

KVANT December 4 2025

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 36. årgang



- NATURVIDENSKABELIGE METODER I KUNSTENS TJENESTE
- GRØN BRINT • CP-BRUD I BARYONER • JORDENS KLIMA
- NOT-SOMMERSKOLEN PÅ LA PALMA • PLANETKALENDER
- ISAAC NEWTON – TEOLOG, ALKYMIST OG FYSIKER
- MEKANISKE BØLGELEDERE TIL INFORMATIONSOVERFØRSEL

Løssalgspris: 60 kr.

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk

E-mail : kvant@kvant.dk

Facebook  : [KVANT.fysiktidsskrift](https://www.facebook.com/kvant.fysiktidsskrift)

ISSN (trykt) : 0905-8893

ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

Astronomisk Selskab (AS)
Dansk Fysisk Selskab (DFS)
Selskabet for Naturlærens Udbredelse
(SNU)

Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),
DTU Space
Michael Cramer Andersen,
Christianshavns Gymnasium
Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Electro
Henning Haack, SNU
Louise Kindt (digital redaktør),
DTU Fysik og KU Matematik
Ole Mørk Lauridsen, SNU
Steen Lærke, AS
Maren Malling, DFS
John Rosendal Nielsen
Lars Occhionero, AS
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh

Abonnementspris : 190 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-
lemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnement tegnes ved henvendelse til
Christine Pepke Gunnarsson:
cpepe@dtu.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

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

Priserne er excl. moms og for reproklart
materiale i farver. Henvendelser om annon-
cer til redaktøren på: kvant@kvant.dk

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 1-2026 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-2026 udkommer ca. 15. juni
Deadline for mindre bidrag og annoncer
er ca. en måned før, længere artikler skal
modtages to måneder før.

Indhold:

Fra multispektral billeddannelse til mikroskopisk pigmentanalyse:
Naturvidenskabelige metoder i kunstens tjeneste

Mads Svanborg Peters, Jacek Fiutowski og Arkadiusz Goszczak . 3

Isaac Newton – teolog, alkymist og fysiker

Erik Høg 8

Grøn brint

Henrik Stiesdal 12

Kvants hjemmeside 14

Large Hadron Collider beauty (LHCb) eksperimentet: CP-brud i
baryoner

Lars Eklund og Patrik Adlarson 15

Fra Skyhav til Stjernelys: Erfaringer fra NOT-sommerskolen
på La Palma

Charlie Emil Lind-Thomsen 16

Mekaniske bølgeledere til informationsoverførsel

Ilia Chernobrovkin 19

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson 21

Planetkalender 2026

Martin Götz 24

Jordens klima (1. del): Fra istider til nutidens forandringer

Jens Olaf Pepke Pedersen 25

Meteren, en fantastisk fortælling

Peer Jespersen 33

Stenudslyngning – breddeopgave 117

Jens Højgaard Jensen 36

Foreningsnyt 38

Foredragskalender Bagsiden



Forsidebilledet er en gengivelse af værket
Opstilling med kander, som er malet af
Vilhelm Lundstrøm (1893–1950) i 1931.
En multispektral analyse af to af hans
værker har nu afsløret en overraskende sy-
stematik i det skjulte. Læs mere i artiklen
på side 3.

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

Dette nummer af Kvant er omdelt med PostNord, hvilket bliver sidste gang
eftersom PostNord ophører med at levere breve og magasiner med udgan-
gen af året. Såfremt bladet udebliver, bedes du kontakte Kvant på e-mail
kvant@kvant.dk.

Fra multispektral billeddannelse til mikroskopisk pigmentanalyse: Naturvidenskabelige metoder i kunstens tjeneste

Mads Svanborg Peters, Newtec Engineering A/S, Jacek Fiutowski og Arkadiusz Goszczak, Mads Clausen Instituttet, NanoSYD, Syddansk Universitet

Multispektral billeddannelse kombineret med mikroskopiske og kemiske analyseteknikker giver en unik indsigt i kunstværkers opbygning og skjulte detaljer. Med et specialudviklet kamerasystem, der dækker 400–1700 nm, samt scanningelektronmikroskopi med energidispersiv røntgenspektroskopi (SEM-EDX) og Raman-spektroskopi, undersøges tre værker af Vilhelm Lundstrøm (1893–1950) fra Kunstmuseum Brandts. Analysen afslører underliggende geometrier, pigmentlag og grundstofsammensætning gennem en kombination af billeddannelse og punktbase-rede målinger. Den tværfaglige tilgang demonstrerer potentialet i at integrere ikke-destruktive og mikrodestruktive teknikker i kunsthistorisk forskning og konservering. Undersøgelserne er udført som en del af Interreg-projektet *Technological Enlightenment to Preserve and Explore Regional Cultural Heritage* (TORCH).

I et almindeligt kamera opfanges farveinformationen ved hjælp af et såkaldt Bayer-filter, der er placeret oven på billedsensoren. Dette filter består af røde (R), grønne (G) og blå (B) felter, som muliggør optagelse af et RGB-billede. Hver pixel indeholder tre farveværdier, der afspejler lyset fra det observerede objekt.

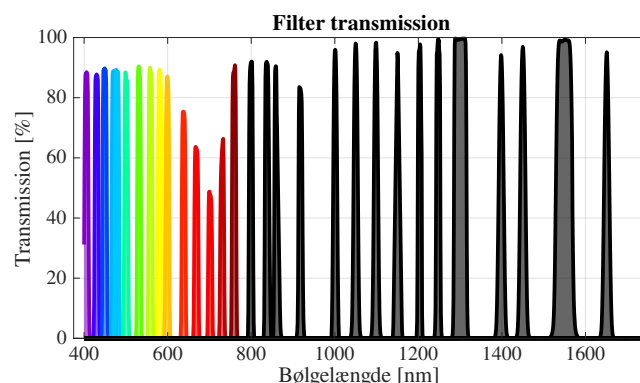
Spektral billeddannelse udvider dette princip ved at registrere lys i mange flere bånd—ofte både i det synlige og usynlige spektrum. I denne artikel anvendes et multispektralt system bestående af et filterhjul med 30 båndpasfiltre, som dækker bølgelængder fra 405 nm til 1650 nm, og et kamera med en Sony SenSWIR IMX990 billedsensor, der er følsom i området 400–1700 nm (figur 1).



Figur 1. 3D-rendering af det multispektrale system bestående af filterhjulet med 30 båndpasfiltre og et kamera med en IMX990 billedsensor. Det yderste lag er fjernet, så filtrene kan ses. Et yderligere filter foran hjulet sikrer de ønskede spektrale responser.

Filtrenes transmissionskurver som funktion af bølgelængde er vist i figur 2. Hvert filter har en

båndbredde (full width at half maximum, FWHM) på 10 nm, bortset fra filtrene ved 1300 nm og 1550 nm, som har bredder på henholdsvis 30 nm og 40 nm. For at dække hele spektret fra 400 nm til 1700 nm er det nødvendigt med en særlig billedsensor, da siliciumsensorer kun dækker fra 400 nm til 1000 nm og InGaAs-sensorer fra 900 nm til 1700 nm. Sony IMX990 kombinerer begge teknologier og muliggør dermed kontinuerlig følsomhed over hele området.



Figur 2. Transmission af de 30 optiske båndpasfiltre i filterhjulet som funktion af bølgelængde. Filtrene dækker området fra 405 nm til 1650 nm og er farvet efter deres respektive bølgelængder. Ikke-synlige bølgelængder (>750 nm) er vist i sort.

Det multispektrale system genererer en såkaldt spektral datakub, hvor hver pixel indeholder information om, hvordan det afbildede punkt reflekterer lys ved de forskellige bølgelængder. Datakuben kan opfattes som et 3D-billede med to rumlige dimensioner (x , y) og én spektral (λ). Ved at analysere spektralkurverne fra forskellige områder kan man identificere pigmentforskelle, skjulte skitser og lagdeling.

Metoden er ikke-destruktiv, da den registrerer reflekteret lys, hvilket gør den ideel til analyser af kunstværker uden fysisk prøvetagning. Især det nærinfrarøde område (>700 nm) er værdifuldt, da mange pigmenter bliver gennemsigtige, hvilket gør underliggende lag synlige [1]. Dog kræver tolkningen forsigtighed, da

pigmenter ofte optræder som blandinger og sjældent i ren form.

For at opnå en mere komplet forståelse af værkernes materialer og opbygning blev de multispektrale analyser suppleret med mikroskopiske og kemiske teknikker. Her giver scanningelektronmikroskopi-energidispersiv røntgenspektroskopi (SEM-EDX) mulighed for at kortlægge grundstofindholdet i mikroskopiske farvesnit, mens Raman-spektroskopi kan identificere organiske og uorganiske pigmenter ud fra deres molekylære signatur. Kombinationen af disse metoder gør det muligt både at lokalisere, kvantificere og kemisk bestemme pigmenterne – og derved koble de store linjer fra multispektral billeddannelse med den detaljerede viden fra punktmålinger.

Vilhelm Lundstrøms skjulte undertegninger

Den danske modernist Vilhelm Lundstrøm (1893–1950) er kendt for sine enkle og stringente kompositioner, præget af en fri tilgang, hvor objekternes placering ofte er ændret flere gange i løbet af maleprocessen. Men multispektrale analyser af to af hans værker, *Opstilling med kander* (1931) og *Modelbillede* (1928), afslører en overraskende systematik i det skjulte. Farvebilleder af de to værker er vist i figur 3.



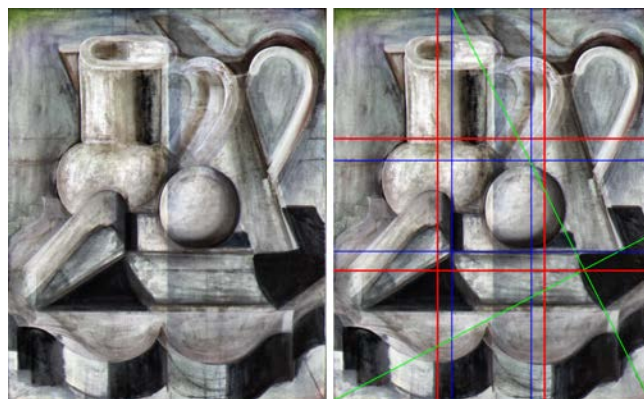
Figur 3. Fotografier af Vilhelm Lundstrøms malerier *Opstilling med kander* (venstre) og *Modelbillede* (højre). Fotografierne er fra Kunstmuseum Brandts.

De to værker blev optaget med det multispektrale system hos Konserveringscenter Vejle, hvor de var opmagasineret, og de skjulte detaljer trådte hurtigt frem i analysen af de spektrale datakuber. Allerede ved at kombinere spektralbåndene ved 1200 nm, 1300 nm og 1550 nm til et falsk farvebillede, blev tidligere usynlige skitsetræk og hjælpelinjer synlige. Figur 4 viser til venstre det falske farvebillede, hvor tværgående skitsetlinjer fremstår tydeligt. Til højre er disse linjer farvelagt og fremhævet, hvor skjulte dele er rekonstrueret ud fra de synlige segmenter.

De røde linjer følger *tredjedelsreglen*, som inddeler billedfladen i et 3×3 -gitter. De blå linjer markerer *det gyldne snit*, en klassisk harmonisk opdeling i forholdet $1 : 1,618$.

De vigtigste kompositionselementer er anbragt langs disse linjer og i deres krydsfelter, hvilket skaber en harmonisk og afbalanceret billedopbygning. Eksempelvis følger kanderne de lodrette skitsetlinjer, mens bogens

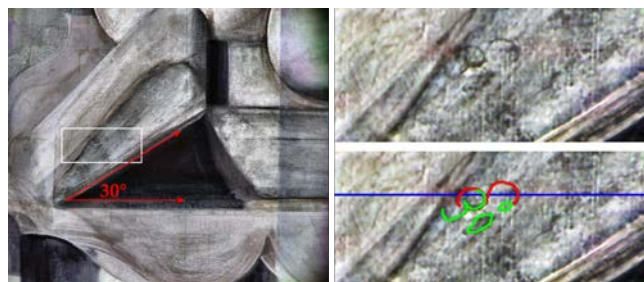
nederste kant ligger langs en vandret linje i det gyldne snit.



Figur 4. Falsk farvebillede (kombination af båndpasfiltre ved 1200 nm, 1300 nm og 1550 nm) af *Opstilling med kander*. Skjulte skitser er fremhævet i farve, hvor rød, blå og grøn markerer henholdsvis tredjedelsreglen, det gyldne snit og diagonalen.

Dette er første gang, at undertegninger er blevet dokumenteret i Lundstrøms værker – en opdagelse, der overraskede konservatorerne. Lundstrøms stil forbindes ellers med hyppige ændringer under maleprocessen, hvilket ofte fører til overlappende lag og fremtoning af underliggende figurer – som den ekstra arm i *Modelbillede* (figur 3).

Analyserne viste også tal og vinkelmarkeringer i *Opstilling med kander*, herunder 3-taller placeret på tredjedelslinjerne og en vinkel på præcis 30° , svarende til hældningen mellem bogens ryg og bordet (figur 5). Desuden blev der fundet en kryptisk notation, “5/80 900”, som muligvis henviser til proportioner anvendt under planlægningen.



Figur 5. Udsnit med tal- og vinkelmarkeringer fremhævet. Bemærk vinklen på 30° (grøn) og 3-tallet (rød) placeret langs tredjedelslinjerne.

I *Modelbillede* blev der ikke fundet skitsetlinjer, men derimod tydelige undertegninger og markeringer. Figur 6 viser et falsk farvebillede (kombination af bånd ved 480 nm, 1200 nm og 1300 nm), hvor kompositionen af kvindekroppen ses at være ændret flere gange — både hoved, arme og underliv er flyttet. I udsnittet markeret med en hvid firkant ses endnu en inskription, “4/70/5”, hvis betydning er uklar, men som vidner om en vis geometrisk planlægning.

