sin reneste form

Af Mikkel Tang og Stefan Alaric Schäffer, Gruppen Ultrakolde Atomer ved Niels Bohr Institutet

Lasere anvendes i utallige teknologier og er siden de første realisationer i 1960'erne blevet en del af vores hverdag. På grund af laserlysets smalle frekvensspektrum er det særligt velegnet til at foretage præcise målinger af for eksempel længder og tidsforskelle. Det udnytter man især i atomuret, hvor atomers veldefinerede energiniveauer bruges til at bygge de mest nøjagtige ure, der nogensinde har eksisteret. I vores laboratorium udvikler vi en ny type laser, der gentænker atomurets konstruktion. Det er en laser, der dikteres af atomernes egne egenskaber, fremfor den mekaniske konstruktion af dens omgivelser – det aktive atomur.¹

Indledning

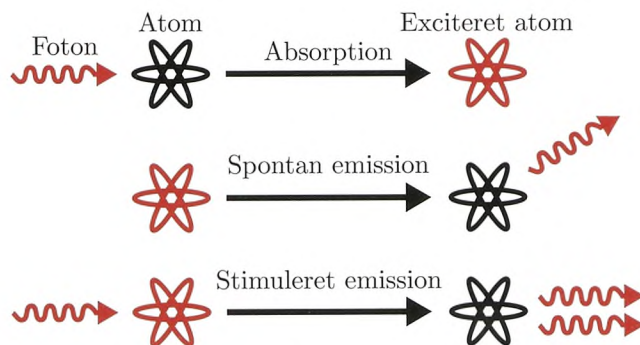
Når du åbner et kort på din mobiltelefon og ser, hvor du er, bruger du GPS-systemet. Det fungerer ved, at en række satellitter med atomure ombord udsender radiosignaler med information om deres lokale tid. Disse signaler rejser med lysets hastighed til telefonen, og den information bruger telefonen til at udregne dens position. Atomure er i dag de mest præcise måleinstrumenter, som menneskeheden har til rådighed. De anvendes både i teknologien og i grundforskningen, hvor deres særlige nøjagtighed kan tillade følsomme målinger af bl.a. tyngdebølger, som rejser tværs gennem Jorden.

Før man havde atomuret, var de mest præcise ure baseret på mekaniske vibrationer i krystaller af kvarts eller safir, og tidligere igen var det meget præcise mekaniske penduler, man udnyttede. Denne type ure har i modsætning til atomuret en tikkefrekvens, der er afhængig af den mekaniske udformning. Det betyder, at der vil være små afvigelser mellem hver enkelt ur, man bygger. Mikroskopiske ændringer i f.eks. krystallens størrelse eller pendulets længde vil ændre svingningsfrekvensen. Det gør det svært at definere sådan en ting som sekundet, der i stedet har været defineret ud fra langt større tidsperioder, som en brøkdel af en dag eller et år.

Atomuret fungerer fundamentalt anderledes end mekaniske ure. Det baserer sig i stedet på egenskaberne af atomer. Eftersom ethvert atom af samme isotop vil opføre sig identisk under identiske forhold, kan man derfor sikre sig, at to realisationer af et atomur altid vil have samme tikkefrekvens. Dermed hviler kvaliteten af ens ur ikke længere på de finmekaniske konstruktioner af en reference. I stedet kan man hvor som helst på Jorden – eller i rummet – konstruere et atomur, så længe man ved hvilken type atom og hvilken atomar overgang, man ønsker at bruge. Det var dette faktum, man tog konsekvensen af, da man i 1967 valgte at definere sekundet ud fra atomet cæsium-133.

Atomuret

I atomure udnytter man altså atomernes veldefinerede, kvantiserede energiniveauer. Det er de energiniveauer, som Niels Bohr i 1920'erne tolkede som diskrete omløbsbaner for elektronerne. Atomernes elektroner kan skifte energiniveau ved at absorbere lys (se Figur 1).



Figur 1. De tre mulige interaktioner mellem atomer og fotoner. Absorption, hvor energi tilføjes atomet fra lyset (foton). Spontan emission, hvorved atomets energi spontant udsendes som lys, og stimuleret emission, hvor atomet drives til udsendelse af lys identisk med det indkommende lys. Einsteins beskrivelse af stimuleret emission i 1917 dannede grundlaget for den første laser i 1960.

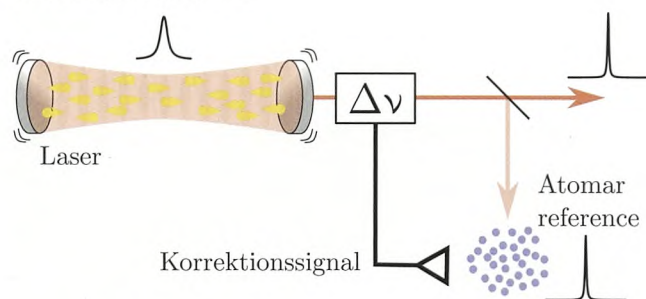
Når dette sker, vil en eller flere elektroner få en højere energi og efterfølgende befinde sig i en ny tilstand. Generelt vil denne tilstand være ustabil, hvilket betyder, at elektronerne igen vil henfalde til grundtilstanden, og lys vil blive udsendt. Dette kaldes spontan emission, og tiden, det typisk tager for henfaldet af en elektronisk tilstand i et atom, kaldes for tilstandens levetid. Lang eller kort levetid resulterer i en smal eller bred spektral linjebredde af det lys, der kan absorberes eller udsendes. Netop dette bliver interessant i forbindelse med atomuret. Det tillader, at man bruger overgangen mellem to energiniveauer som en rettesnor for frekvensen af lys og dermed som referencen i sit ur.

Atomuret består altså af to delsystemer (se Figur 2). Den første del er en laser, som agerer pendul, og hvis tikkefrekvens man kan tælle. Denne del af systemet er i sig selv et ur, men ikke et særligt præcist ur, da tikkefrekvensen varierer, og en laser typisk er følsom over for eksempelvis temperaturændringer, variationer i strøm og rystelser. Den anden del af atomuret er derfor den atomare reference, som sørger for, at laserens frekvens hele tiden kan korrigeres og forblive omkring den samme frekvens, hvilket gør uret reproducerbart.

Moderne atomure, der opererer ved optiske frekvenser, har stor fordel af at have meget høje tikkefrekvenser. Jo hurtigere uret tikker, jo bedre kan man karakterisere nøjagtigt hvor mange tik, der går på et sekund – som centimeterinddelingen på en meterstok. Tikkefrekvensen er givet af lysets frekvens, og for atomet strontium er den tikkefrekvens, man bruger,

¹Denne artikel var en af vinderne i DFS's posterkonkurrence på årsmødet i år.

på ca. 430 THz – altså 430 billioner svingninger per sekund, hvorimod det for cæsium ligger omkring 9,2 milliarder svingninger per sekund.² Sammenholdt med den veldefinerede energi af atomets tilstande har det ledt til ure med en relativ nøjagtighed på 10^{-18} i forhold til deres tikkefrekvenser. Det svarer til, at to moderne atomure ville stemme overens inden for et sekund, hvis de begge blev sat igang ved universets begyndelse for 14 milliarder år siden.



Figur 2. Princippet bag et atomur – her en såkaldt passiv frekvensreference: Noget af lyset fra en laser sendes gennem en sky af atomer. Bredden af laserens frekvensspektrum er relativt bredt. Ved at måle atomernes respons på lyset kan man korrigere laserens frekvens, her illustreret ved kassen $\Delta\nu$. Atomernes smalle frekvensspektrum bruges dermed til at gøre laserens spektrum smalt.

Laserens styrke og svaghed

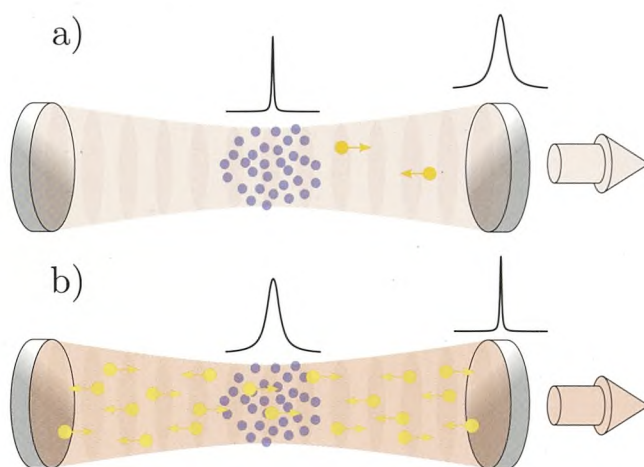
Laseren agerer altså pendul, og atomet bruges som en universel reference, der udnyttes til at rette på laserens frekvens hver gang den driver i den ene eller den anden retning. Hvis laseren er for støjet eller ustabil, begrænser det derfor også, hvor præcist et ur man kan få. For at forstå hvorfor laseren kan være upræcis, må man overveje, hvordan dens egenskaber er bestemt af dens mekaniske konstruktion.

En laser består i al sin simplicitet af to elementer. Det ene element er et medium, der kan forstærke lys, og det andet element er en optisk kavitet, bestående for eksempel af to spejle over for hinanden. Forstærkningsmediet (eller lasermediet) er i dag typisk en diode bestående af halvledere, men kan også være for eksempel krystaller eller gasser, som de kanoniske rubin- og helium-neon-lasere. Mediet skal kunne bringes i en exciteret tilstand – i nogle gasser kan man pumpe energi ind i systemet ved at lade det absorbere noget pumpe-lys. Efterfølgende kan der så ske spontan emission, som omtalt ovenfor, men også stimuleret emission. Ved spontan emission er lysets udsendelsesretning og fase tilfældig, men ved stimuleret emission vil en foton stimulere en identisk foton til at henfalde (se Figur 1). Den optiske kavitet sørger for, at udsendte fotoner passerer igennem lasermediet flere gange og dermed kan stimulere flere henfald. Det er denne proces, som kendetegner en laser – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Både lasermediet og den optiske kavitet har hver deres spektrale områder, hvor lyset er resonant. I klassiske lasere vil lasermediet typisk være ret bredt spektralt. Det betyder, at der ofte vil ske spontane henfald, som

kan igangsætte lasing-processen. Men det betyder også, at den optiske kavitet – med et smallere spektrum – ofte vil sætte en begrænsning på laserens spektrum. Og netop kavitetens resonans er meget afhængig af omgivelserne. Især temperatur og rystelser kan direkte påvirke længden af den optiske kavitet og vil dermed føre til variationer i laserens frekvens.

Hvis man kan konstruere laseren, så den ikke længere påvirkes direkte af omgivelserne, kan det resultere i langt bedre frekvensstabilitet. En måde at gøre det på er at mindske laserens afhængighed af mekaniske konstruktioner – helt analogt med skridtet fra mekaniske ure til atomure. I stedet for at bruge atomerne passivt, som en korregerende reference, kan man forsøge at konstruere laseren således, at den optiske kavitet ikke har nogen synderlig betydning for laserens frekvens. Det er en laser i sin reneste form, hvis egenskaber afhænger af atomerne frem for mekanikken, og den idé kaldes også et aktivt atomur (se Figur 3).