Spektral unmixing: Et sort område, der ikke var sort

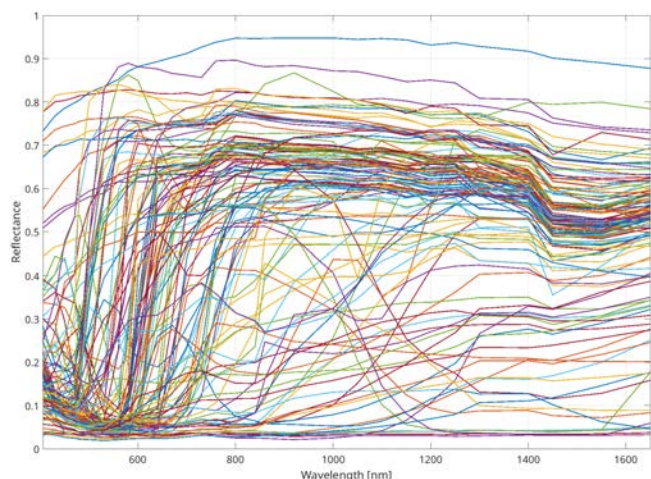
For at undersøge, hvilke pigmenter der er anvendt i *Opstilling med kander*, blev der udført en spektral

unmixing-analyse baseret på multispektrale billeder. Spektral unmixing er en metode, der gør det muligt at identificere, hvilke rene pigmentspektre (kaldet *end-members*) der findes i hver enkelt pixel, samt estimere i hvilke mængder, de optræder [2, 3]. Metoden er særlig nyttig, når pigmenter er blandet eller påført i tynde lag oven på hinanden.



Figur 6. Modelbillede. Falsk farvebillede (R: 1300 nm, G: 1200 nm, B: 480 nm) med udsnit omkring en skjult markering, farvelagt og fremhævet i rød.

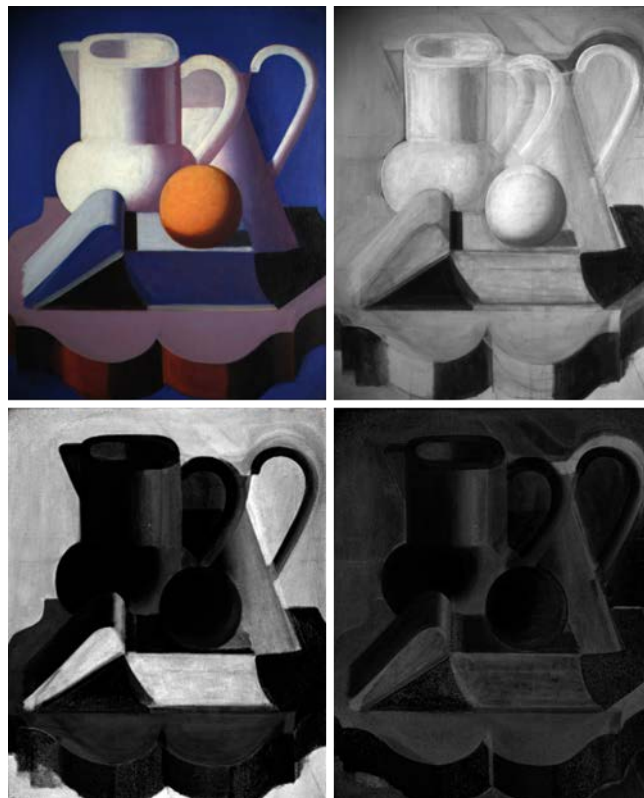
Der findes to typer modeller til unmixing: lineære og ikke-lineære [4]. Den lineære model antager, at det målte spektrum er en vægtet sum af de enkelte pigments spektra. Den virker godt, når pigmenterne er blandet på makroskopisk niveau – f.eks. ved siden af hinanden på lærredet. Den ikke-lineære model tager højde for komplekse lysinteraktioner mellem lag og giver ofte bedre resultater, når malingen er påført i flere tynde lag [5]. I denne analyse blev der anvendt en ikke-lineær model med kravet om, at de estimerede mængder af hvert pigment er positive og summerer til én.



Figur 7. Reflektans-spektre af de 136 reference-pigmenter fra Pigments Checker v5 og Modern & Contemporary Art målt med det multispektrale system.

Til reference blev der benyttet multispektrale optagelser af Pigments Checker v5 og Pigments Checker Modern & Contemporary Art, som er farvekalibratorer bestående af henholdsvis 70 og 66 kendte pigmenter, anvendt fra oldtiden til moderne tid. Reflektansspektre af de 136 referencepigmenter er afbildet i figur 8. Til selve analysen blev der udvalgt 37 pigmenter, som var i brug og relevante i 1920–1930, da værket blev malet.

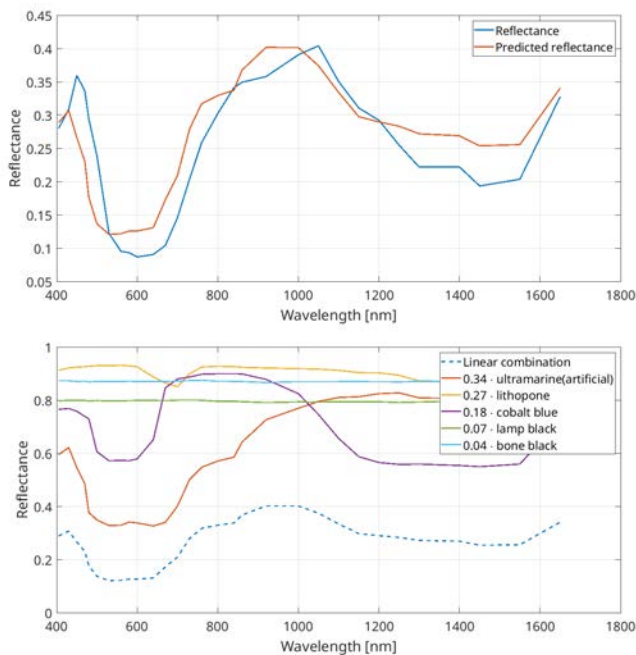
I analysen af *Opstilling med kander* var der flere interessante områder, men området over hanken af den bagerste kande skilte sig markant ud med høj absorption over 1200 nm – selvom området ikke adskiller sig fra baggrunden for det blotte øje. Dette ses i figur 8, hvor der øverst til venstre vises en RGB-visualisering af værket og øverst til højre det infrarøde bånd ved 1550 nm. Den spektrale unmixing resulterer i såkaldte mængde- eller koncentrationskort for hvert pigment i analysen, hvor intensiteten i en given pixel svarer til mængden af pigment. Nederst i figur 8 ses mængdekortene for ultramarin og koboltblå, hvoraf det fremgår, at området over hanken hovedsageligt består af disse to blå pigmenter, og at baggrunden primært består af ultramarin.



Figur 8. Sammenstilling af optagelser: (øverst til venstre) RGB, (øverste til højre) infrarødt (1550 nm), (nederst til venstre) mængdekort for ultramarin, og (nederst til højre) mængdekort for koboltblå. Hvide områder angiver høj sandsynlighed for pigmentets tilstedeværelse.

Øverst i figur 9 vises det målte reflektansspektrum (blå) for området over hanken samt kombinationen af de rene pigmentspektre (orange). Nederst ses de rene spektre vægtet med deres koncentration fra unmixing-analysen, samt den kombinerede kurve (stiplet blå), som svarer til det orange spektrum øverst. De estimerede mængder er: 0.34 ultramarin, 0.27 lithoponehvidt, 0.18 koboltblå, 0.07 kønrøg og 0.04 bensort. Koboltblå og ultramarin har overlappende spektrale karakteristika i det synlige spektrum, men adskiller sig i det infrarøde område. Hypotesen blev bekræftet af røntgenfluorescens (XRF)-analyse, som viste tilstedeværelse af kobolt, men ikke tin (som ville indikere cølinblå) i området over hanken. Tilsvarende blev der fundet aluminium, silicium og svovl i områderne med ultramarin. Det tyder på, at Lundstrøm først malede

området med koboltblå og senere overdækkede det med ultramarin, efter at have ændret kompositionen.



Figur 9. (Øverst) Middel reflektans-spektrum af området over hanken på den bagerste kande i *Opstilling med kander* samt kombinationen af de rene pigmentspektre fra den spektrale unmixing. (Nederst) Reflektans-spektrum af de rene reference-spektre samt kombinationen af de forskellige pigmenter vægtet med deres mængde/koncentration.

Farvesnit og mikroskopisk analyse

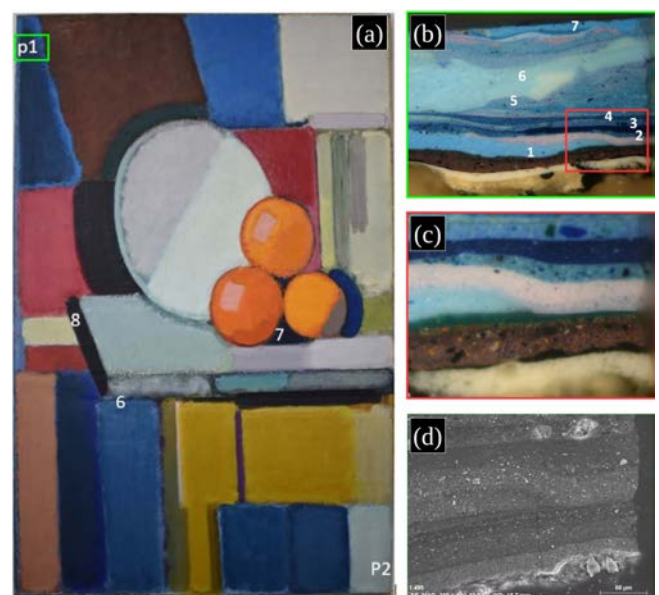
Ud over den multispektrale billeddannelse blev der også anvendt mikroskopiske og kemiske analysemetoder for at opnå en dybere forståelse af farvelagenes opbygning og pigmenternes sammensætning i Lundstrøms værker. Disse analyser omfattede blandt andet SEM-EDX samt Raman-spektroskopi. Metoderne blev anvendt på tværsnit af små farveprøver og bidrager med væsentlig information, der supplerer de ikke-destruktive billedbaserede undersøgelser.

For at undersøge underliggende lag blev der udtaget mikroskopiske prøver, som blev indstøbt og slebet ned til tværsnit. Disse tværsnit blev derefter analyseret med henblik på at identificere pigmenter og lagstrukturer. SEM-EDX og Raman-spektroskopi blev her anvendt som komplementære teknikker.

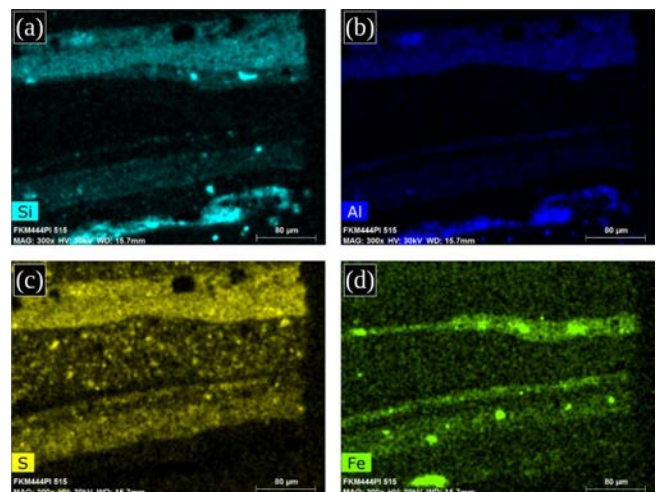
Raman-spektroskopi er en optisk metode, der benytter en fokuseret laser til at fremkalde inelastisk lysspredning (Raman-effekten) i prøvens molekulære bindinger. De målte spektrale frekvensskift er karakteristiske for specifikke pigmenters kemiske strukturer. Metoden er særligt velegnet til identifikation af organiske og visse uorganiske pigmenter, herunder mange blå – dog med undtagelse af koboltblå, som ofte giver svage eller utydelige signaler.

SEM-EDX er en grundstofanalytisk teknik, der tillader både punktmålinger og fuld scanning af hele tværsnittet. Metoden giver detaljerede kortlægninger af grundstofindholdet i de enkelte lag og kan anvendes til pålidelig identifikation af mange uorganiske pigmenter, herunder blå pigmenter. Som det også kendes fra

XRF-analyse, har SEM-EDX dog visse begrænsninger, eksempelvis i detektion af PB15 (phthalocyanin-blå), som derimod er let identificerbar med Raman-spektroskopi selv i lave koncentrationer.



Figur 10. (a) Fotografi af Vilhelm Lundstrøms *Nature Morte* (1945) med markering af positionen for farvesnittet. (b) Mikroskopibillede af farvesnittet fra punkt P1, hvor tallene angiver positioner for Raman-målinger. (c) Det samme farvesnit, her vist i det område markeret med et rødt rektangel, hvor de enkelte farvelag fremgår tydeligt. (d) SEM-EDX-billede af området med 300X forstørrelse.



Figur 11. SEM-EDX-mængdekort for (a) silicium, (b) aluminium, (c) svovl og (d) jern ved 300X forstørrelse af området vist i figur 10(d) fra *Nature Morte*.

Figur 10(a) viser et fotografi af Lundstrøms *Nature Morte* (1945), hvor der er udtaget et farvesnit i det blå område i øverste venstre hjørne (punkt P1, markeret med et grønt rektangel). Et udsnit af mikroskopibilledet af farvesnittet (figur 10(b)) afslører flere af de i alt 26 farvelag. Tallene på udsnittet angiver Raman-målepunkterne: PB15 blev identificeret i punkt 1, 5, 6 og 7; ultramarin i punkt 3, 4 og 5; samt preussisk blå i punkt 4. Figur 10(c) viser det samme farvesnit, nu med fokus på området markeret med et rødt rektangel, hvor SEM-EDX-analysen blev udført. Figur 10(d) præsenterer et SEM-billede med 300X forstørrelse af dette område.

Grundstofsfordelingen for silicium (Si), aluminium (Al), svovl (S) og jern (Fe) fra SEM-EDX-målingerne er vist i figur 11(a–d), svarende til området i figur 10(d). Tilstedeværelsen af Si, Al og S indikerer ultramarin, hvilket også blev bekræftet ved Raman-spektroskopi. Fe indikerer preussisk blå, som dog ikke kunne bekræftes ved Raman – sandsynligvis fordi målepunktet ikke ramte pigmentpartiklerne direkte. Laget vurderes alligevel at indeholde preussisk blå, da dette pigment blev identificeret ved Raman i et andet lag.

Konklusion

Som en del af Interreg-projektet TORCH har dette arbejde vist, hvordan en kombination af multispektral billeddannelse, SEM-EDX og Raman-spektroskopi kan give et mere nuanceret billede af et maleris opbygning, end hver enkelt metode kan levere alene. Det multispektrale system med høj spektral opløsning har afsløret skjulte geometriske retningslinjer og ændringer i kompositionen i Vilhelm Lundstrøms værker, mens spektral unmixing har visualiseret fordelingen af specifikke pigmenter i hele billedfladen. SEM-EDX har tilføjet præcis grundstofinformation i specifikke lag, og Raman-spektroskopi har suppleret med pigmentidentifikation – herunder for pigmenter, som ikke kan påvises med SEM-EDX. Eksemplet med *Nature Morte* (1945) viser, hvordan disse metoder tilsammen kan bekræfte og nuancere fund fra den billedbaserede analyse, f.eks. ved at forbinde spektrale signaturer med bestemte pigmenter og lagfølger.

Samlet set illustrerer studiet styrken ved en integreret, tværfaglig tilgang, hvor billedteknologi, mikroskopi og spektroskopi indgår i et samlet analyseforløb. Denne metode rummer et betydeligt potentiale i kunsthistoriske studier, konserveringsarbejde og bevaringsstrategier, hvor forståelsen af både det synlige og det skjulte lag er afgørende.

Resultaterne præsenteret her er en del af Interreg-projektet TORCH, der har til formål at udvikle og anvende avancerede teknologier til bevaring og udforskning af den regionale kulturarv.

En særlig tak til

Forfatterne ønsker at takke konservatorerne Clara Bratt Lauridsen og Marie Bitsch Christiansen, Konserveringscenter Vejle, for udtagelse af prøver og farvesnit samt kritisk sparring under projektet, Ayoub Laghrissi, SDU, for Raman-spektroskopi, Bjarke Jørgensen, Newtec Engineering A/S, for sparring angående de hyperspektrale analyser, Bjarke Jensen, Newtec Engineering A/S, for fortolkning af XRF-analyser, og ikke mindst museumsinspektør Ellen Egemose, Kunstmuseum Brandts, for at stille værker til rådighed for projektet. Dette arbejde er delvist finansieret af Interreg Deutschland-Danmark og Den Europæiske Union under bevillingsnummer 04-3.2-23 2.

Litteratur

- [1] J. K. Delaney, E. R. de la Rie, D. L. Palmer, K. A. Doolley, M. Ricciardi og M. B. Palmer (2016) “Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings: pigment mapping and improved infrared reflectography”, *Herit. Sci.*, bind 4, artikel 6. DOI: 10.1186/s40494-016-0075-4
- [2] A. Cosentino (2014) “Identification of pigments by multispectral imaging: a flowchart method”, *Herit. Sci.*, bind 2, artikel 8. DOI: 10.1186/2050-7445-2-8
- [3] G. Poldi og G. C. Villa (2006) “Non-invasive pigment analysis on 20th-century paintings by reflectance spectroscopy: a methodological approach”, *J. Cult. Herit.*, bind 7, side 124–131.
- [4] N. Dobigeon, J.-Y. Tournet, C. Richard, J. C. M. Bermudez, S. McLaughlin og A. O. Hero (2016) “Linear and Nonlinear Unmixing in Hyperspectral Imaging”, *Data Handling in Science and Technology*, bind 30, side 185–224. DOI: 10.1016/B978-0-444-63638-6.00006-1
- [5] J. M. Bioucas-Dias, A. Plaza, N. Dobigeon, M. Parente, Q. Du, P. Gader og J. Chanussot (2012) “Hyperspectral Unmixing Overview: Geometrical, Statistical, and Sparse Regression-Based Approaches”, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, bind 5, nr. 2, side 354–379. DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2194696



Mads Svanborg Peters er optisk ingeniør hos Newtec Engineering A/S. Han er uddannet civilingeniør og har en erhvervs-ph.d. i ingeniørvidenskab fra Syddansk Universitet. Han arbejder med udvikling og anvendelse af hyperspektrale billedsystemer.



Jacek Fiutowski er lektor ved Mads Clausen Institut, Syddansk Universitet, og leder af Nanophotonics-gruppen. Han er uddannet fysiker og har en ph.d. i fysik. Hans forskning fokuserer på nanooptik, avanceret elektron- og ionmikroskopi samt udvikling af sensorteknologier til miljø-, energi- og sundhedsapplikationer.



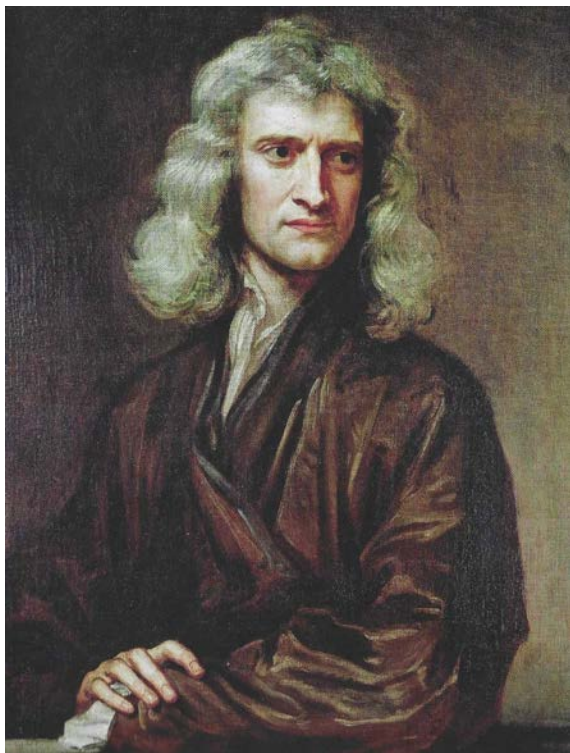
Arkadiusz Goszczak er specialkonsulent ved Mads Clausen Institut, Syddansk Universitet. Han er uddannet ingeniør og har en ph.d. i mikro- og nanoteknologi. Hans arbejde fokuserer på mikro- og nanofabrikation, mikrofluidik og udvikling af biomedicinske sensorer.

Isaac Newton – teolog, alkymist og fysiker

Erik Høg, Niels Bohr Institutet

Isaac Newton studerede gamle bibelske skrifter og opdagede, at den hellige Treenighed ikke var omtalt. Han var antitrinitar og streng monoteist. For ham var det meget vigtigt at studere teologi og alkymi, og han brugte langt mere tid på det end på den matematik og fysik, vi husker ham for. Newton fandt love for tyngdekraften og for mekaniske kræfter, i fysik nåede hans geni at skabe noget, der har fuld gyldighed i vore dage og i al fremtid.¹

Lad mig fortælle lidt om 1600-tallet. Vi kan begynde i Store Kannikestræde, gaden fra Frue Plads til Rundetaarn. Her boede Ole Rømer, efter at han i Paris havde opdaget, at lyset har en endelig hastighed. Han var født 1644 i Aarhus. Han var selvfølgelig kristen som alle andre på den tid, men noget nærmere ved vi ikke om hans tro. Det nævner jeg, fordi vi straks kommer til en anden stor videnskabsmand, fysikeren Isaac Newton, hvor vi ved meget om hans kristentro, hans gudsbillede.



Figur 1. Isaac Newton, portrætteret af Godfrey Kneller (1646–1723). Kneller malede Newton adskillige gange. Hvor mange af de senere portrætter viser den ældre, magtfulde Newton, møder vi i Knellers første portræt af Newton det unge geni, der netop har fået udgivet hovedværket *Principia*. Alle billeder er fra [1].

Newton var født i England 1642, to år før Ole Rømer. Vi kender ham mest som den store fysiker, se figur 1, der fandt tyngdeloven og lovene for kræfter, mekaniske kræfter. Med hans matematiske formler beregner vi den dag i dag planeternes bevægelser om Solen og i det hele taget alle kræfter i maskiner på Jorden og i Universet. Newtons love blev grundlag for

den tekniske og videnskabelige revolution, vi har set siden hans tid for 300 år siden.



Figur 2. Newtons tegning og et eksemplar af den kikkert, som han konstruerede.

Jeg har for nylig læst en stor bog [1] om Newton skrevet af Carl Henrik Koch, videnskabshistoriker og docent i filosofi ved Københavns Universitet. Det er en bog for interesserede, altså ikke specielt for fagfolk af den ene eller anden slags. Den fortæller om Newtons matematik og fysik og om hans arbejde med alkymi og med bibelen, og de to sidste emner brugte han meget mere tid på end på matematik og fysik, så derfor står de først i titlen på mit indlæg.

Koch har også skrevet en meget fin bog [2] om Leonardo da Vinci, som jeg har fornøjet mig med for nylig. Men nu til Isaac Newton, måske den største fysiker nogensinde.

Fysik og matematik

Newton var en enestående begavelse, 19 år gammel blev han i 1661 Fellow ved Trinity College i Cambridge,

¹En stor tak for kommentarer til et udkast modtaget fra Jens Olaf Pepke Pedersen og fra stud.theol. Niels Nicolajsen Geil.

hvor han boede til 1696. Allerede 24–25 år gammel var han meget produktiv, se figur 2-5. I disse to år under pesten boede han i sit fødehjem. Han opfandt og byggede en spejlkikkert, men mente ikke, det havde nogen betydning. Han opdagede lysets spektrum, at hvidt lys kan spaltes i flere farver. Han udviklede en ny matematik, differential- og integralregning, som var egnet til beregninger med variable størrelser, og som kom til at spille en enorm rolle i matematik og fysik. Han tænkte over tyngdekraften, at den måske nåede op til Månen. Han udviklede mekanik og dynamik, altså læren om legemers bevægelse.



Figur 3. Sollyset sendes gennem et prisme, og et spektrum ses på væggen.

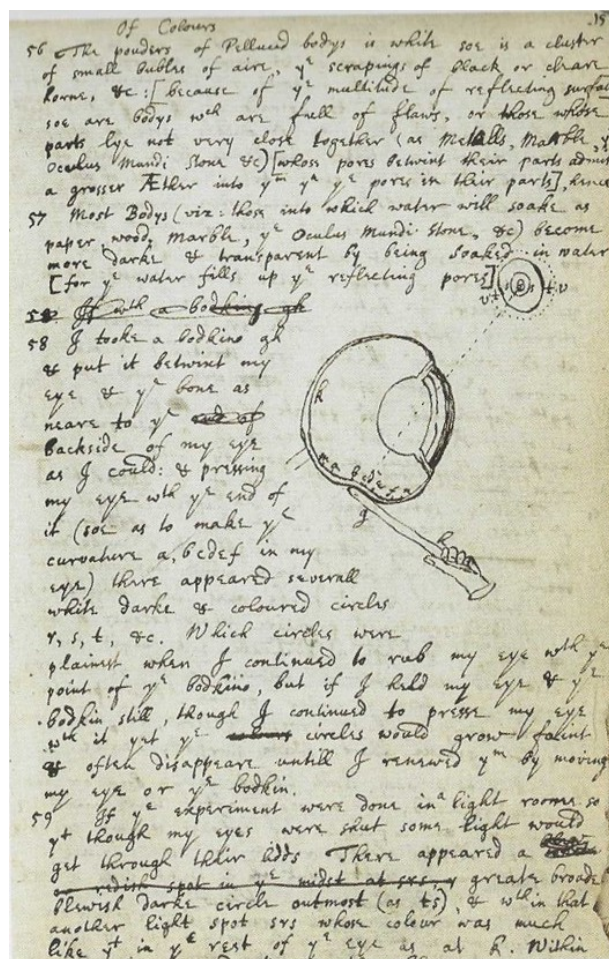
Han skrev om alt i sine notesbøger med en letlæselig håndskrift, se figur 4, men han publicerede nødigt. Man kunne publicere i *Royal Society Transactions*, og han tillod andre at meddele, hvad han havde opdaget, men det skulle være uden hans navn. “For hvad nytte er det til at vinde almen agtelse? Det ville måske udvide min bekendtskabskreds, men det ville jo bare tage af min tid til at studere”. Alligevel gjorde han sin ejendomsret gældende til sine opdagelser og nævnte aldrig, hvem han havde lært af. Han var virkelig en meget vanskelig og uomgængelig person.

Vi kender Newton især for hans store bog *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, kaldet *Principia*, som han skrev på under to år og udgav, se figur 6, da han var 45, efter stærkt pres fra astronomen Edmond Halley (1656–1742). Værket indeholder den matematiske beskrivelse af love for kræfter og bevægelse, der blev grundlag for den naturvidenskabelige og tekniske revolution, som fulgte.

Teologi

Principia er det værk, vi husker Newton for, men det var en mindre sag for ham, idet han kun brugte kort tid på den. *Principia* var imidlertid for ham et teologisk projekt, idet naturlovene afslørede Guds orden i skaberværket. Det vigtigste for ham selv var teologi, studiet af bibelen og selve kristendommen. Han var selvfølgelig en troende kristen, som alle på den tid, hvor alt var gennemsyret af kristendom og kirken. Efter de to år, *anni mirabiles*, 1665–67 med store opdagelser i fysik og matematik gik han igen over til indgående studium af mange teologiske emner, og han efterlod

sig en million skrevne ord derom. Jeg vil trække et enkelt emne frem, spørgsmålet om Treenigheden, om Kristi guddommelige natur. Jeg tror det siger et nutidigt menneske mest, hvad jeg har fået bekræftet i samtaler om denne artikel.

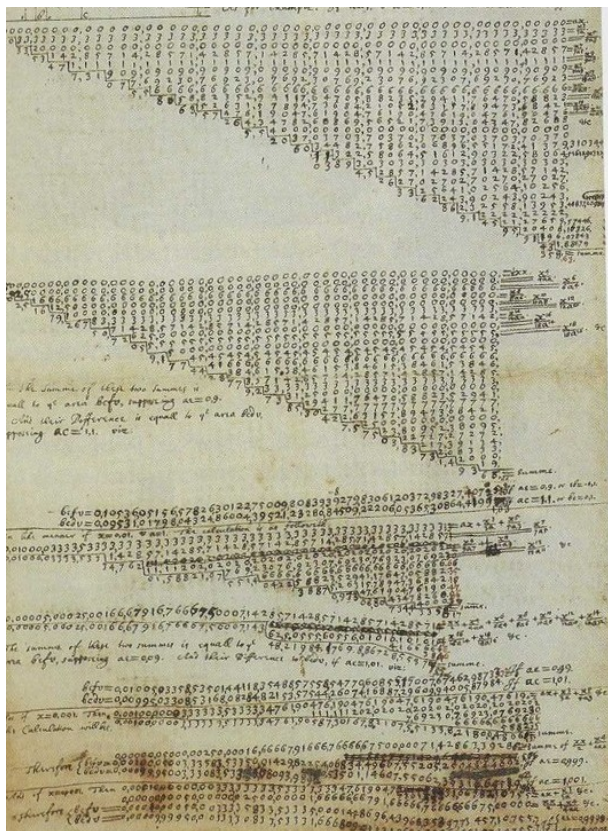


Figur 4. I sin Trinity-notesbog fra midten af 1660'erne redegør Newton for et optisk eksperiment, i hvilket han beskriver sit synsindtryk, mens han presser øjeblikket med en stift.