Figur 3. To eksempler på en laser. Et lasermedium befinder sig i midten, her illustreret som en gas af atomer (blå prikker). To spejle danner en kavitet, og lys, der lækker igennem spejlene, bruges efterfølgende. a: Bad cavity regime, hvor atomernes linjebredde er betydeligt smallere end kaviteten, og lysets frekvens derfor dikteres af atomernes egenskaber. b: Good cavity regime, hvor kavitetens linjebredde er smallest som i klassiske lasere.

Et aktivt atomur

Et atomur får sin helt enorme stabilitet og præcision fra atomernes exceptionelle egenskaber. Hvis man finder de helt rigtige atomare overgange, kan de have enormt smalle spektrale egenskaber, således at kun lys med den helt rigtige frekvens er resonant med overgangen. I moderne atomure betyder det, at linjebredden på en sådan overgang kan være nogle få mHz, svarende til en relativ usikkerhed på frekvensen i omegnen af 10^{-18} . Atomure, som opnår en sådan nøjagtighed, er så følsomme, at de kan bruges til at måle højdeforskelle på under en cm, udelukkende på grund af påvirkningen fra Jordens tyngdekraft [1]. For at kunne udnytte denne helt enorme præcision, må man dog have stor kontrol over atomerne, hvilket man opnår ved at fange atomerne i optiske fælder i vakuumkamre. Derudover har man brug

²Denne værdi er defineret og er derfor præcis 9.192.631.770 svingninger per sekund ved havets overflade. Sammen med definitionen af lysets hastighed på 299.792.458 m/s giver det en eksakt definition af meteren, som kan måles ved hjælp af atomure.

for en kavititet rundt om atomerne og en mekanisme til at få dem i den exciterede energitilstand. Befinder de sig først her, vil de kunne udsende lys i kaviteten, og stimuleret emission vil igen klare resten for os. Vi støder dog ind i nogle problemer.

En af de store fordele ved de energiniveauer, man bruger i atomure, er deres smalle spektrale egenskaber – altså overgangens enormt veldefinerede frekvens. Men som en konsekvens af Heisenbergs usikkerhedsprincip betyder en meget veldefineret energiforskel også, at tidspunktet for et henfald har stor usikkerhed. Det betyder i praksis, at henfaldet sker meget sjældent, og at der derfor vil være meget lidt lys i en sådan laser.

Det næste problem, vi støder ind i, er, at den optiske kavititet, som sættes op rundt om atomerne, jo netop er et mekanisk, menneskeskabt element. Dette er, hvad vi ønsker at undgå. Problemet med denne del af systemet i klassiske lasere er, at det frem for alt er kaviteten, der bestemmer de spektrale egenskaber af lyset. Den opfører sig som et filter. Kaviteten har altså to egenskaber: Den sørger for at lyset cirkulerer og dermed passerer lasermediet mange gange, og så har den et spektralt bånd, hvor den tillader lyset at blive udsendt. Vi ønsker at bibeholde evnen til at cirkulere lyset, men er ikke interesseret i den spektrale filtrering.

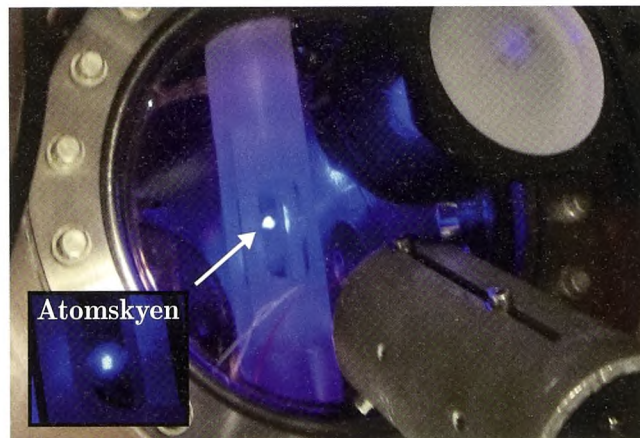
Ved at sørge for at kavitetsens spektrale krav – dens linjebredde – er meget løsere end renheden af det atomare spektrum – den atomare overgangs linjebredde – kan man sikre sig imod påvirkning fra kaviteten. Dette regime er et helt andet end der, hvor lasere traditionelt opererer, og resulterer i en forstærkning af lysintensiteten udsendt af atomerne, men undgår de påtrykte forstyrrelser, man kan få fra en optisk kavititet med vibrationer og temperaturændringer. Regimet er også kendt som *bad cavity regime* (se Figur 3).

Kolde atomer i laboratoriet

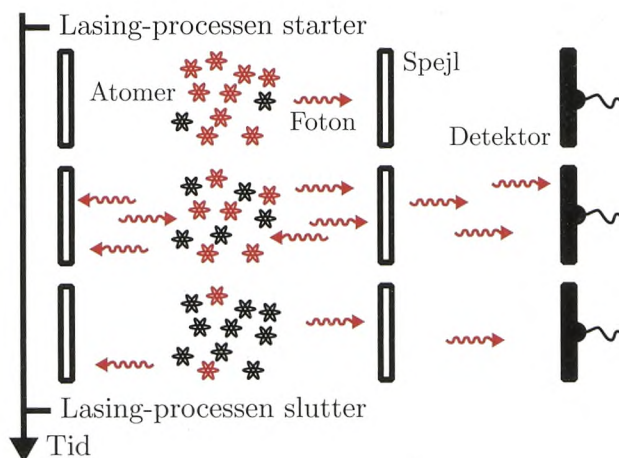
I vores laboratorium undersøger vi mulighederne for at bygge et aktivt atomur baseret på disse idéer. Vi fanger omkring 100 millioner ^{88}Sr -atomer i en optisk kavititet (se Figur 4). De fanges ved hjælp af laserlys i en såkaldt magneto-optisk fælde, hvorved de køles ned fra omkring 520°C til nogle få mK over det absolutte nulpunkt. Atomerne tvinges derefter op i den exciterede tilstand, hvorefter lasing-processen kan begynde: Et atom henfalder til grundtilstanden og udsender en foton. Denne foton stimulerer emission fra et andet atom i den exciterede tilstand, så vi ender med to fotoner og begge atomer i grundtilstanden. Det starter en kædereaktion (se Figur 5), hvor lyset bliver forstærket, så længe der er nok atomer i den exciterede tilstand. Spejlene reflekterer det meste af lyset, men en smule af lyset slipper ud, og vi kan måle på det.

Lasing-processen kan beskrives kvantemekanisk med en såkaldt Tavis-Cummings-model. Her opstiller vi ligninger for energien i systemet, og hvordan denne udvikler sig. En stor udfordring ved at tilpasse modellen til vores system er, at det kræver ekstremt meget regnekraft at lave beregninger med 100 millioner atomer. Hvert atom interagerer forskelligt med lyset alt efter dets position, hastighed, tilstand og lysets bølgenatur

på nanometer-skala. Derfor er vi nødt til at bruge forskellige antagelser for at kunne regne på det. Derudover afhænger lasing-processen af mange parametre: Antallet af atomer, deres præcise temperatur og rumlige fordeling, påvirkninger fra magnetfelt og intensiteten af de laserstråler, vi bruger. Vores model er interessant, netop fordi den inkluderer de virkelige fysiske forhold i en ikke-idéal atomar gas. Så hvis modellen skal sammenlignes kvantitativt med eksperimenterne, kræver det, at vi kan måle alle disse parametre uafhængigt og med høj præcision.

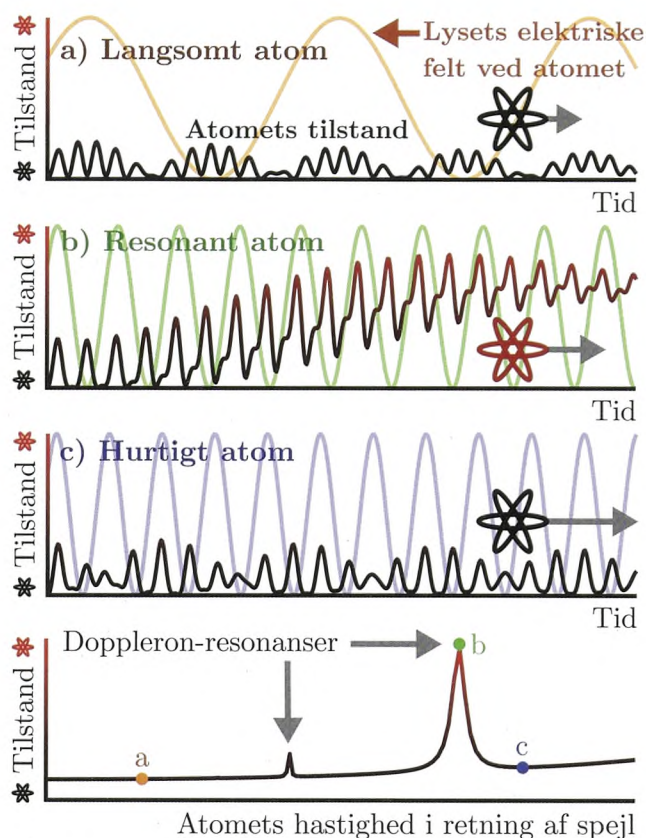


Figur 4. I vakuumkammeret i vores laboratorium kan man se de 100 millioner strontiumatomer lyse op, når vi fanger og køler dem med laserlys inden lasing-processen begynder.

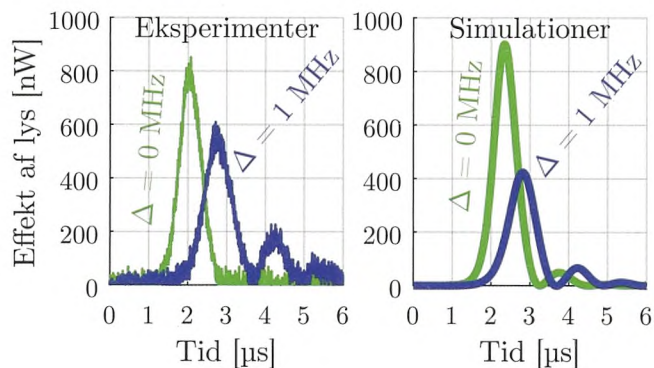


Figur 5. Lasing-processen starter ved, at et exciteret atom udsender lys imellem de to spejle. Ved stimuleret emission forstærkes det, imens atomer overgår til grundtilstanden. Til sidst er så mange atomer i grundtilstanden, at absorption foregår oftere end emission, og processen stopper.

I modellen kan vi se, at specielt atomernes hastigheder har en stor indflydelse på dynamikken, når de interagerer med lyset i kaviteten. Lyset kan opfattes som en stående bølge, og for nogle atomer med helt bestemte hastigheder passer bevægelsen med lysbølgen sådan, at de interagerer særligt kraftigt. Disse resonanser kaldes dopplersoner og er en af de eksotiske processer, som, vi kan se, bidrager til dynamikken i systemet, når vi beskriver det kvantemekanisk (se Figur 6).