Om Newtons teologiske interesser citerer jeg fra [1] s. 283:

“I en vis forstand var alt, hvad Newton beskæftigede sig med, teologi. I sine naturvidenskabelige værker, som han efterlod, søgte han at afsløre guddommens stadige indgriben i den fysiske verden og i historien. Grundtvig talte om, at “den Eviges Finger” eller “Guds Finger” kan anes i historien, og at menneskeheden historie munder ud i en genrejsning af det faldne menneske. Newton fandt ikke alene guddommens finger i historien, men også i den fysiske verden. Opretholdelsen af verden, dens fortsatte eksistens og de fundamentale naturloves almene gyldighed er udtryk for guddommens vilje, og i det øjeblik han vil verdens undergang, går den til grunde. I mere end 60 år var Newton optaget af at tolke profetierne i Daniels Bog fra Det Gamle Testamente og i Johannes’ Åbenbaring fra Det Nye. Som mange andre i samtiden forventede han tusindårsrigets komme og omtalte sin samtid som de sidste tider. Hans beskæftigelse med kirkehistorie og med verdenskronologien må ses i denne sammenhæng.

... Især var Johannes' Åbenbaring vigtig for ham, og han opfattede igennem hele sit voksenliv denne del af Bibelen som dens væsentligste. ... Mirakler var for Newton ikke nødvendigvis brud på naturens vante gang, men også selve den vante gang var et mirakel. ..."

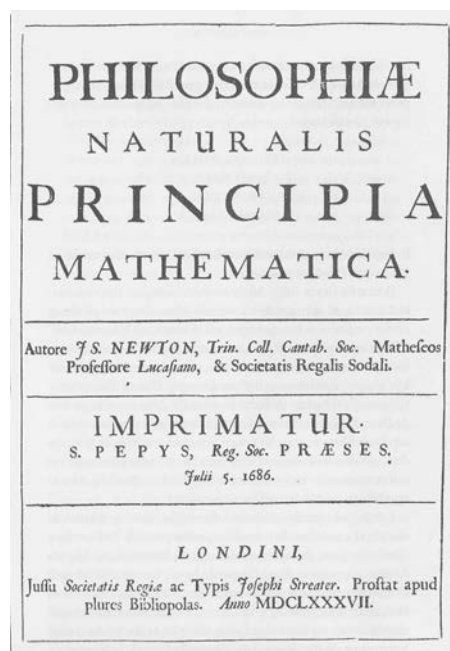


Figur 5. Newtons beregninger fra midten af 1660'erne af op til 55-cifrede logaritmer. Logaritmer blev opfundet i begyndelsen af det 17. århundrede og indebar en uhyre lettelse af beregninger, idet multiplikation og division erstattedes af addition og subtraktion.

"Jeg taler her om Newtons teologi og ikke om hans religion. Vi ved, hvilke egenskaber Newton tillagde det guddommelige, men ikke hvordan han inderst inde selv forholdt sig til de sandheder, han fandt i den kristne religions grundlæggende skrifter. ... Sin gud beskrev han på følgende måde i anden udgave af *Principia* fra 1713: Han råder over alting – ikke som en verdenssjæl, men som en hersker over alt. Og på grund af herredømmet kaldes han Gud Herren, eneherskeren. ... osv. osv."

Videre på s. 287: "Newton var en yderst bibelkyndig herre. ... Af de 1752 værker, som omfatter Newtons bibliotek, var de 477 teologiske værker (til sammenligning var 126 matematiske og kun 57 fysiske), og af disse var 31 bibler og udgaver af testamenterne på engelsk, latin, græsk, hebraisk og syrisk. Hertil kom, at han også synes at have studeret de gamle bibelmanuskripter, der på hans tid befandt sig i Cambridge. ... Der er ingen tvivl om, at Newton så sig selv som et menneske, der ved guddommens forsyn var bestemt til at afsløre sandheden om den skabte verden. ... Newton afbrød ikke sine fysiske og matematiske studier for at beskæftige sig med teologi, men afbrød snarere sin livslange beskæftigelse med teologi, alkymi og kronologi for i kortere perioder at kaste sig over matematiske og naturvidenskabelige studier."

Men nu til læren om Treenigheden. Newton [3] mente, at denne lære var en forvanskning af kristendommen, noget som ikke var nævnt i de ældste bibelske skrifter. Han troede ikke på treenigheden af Gud, Kristus og Helligånden. Han var antitrinitar og mente, at Kristus var skabt af Gud som budbringer til menneskene. Han var streng monoteist.



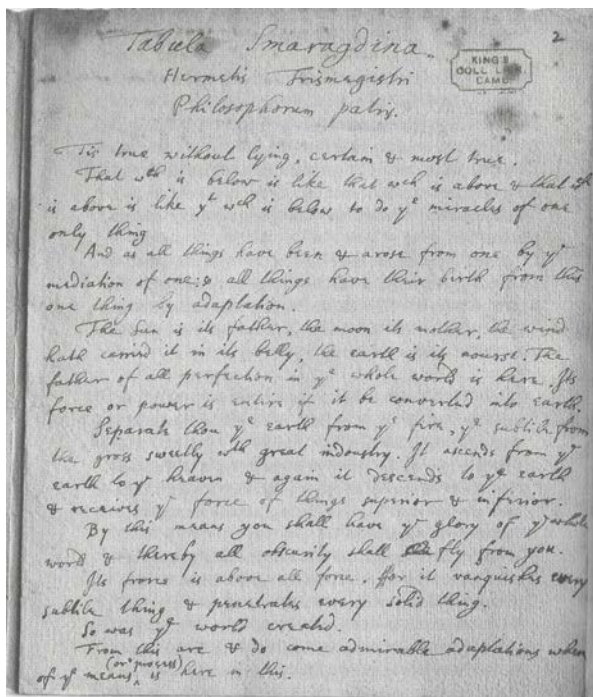
Figur 6. Titelbladet af Newtons hovedværk, kort kaldet: *Principia*.

Han holdt sine antitrinitariske synspunkter skjult i offentligheden, for de kunne have kostet ham alt i den tids England. Vi husker, at kongen Charles den 1. blev henrettet under Cromwell i 1649. Han blev henrettet som følge af borgerkrigen og sin konflikt med Parlamentet — mistanken om katolsk sympati forværede konflikten, men var ikke den officielle årsag.

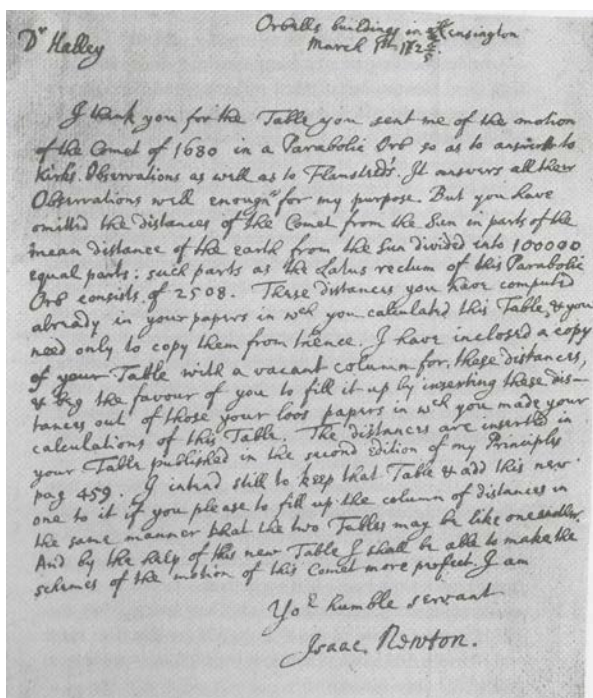
Newton blev ved kongelig dispensation fritaget for at skrive under på den anglikanske kirkes 39 trosartikler, hvad der ellers var hans pligt som Fellow på Trinity College. Han nægtede på sit dødsleje at modtage den anglikanske kirkes sakramente [3], hvilket stemmer med hans antitrinitariske tro, men de historiske kilder er ikke entydige.

Troen på Treenigheden er helt central for kristne. Den første formulering, som ikke fremgår af Bibelen, blev givet af Tertullian fra Karthago omkring 200, og den var: Gud er én substans og tre personer. Et grundlag for læren om Treenigheden blev vedtaget af den katolske kirke ved koncilet i Nikæa i 325. Kejser Konstantin appellerede personligt til biskop Alexander og præsten Arius om, at de skulle komme til enighed om forholdet mellem Gud og Jesus Kristus. Da det ikke lykkedes, og han så, at striden også udviklede sig i befolkningen på en sådan måde, at han anså rigets stabilitet i fare, indkaldte han til et almindeligt koncil i Nikæa ved Konstantinopel.

Der samledes omkring 300 biskopper og mange præster, og efter en måned med oprevne diskussioner satte Alexanders positioner sig igennem mod Arius' tilhængere, arianerne.



Figur 7. Newtons gengivelse af og kommentar til indholdet af en central alkymistisk tekst kaldet Smaragdtavlen. Denne tekst spillede en betydelig rolle i renæssancen og ansås for at være så gammel som Moses, men den er kun fra det 1. århundrede.



Figur 8. I forbindelse med sit arbejde med tredje udgave af Principia skrev Newton 1. marts 1725 til Halley for at få oplyst nogle afstande mellem Solen og den komet, der var blevet observeret i 1680. Hverken håndskriften eller brevet indhold viser tegn på alderdomssvækkelse.

Hovedemnet for konciliet var arianismen, opkaldt efter Arius. Hans tilhængere kaldtes arianere. Arianerne hævdede, at Sønnen var *skabt* af Faderen og derfor hverken lig med Ham, evig eller guddommelig af væsen. Arianismen blev fordømt af konciliet, der besluttede, at Kristus var *født af Faderen og af samme*

væsen, på græsk: homoousios. Indvendingen mod Arius var, at når han anså Jesus for *skabt*, berøvede han menneskeheden *Frelseren*, Gud der led døden for vores skyld.

Men det varede længe før arianismen forsvandt. Kirken gjorde alt for at udrydde sporene af Arius og hans tro. Hans skrifter blev brændt, og der var dødsstraf for besiddelse af dem. Tilhængerne blev anset for kættere. Der findes også nu om dage trossamfund, der ikke anerkender Treenigheden, og trinitarerne regner dem ikke for at være kristne.

Alkymi

Newton brugte mange af sine mest produktive år på alkymien og efterlod en vældig alkymistisk tekstmængde. Hans formål med disse studier var at videnskabeliggøre alkymien for derved at kunne undersøge om de aktive kræfter, som alkymien opererede med, kunne inddrages i hans verdenssystem, se figur 7. Newton ville ikke "bare" lave guld, som alkymister jo ellers ville.

Slutning

Newton var præsident for Royal Society i 24 år, han var en effektiv inspektør for den kongelige mønt og stod for en stor møntombygning 1695-98. Han døde 1727 i sit 84. leveår og blev bisat i Westminster Abbey, æret af alle. Han bevarede sin åndskraft til det sidste, se figur 8.

Det er skønt, vi har bøger om historiske personer på dansk som denne af Carl Henrik Koch. Dem læser jeg hellere end historiske romaner, hvor en forfatter bruger sin fantasi til at pynte på historien. Koch er kun optaget af at skrive om den historiske person, som han virkelig var, så vidt vi overhovedet kan forstå det over et tidsrum af 300 år. Newton var et barn af sin tid, og det ser vi tydeligt i hans interesse for alkymi og teologi. Det var han også i fysikken, for der var meget i gang i 1600-tallet, tænk på Galilei, Kepler, Descartes, Huygens, Rømer og Leibnitz, men i fysik nåede hans geni at skabe noget, der har fuld gyldighed i vore dage og i al fremtid.

Litteratur

- [1] C. H. Koch (2013) "Isaac Newton – Geniet og mennesket", Lindhardt og Ringhof Forlag.
- [2] C. H. Koch (2019) "Leonardos Univers – Naturfilosofi, kunst og videnskab", Lindhardt og Ringhof Forlag.
- [3] Isaac Newton i Den Store Danske Encyklopædi (1999) bind 14, side 142.



Erik Høg er dr.scient. i astronomi. Han har arbejdet ved Hamborg Observatoriet 1958–73 og ved Københavns Universitet 1953–58 og 1973–2002, hvor han gik på pension. Han har især arbejdet med måling af positioner, bevægelser og afstande af stjerner med højest mulig præcision, fra Jorden og med to satellitter, Hipparcos og Roemer/Gaia. En efterfølger til Gaia til opsendelse i 2045 er på vej.

Grøn brint

Henrik Stiesdal

Grøn brint bliver et centralt element i den grønne omstilling, fordi den muliggør anvendelsen af vedvarende energi i sektorer, der ikke kan elektrificeres direkte, såsom tung transport og højtemperaturindustri. Brint produceres via elektrolyse drevet af grøn strøm og fungerer som en fleksibel energibærer med bred anvendelighed, fra stålproduktion til syntese af metanol og ammoniak. Artiklen gennemgår de tre dominerende elektrolyseteknologier – alkalisk, PEM og SOEC – samt deres effektivitet, materialekrav og driftsforhold. Endelig belyses brintens potentiale for at erstatte både grå brint og fossile brændsler, hvilket kan reducere globale CO₂-udledninger markant og placere Danmark som en vigtig producent i fremtidens energisystem.

Grøn brint spiller en stor rolle i den energiomstilling, vi har foran os.

I energiomstillingen gælder den fundamentale regel, at alt, hvad der kan elektrificeres, skal elektrificeres. Elektrificering er den simpleste, mest effektive og billigste måde at bruge vedvarende energi på.

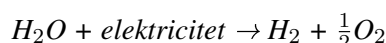
Selvom den foretrukne energiform er elektricitet, er der stadig store dele af samfundet, som ikke umiddelbart kan elektrificeres. Det gælder navnlig dele af transportsektoren, højtemperaturprocesser i industrien m.v. Hvis man skal gå fra grøn strøm til andre produkter end el og varme, er der kun én vej: produktion af brint ved elektrolyse. Brint er den eneste vektor fra grøn strøm til andre produkter.

Grøn brint er naturligvis ikke en energikilde i sig selv, men en energibærer. Man kan tænke på brint som en teknologi, der gør det muligt at transportere og anvende grøn strøm i sektorer, hvor direkte elektrificering ikke er mulig eller praktisk.