Figur 6. Når et atom rejser gennem lysbølgen i kaviteten (her med forskudt frekvens ift. atomerne) ændrer det tilstand afhængigt af dets hastighed imod et af spejlene. Ved bestemte hastigheder (b) interagerer atomet særligt kraftigt.



Figur 7. Laserlyset udsendes i eksperimentet som en enkelt puls, der kan være efterfulgt af oscillationer. I både eksperimenter og simulationer finder vi, at en forskudt kavitetsfrekvens kan fremprovokere oscillationer i det lys, som går igennem spejlene under lasing-processen.

Vi kan også undersøge atomernes afhængighed af kaviteten ved at bevæge spejlene, så kavitets og atomernes frekvenser ikke længere er helt ens. I Figur 7 viser vi et eksempel på de laser-pulser, vi ser fra vores system, sammenlignet med vores simulationer. Her kan man se den korte puls af lys, der udsendes under normale omstændigheder (grøn), og hvordan ændringer i kavitetsfrekvens influerer lysets opførsel. Fremfor alt viser denne sammenligning, at simulationerne i høj grad kan forudsige opførslen af vores system. På grund af kohærens i systemet kan vi se oscillationer efter den første puls. Energien i systemet opfører sig som en

bølge, der plasker frem og tilbage mellem atomerne og lyset. Når energi fra atomerne udsendes som lys i kaviteten, vil noget af den energi blive genabsorberet af atomerne og kan så igen udsendes som lys. Det resulterer i den oscillation, vi ser i lyspulsens.

Målet – det kontinuerte atomur

Målet med disse undersøgelser er på sigt at bygge et atomur, hvor lasing-processen bliver kontinuert og stabil fremfor i pulser. Vores nuværende system er således et første skridt på vejen mod det fuldt funktionelle atomur, hvor vi undersøger hvilke problemer, man støder på, og hvilke forbehold vi skal tage for at minimere indflydelsen af andre elementer på atomernes tilstande. Det hjælper os altså med at forstå de tekniske krav, når vi skal bygge det kontinuerte atomur, og modellen kan hjælpe os med at forudsige, hvad vi kan forvente af en given opbygning af vores aktive atomur.

Litteratur

- [1] W. F. McGrew, X. Zhang, R. J. Fasano, S. A. Schäffer, et. al. (2018), *Atomic clock performance beyond the geodetic limit*, udgives i Nature <https://arxiv.org/abs/1807.11282>
- [2] H. Metcalf og P. van der Straten (1999) *Laser Cooling and Trapping*, Springer (dækker laserkøling og -trapping).
- [3] J. Ye og T. W. Lynn, *Applications of Optical Cavities in Modern Atomic, Molecular and Optical Physics* https://jila.colorado.edu/yelabs/sites/default/files/uploads/4101-Bederson-001_corrections.pdf (dækker optiske kaviteter, atomfysik og optik).



Mikkel Tang er PhD-studerende på Niels Bohr Institutet. Han blev for nylig færdig med sit speciale, hvor han specielt beskæftigede sig med den teoretiske beskrivelse af lasing-processen.



Stefan Alaric Schäffer er PhD-studerende på Niels Bohr Institutet og forsker i systemer af kolde atomer i optiske kaviteter og brugen af disse i metrologiske sammenhænge.

Opdagelsen af en supernova med gravitationel linse-effekt – en ny æra inden for kosmologien

Af Ariel Goobar, Oskar Kleincentret, Fysikum, Stockholms Universitet

Den gravitationelle linseffekt virker som naturens eget gigantiske teleskop, muligheden for at finde billeder af samme supernova ved den kosmiske linseffekt betyder, at man også kan måle tidsforskellen mellem ankomsttiderne af billederne. Tidsforskellen mellem billederne kan anvendes til at måle universet udvidelseshastighed, og det kan åbne en ny æra inden for kosmologien.

Det er en del af grundlaget for Einsteins generelle relativitetsteori, at rumtiden krummer omkring de tunge legemer. En konsekvens af teorien er, at lysstråler, der passerer tæt på stjerner eller galakser, kan ændre retning. Gravitation fungerer således som en optisk linse, der afbøjer og fokuserer lys. Derfor var det en stor triumf for Einstein, da en ekspedition under ledelse af den britiske astronom Arthur Eddington i maj 1919 kunne måle afbøjningen af lys, der passerede tæt på Solen i løbet af en solformørkelse.

Eddington var i stand til at vise, at den målte afbøjning af lyset, $\theta = 1,74$ buesekunder, passer med relativitetsteoriens forudsigelse,

$$\theta = \frac{4GM}{bc^2} \quad (1)$$

hvor G er Newtons gravitationskonstant, M er massen af "linsen", og b er den tætteste afstand mellem lysstrålen og midtpunktet af gravitationslinsen. I Eddingtons eksperiment var M Solens masse, og b var Solens radius.

Fritz Zwicky, der ellers er bedst kendt for at have postuleret eksistensen af mørkt stof i universet, var den første til at forstå, at den gravitationelle afbøjning af lys ikke bare var en sjældenhed, der bekræftede relativitetsteorien, men også kan bruges til at veje himmellegemer. Hans idé, som han offentliggjorde i 1937, var, at man kunne estimere massen af hele galakser og endda galaksehobe ved at måle vinklen på afbøjningen af lyset fra bagvedliggende galakser. Problemet er dog, at det er yderst sjældent, at galakser med forskellige rødforskydninger ligger tæt nok på sigtelinjen, til at effekten kan måles. Men i de heldige tilfælde, hvor dette forekommer, kan der opstå et fascinerende optisk fænomen: der kan forekomme flere billeder af en enkelt kilde, hvilket normalt kaldes "stærk linsning". For at dette skal være muligt, bør vinkelseparationen være inden for den såkaldte Einstein-radius

$$\theta_E = \left(\frac{4GM}{c^2} \cdot \frac{D_{LS}}{D_L D_S} \right)^{1/2} \quad (2)$$

hvor D_L og D_S er afstandene¹ fra Jorden til henholdsvis linsen (L) og kilden (S), mens D_{LS} er afstanden mellem linsen og kilden.

For typiske galaksemasser og kosmologiske afstande er Einstein-radius omkring et buesekund, hvilket er

cirka 2.000 gange mindre end den vinkel, som Månen fylder på himlen, dvs. at den er meget lille i forhold til hele himmelkuglen, hvorpå galakserne er fordelt.

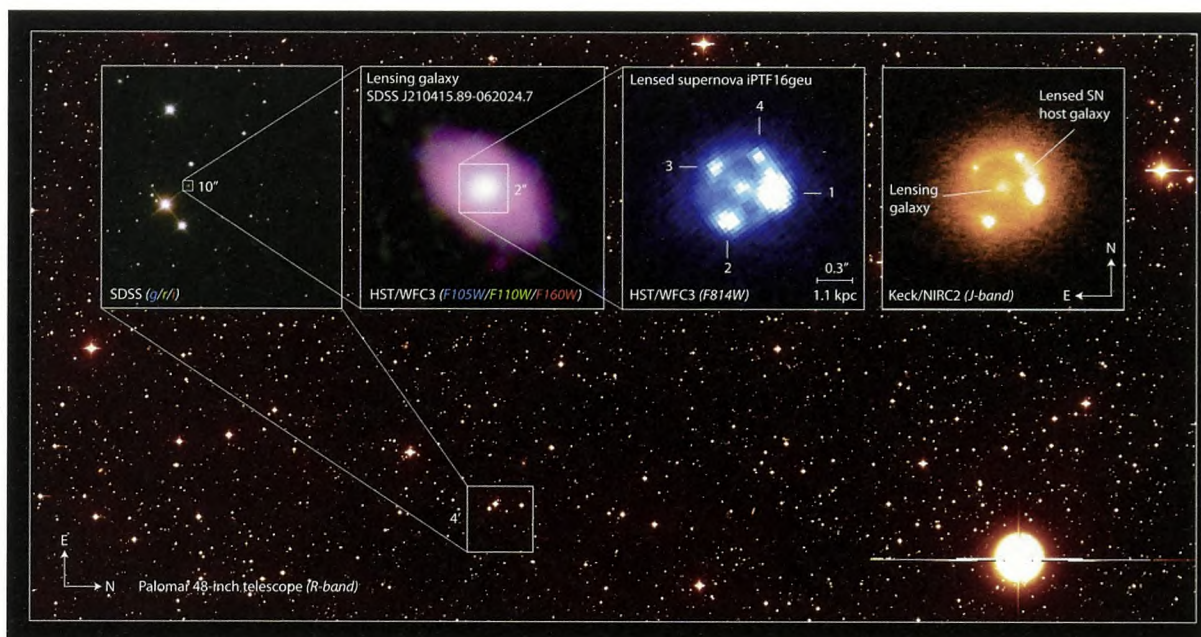
Vi skal helt frem til 1979, før astronomerne kunne vise, at to tilstødende kvasarbilleder, QSO 0957 + 561A og QSO 0957 + 561B, som lå 6 buesekunder fra hinanden og begge med en kosmologisk rødforskydning på $z = 1,41$, faktisk var to billeder fra en og samme kvasar og resultatet af en gravitationel linseffekt fra en forgrundsgalakse med en rødforskydning på $z = 0,355$.

Siden er der fundet flere eksempler på "multiple billeder" af en og samme kilde af kvasarer og galakser, som er blevet detekteret i optiske billeder med høj vinkelopløsning. Zwickys foreslåede metode anvendes nu rutinemæssigt til at veje nogle af universets galaksehobe med et større antal stærkt linsende baggrundsgalakser, sædvanligvis med hjælp fra Hubble-teleskopet.

Den norske astronom Sjur Refsdal var en af dem, der var meget påvirkede af Zwickys argumentation, og i 1964 fremsatte han endnu en revolutionerende idé: Hvis man kunne finde "flere" billeder af en supernovaeksplosion, så skulle man udover at måle vinkelseparationen mellem billederne, også være i stand til at måle tidsforskellen mellem ankomsttiderne af billederne. Billederne ankommer ikke samtidigt for en observatør på Jorden, fordi strålerne tilbagelægger forskellige afstande. Hertil kommer, at strålernes relativistiske tidsdilatation varierer, afhængigt af hvor tæt de passerer på centrum af linsegalaksen. Refsdal viste, at målingen af tidsforskellen mellem billederne kan anvendes til at måle universets udvidelseshastighed, Hubble-konstanten, H_0 . Dette er især vigtigt i dag, hvor forskellige teknikker til at bestemme H_0 giver modstridende resultater, hvilket nogle kosmologer mener skyldes forskellige fejl i den måde, man modellerer universets sammensætning på. Hvis dette bekræftes, vil det være et af de største gennembrud i grundlæggende fysik i et par årtier.

Refsdals idé var revolutionerende, men ikke uden praktiske vanskeligheder. Når det nu var så svært at finde flere billeder af himmellegemer med næsten uendelig levetid som kvasarer og galakser, hvordan ville man så nogensinde kunne finde noget så sjældent og kortvarigt, som en linset supernova, som kun kan observeres i en måned før intensiteten igen daler betydeligt? Desværre nåede Refsdal, som døde i 2009, ikke at opleve det fænomen, han beskrev, men til sidst blev

¹Der findes forskellige afstandsmål i kosmologien. Her benyttes vinkeldiameterafstanden.



Figur 1. S sammensat billede, der viser den gravitationelt linsede Type Ia-supernova iPTF16geu, observeret med forskellige teleskoper. Baggrundsbilledet er et vidvinkelbillede fra Palomar Observatoriet i det sydlige Californien. Billedet til venstre blev taget af Sloan Digital Sky Survey og viser linsegalaksen og dens omgivelser. De øvrige billeder viser en 20-gange forstørrelse med Hubble-teleskopet i optiske bølgelængder og med Keck-teleskopet i det nærinfrarøde område. Teleskoperne fanger de fire billeder af supernovaen iPTF16geu og dens værtsgalakse, som er gravitationelt linset af forgrundsgalaksen. Billedet er lavet af Joel Johansson.

der fundet en supernova med flere billeder, som blev opkaldt efter ham. Takket være et af de største observationsprogrammer, som blev gennemført med Hubble-teleskopet, blev “supernova Refsdal” opdaget i 2015 bag den gigantiske galaksehob MACS J1149.6 + 2223, der fungerede som en kæmpelinse. Dette var faktisk en stor succes, men for at kunne besvare kosmologiske spørgsmål med stor nøjagtighed er det ikke nok med en enkelt begivenhed – der skal langt flere til for at få den nødvendige statistiske nøjagtighed. Derudover var Refsdal-supernovaen et kollaps af stjernens kerne, hvis intensitet varierer meget fra en begivenhed til en anden, og som ikke let modelleres.

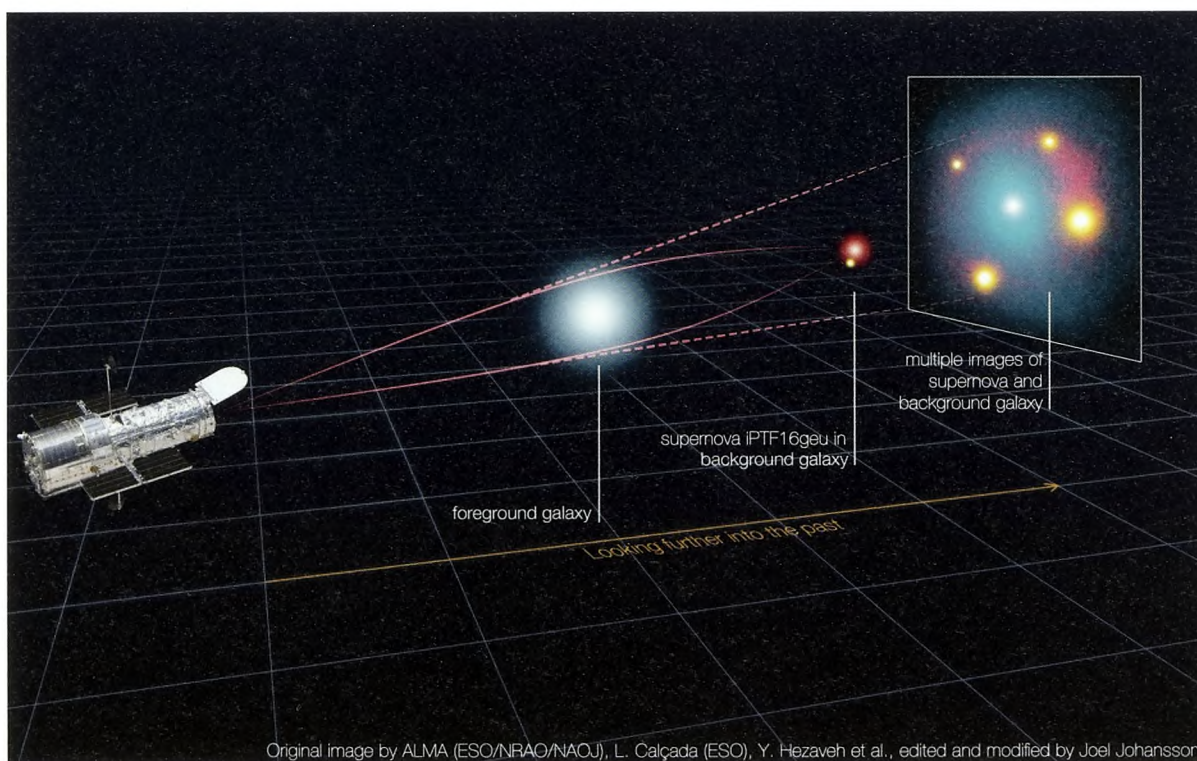
Idealet er derfor at finde et system, hvor den linsede supernova er af “Type Ia”, dvs. den type, der anvendes som standardlys til afstandsmålinger i kosmologien. Det var for eksempel ved afstandsmålinger af Type Ia-supernovaer, at man opdagede, at universets udvidelse accelererer, hvilket blev belønnet med Nobelprisen i fysik i 2011.

Det er her, at det nye gennembrud fandt sted. For at finde sjældne fænomener i universet er det nødvendigt at lede over store kosmiske volumener. Dette er vanskeligt at kombinere med brugen af Hubble-teleskopet, som har et meget lille kamerafelt på blot nogle få kvadrantbueminutter. Derudover bliver rumteleskopet brugt til mange andre projekter, så dets tilgængelighed er stærkt begrænset. På Palomar i Californien findes til gengæld et 1,2 meter-teleskop (P48, hvor 48 indikerer spejldiameteren målt i tommer), der er fuldstændig dedikeret til at finde supernovaer og andre tidsafhængige fænomener. Projektet “Palomar Transient Factory” (iPTF) brugte et robotteleskop med et kamera med et meget stort felt på 7,2 kvadratgrader. Efter et minuts dataindsamling i en retning blev kameraet rettet mod et

nyt felt og fortsatte således i hele nætter og fotograferede meget store dele af himlen. I de følgende nætter observerede teleskopet de samme dele af himlen og kunne derfor hurtigt opdage ændringer mellem billeder fra forskellige nætter, såkaldte “transiente” fænomener, herunder lidt over 3.000 supernovaeksplosioner. Fordi galakserne kun ændrer sig over meget lange tidsskalaer – tæt på en milliard år – kan en supernova opdages blot få timer efter eksplosionen, når den lyser op næsten lige så meget som en hel galakse.

Supernovaopdagelserne fra P48 blev fulgt op af målinger med et 60-tommers teleskop i Palomar (P60). Teleskopet kunne ved spektroskopiske observationer bestemme supernovaernes rødforskydning, og ved også at måle deres atomare sammensætning (ved hjælp af emissions- og absorptionslinjer) kunne det afgøres, hvilken type supernova, der var fundet, for eksempel om det drejede sig om kosmologiens favorit, nemlig Type Ia-supernovaen.

Søndag den 2. oktober 2016, under en rutinemæssig gennemgang af aftenens observationer, så jeg noget meget bemærkelsesværdigt i dataene fra Palomar. En Type Ia-supernova, iPTF16geu, med rødsifte $z = 0,409$, hvilket var lidt over 50 gange lyskraftigere, end den burde have været. Statistisk var dette ekstremt signifikant med 30 standardafvigelser. Ved nærmere undersøgelse kunne man også se, at mellem supernovaværtsgalaksen og Jorden var der en anden galakse med $z = 0,216$. Efter yderligere observationer var sagen klar: det måtte være en gravitationel linse, der fokuserede lyset fra supernovaen! Imidlertid var vinkelopløsningen i Palomars billeder meget grov, omkring 2 buesekunder, så eventuelle multiple billeder kunne ikke registreres med de data, vi havde. Der fulgte nu en hektisk tid med ansøgninger om tidskritiske observationer med Hubble-



Figur 2. Lys fra supernovaen iPTF16geu og dens værtsgalakse afbøjet og fokuseret af krumningen af forgrundsgalaksen, der virker som en linse. Lyset fra den punktlignende supernova splittes op i fire billeder, der kunne observeres med Hubble-teleskopet. Originalt billede fra ALMA (ESO / NRAO / NAOJ), L. Calçada (ESO), Y. Hezaveh et al., edited and modified by Joel Johansson.

teleskopet og de største jordbaserede teleskoper, VLT i Chile og Keck-teleskopet på Hawaii. Efter et par dramatiske dage med tekniske vanskeligheder, lykkedes det at få billederne fra Keck- og Hubble-teleskopet, som bekræftede, at vi havde opdaget den første stærkt linsede Type Ia-supernova, med hele fire multiple billeder, som vist i figur 1 og forklaret skematisk i figur 2. Opdagelsen blev offentliggjort i tidsskriftet Science [1].

Observationer med høj vinkelopløsning som på figur 1 viser et andet interessant fænomen: Udover "galakselinsen" viser forskellene mellem de fire supernovabilleder, at mindst én af lysstrålerne er blevet yderligere fokuseret, sandsynligvis fra kompakte strukturer i sigtelinjen, muligvis sorte huller. I det hele taget rummer opdagelsen mange interessante supplerende spørgsmål, hvoraf den ene er forbundet med den store forstærkning, mere end 50 gange forstørrelse, som er meget større, end vi kunne have forventet. Er iPTF16geu bare en statistisk afvigelse, eller er der noget fundamentalt galt med vores gravitationsmodel?

Målingerne af tidsforskellen mellem supernovabillederne er endnu ikke afsluttet. Selvom målinger af universets udvidelse fra denne supernova ikke giver os et bedre estimat af Hubble-konstanten end det, vi allerede har i dag, kan vi være meget optimistiske. Den lethed, hvormed vi har fundet den gravitationelt linsede supernova, får mig til at tro, at vi bør være i stand til at finde mange flere ved hjælp af den samme teknik, og nu

med et 10 gange bedre kamera på P48 i et projekt kaldet Zwicky Transient Facility (ZTF). Alt tyder på, at vi nu har en ny måde at studere krumningen af rumtiden og udvidelsen af universet på. Det kan være til stor gavn for at forstå de særlige egenskaber ved det "mørke univers", et af vor tids største videnskabelige mysterier.

Litteratur

- [1] A. Goobar m.fl. (2017) "iPTF16geu: A multiply imaged, gravitationally lensed type Ia supernova", *Science*, bind 356, side 291.

Artiklen er oversat fra svensk af Jens Olaf Pepke Pedersen.



Ariel Goobar er professor på Fysikum ved Stockholms Universitet. Hans primære forskningsområde er observationskosmologi og brugen af Type Ia-supernovaer til måling af afstande i universet. Han er medlem af Supernova Cosmology Project, der opdagede universets accelererede ekspansion og den tilhørende "mørke energi".

Hubble-Lemaître-loven?