Elektrolyse af vand

Grøn brint fremstilles ved elektrolyse af vand. Ved

hjælp af elektricitet fra vedvarende energi spaltes vand (H₂O) til brint (H₂) og ilt (O₂):



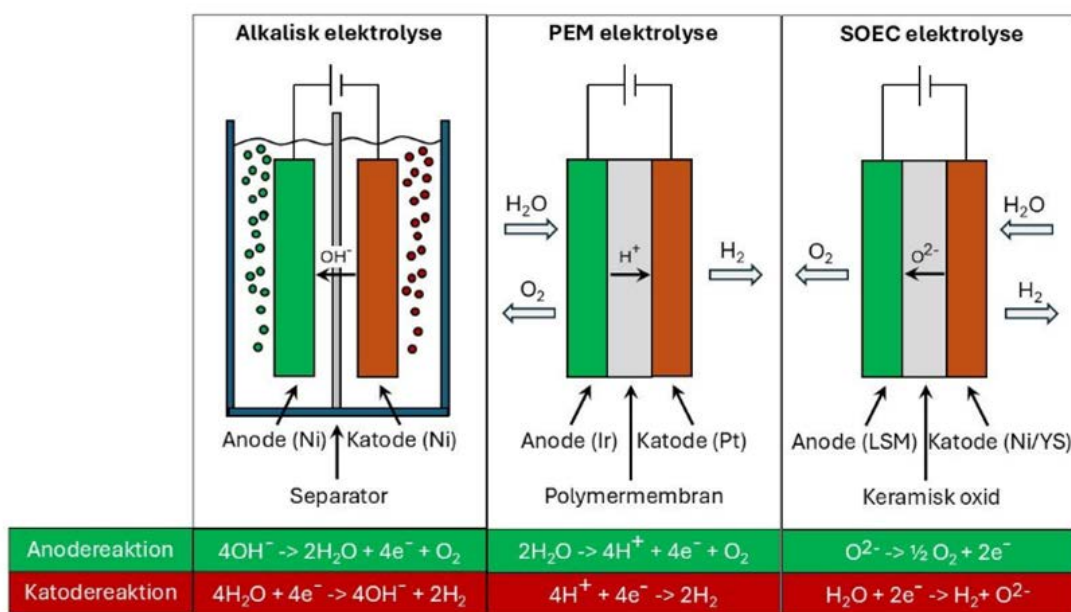
Rent praktisk foregår brintproduktionen i et elektrolyseapparat. Her samles en lang række elektrolyseceller i en stak, der typisk består af flere hundrede celler og forsynes med jævnstrøm fra en ensretter.

Hver celle består af en katode og en anode, adskilt af en separator. Brinten dannes ved katoden, mens ilt dannes ved anoden. Separatoren gør det muligt for ioner at bevæge sig mellem elektroderne og forhindrer samtidig, at brint og ilt blandes.

Når elektrolyseprocessen drives af vedvarende energi, er brintproduktionen næsten CO₂-fri. De mindre emissioner stammer fra produktionen af de vedvarende energikilder og fra fremstillingen af selve elektrolyseanlægget.

Tre elektrolyseteknologier

I brintindustrien anvendes tre forskellige elektrolyseteknologier.



Figur 1. De tre almindelige typer af elektrolyse.

Alkalisk elektrolyse foregår i en vandig opløsning af kaliumhydroxid (KOH) ved temperaturer mellem 60 og 90 °C. Systemet består af to elektroder adskilt af en porøs separator. Hydroxidioner (OH^-) bevæger sig fra katoden til anoden gennem separatore, der normalt er fremstillet af polysulfon. Elektroderne er oftest baseret på nikkel eller fornicket stål.

Alkalisk elektrolyse er den ældste og mest gennemprøvede teknologi. Den har været i brug i over 100 år. Materialerne er relativt billige og har god holdbarhed. Ulemperne er primært begrænset fleksibilitet ved dynamisk drift. Derfor slukker man normalt for alkaliske elektrolyseapparater, når strømmen når under 15-20% af mærkestrømmen.

PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolyse anvender en sur, fast elektrolytmembran, som tillader protontransport, men er impermeabel for gasser. Vand tilføres på anodesiden, hvor det spaltes til ilt, protoner og elektroner. Protonerne transporteres gennem membranen til katodesiden, hvor de reduceres til brint.

PEM-elektrolyse har hurtig responstid og er godt egnet til dynamisk drift. Den største ulempe er materialekravene. Anodematerialet er næsten altid iridiumoxid, og iridium er et virkelig sjældent metal med en pris i omegnen af en million kr. pr. kg, sammenlignet med ca. 100 kr. pr. kg for nikkel.

SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) adskiller sig fra de øvrige ved at fungere ved høje temperaturer, normalt 600–800 °C. Fordelen er, at virkningsgraden kan blive meget høj, fordi de elektrokemiske reaktioner foregår meget villigt ved høj temperatur. SOEC-elektrolyse egner sig derfor primært til anvendelse, hvor man har adgang til spildvarme ved høj temperatur.

De tre teknologier adskiller sig grundlæggende i driftsbetingelser, materialer og anvendelsesområder. Her i Europa og også i Kina, som er det førende land på produktion af grøn brint, er alkalisk elektrolyse dominerende.

Strømme, spændinger og virkningsgrader

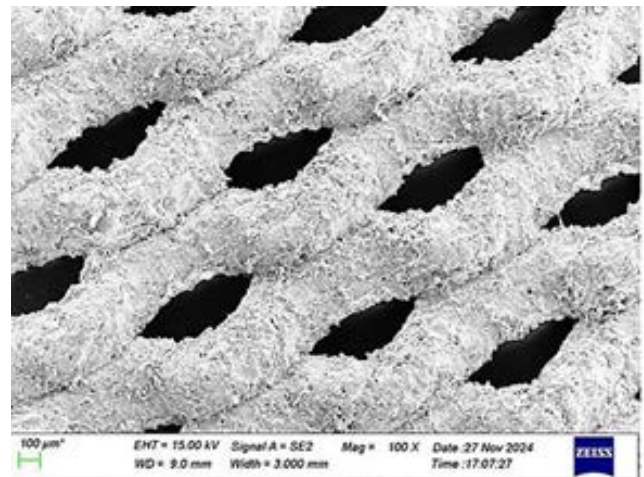
I elektrolyseprocessen opererer vi med et startpotentiale på 1,23 V. Det er den spænding, der skal til for at få processen til at forløbe. Hvis vi påtrykker elektroderne en spændingsforskel, der er lavere end 1,23 V, sker der ikke noget. Selv ved en spænding lige over 1,23 V sker der meget lidt, og man regner normalt med, at 1,48 V er den laveste spænding, som giver en egentlig produktion af brint.

Det kræver 39,4 kWh at producere 1 kg brint ved 1,48 V. I praksis skal vi imidlertid noget højere op i spænding for at få en rimelig strømstyrke. Årsagen er, at der er flere forskellige, strømafhængige spændingsfald i systemet: aktiveringsoverspænding ved elektroderne, ohmsk modstand i elektroderne og elektrolytten, og bidrag fra ikke-optimale fysiske forhold, fx maskering af de aktive overflader af gasbobler.

I et typisk kommercielt elektrolyseapparat er strømtætheden 220 mA/cm². Ved denne strømtæthed er elektrodespændingen typisk 1,84 V for konventionelle elektroder. Det giver en celle-virkningsgrad på 1,48 V / 1,84 V = 80%. De 20%, der tabes, går til opvarmning af

elektrolytten.

Ved at udvikle bedre elektrodeoverflader kan man forbedre virkningsgraden betydeligt. Ved at belægge nikkelelektroder med Raney-nikkel, som er en særligt porøs form for nikkel med et overfladeareal, der kan være op til 1000 gange større end det projicerede areal, kan man opnå cellespændinger helt ned til 1,63 V ved 220 mA/cm², svarende til en cellevirkningsgrad på 90%.



Figur 2. Scanning-elektronmikroskopi af overfladen af en elektrode udført med Raney-nikkel. Det aktive areal er ca. 1000 gange større end det projicerede areal.

Cellevirkningsgraden har den største betydning for den samlede virkningsgrad, men der er andre faktorer som tab i strømforsyning og kabler og effekt til pumper og køleblæsere. Man regner normalt med, at der skal fratrækkes yderligere 5%, så et system med en cellevirkningsgrad på 80% har en samlet virkningsgrad på 75%.

Tryksætning

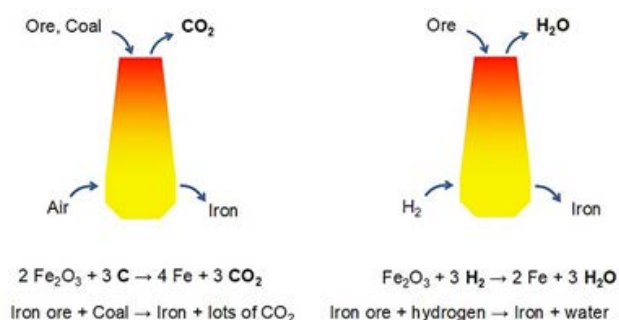
Man kan med fordel producere brinten under tryk for at mindske behovet for efterfølgende kompression. Fordelen er, at det stort set ikke koster noget at sætte tryk på fødevandet, som i processen omdannes til brint og ilt, mens det koster en del at skulle komprimere gassen bagefter. Ved tryksætning opererer man normalt med en øvre grænse på 35 bar. Årsagen er, at ilten, som uundgåeligt følger brinten i tryk, helst ikke skal for meget højere op. Efter 40 bar begynder ilt at blive rigtig farligt, fordi der lettere sker selvantændelse.

Anvendelse af grøn brint

Grøn brint har mange anvendelser. Den vigtigste er at erstatte den såkaldte grå brint, som er brint fremstillet ud fra naturgas. Verden bruger i dag omkring 100 millioner tons grå brint årligt, primært i raffinaderier, til gødningsproduktion og i den kemiske industri. Ved fremstilling af grå brint udledes 11 til 14 kg CO₂ pr. kg brint, så alene ved at erstatte den eksisterende grå brint kan vi reducere den årlige CO₂-udledning med over en milliard ton.

Dernæst kommer nye anvendelser som erstatning for fossile brændsler. Den vigtigste er formentlig at erstatte

kul med brint i stålproduktionen. I stålproduktion fjernes ilten fra jernmalmen ved opvarmning i en højovn, hvor malmen er blandet med kul. Resultatet bliver rent jern og kuldioxid, CO_2 , som biprodukt. Udledningerne fra stålproduktion udgør omtrent 7 procent af de samlede CO_2 -udledninger globalt.



Figur 3. Traditionel udvinding af jernmalm sammenlignet med en grøn brintbaseret proces.

Brint har ligesom kulstof en højere affinitet til ilt end jern, så hvis man erstatter kullet i processen med brint, dannes der rent jern og vand, H_2O , som biprodukt. Denne metode, som man kalder direkte reduktion med brint, er teknisk gennemprøvet og afprøves nu i fuld skala i blandt andet Sverige og Tyskland. Hvis teknologien udbredes bredt og drives med vedvarende energi, kan den reducere de samlede årlige globale udledninger med op til 6–7 procent, svarende til over 2 milliarder ton CO_2 .

Grøn brint kan også kombineres med grønt kulstof fra planter til at fremstille metanol, som er en vigtig bestanddel i den kemiske industri. Metanol er desuden en af kandidaterne til fremtidens skibsbrændstoffer, og Mærsk har allerede 25 metanoldrevne skibe enten i drift eller i ordre.

Ammoniak er en anden kandidat til fremtidens skibsbrændstof. I forhold til metanol har ammoniak den store fordel, at det med et molekyle, der alene

består af brint og kvælstof, ikke kræver grønt kulstof. Ammoniak har til gengæld den ulempe, at det er giftigt. På skibe arrangerer man derfor brændstofsyste med dobbeltrør, så lækager opdages af ammoniaksensorer, før der opstår risiko for forgiftning i maskinrummet.

Endelig kan grøn brint anvendes til energilagring. Et af de store problemer ved sol og vind er, at produktionen ikke altid passer med forbruget. Her kan brint bruges til at lagre energi. Når der er overskud af strøm, produceres brint, og når der senere opstår mangel, kan brinten bruges til at generere strøm igen. Selve lagringen kan ske i gasform, for eksempel i gaslagre, eller i flydende form efter konvertering til ammoniak.

Konklusion

Produktionen af grøn brint er stadig begrænset, men mange lande har store planer. Danmark har med sine meget store vindressourcer en særlig god position til at producere grøn brint og blive eksportør til resten af Europa.

Sammenfattende er grøn brint ikke en mirakelløsning, men et vigtigt supplement i den grønne omstilling. Den kan især gøre det muligt at anvende vedvarende energi til at nedbringe udledningerne fra sektorer, hvor det ellers er meget vanskeligt – navnlig i tung industri og tung transport.



Henrik Stiesdal er grundlægger af samt teknisk direktør for firmaet Stiesdal. Han byggede den første testvindmølle i 1976 og solgte licensen til et kommercielt design til Vestas i 1979, hvilket kickstartede den moderne vindindustri. Teknisk chef hos Bonus Energy fra 1988 og senere CTO for Siemens Wind Power 2004–2014. Installerede verdens første havvindmøllepark i 1991.

Kvants hjemmeside



Kvant har i løbet af året fået ny hjemmeside, idet den gamle efterhånden var meget ustabil og havde flere funktioner, som ikke længere fungerede. Hjemmesiden findes fortsat på adressen www.kvant.dk og er udviklet af Louise Kindt fra DTU Fysik og KU Matematik.

Louise Kindt er samtidig indtrådt i Kvants redaktion som digital redaktør, hvor hun bl.a. har arbejdet med

at gøre alle udgaverne af Kvant siden starten i 1990 tilgængelige på hjemmesiden kvant.medlemsbladet.dk. Der er fri adgang til alle udgaver bortset fra de numre, som er udkommet inden for det seneste år.

De nyeste numre kræver et medlemslogin, som vi arbejder på at etablere, og når det er klart, vil vi annoncere det på hjemmesiden www.kvant.dk. Allerede nu har medlemmer af DFS dog adgang med deres login til DFS.