Af Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Videnskabelige love får navne, fordi de vinder indpas i den videnskabelige litteratur uden at være officielt vedtaget, men for nylig vedtog den Internationale Astronomiske Union at ændre kosmologiens Hubble-lov til Hubble-Lemaître-loven. Det skete bl.a. med henvisning til en samtale mellem Hubble og Lemaître, som formentligt aldrig har fundet sted og må betegnes som en myte eller fabrikation.

I navngivningen af videnskabelige love eller teorier er der en lang tradition for at knytte dem til de forskere, der først har formuleret dem. Når vi taler om eponymer som fx Ohms lov og Lorentz-invarians, er der tale om navne, der har vundet indpas i det videnskabelige sprog uden at være officielt vedtaget [1].

I andre tilfælde er den slags navne blevet sanktioneret af internationale videnskabelige sammenslutninger som de unioner, der udgør paraplyorganisationen ICSU (International Council for Science). Disse unioner kan også anbefale at revidere et navn for derved at hædre en hidtil overset forsker. Det var netop det, der skete, da den Internationale Astronomiske Union (IAU) ved en generalforsamling den 30. august 2018 i Wien vedtog at ændre kosmologiens Hubble-lov til Hubble-Lemaître-loven [2]. Den endelige vedtagelse af Resolution 4B blev dog overladt til en elektronisk afstemning blandt alle unionens medlemmer. Tre måneder senere viste denne afstemning et klart flertal for den foreslåede ændring, sådan at vi ifølge IAU ikke længere bør bruge udtrykket “Hubbles lov”. Vi skal måske vænne os til at sige Hubble-Lemaître-loven.

Mens den amerikanske astronom Edwin Hubble er vidt berømt, er det samme ikke tilfældet med den belgiske præst og astrofysiker Georges Lemaître. Ikke desto mindre var sidstnævnte en pioner i teoretisk kosmologi og mere end nogen anden arkitekten bag det verdensbillede, vi tror på i dag. Det har i lang tid været kendt, at den moderne forståelse af universets udvidelse stammer fra en artikel, Lemaître skrev i 1927 og hvori han udledte en lineær relation mellem galaksers rødforskydning og deres afstande. En tilsvarende relation blev på et empirisk grundlag foreslået af Hubble to år senere, men hverken da eller senere tilsluttede Hubble sig ideen om et univers i udvidelse. Der er ingen tvivl om, at såfremt Hubble-loven forstås som en lov om universets udvidelse, skyldes den Lemaître; men der er heller ikke tvivl om, at den lineære rødforskydning-afstandslov først blev eftervist empirisk med Hubbles arbejde fra 1929 [3]. Under alle omstændigheder spillede Lemaître en central rolle i denne fase af kosmologiens historie, hvilket er IAUs begrundelse for at hædre ham side om side med Hubble.

Beklageligvis var den resolution, IAUs eksekutivkomité havde udfærdiget og som var grundlaget for afstemningen, behæftet med fejl og misforståelser af en historisk og begrebsmæssig art [4]. Ikke blot skelnede man ikke ordentligt mellem den empiriske Hubble-relation og den nutidige forståelse af relationen som

et udtryk for universets udvidelse, man hævdede også, at “Hubbles lov” hurtigt vandt indpas i astronomisk sprogbrug. Dette er ganske forkert, idet udtrykket først blev almindeligt i slutningen af 1960’erne. Mere alvorligt er det, at resolutionen henviser til en samtale mellem Hubble og Lemaître fra 1927, hvor de to skal have diskuteret observationsdata i forbindelse med sidstnævntes ide om et ekspanderende univers. Samtalen har formentligt aldrig har fundet sted og må betegnes som en myte eller fabrikation. I resolutionen er påstanden ganske vist forsynet med kildehenvisninger til den videnskabelige litteratur, men det viser sig, at disse intet har at gøre med det nævnte møde. For mig at se er der her tale om enten groft sjuskeri eller videnskabelig uredelighed.

Selv om jeg påpegede disse og andre problemer med resolutionsteksten, blev den altså vedtaget, idet 78% af de ca. 4.000 afgivne stemmer var for navneændringen. I kommentarer til tidsskrifterne *Science* og *Nature* fik jeg og andre kritikere af resolutionen lejlighed til at gentage vores forbehold [5,6]. Den egentlige ophavsmand til Resolution 4B var den italienske astronom Piero Benvenuti fra universitetet i Padova, der indtil generalforsamlingen i Wien fungerede som generalsekretær for IUA. Forbavsende nok kunne Benvenuti, da han blev forelagt mine indvendinger mod det påståede møde mellem Hubble og Lemaître, ikke se nogen problemer. Ganske vist er der ingen dokumentation eller blot evidens for mødet, men han var alligevel overbevist om, at det måtte have fundet sted. Det kunne have fundet sted og burde have fundet sted – og derfor fandt det sted!

Affæren om IAU-resolutionen og den anbefalede ændring af navnet for Hubbles lov er ikke nogen stor sag. Den handler i det væsentlige om at ære en af kosmologiens store skikkelser og anerkende hans prioritet med hensyn til opdagelsen af det ekspanderende univers, hvilket de færreste vel kan have noget imod. Jeg har selv beskæftiget mig indgående med Lemaîtres bidrag til kosmologien og er ganske enig i, at han fortjener anerkendelse og mere opmærksomhed. Men en sådan anerkendelse bør ske på et oplyst historisk grundlag, hvilket ikke er tilfældet med initiativet fra IAU. Affæren har været et noget deprimerende lærestykke i, hvor lidt seriøst nogle videnskabsmænd – her astronomer – tager videnskabshistorien og hvor villige de er til endog at forvanske historiske kilder.

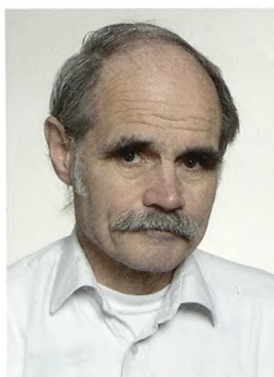
Det må fremhæves, at hverken IAU eller andre organisationer har nogen ret til at bestemme videnskabelig sprogbrug ud over egentligt nomenklatur. Man

kan anbefale ændringer i alment brugte navne, men i realiteten er det op til de videnskabelige forfattere at bestemme, hvor vidt ændringerne skal bruges i praksis. Videnskabeligt set er det ret ligegyldigt, om vi knytter Lemaîtres navn til Hubbles lov eller ej, mens det har en vis ideologisk, social og national betydning. I denne henseende er sagen om Hubble-Lemaître-loven ganske forskellig fra den meget omtalte sag fra 2006, hvor IAU bestemte at degradere Pluto fra en planet til en dværgplanet.

Endelig kan det være instruktivt at sammenligne den her omtalte lov med et andet velkendt eponym fra astronomihistorien, nemlig Olbers' paradoks fra 1826. Det såkaldte paradoks var klart blevet fremstillet af den mindre kendte schweiziske astronom Loys de Chéseaux i 1744, hvorfor nogle astronomer foretrækker betegnelsen Chéseaux-Olbers' paradoks. I dette tilfælde, hvor hverken det ene eller det andet navn er blevet officielt anbefalet, synes astronomerne klart at foretrække det etablerede navn Olbers' paradoks. Mit gæt er, at de tilsvarende vil foretrække at associere Hubble alene med loven om den kosmiske udvidelse. Men vi må vente og se.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2007) "Tro og love: Naturvidenskabens terminologi", *Aktuel Naturvidenskab*, nr. 5, side 32–33.
- [2] www.iau.org/static/archives/announcements/pdf/ann18029e.pdf.
- [3] H. Kragh og R. Smith (2003) "History of Science", bind 41, side 159–167.
- [4] H. Kragh, Arxiv:1809.02557 [physics.hist-ph].
- [5] D. Clery, www.sciencemag.org/news/2018/10/move-over-hubble-discovery-expanding-cosmos-assigned-little-known-belgian-astronomer
- [6] E. Gibney, www.nature.com/articles/d41586-018-07234-y



Helge Kragh er professor emeritus ved Niels Bohr Institutet og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie.

Dansk Videnskab på Youtube

I flere år har Eyvind Dekaa optaget mange af foredragene i Selskabet for Naturlærens Udbredelse og lagt et stort arbejde i at redigere dem, så de kunne blive til glæde for dem, der ikke havde mulighed for at overvære foredragene eller blot ville gense dem.

Efter Henning Haacks foredrag den 10. december 2018 om fundet af et kæmpekrater fra en jernmeteor i Grønland (se KVANT-nyheder side 33), fik Eyvind derfor overrakt en lille hædersgave fra SNU som påskønnelse af indsatsen.



Figur 1. Eyvind Dekaa med SNU's præsident Dorte Olesen. Foto: Jens Olaf Pepke Pedersen.

Eyvind har Youtube-kanalen "Dansk Videnskab", hvor han samler optagelserne af SNU's foredrag, og i løbet af aftenen lykkedes det at få så mange nye abonnenter, at den fik sin egen URL-adresse. Den er www.youtube.com/c/DanskVidenskab, hvor også Henning Haacks foredrag snart vil kunne opleves.

Korrektion

En opmærksom læser har påpeget to korrektioner til artiklen "G-2-eksperimentet – den mest nøjagtige test af kvanteelektrodynamikken" af Bernhard Lind Schistad i forrige nummer af KVANT. I ligning (5) manglede der et 2-tal på højre side af ligningen, som korrekt skal se sådan ud