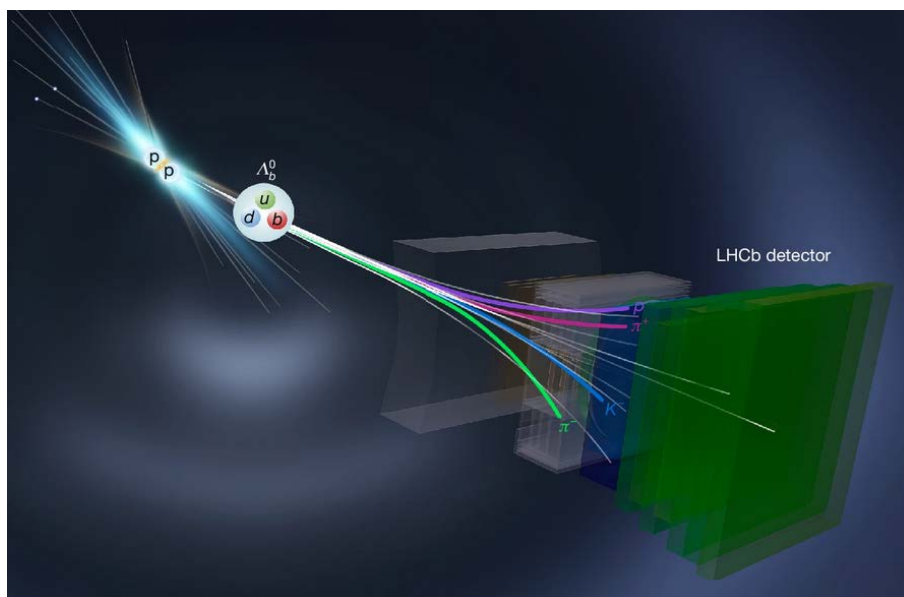
I samarbejde med Det Kongelige Bibliotek arbejder vi desuden på at gøre Kvant tilgængeligt via hjemmesiden Tidsskrift.dk.

Perioden med en ustabil hjemmeside har desværre også betydet, at nogle mails sendt til kvant@kvant.dk ikke er nået frem. Så hvis du har henvendt dig på mailadressen, og der er gået usædvanlig lang tid uden svar, opfordres du til at sende mailen igen.

Large Hadron Collider beauty (LHCb) eksperimentet: CP-brud i baryoner

Lars Eklund og Patrik Adlarson, Institutionen för Fysik och Astronomi, Uppsala Universitet

LHCb-eksperimentet ved CERN har for første gang observeret forskelle mellem stof og antistof i henfald af partikler, der består af tre kvarker – såkaldte baryoner. Dette er en vigtig milepæl i udforskningen af forskellen mellem stof og antistof, som sigter mod at forstå, hvorfor universet næsten udelukkende består af stof.



Figur 1. Til den CP-brydende måling blev baryonen Λ_b^0 skabt gennem højenergetiske proton-proton-kollisioner, hvorefter den henfaldt til elektrisk ladede partikler – en proton, en kaon og to pioner – som måles og rekonstrueres i LHCb-detektoren. Figuren er modificeret fra [1].

Ifølge kosmologiens standardmodel blev der skabt lige store mængder stof og antistof ved Big Bang, og når de mødtes, annihilerede de hinanden. Hvis mængderne havde været helt identiske, ville alt være blevet annihileret; men en lille rest af stof blev tilbage – kimen til nutidens galakser, stjerner, planeter og biologisk liv.

De fleste fysikere antager, at en endnu ukendt mekanisme i det tidlige univers skabte det overskud af stof, der findes i dag. Selvom detaljerne er ukendte, ved vi, at tre grundlæggende kriterier skal være opfyldte. Ét af dem er, at der findes processer, der bryder *CP-symmetrien*. En *CP-symmetrisk* proces indebærer, at fysikkens love er de samme, hvis man erstatter en partikel med dens antipartikel (*fra engelsk: C, charge conjugation*) samtidig med, at man spejlvender rummet (*P, parity*).

Standardmodellen for elementarpartikelfysik indeholder en mekanisme, der bryder *CP-symmetrien* ved overgange mellem forskellige kvarktyper gennem den svage vekselvirkning. Kvarker findes i seks varianter:

up, down, charm, strange, top og bottom. Mekanismen beskrives af en 3×3 kompleks matrix (CKM-matricen), hvis elementer angiver sandsynlighederne for et kvark-flavourskifte, men som også introducerer en kompleks fase i amplituden. Det er denne fase, der gennem kvantemekanisk interferens er ansvarlig for CP-symmetribruddet i standardmodellen.¹

At der eksisterer processer i naturen, som bryder CP-symmetrien, blev opdaget i 1964 i henfald af mesoner – partikler bestående af kvark-antikvarkpar – der indeholder strange-kvarker. Siden da er CP-brud blevet yderligere bekræftet i henfald af bottom-mesoner² i 2001 i eksperimenter ved BaBar (ved SLAC i USA) Belle (Japan) og charm-mesoner³ i 2019 ved LHCb. CP-symmetribrud er målt med høj præcision i mange henfald, og resultaterne stemmer overens med forudsigelserne fra CKM-mekanismen. Men da CKM-mekanismen kun kan forklare en brøkdel af universets samlede stof-antistof-asymmetri, må der findes flere bidragende mekanismer. En måde at søge efter sådanne

¹Der findes en lignende mekanisme for neutrinoer, men indtil videre har man ikke kunnet bekræfte, at den komplekse fase i neutrino-sektoren er forskellig fra nul.

²Mesoner med to kvarker, hvor den ene kvark er en bottom-kvark eller en anti-bottom-kvark.

³Mesoner med to kvarker, hvor den ene kvark er en charm-kvark eller en anti-charm-kvark

nye mekanismer på er at måle afvigelser fra CP-symmetrien og sammenligne dem med forudsigelserne fra CKM-modellen. LHCb-eksperimentet ved LHC i Genève har et omfattende program af præcisionsstudier af CP-symmetri, og experimentet offentliggjorde for nylig [1] opdagelsen af CP-symmetribrud i henfald af baryoner – partikler, ligesom protonen og neutronen, der består af tre kvarker.

Opdagelsen blev gjort ved at studere bottom-baryonen Λ_b^0 , som består af en up-, en down- og en bottom-kvark, samt dens antipartikel $\bar{\Lambda}_b^0$. Den tunge og relativt kortlivede baryon henfalder til mere stabile partikelsystemer – i dette tilfælde $pK^-\pi^+\pi^-$ (se figur 1). Hvis CP-symmetrien er bevaret, skal henfaldskæden for Λ_b^0 og $\bar{\Lambda}_b^0$ forekomme lige hyppigt; men målingen viste, at Λ_b^0 -baryonen henfalder omkring 2,5 % oftere til sluttillstanden end sin antistof-modpart.

Antallet af registrerede Λ_b^0 - og $\bar{\Lambda}_b^0$ -henfald påvirkes også af mulige asymmetrier i produktionen af disse partikler og i detektion af deres henfald. Når der korrigeres for disse effekter i dataanalysen, er den statistiske signifikans af observationen 5,2 standardafvigelser. Nøjere studier viser, at kortlivede resonanser af andre partikler i henfaldet både kan øge og mindske CP-asymmetrien, fordi den kvantemekaniske interferens varierer mellem de forskellige henfaldsveje. LHCb har også undersøgt henfaldskanalerne $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$ og $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ (hvor J/ψ er en meson, der består af en charm-kvark og en anti-charm-kvark), som viser tegn på CP-symmetribrud med signifikans på hhv. 3,1 og 3,9 standardafvigelser, men der kræves mere data for endeligt at fastslå CP-brud i disse henfald.

LHCb befinder sig nu i sin tredje dataindsamlingspe-

riode med et planlagt produktionsstop i midten af 2026. Med de nyindsamlede datamængder fortsætter arbejdet med at forstå, hvad der skete ved universets fødsel, hvor stof og antistof gik hver sin vej.

Litteratur

- [1] LHCb Collaboration (2025) “Observation of charge-parity symmetry breaking in baryon decays”, *Nature*, bind **643**, side 1223–1228.



Lars Eklund er professor ved Institutionen för Fysik och Astronomi, Uppsala Universitet.



Patrik Adlarson er forsker ved Institutionen för Fysik och Astronomi, Uppsala Universitet.

Fra Skyhav til Stjernelys: Erfaringer fra NOT-sommerskolen på La Palma

Charlie Emil Lind-Thomsen, Niels Bohr Institutet

Artiklen præsenterer en beretning fra den observationelle sommerskole ved Det Nordiske Optiske Teleskop (NOT), hvor danske fysikstuderende opnår praktisk erfaring med planlægning og udførelse af astronomiske observationer. Forløbet omfatter både forberedende arbejde i København og fem nætters observationer på La Palma, herunder udvælgelse af mål, analyse af sigtbarhed, konstruktion af observationsblokke samt håndtering af kalibrationsdata og rådata. Artiklen skitserer centrale tekniske procedurer og læringsprocesser og fremhæver, hvordan opholdet giver indblik i observationsastronomiens metodik og arbejdskultur, herunder gruppens identifikation af en mulig lensed kvasar.

Forberedelserne i København

Hvert år afholdes en observationel sommerskole ved Det Nordiske Optiske Teleskop (NOT). Målet med sommerskolen er at give studerende i astrofysik ”hands-on” erfaring med brugen af teleskoper og alt, hvad der hører til.

Sommerskolen varer to uger. Først forbereder man de observationer, man gerne vil lave hjemme i Danmark, hvorefter man flyver til La Palma, hvor sommerskolen har hele fem nætters observationstid på NOT. I løbet af den sidste uge bliver man indført i alt, hvad der skal til – fra man opstarter NOT, til man sidder med et

reduceret datasæt i hånden.

I år havde jeg den store fornøjelse at deltage i sommerskolen sammen med 21 andre fysikstuderende fra hele Danmark. Sommerskolen fandt sted fra den 11. til den 23. august. Jeg var en del af en gruppe på fem andre studerende – stor tak til Ísól, Mark, Kaj, Fiona og William. Her følger en kort fortælling om vores oplevelser:



Figur 1. Det Nordiske Optiske Teleskop (NOT) på La Palma.

Den første uge brugte vi i Niels Bohr Bygningen i København, hvor vi først skulle finde ud af, hvad vi gerne ville observere. Vi havde nogle forskellige idéer, og planlagde i meget forskellige retninger: Nogle ville gerne observere den intergalaktiske komet 3I/Atlas, som skulle passere forbi en stjerne, mens vi var dernede, og andre ville tage flotte billeder af stjernehobe, galakser og planeter. Selv havde jeg arbejdet med lensede kvasarer i mit bachelorprojekt to måneder tidligere og havde derfor fundet nogle lensede kvasarkandidater, som jeg meget gerne ville undersøge nærmere. En lensede kvasar er et fænomen, hvor lyset fra en fjern kvasar bliver bøjet og forstærket af tyngdekraften fra et massivt objekt, typisk en galakse, der ligger mellem os og kvasaren.

Vi var inddelt i fire grupper, som hver havde omkring ni timers observationstid på NOT, fordelt over fire nætter. Hver gruppe havde altså én nat fri fra observationer.

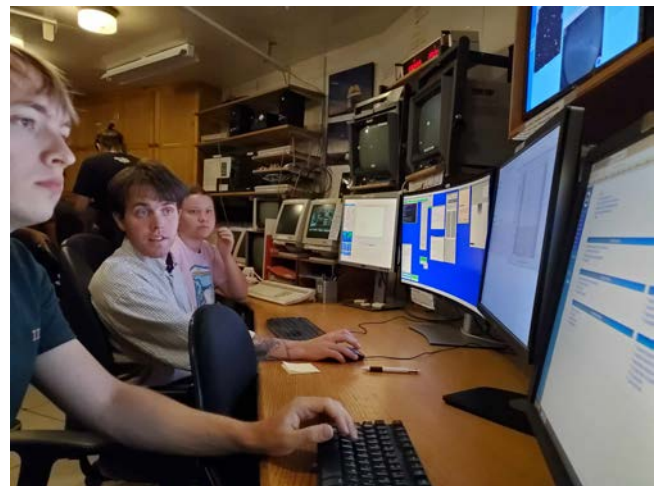


Figur 2. Teleskopet kigger ud gennem den øverste luge. Foto: Benjamin Godson.

I løbet af ugen skulle vi planlægge, hvordan vi bedst udnyttede den tid, vi havde til rådighed ud fra dogmet om ikke at spille den dyrebare teleskoptid!

Vi skulle kigge på visibility plots, som viser, hvornår et objekt på himlen befinder sig over horisonten i løbet af natten, og sammenligne dem med vores tider på teleskopet. Vi skulle vælge filtre, grismer og spalter, som er optisk udstyr, der udvælger specifikke bølglængder af lys til astrofysiske observationer, og samle det hele i en observationsblok. Det er en kode, man starter på teleskopet, som sørger for, at ens objekt bliver observeret som planlagt.

Og vi måtte for guds skyld ikke glemme finding chartet, som er et billede af nattehimmelen omkring objektet med en pil, der peger på det specifikke mål, så man kan finjustere teleskopet. Ej heller måtte vi glemme kalibrationsobservationer, som gør det muligt at fratrække støj og atmosfæriske effekter, og som gør det muligt at vide, hvilke bølglængder ens observationer svarer til. Ud over at planlægge vores observationer blev vi sat ind i forskellige praktiske og tekniske ting, som: Hvordan laver man observationsblokke? Hvad betyder sigtbarhed, fugtighed og støj for jordbaserede teleskoper? Hvad skal der til for, at man kan observere et objekt med NOT? Hvad gør man med de rådata, teleskopet indsamler?



Figur 3. Der er stor koncentration i kontrolrummet, når man er igang med at udføre observationer. Det helst skal gå hurtigt for ikke at spille den dyrebare observationstid. De mange skærme styrer forskellige dele af teleskopet og har forskelige informationer.

Den kursusansvarlige, Johan Fynbo, holdt små oplæg om disse emner, og i løbet af ugen blev vi endelig klar til at tage af sted mod La Palma!

Observationerne på La Palma

Vi mødtes ulideligt tidligt i lufthavnen lørdag den 16. august, klar til en hel dags rejse og fire nætters observationer på La Palma. Efter at man er brudt gennem skylaget på Roque de los Muchachos, ankommer man til NOT, hvor hele ni andre teleskoper også har deres hjem: det spanske Gran Telescopio Canarias, det britiske William Herschel Telescope, det italienske Telescopio Nazionale Galileo, det hollandske Jacobus Kapteyn Telescope, det svenske Swedish Solar Telescope, det

hollandske Dutch Open Telescope, det britiske Liverpool Telescope, det belgiske Mercator Telescope og MAGIC Telescopes, et gamma-ray-teleskop.

Og hvilket syn er ikke dette fantastiske bjerg, lige på grænsen til Atlanterhavet! En symbiose mellem natur og naturvidenskab mødes på klippetoppene, hvor teleskoperne pryder den vulkanske grund. Når man befinder sig over skylaget, føler man sig taget ud af den almene verden – svævende på en lille ø kun bestående af klipper, et skyhav og teleskopernes ensomme frem-spring. Men ingen af de naturskønne omgivelser slår det fænomen, som opstår, når solen er gået ned, og dens sidste stråler langsomt forsvinder. En nattehimmel uden lige begynder langsomt at tone frem. Resten af Mælkevejen buldrer af liv og stjerner, og teleskopernes spejle åbner denne om dagen lille og omsluttende verden ud imod det uendelige univers.

Det var i disse omgivelser, at min gruppe havde første observationsnat søndag. Vi var den første gruppe og skulle derfor starte teleskopet op. Det astronomiske tussmørke begyndte kl. 21.15, men før det skulle der tages diverse kalibrationsobservationer, og vi skulle sikre os, at alle grismer og filtre var tilgængelige. Ud over tre undervisere fra KU, SDU og AU var der i denne uge to studerende til stede på NOT for at hjælpe os: Kostas Valeckas og Roar Rasmussen. Uden disse to personer var der ingen tvivl om, at min gruppe på ingen måde ville have kunnet så meget som at åbne teleskopets kuppel. Med tålmodighed og kyndighed førte Roar og Kostace os gennem alle skridt, der skulle til for at udføre de nødvendige procedurer. De studerende er ansat på NOT mindst et år ad gangen.



Figur 4. Fra kontrolrummet i NOT umiddelbart efter, at de foreløbige data fra en observation er kommet op på skærmen. Det er tydeligt fra spektret, at der dels er flere objekter på skærmen (det er godt!), men også, at der er tale om kvasarer, som vi har ledt efter. Derfor det store smil!

I løbet af de næste fem nætter blev vi bedre og

bedre til at udføre de nødvendige procedurer, og vi fik observeret næsten samtlige af de planlagte objekter. Den cirka to og en halv times observationstid midt om natten fløj af sted.

Vi var fyldt med eufori over at indtaste kommandoer på den gamle TCS-computer, som var sort og grøn og absolut ikke måtte slukkes – og over at opholde os i NOTs kontrolrum, hvor hele rummet drejede, når man valgte sit target. Vi befandt os i et miljø, hvor den rene astronomi blev dyrket og nørdet i højeste gear.

I løbet af sådan en nat kunne man godt gå hen og slumre en smule i det varme kontrolrum, men så var det godt, at der efter hver observationsblok lød en høj alarm kaldet "astronomens vækkeur", hvor der stod "Vågn op og gør noget" på skærmen. Det andet, som kunne vække én i kontrolrummet, var hvis man fik en såkaldt "Target of Opportunity" – en funktion, som nogle astrofysikere kan aktivere, hvis de finder ud af, at nu skal dét objekt observeres, fordi der sker noget særligt. Det blev min gruppe udsat for et par gange, og det gik selvfølgelig ud over de observationer, vi selv havde planlagt, for natten blev jo ikke længere af den grund. Vi fik i hast aftalt, hvilke objekter vi så ikke nåede at observere alligevel.

Da klokken slog 02.38, blev det den næste gruppes tur, og det var med et tungt hjerte, at min gruppe og jeg begav os ned ad bjerget efter vores sidste observation. Dem af os, der ikke var alt for trætte oven på strabadserne, valgte at gå. Og her, med den tørre bjergluft omkring os, trætte hjerner, store smil, og hvad der føltes som fri adgang til det ekspanderende kosmos over os, forstod jeg hele idéen med, hvorfor vi dyrker astrofysik bedre end nogensinde.

Læring, resultater og refleksion

Og således vil jeg afslutte min fortælling om dette års NOT-sommerskole. Ugen på La Palma har uden tvivl været blandt de mest lærerige i mit liv. Jeg har ikke kun fået en dyb indsigt i, hvad det vil sige at lave astronomiske observationer – hvordan man helt konkret går fra en idé til et reduceret datasæt, hvordan man planlægger og strukturerer en observationsnat, og hvordan man samarbejder i en gruppe for at nå sine videnskabelige mål – men også hvor stærkt, varmt og velkomment et miljø, der findes inden for astronomi.

Tak til alle jer, der har gjort dette muligt!

PS: Jeg fandt mindst én *lensed kvasar*! Af den grund ses jeg meget glad på billedet med NOT-kasket og de rådata, som vi lige har observeret.



Charlie Emil Lind-Thomsen er studerende på Niels Bohr Institutet.

Mekaniske bølgeledere til informationsoverførsel

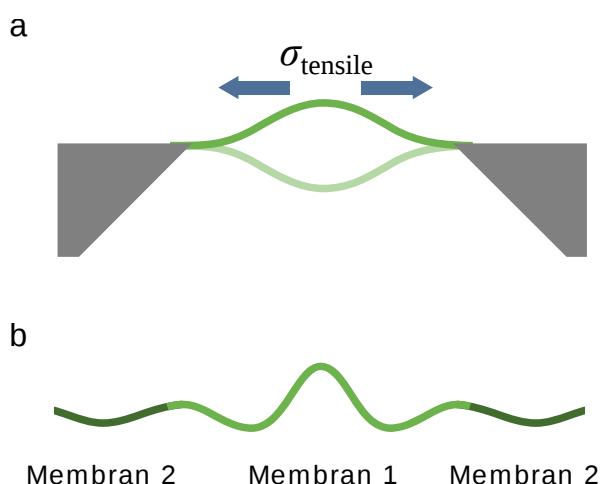
Ilia Chernobrovkin, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Artiklen beskriver udviklingen af en mekanisk bølgeleder på en chip, som kan transportere vibrationer næsten uden tab af energi. Ved at kombinere teknikker som dissipation dilution og soft clamping skabes ultrakoherente membraner, hvor friktion og bøjning minimeres. Inspireret af krystalstruktur og topologi konstrueres en fononisk krystal med en defekt, som leder mekaniske bølger langs en topologisk kanttilstand. Målinger viser ekstremt lave tab: ca. 3 dB/km og kun 0,01 % spredning ved hvert hjørne. Resultatet demonstrerer mekaniske bølgeledere med ydeevne på niveau med optiske fibre og åbner for nye teknologiske muligheder.

Mekaniske forbindelser

Når det kommer til praktiske anvendelser, har ethvert fysisk system sine fordele og ulemper. Det gælder også informationsoverførsel og beregning. I løbet af de sidste årtier har det teknologiske landskab fundet frem til to hovedmidler, der muliggør hurtig og effektiv transport: elektricitet og lys.

Der findes dog en anden måde at sende signaler på. Lyd eller, mere generelt, mekaniske bølger kan også bruges til at overføre energi og information. Man kunne argumentere for, at denne metode i dag er stort set forældet. Mekanisk energi kan let forringes, og dens udbredelseshastighed er mange størrelsesordener lavere end elektromagnetiske felter og elektriske strømme. Men den har en afgørende egenskab: Den kan effektivt kobles sammen med optiske og elektriske enheder. Sådanne mekaniske forbindelser kan potentielt formidle signaloverførsel fra en type system til en anden næsten uden tab. Og i skalaer med små computerchips betyder overgangshastigheden ikke så meget.



Figur 1. Skitser af de grundlæggende ideer bag (a) dissipation dilution og (b) soft clamping.

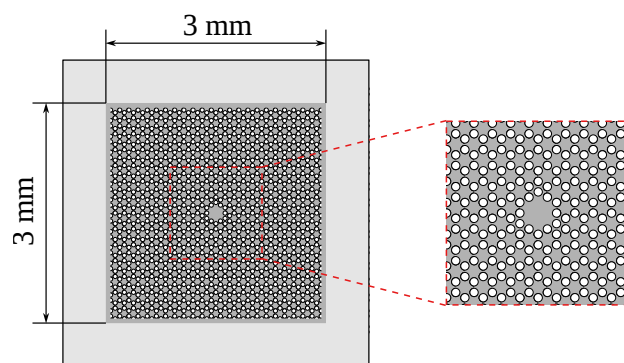
Dette bringer os til problemstillingen. Vi søger at udvikle en rent mekanisk enhed, der kan overføre et signal fra et punkt til et andet langs en bestemt bane uden tab af information. Vi designer en enhed med sådanne særlige egenskaber ved at kombinere mange forskellige ideer, der stammer fra forskellige områder inden for

fysik og ingeniørvidenskab, hvilket gør resultatet til et spændende og tværfagligt projekt.

Krystaller til fononer

Vi finder, at den mest egnede platform til at realisere en mekanisk bølgeleder synes at være en tynd firkantet membran. Man kan forestille sig den som en tromme. Når nogen slår på den, begynder den at vibrere, og vibrationerne producerer en lyd. Den lyd kan indeholde information, som uundgåeligt går tabt, så snart trommen bliver stille igen. Derfor søger vi at designe en membran, der kan vibrere så længe som muligt.

Som i mange andre mekaniske systemer lækker vibrationsenergien gennem friktion. Man kan forestille sig, at membranen består af mange sammenkoblede dele. Ideelt set bør de andre dele følge med, når vi trækker i en del. Desværre er det ikke tilfældet i virkelige systemer. Når nogle dele af membranen reagerer langsommere end andre, opstår der stor friktion mellem dem. Og ligesom ski, der glider hen over en snedække, til sidst stopper, så gør membranens bevægelse det også.



Figur 2. Skitse af en membran (mørkegrå) fastspændt til et bulk-substrat (lysegrå). Zoomet område taget omkring den centrale "defekte" pude. Hvide cirkler repræsenterer huller.

Denne friktion opstår hovedsageligt ved bøjning og forlængelse af membranmaterialet, og vi har udviklet specifikke teknikker til at håndtere begge dele [1].

Forlængelse kan mindskes ved at påføre en trækbelastning og strække membranen i alle retninger. Ligesom trommemembranen ville producere en ringende lyd, hvis den blev trukket hårdere på skallen, så vil vores membran også gøre det. Denne teknik kaldes "dissipation dilution" i faglitteraturen og henviser til det faktum, at en stor, jævnt fordelt belastning modvirker

enhver lokal forlængelse, som membranen måtte opleve (figur 1a).

Der opstår normalt stor bøjning ved membranens kanter, fordi den stærke binding til fastspændingsrammen forhindrer den i at vibrere frit. Hovedprincippet i teknikken kaldet “soft clamping” stammer fra ideen om, at hvis denne membran fastspændes til en anden, afskærmende membran, vil den sidstnævnte følge den førstnævntes vibrationsmønster (figur 1b). På den måde opstår der ingen overdreven bøjning.

Den fysiske realisering af blødt fastspændte membraner er i høj grad inspireret af kondenseret stoffysik (figur 2). Dette felt beskæftiger sig primært med periodiske strukturer, der kaldes krystaller. Teorien siger, at hvis et perfekt krystal har en defekt indeni, bliver de elektroner, der befinder sig der, lokaliserede og udveksler ikke energi med resten af materialet.

Analogien til elektroner i kvantemekanikken kaldes en fonon. Hvis man perforerer et periodisk mønster af huller i membranen, fungerer det nøjagtigt som en fast krystal for elektroner, men i dette tilfælde påvirkes fononerne. Hvis man laver en defekt i membranen, der bryder denne periodicitet, giver det anledning til specielle mekaniske vibrationsmønstre, der kun findes i det pågældende område [2].

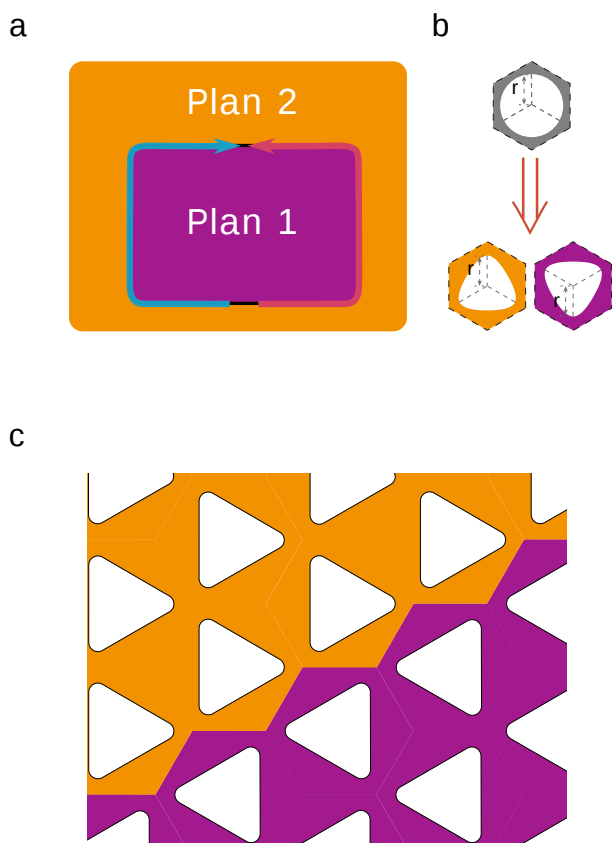
og antage forskellige former. Vi kan altid gendanne papirets oprindelige tilstand ved at folde det ud igen. Det betyder, at vi kun har udført glatte transformationer, som bevarer papirets egenskaber og blot ændrer dets udseende.

Hvis vi laver et hul et eller andet sted i arket, kan vi ikke længere gendanne papirets oprindelige tilstand ved at folde og folde det ud. Og medmindre vi ønsker at stirre på et gabende hul, er antallet af mulige former, som papiret kan antage, mens det stadig ser helt ud, betydeligt reduceret.

Det felt, der beskæftiger sig med overfladers egenskaber, kaldes topologi. Det er interessant på grund af dets forudsigelser om eksotiske egenskaber, som nogle overflader kan få ved at modificere dem direkte [3]. Vi låner de grundlæggende principper fra topologiske isolatorer, som er en specifik type todimensionelt fast stof, der kun tillader signaler at udbrede sig langs kanten. Vi kan bygge en bølgeleder ved at sammenkoble to isolatorer side om side (figur 3a). Ydeevnen af en sådan konfiguration maksimeres, når de to plane isolatorer er spejlbilleder af hinanden.

Lad os tage et enkelt element fra vores fononiske krystal, som kaldes en enhedscelle. Den er repræsenteret af en sekskant med et cirkulært hul indeni. Denne form har i sig selv en seksfoldig rotationssymmetri omkring sit centrale punkt. Men hvis vi laver et trekantet hul i stedet for et cirkulært, har den resulterende konfiguration kun en tredobbelt symmetri. Hvis vi spejler denne form, får vi en anden enhedscelle (figur 3b).