$$\vec{\mu}_e = -2(1 + a) \cdot \mu_B \cdot \frac{\vec{s}}{\hbar} \quad (5)$$

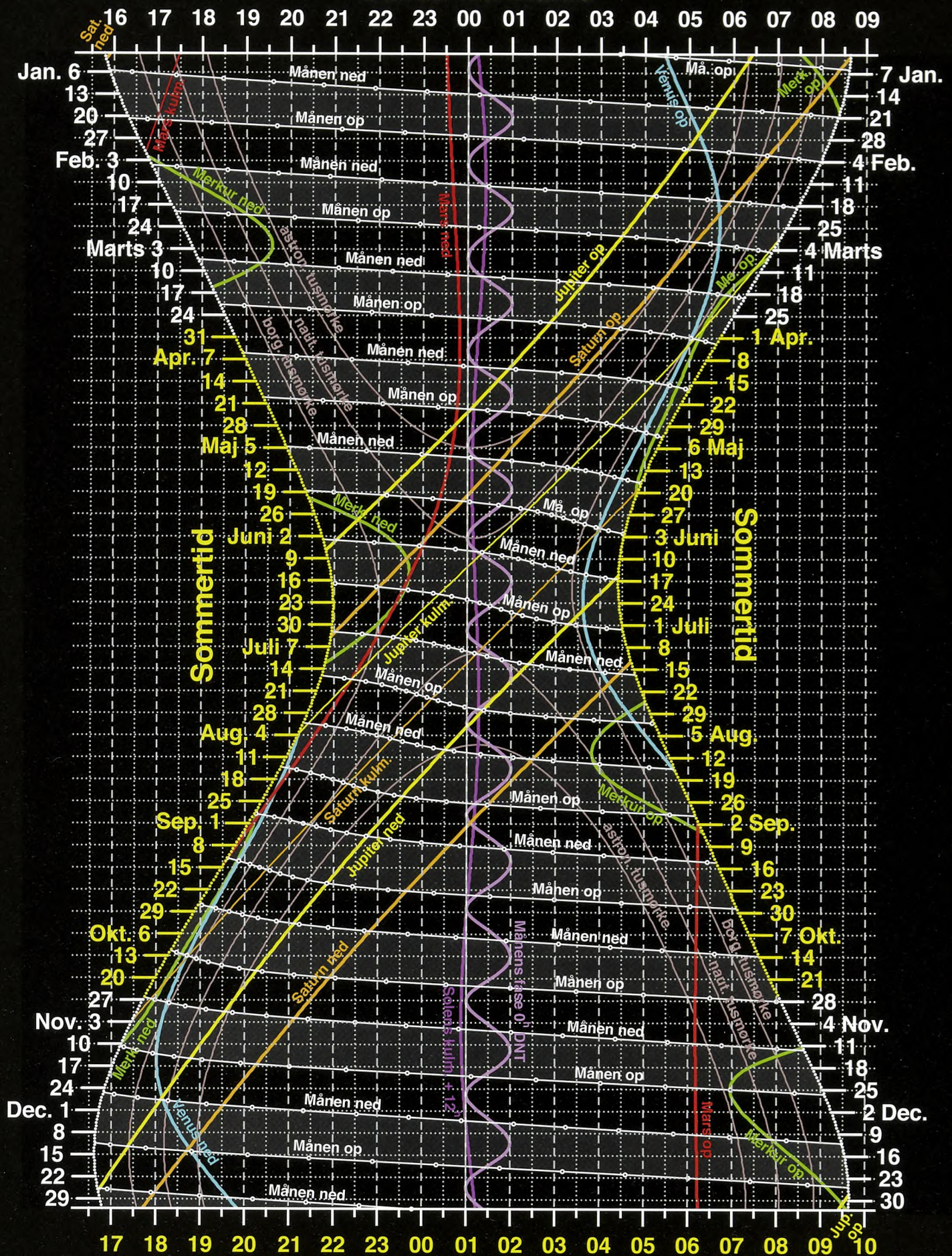
hvor $a = (g - 2)/2$. Desuden skal der i teksten efter ligning (6) stå, at de reelle partikler ligger på masseskallen, fordi deres impulsvektor ligger på en kugleskal med radius lig med

$$\sqrt{\frac{E^2}{c^2} - \frac{m^2}{c^2}} \quad (6)$$

Rettelserne er indført i onlineudgaven af KVANT.

Planetkalender for København 2019

Dansk Normaltid



Aktuelle bøger

Af Finn Berg Rasmussen og Jens Olaf Pepke Pedersen



Studenterrevy fylder 30

Anine Laura Borger, Jophiel Nyman Wiis, Viktor Lindahl Holm, "FysikrevyTM", 195 sider, rigt illustreret, 250 kr. Kan bestilles hos en af redaktørerne: anine.borger@gmail.com, jophiel@gmail.com, vektor.holm@gmail.com.

Hvis det lille "TM" skal tages alvorligt (hvad jeg tvivler på), peger bogens titel entydigt på den revy, som fysikstuderende ved Københavns Universitet (KU) har gennemført hvert år igennem 30 år. Ellers kan man jo komme i tvivl om hvilket af landets fysiksteder, der er tale om. Med andre ord er det en lidt indforstået bog, som mest vil interessere studerende og ansatte ved KU-fysik samt disses venner og familie. Den fortæller imidlertid også om erfaringer og tricks, der kan være nyttige og inspirerende for iværksættere af lignende arrangementer.



Figur 1. Kan du ikke give mig en hånd, skat? – Nå, ikke? Kali er ikke helt tilfreds med mandens valg af bygge-selv-univers i standardmodellen (2013). Foto: Mads Bertelsen.

Denne formidable bog om Fysikrevyens 30-årige historie er blevet til på den måde, at de tre redaktører har modtaget skriftlige bidrag fra eller interviewet omkring et halvt hundrede personer med berøringsflade til revyen: skuespillere, instruktører/-tøser, musikere, scenebyggere, sminkøser/-kører. Endvidere teknikere og undervisere ved instituttet/institutterne (det var først

fem år efter starten på FysikrevyTM, at det tidligere kaos med 8 fysikinstitutter blev ordnet under den fælles hat Niels Bohr Institutet (NBI)).



Figur 2. Holger Bech Nielsen måtte klones flere gange og stod pludselig på scenen i egen figur (2014). Foto: Mads Bertelsen.

I halvdelen af teksten er bidragene inddelt efter de nævnte grupper, derefter kommer et væld af korte og længere historier om fadæser og succeser. Revyens udviklingshistorie fra 11 til op mod 100 "revyster" og samarbejdet med "konkurrerende" revyer og pressen behandles også.



Figur 3. Man skal ikke undervurdere en god ordspilssketch, revyen har haft mange gode gennem tiden. Jord på transientekspressen med Sherlock Ohms og Dr Wattson var klart en af de bedre (2016). Foto: Frederik Grønberg Madsen.

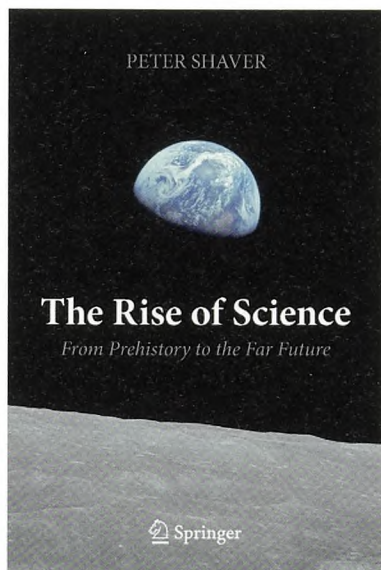
Det fremgår af bogen – og det stemmer med min erindring – at det kun er sket to gange, at undervisere har stået på revyens scene: første gang i året 2000, da Jens Martin Knudsen (Marsmanden) blev pensioneret og efter en hyldestsang pludselig gik op blandt skuespillerne og holdt en kort, bevæget tale; anden gang, da en sketch udviklede sig til, at Holger Bech Nielsen

måtte klones den ene gang efter den anden og pludselig stod i egen figur blandt de mange klonede Holgere til det støjende publikums store jubel. Instituttets teknikere forstod meget tidligt, at revyen var en værdifuld aktivitet, der fortjente al nødvendig hjælp. Bogen nævner Flemming Bo Hansen (NBI-Blegdamsvej) og Jan Fingeret (H.C. Ørsted Bygningen), der altid var klare med råd og dåd, selvom revy og påfølgende fest hver gang må have forårsaget en del rod og besvær. De udviste her en vel anbragt konduite, for blandt de videnskabelige medarbejdere var der i revyens første år kun få, der interesserede sig for sagen.

Redaktionen har samlet et imponerende billedmateriale. Alle teksterne ledsages af relevante billeder, og bogens sidste 55 sider er viet til fotos fra scene og bagscene og fra det liv, der iøvrigt har udspillet sig omkring revyarbejdet. Imponerende layout. Billedteksterne bidrager i høj grad til underholdningen.

For enhver med kendskab til nogle årgange studerende og undervisere må dette være en vidunderlig bog, som af og til ligefrem kalder tårerne frem, nogle gange af grin, andre gange ved sentimentale minder.

FBR



Videnskabens udvikling

Peter Shaver, "The Rise of Science", 292 sider, Springer, 29,11 euro. Fås også som e-bog for 23,79 euro.

Der findes mange bøger om naturvidenskabens opståen og udvikling, og nu har Peter Shaver, der er tidligere seniorforsker ved European Southern Observatory i München også skrevet en. Ifølge forordet har projektet taget ham fire år, og selvom det ikke er klart, om det har været et fuldtidsprojekt, er der ingen tvivl om, at der ligger et stort arbejde bag.

Bogen begynder med fortællingen for 7 millioner år siden, da vore forfædre skilte sig ud fra chimpanserne og startede udviklingen mod at blive til vores egen art. Herefter går det i rask tempo via de første landmænd, de tidlige civilisationer og over det græske mirakel og islamisk videnskab til middelalderen og den naturvidenskabelige revolution. Det indledende kapitel slutter med en gennemgang af de sidste par hundrede års vigtigste

resultater inden for de meget store ting (astronomien), de meget små ting (atom-, kerne- og partikelfysikken), lys og elektromagnetisme samt biologien.

Det andet hovedkapitel er viet til en systematisk gennemgang af forskningens vej til indsigt. Her gennemgås emner som forskernes nysgerrighed, forestillingsevne, beslutsomhed, held, samarbejde og tværfaglighed. Der er også videnskabens store diskussioner og uenigheder samt de videnskabelige metoder, verifikationer, falsifikationer og paradigmeskifte.

Det tredje hovedkapitel gennemgår forskningen i dag. Den eksponentielle vækst i viden, de store forskningssamarbejder som LIGO og CERN, og samspillet mellem videnskaben og samfundet, filosofien og religionen. Der er også en lang (og noget trættende) gennemgang af, hvordan grundvidenskab ligger bag alle de teknologiske opfindelser, vi omgiver os med.

Bogen slutter med et kort kapitel om fremtiden. Vil videnskaben fortsætte i det nuværende tempo? Hvad er de store trusler, og kan vi risikere at miste vores akkumulerede viden igen? Er der mere tilbage at opdage, og kan videnskaben nogensiden blive fuldstændig?

Det er lidt svært at sige, hvad man skal mene om bogen. Den er meget kompakt, og det er på en måde imponerende, hvor meget information, det er lykkedes forfatteren at få klemmt ind på de 242 reelle tekstsider i bogen. Til gengæld sidder man efter endt læsning også lettere forpustet tilbage og med indtrykket af, at forfatteren vil alt for meget og også forfalder til mange lidt for hurtige eller skråsikre konklusioner.

Detaljerigdommen er overvældende og til tider også ret irrelevant for historien, og der er også (for) mange gentagelser. Det kan måske skyldes den leksikalske karakter af bogens opbygning, som betyder, at den samme historie hører til under flere emner, men det virker også som om, forfatteren selv har haft svært ved at overskue stoffet. Fx får vi på side 59 et afsnit med en mindre biografi om Dmitri Mendeleev, og hvordan han blev født i Sibirien som den yngste af 14 børn, hvorefter faderen blev blind, og moderen måtte tage sig af familien osv. På side 96 gentages hele afsnittet imidlertid næsten ordret.

Med så mange detaljer kan det næppe undgås, at der også er misforståelser, fx når han på side 34 skriver, at Giordano Bruno blev henrettet af inkquisitionen for at promovere det heliocentriske system. Informationen gentages ordret på side 202, hvilket den nu ikke bliver mere korrekt af. Brunos skæbne og retssagen er kompleks, og han blev dømt for flere holdninger, som blev anset for kætteri, men han blev ikke dømt for at tro på Kopernikus og mente i øvrigt, at universet ikke havde noget centrum.

Til gengæld har Shavers en udmærket gennemgang af forskningens nuværende status og nogle af de store uløste spørgsmål inden for fysik, astronomi og biologi. Det er svært at finde et emne, som han ikke har behandlet et sted i bogen, og der er mange gode overvejelser og pointer, som måske ikke er nye, men som i hvert fald her er samlet i én bog. Som fx hvordan mange fysikere i slutningen af 1800-tallet mente, at nu var der ikke flere større opdagelser tilbage i fysikken, samt om fysikernes

drøm i dag om at finde en teori om alting.

Der er også interessante overvejelser om, hvordan vores internetbaserede samfund i dag er mere skrøbeligt end før, og eksempler på, hvordan alle de store civilisationer i historiens løb er kollapsede og forsvundet. En kulturs akkumulerede viden kan gå tabt – nazisterne brændte bøger, Mao Zedong dræbte millioner og ødelagde en hel generation af akademikere, og Pol Pot dræbte omkring 20% af befolkningen, især folk med briller, fordi de kunne være intellektuelle. I dag kommer truslen fra islamister, der forsøger at trække verden tilbage til det 7. århundrede.

Andre globale trusler er en kernevåbenkrig, pandemier, asteroider eller supervulkaner. Måske vil fremtidens kvantecomputere og kunstige intelligens gøre os selv overflødige. Der er en fysisk og biologisk grænse for, hvor meget information vi kan samle i vore hjerner gennem et livs uddannelse, og når vi dør, går informationen tabt, og en ny generation skal lære det hele på ny. Men en kunstig intelligens har ikke disse begrænsninger og kan i princippet få adgang til hele menneskehedens samlede viden. Det er ikke utænkeligt, at en sådan intelligens kan lære at studere verden på samme måde, som vi gør det, og måske med tiden også udvikle en selvbevidsthed og samvittighed.

Shavers bog er et ambitiøst projekt, og som det fremgår af det ovennævnte, savner man den kritiske redaktør, men projektet er dog lykkedes så langt, at bogen fortjener at blive læst og også gerne brugt som indgang til at fordybe sig i nogle af de mange emner.

JOPP



Klima

Jens Koch, "Jordens klima – og de problemer vi står overfor", Mellempgaard, 96 sider, 150 kr. Fås også som ebog for 119 kr.

Forfatteren er elektroingeniør og har på grundlag af mange års interesse for Jordens klima skrevet denne lille bog, der er udgivet med støtte fra Veluxfonden.

Med sin korte form har bogen svært ved at komme i dybden med emnerne, men bogen giver en introduktion til nogle af de faktorer, der påvirker klimaet som Solens udstråling, Jordens bane, vulkaner og drivhusgasser. Der er også overvejelser om forurening og om problemerne med klodens stigende befolkning, ligesom en del af klimapolitikken udfordres med forfatterens kommentarer.

JOPP

Videnskabelige vikinger

KVANT egner sig også fint til højtlesning, ikke mindst på vikingetogter. Her er det de barske vikinger, der flækkes om bladet ombord på vikingeskibet Imme Sejr i Det Sydfynske Øhav.

Imme Sejr er bygget af medlemmer af Tønder Skibslag og er en kopi af Ladbyskibet, der er fundet på det nordlige Fyn.

Foto: Gia Schultz.



Af Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Kæmpekrater fra jernmeteor i Grønland

METEORIT. Et forskerhold under ledelse af forskere fra Center for GeoGenetik på Københavns Universitet har opdaget et gigantisk meteorkrater under indlandsisen i Nordgrønland. Det er første gang, at et krater af den størrelse er fundet under en af Jordens iskapper.



Figur 1. En kunstners bud på meteornedslaget i Nordvestgrønland. Maleri: Carl Christian Tofte.

Meteorkrateret måler mere end 31 km i diameter, og det placerer krateret blandt et af de 25 største kraterer på Jorden. Krateret blev dannet, da en 1 km bred jernmeteor styrtede ned i Nordgrønland, og det har siden ligget skjult under mere end 1 km tyk is.

Krateret blev opdaget, da forskerne i december 2015 nærstuderede et helt nyt kort over topografien under Grønlands indlandsis. De bemærkede her en gigantisk, men hidtil upåagtet cirkulær fordybning under Hiawatha-gletsjeren ved indlandsisens rand i Nordgrønland.

I sommeren 2016 og 2017 besøgte forskerholdet Hiawatha-gletsjeren for at kortlægge tektoniske strukturer i geologien ud for gletsjerfoden og for at indsamle prøver af de sediment, som bliver vasket ud fra kraterets bund via en smeltevandsskud. Det viste sig, at en del af de udvaskede mineralkorn indeholdt chok-lameller dannet ved det voldsomme nedslag, og det er et afgørende bevis for, at fordybningen under Hiawatha-gletsjeren er et meteorkrater.

En af forskerne bag opdagelsen er Henning Haack, der har skrevet om meteoritter og solsystemets oprindelse i Kvant nr. 1 fra 2017. Han har for nylig holdt foredrag om opdagelsen i Selskabet for Naturlærens Udbredelse, og en optagelse fra foredraget vil blive lagt ud på www.youtube.com/c/DanskVidenskab.

K. H. Kjær m.fl. (2018) "A large impact crater beneath Hiawatha Glacier in northwest Greenland", *Science Advances*, bind 4, DOI: 10.1126/sciadv.aar8173

Ultrapræcise atomure

ATOMFYSIK. Forskere på NIST (National Institute of Standards and Technology) i Boulder, USA, har i et nyt forsøg vist deres atomure, der er så præcise, at de kan måle højdeforskelle på Jorden med en præcision på 1 cm.

Et atomur måler tiden som et antal overgange (svingninger) mellem to energitilstande i et atom. Et sekund er defineret ud fra en overgang i cæsium-133, som har en frekvens på ca. 9 GHz, og er således den tid, det tager atomet at svinge ca. 9 milliarder gange mellem de to energitilstande.

Atomurene på NIST består af flere tusinde ytterbium-atomer som holdes fast af laserbeams i såkaldt optiske gitter. Atomuret tikker med atomets resonansfrekvens, og urene matchede atomernes resonansfrekvens med en usikkerhed på $1,4 \times 10^{-18}$, og deres frekvensstabilitet over et døgn var på $3,2 \times 10^{-19}$. Målingerne var reproducerbare, og urene blev testet mod hinanden for at se, om de tikker på samme frekvens, hvilket viste en frekvensforskel i størrelsesordenen af 10^{-19} . Dermed har atomurene på NIST sat målerekord på både usikkerhed, stabilitet og reproducerbarhed.

Einsteins relativitetsteori fortæller, at ligesom et ur i bevægelse går langsommere end et stillestående ur, vil et ur i et stort tyngdepotentiale gå langsommere end et ur i et mindre tyngdepotentiale. Hvis to ure er placeret i to forskellige tyngdepotentialer (højder), vil de derfor gå forskelligt. Derfor kan urene på NIST bruges til at måle højdeforskelle, og ud fra urenes totale måleusikkerhed oplyser forskerne, at præcisionen er 1 cm. De mener også, at deres atomure kan bruges til at udforske geofysiske fænomener, måle gravitationsbølger og lede efter mørkt stof.

W. F. McGrew m. fl. (2018) "Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level", *Nature* DOI: 10.1038/s41586-018-0738-2



Nye definitioner

SI-ENHEDER. I november i år har fire af SI-systemets grundenheder, nemlig kilogram, ampère, kelvin og mol fået nye definitioner.

En meter er defineret som den afstand, lyset tilbagelægger i et bestemt tidsrum, hvilket vil sige, at lyshastigheden er blevet tildelt en bestemt værdi. De nye definitioner af kilogram, ampère, kelvin og mol er også fastlagt ved, at fire relevante naturkonstanter har fået defineret en bestemt værdi.

Enheden for kilogram er den sidste enhed, der har været defineret ud fra en fysisk genstand. Siden 1899 har der i Sévres nær Paris været opbevaret en metalcylinder af platin og iridium, som har været prototypen på et kilogram. Men nu er også et kilogram defineret ved hjælp af en defineret værdi af Plancks konstant h .

Finn Berg Rasmussen har i KVANT nr. 1 fra 2012 skrevet om revisionerne af SI-systemet og herunder det arbejde, der gennem mange årtier er udført for at udvikle en vægt, som kunne forbinde en masse med Plancks konstant. Idéen er, at man bruger en ganske særlig vægt, kaldet en Watt- eller Kibble-vægt, som meget præcist kan bestemme den energi, det kræver at løfte et objekt, og herfra udlede objektets vægt.

I næste nummer af KVANT skriver Finn Berg Rasmussen om temperaturen og den nye kelvin.

Resolutions of the General Conference on Weights and Measures (CGPM): 26th meeting (13.-16. november 2018) www.bipm.org/en/CGPM/db/26/

Korrespondens mellem Doppler- og Compton-effekt - breddeopgave 78 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

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

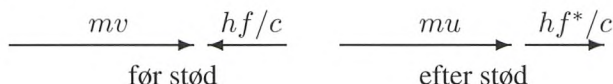
Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave (nr. 78 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 78. Korrespondens mellem Doppler- og Compton-effekten

Temperaturen på 200 millioner grader af plasmaet i fusionsreaktoren JET måles ved at undersøge plasma-partiklernes hastighedsfordeling ved hjælp af frekvensfordelingen af laserlys reflekteret fra partiklerne. Er det det reflekterede lys fra elektronerne eller fra ionerne i plasmaet, der giver den bedste temperaturbestemmelse? Begrund svaret.

Løsning

Vi vil regne på det elastiske 180° -stød antydnet på figuren:



Figur 1. Elastisk 180° -stød imellem en foton og en elektron/ion.

Energikvantet af laserlys hf , hvor h er Plancks konstant og f frekvensen af laserlyset, tilbagekastes af elektronen/ionen, som har massen m og hastigheden v . Herved ændres frekvensen af det tilbagekastede laserlys til f^* . Og elektronens/ionens hastighed ændres til u . Vi antager, at elektronernes og ionernes hastigheder er små i forhold til lysets hastighed.

Energibevarelsen under det elastiske stød giver:

$$\frac{1}{2}mv^2 + hf = \frac{1}{2}mu^2 + hf^*, \quad (1)$$

hvoraf fås, idet vi antager $v - u \ll v$:

$$h(f^* - f) = \frac{1}{2}m(v^2 - u^2) \approx \frac{1}{2}m(v - u)2v. \quad (2)$$

Impulsbevarelsen giver:

$$mv - hf/c = mu + hf^*/c, \quad (3)$$

og heraf fås, idet vi antager $f^* - f \ll f$:

$$m(v - u) = h(f + f^*)/c \approx h2f/c, \quad (4)$$

hvor c er lyshastigheden.

Ved indsættelse af (4) i (2) kommer vi frem til:

$$m(v - u) = h(f + f^*)/c \approx 2hf/c \quad (5)$$

eller

$$(f^* - f)/f \approx 2v/c. \quad (6)$$

Dette er tilnærmelsen til første orden af v/c for Doppler-effekten ved vinkelret lysrefleksion fra et bevæget spejl. Måske kunne vi have gættet det fra en start? Elektronen som et spejl?

For at besvare opgaven skal ligning (6) sammenholdes med, at middelværdien af bidraget til den kinetiske energi fra bevægelserne i den ene af tre mulige retninger ifølge ækvipartitionsprincippet er givet ved:

$$\langle \frac{1}{2}mv^2 \rangle = \frac{1}{2}k_B T, \quad (7)$$

hvor k_B er Boltzmanns konstant og T den absolutte temperatur. Fordelingen af v omkring 0 har derfor en bredde, Δv , givet ved:

$$\Delta v = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{k_B T}{m}}. \quad (8)$$

Ifølge ligning (6) modsvares fordelingen af v af en fordeling af $f^* - f$. Sammenholdes ligning (8) og ligning (6) ses det, at bredden af fordelingen af $f^* - f$ er et mål for $\sqrt{T}$. Det ses endvidere, at bredden af fordelingen er proportional med $\sqrt{m^{-1}}$. Der er derfor mere at måle på, jo mindre m er. Det reflekterede lys fra elektronerne giver derfor en nøjagtigere temperaturbestemmelse end lyset fra ionerne.

Kommentar

Opgaven hører til i den svære ende af spektret af breddeeksamensopgaver. Vi udvælger blandt andet eksamensopgaverne med henblik på deres senere værdi i undervisningen, som i høj grad er baseret på tidligere eksamensopgaver. At der i eksamensopgavesættene forekommer opgaver af varierende sværhedsgrad, er ikke i sig selv et problem. Besvarelsen af et opgavesæt vurderes i sin helhed. Besvarelsen af de enkelte opgaver i sættet tildeles altså ikke nødvendigvis samme vægt ved den samlede bedømmelse.

Opgaven kan besvares på tre niveauer.

Det første niveau består i umiddelbart at antage gyldigheden af ligning (6) ud fra analogien til refleksionen fra et bevæget spejl og derefter sammenholde den med ligning (8).

Det andet niveau er det, der er gennemgået ovenfor under antagelserne $v \ll c$, $v - u \ll v$ og $f^* - f \ll f$. Det tredje niveau er at gennemregne problemet uden disse antagelser.

En eksakt relativistisk beregning giver:

$$f^* = f \frac{\sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}}{\frac{2hf}{mc^2} + \sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}} \quad (9)$$

i stedet for ligning (6).

I JET-tilfældet er $hf \approx 1$ eV og mc^2 for en elektron ca. 1 MeV. Ledet $2hf/(mc^2)$ i ligning (9) er derfor i vores tilfælde forsvindende lille. I grænsen, hvor $2hf/(mc^2)$ går imod 0, går ligning (9) imod $f^* = f(1+v/c)/(1-v/c)$, som er den relativistiske Doppler-formel for refleksion af en elektromagnetisk bølge fra et spejl bevæget imod bølgen. Refleksionen fra elektronen svarer derfor i JET-tilfældet til refleksionen fra et bevæget spejl.

Den typiske fart af elektronerne i JET-plasmaet kan ud fra ligning (8) vurderes til at være ca. 1/6 af lyshastigheden. Med udgangspunkt i den relativistiske Doppler-formel kan vi derfor lave tilnærmelserne $f^* \approx f(1+v/c)(1+v/c) \approx f(1+2v/c)$, eller $(f^* - f)/f \approx 2v/c$, jævnfør ligning (6). Det andet niveau for besvarelsen af opgaven bestod således af

tilnærmelsesvis rigtige regninger. Antagelserne $v \ll c$, $v - u \ll v$ og $f^* - f \ll f$ var altså berettigede.

I grænsen $v/c = 0$, dvs. 180° elastisk fotonspredning fra en hvilende ladet partikel, giver formel (9)

$$\frac{1}{f^*} = \frac{1}{f} \left(1 + \frac{2hf}{mc^2}\right). \quad (10)$$

Eller oversat til bølgelængder af fotonerne, λ^* og λ , $\lambda^* - \lambda = 2h/(mc)$, som er Compton-formlen for elastisk fotontilbagespredning fra en hvilende ladning med massen m . Formel (9) indeholder således både et tilfælde af Doppler-effekt og et tilfælde af Compton-effekt som grænsetilfælde.

I grænsen $hf \ll mc^2$ går ligning (9), som sagt, imod Doppler-formlen for refleksion af en elektromagnetisk bølge fra et spejl bevæget imod bølgen. Den generelle formel for bevarelsen af relativistisk energi og impuls i sammenstød imellem en foton og en elektron har altså kontinuumsfænomenet lysrefleksion i et bevæget spejl som grænsetilfælde.

Et fint eksempel på korrespondensprincippet!

Breddeopgave 79. Klodesprængning

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 2016, nr. 79 i rækken her i KVANT):

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

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

Earthrise



Forsidebilledet på dette nummer af KVANT blev taget af astronauten Bill Anders, da han sammen med Frank Borman og Jim Lovell var i kredsløb omkring Månen ombord på Apollo 8 i juledagene for 50 år siden.

Billedet omtales også som "Earthrise", hvilket egentlig ikke er korrekt. Eftersom Månen hele tiden vender samme side mod Jorden, står Jorden kun op over Månen, hvis man er i kredsløb omkring den og således bevæger sig.

Apollo 8 blev opsendt den 21. december 1968 og det tog 68 timer at nå ud til Månen, hvor rumskibet var i kredsløb i 20 timer. Besætningen på Apollo 8 blev således de første mennesker, der gik i kredsløb omkring

et andet himmellegeme. Juleaften 1968 sendte de et direkte tv-program til Jorden, som blev set eller hørt af omkring en milliard mennesker. De viste også direkte billeder fra Månens overflade, som de havde kigget på de forudgående 16 timer, men hvis man dømmer efter deres umiddelbare kommentarer, var de nu ikke begejstrede for synet.

De beskrev overfladen med udtryk som "absolut ingen farve" og "hvidlig-grå, som en snævet sandstrand", og Frank Borman beskrev sin oplevelse af Månen som en "vidtstrakt, ensom, uindbydende eksistens", som "bestemt ikke synes at være et særligt indbydende sted at bo eller arbejde". Jim Lowell fortsatte med at fortælle, at hans indtryk af Månen var det samme: den store ensomhed deroppe fik ham i stedet til at indse, hvor meget vi har på Jorden, som set fra Månen ligner en stor oase i det enorme, tomme rum.

Måske er det også forklaringen på, at billedet af jordkloden, der stiger op fra Månens grå og livløse overflade og med det sorte verdensrum som baggrund, er blevet et af de mest ikoniske billeder fra det 20. århundrede (se fx forsidebilledet til bogen "The Rise of Science", der er anmeldt på side 31). Flere har ligefrem beskrevet oplevelsen, da de første gang så billedet, som nærmest en åbenbaring, fordi det gik op for dem, hvor sårbare og ensomme vi er i universet.

JOPP

Ørsted-medaljen uddelt til Ole Bakander

Af Dorte Olesen, Selskabet for Naturlærens Udbredelse¹

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) sætter i disse år fokus på den vigtige formidling i gymnasiet ved at uddele H. C. Ørsted-medaljer til inspirerende gymnasielærere inden for SNUs fagkreds.

Selskabet har igen i år modtaget en række meget flotte indstillinger. Udvælgelsen blev en vanskelig opgave for det nedsatte bedømmelsesudvalg, men man nåede i enighed frem til at pege på lektor Ole Bakander.



Figur 1. Ole Bakander med Ørsted-medaljen og SNUs præsident Dorte Olesen (th). Foto: Jens Olaf Pepke Pedersen.

Lektor Ole Bakander har siden 1980 været ansat på Allerød Gymnasium, hvor han har undervist utallige elever i sine fag fysik, matematik og astronomi, og det er sket med entusiasme og stor glæde. Han har fat i og inspirerer sine elever uanset niveau og lige meget, om det er dygtige eller svagt funderede elever, og alle beriges. Hans brede viden og engagement forener på flotteste vis naturvidenskab og almindendannelse, og han fungerer som rollemodel for både elever og kolleger. Ole er en udvikler og innovator inden for didaktik, fysik, astronomi som fag og brug af IT i undervisningen. Han er en afholdt og respekteret lærer, kollega, medarbejder og menneske, med et utrætteligt engagement i forhold til at inspirere og dygtiggøre unge mennesker inden for naturvidenskab.

Ole Bakander var primus motor på nationalt plan i udviklingen af astronomifaget i gymnasiet, og han har selv undervist i

faget siden 1996. Sideløbende med arbejdet på Allerød Gymnasium har Ole i en årække undervist i fysik og astrofysik på RUC og dermed virket som brobygger mellem gymnasie- og universitetsverdenen til gavn for elever og lærere begge steder. Han har således en stor del af æren for, at Allerød Gymnasium er ét af de gymnasier, der leverer forholdsvis flest studerende til de naturvidenskabelige uddannelser.

Ole har gennem årene haft stor indflydelse på anvendelsen af IT i fysik- og matematikundervisningen. Han var således med som pioner i forbindelse med udviklingen af databehandlingsprogrammet FPro. En tidligere kollega har i den forbindelse sagt: "Dette programs sublime enkelthed skyldes i høj grad Oles helt specielle evner til at gennemskue strukturer og dermed simplificere arbejdsgange – hvilket var særdeles nyttigt i forhold til fysikdidaktikken i gymnasiet, hvor man både ønsker at introducere ny og relevant teknologi samtidig med, at professionelle systemers kompleksitet kan umuliggøre deres brug på gymnasieniveau. Ole har desuden spillet en unik rolle i udviklingen af lommeregneren, idet Ole har formidlet sine erfaringer fra gymnasiet og sin indsigt i emnet ved talrige møder med Texas Instruments og derigennem haft indflydelse på funktionaliteten af de lommeregnerne, der blev anvendt i den danske gymnasieskole."

Alle udsagn peger på, at Ole Bakander tænker meget tværfagligt og har gjort det længe før, det blev en del af gymnasiets pensum – og at det er kommet til udtryk i vejledningen af elever i almen studieforbereelse samt i studieretningsprojektet.

Der kunne siges en hel del mere, men lad mig sammenfatte det på følgende måde: "Ole Bakander er en inspirerende ildsjæl, som gennem næsten 40 år har formået at engagere sine elever med sin viden og indsigt i fysik, matematik og astronomi – fag som i dag er helt centrale for at forstå den tekniske udvikling i vores samfund, men desværre nok svære at gennemskue for mange. SNU ønsker med prisen at markere, hvor vigtigt det er at få formidlet denne forståelse, og hvor stor en indsats, det rent faktisk kræver."

¹Uddrag af Dorte Olesens tale ved overrækkelsen af H. C. Ørsted-medaljen den 10. december 2018.