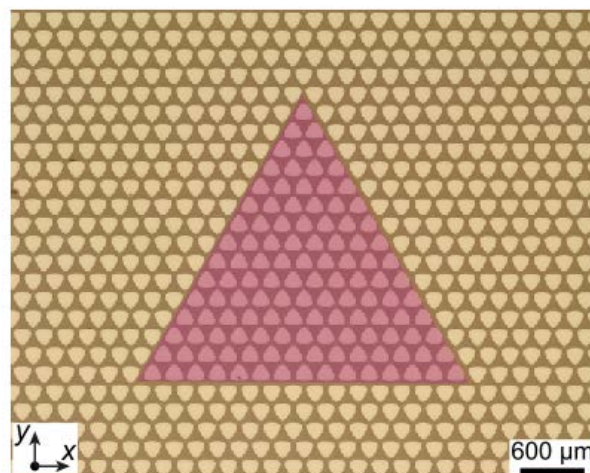
Der opstår et interessant fænomen, hvis vi bygger to krystaller med to forskellige tredobbelte symmetriske enhedsceller og forbinder dem (figur 3, c). Ved grænsen mellem dem finder vi en bølgeleder, der understøtter bølger, der udbreder sig langs den. Disse såkaldte topologiske kanttilstande opstår på grund af symmetrierne i de omgivende bulk-krystaller. Og fordi vi ikke længere har spejlsymmetrien, undertrykkes spredningen af disse bølger i princippet. Dette giver topologiske bølgeledere potentiale til at overføre energi og information stort set uden tab.



Figur 3. (a) Grundlæggende idé bag topologisk bølgeleder; (b) transformation af en fononisk krystalcelle for to forskellige dele af membranen; (c) sektion af grænsefladen mellem to topologisk forskellige dele af membranen.

Topologiske kanttilstande

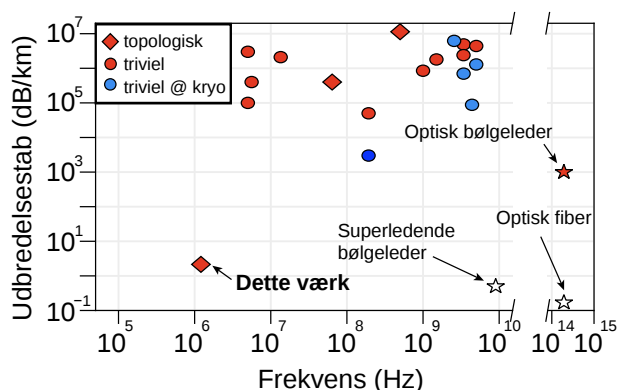
Forestil dig et fladt ark papir, der fx bruges til at lave origami-figurer. Det kan foldes på mange måder



Figur 4. Mikroskopbillede af den centrale del af den topologiske bølgeleder. To forskellige krystaller er fremhævet med farve.

Næsten tabsfrie bølgeledere

Vi kombinerer både maskinteknik og topologiske bølgelederprincipper i den enhed, der er afbildet i figur 4. Vi har modelleret bølgelederen i form af en stor trekant, fordi denne konfiguration giver os et direkte bevis på, hvordan skarpe hjørner påvirker bølgeudbredelsen.



Figur 5. Statistikker over udbredelsestab rapporteret i litteraturen for topologiske (romber) og trivielle (cirkler) mekaniske bølgeledere sammenlignet med avancerede platforme (stjerner) og den værdi, der er opnået i vores arbejde.

Man kan huske, at Newtons anden lov giver os definitionen på resonansmodi, der gør mekaniske oscillatorer mere følsomme over for kræfter ved bestemte frekvenser. I vores tilfælde er de manifestationen af de vandrende bølger, der arver information om tab og spredning. Vi kan opnå det første ved blot at observere, hvordan resonansvibrationer forsvinder. Og det sidste får en resonansmodus til at splitte sig i to, hvilket tyder på energiudveksling mellem to modsat udbredende bølger i bølgelederen.

Ved at foretage målinger på en sådan enhed får vi to vigtige resultater [4]. For det første finder vi ud af, at resonansvibrationernes forfaldshastighed er ca. 3 dB/km. Med andre ord, hvis vi sender en bølge ind i bølgelederen, mister den halvdelen af sin energi efter at have bevæget sig en kilometer. For det andet konkluderer vi, at i gennemsnit kun 0,01 % af bølgeenergien

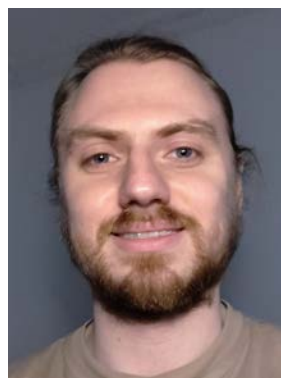
spredes ved hvert hjørne.

Tilsammen viser disse resultater os hidtil usete muligheder, når det gælder transport af signaler ved hjælp af mekaniske midler. Med hensyn til ydeevne kan vores enhed måle sig med industrielt fremstillede optiske fibre, der driver internettet og kommunikation, og den overgår alle andre mekaniske bølgelederkonstruktioner med flere størrelsesordere (figur 5).

Selvom vores platform endnu ikke har nogen praktisk anvendelse, viser den, at en tværfaglig tilgang, der kombinerer mange forskellige koncepter, kan føre til interessante og unikke effekter, der kan give anledning til yderligere forskning inden for fysik og teknologi.

Litteratur

- [1] S. Schmid, L. Guillermo Villanueva og M. L. Roukes (2023) “Fundamentals of Nanomechanical Resonators”. Springer International Publishing.
- [2] Y. Tsaturyan, A. Barg, E. S. Polzik og A. Schliesser (2017) “Ultraslow nanomechanical resonators via soft clamping and dissipation dilution”, *Nature Nanotechnology*, bind 12, side 776–783.
- [3] M. Nakahara (2003) “Geometry, topology, and physics”, Graduate student series in physics, Institute of Physics Publishing, 2. udg.
- [4] X. Xi m.fl. (2025) “A soft-clamped topological waveguide for phonons”, *Nature*, bind 642, side 947–953



Ilia Chernobrovkin er ph.d. fra kvanteoptiksektionen ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet. Hans forskningsområder omfatter kvanteoptomekanik, faststoffysik og topologi.



Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Neutronstjerner afslører nye grænser for en mulig femte kraft

PARTIKELFYSIK. Vi kender de fire fundamentale kræfter: den elektromagnetiske kraft, tyngdekraften og den stærke og svage kernekraft. Men nogle teorier inden for partikelfysik siger, at der måske findes en femte kraft. Nu har forskere fra bl.a. Tyskland og Italien undersøgt, om de ekstremt tætte stjerner, der kaldes neutronstjerner, kan hjælpe os med at finde en mulig – endnu ukendt – femte kraft i universet.

Forskerne har undersøgt eksistensen af en femte

kraft gennem afkølingen af neutronstjerner. Neutronstjerner er ekstremt tætte stjerneverster (efter en supernovaeksplosion kan en stjerne blive til en neutronstjerne), og de består primært af nukleoner, dvs. protoner og neutroner. Neutronstjerner køler i de første mange år primært via neutrinoer, og først senere dominerer foton/varmestråling fra overfladen.

Ligesom de andre kræfter virker gennem vekselvirkningen af en fundamental partikel – fotoner for elektromagnetismen, gluoner for den stærke kernekraft, de såkaldte W- og Z-bosoner for den svage kernekraft

og muligvis en graviton for tyngdekraften – menes den femte kraft at have en vekselvirkningspartikel, en såkaldt skalarpartikel.



Figur 1. Illustration af neutronstjerne. Kilde: ESA.

Idéen er, at der kunne findes en “skalarpartikel” – en partikel uden spin – som kan vekselvirke med protoner og neutroner (altså de partikler, der udgør neutronstjernernes indre). Det betyder, at hvis skalarpartikler findes og påvirker protoner og neutroner, så vil effekten blive kraftigt forstærket i en neutronstjerne. Hvis sådan en partikel findes, kunne den dermed skabe en ny kraft, som ændrer måden, stjerner køler af på.

Derfor kan neutronstjerner fungere som “naturens egne laboratorier” til at teste, om en femte kraft eksisterer – under ekstreme forhold, som vi ikke kan skabe her på Jorden.

Forskerne gennemførte avancerede computersimuleringer af, hvordan neutronstjerner langsomt køler af over millioner af år – både med og uden mulighed for, at skalarpartikler slipper væk og dermed “stjæler” energi.

Hvis skalarpartikler eksisterer og kobler stærkt nok til nukleoner, ville neutronstjerne køle meget hurtigere, end det, forskerne observerer med teleskoper. Men simuleringerne viste, at de neutronstjerner, man har observeret, faktisk har omtrent de temperaturer, man forventer uden en ekstra kraft.

Det betyder, at forskerne ikke fandt nogen tegn på ekstra energitab, og derfor konkluderer de, at hvis en femte kraft findes, så må den være meget svagere, end man tidligere har antaget og så svag, at den ikke påvirker afkølingen af neutronstjerner mærkbart.

Opdagelsen af en femte fundamental kraft – eller bevis for at der ikke er en – vil være en stor sag i fysikken. Det kan ændre, hvordan vi forstår alt fra elementarpartikler til universets opbygning. Ved at bruge neutronstjerner som “testobjekter” har forskerne nu sat nogle af de stærkeste begrænsninger på, hvordan sådan en kraft kunne se ud.

Ifølge forskerne ved vi stadig ikke alt om neutronstjerner og deres indre forhold er ekstremt komplekse. Derfor er det muligt, at fremtidige observationer og data kan afsløre nye overraskelser. Nye og mere præcise observationer kan gøre det muligt at teste endnu svagere kræfter – eller måske opdage hidtil ukendte fænomener. Hvis det viser sig, at der findes en femte fundamental kraft, kan det resultere i et paradigmeskifte for fysikken.

Kilde: phys.org samt D. F. G. Fiorillo m.fl (2025) “Leading Bounds on Micrometer to Picometer Fifth Forces from

Neutron Star Cooling”, *Physical Review Letters*, bind 135, side 211003. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.135.211003>.

Gnistrende støvdjævel på Mars

PLANETFYSIK. NASAs rover Perseverance, der siden 2021 har udforsket Mars, bliver ved med at levere nye og overraskende resultater. Den har taget billeder, filmet og optaget lyde, og nu har roverens instrumenter registreret elektrisk aktivitet i Mars’ atmosfære. Det har forskere kunnet konstatere ved at analysere flere lydoptagelser fra den røde planet. Perseverance har nemlig opfanget lyden af små elektriske gnister inde i en såkaldt støvdjævel.

Støvdjævel har været kendt på Mars i mange år, både fra billeder fra rovere og fra satellitter. Det nye er, at Perseverance for første gang har målt elektriske udladninger inde i en støvdjævel.

Mars’ overflade er dækket af et fint lag støv og sand. Når Solen varmer overfladen op, stiger den varme luft til vejrs, og køligere luft trænger ind under den. Det kan få luften til at rotere, præcis som en lille tornado. Den roterende søjle hvirvler støv og sand med sig – og så opstår en støvdjævel.

Når støvpartikler i den roterende søjle gnider mod hinanden, kan de opbygge elektriske ladninger og udløse små gnister, lidt som mikroskopiske lyn. Mars’ atmosfære er meget tyndere end Jordens, og derfor skal der langt mindre ladning til, før en gnist springer. Det gør elektriske udladninger mere sandsynlige i de støvfylde mini-tornadoer.



Figur 2. Støvdjævel på Mars. Foto: NASA/JPL.

Det er Perseverances instrument SuperCam, som er udstyret med både mikrofon (udviklet i Danmark) og elektromagnetiske sensorer, der har registreret lydene og signalerne fra sådanne udladninger. På optagelserne kan man høre både vindstøj og en tydelig knitren fra de små gnister i støvdjævelen. Forskernes analyser viser, at knitringen og de tilhørende elektromagnetiske impulser stammer fra elektriske udladninger i støvskyen.

Den nye indsigt – at Mars’ atmosfære kan blive elektrisk ladet og skabe gnister – er vigtig af flere grunde.

Elektriske udladninger kan nemlig igangsætte kemiske reaktioner i atmosfæren og danne stærkt oxiderende forbindelser såsom perklorat. Perklorat kan nedbryde organiske molekyler, hvilket gør det vanskeligere for liv at overleve på overfladen og vanskeliggør søgen efter spor af tidligere liv.

Elektrisk aktivitet kan også påvirke mængden af gasser i atmosfæren og måske være med til at forklare, hvorfor fx metan ser ud til at forsvinde hurtigt fra Mars' atmosfære. Sådanne processer kan ændre og nedbryde visse gasarter.

Samtidig spiller støv en stor rolle for både klimaet og atmosfæren på Mars. Forståelsen af, hvordan støv transporteres, oplades og bevæger sig rundt, er afgørende for at forstå planetens miljø.

For fremtidige missioner – både robotter og måske en dag mennesker – er det vigtigt at vide, at Mars kan være elektrisk aktiv. Elektriske gnister kan potentielt skade elektronik og rumudstyr. En sovjetisk rumsonde, der landede i 1971, stoppede med at sende signaler kort efter landingen midt i en støvstorm. Nogle forskere vurderer, at elektriske udladninger kan have spillet en rolle.

Perseverances opdagelse viser, at den guldørkenplanet er langt mere dynamisk, end vi tidligere troede. Selv små støvdjævlae kan have stor betydning for Mars' atmosfære, dens kemi, dens klima – og for vores forståelse af planetens potentiale for liv.

Kilde: NASA.

Rudolf med den rødforskudte tud

SPEKTROSKOPI. Måske har KVANTs læsere overvejet, hvor hurtigt Julemanden egentlig skal flyve for at kunne nå at dele gaver ud til alle børn – og hvad den høje hastighed i så fald vil gøre ved Rudolfs ellers så røde næse? Svaret kan de få her: En forsker fra University of Sydney har nemlig opsat regnestykket og udregnet rødforskudningen af Rudolfs næse!



Figur 3. Blåforskudt Rudolf, Rudolf i hvile og rødforskudt Rudolf. De blå- og rødforskudte farver blev beregnet for en hastighed svarende til 10 % af lysets hastighed. Brun er en vanskelig farve, fordi det i virkeligheden er en afmættet orange. Derfor er de blå- og rødforskudte farver for Rudolfs pels og gevir kun omtrentlige. Når Rudolfs næse bliver rødforskudt ved den hastighed, bliver den så mørkerød, at den praktisk talt er sort. Grafik: Laura Driessen

Men først nogle tal fra artiklen:

- Der er omkring 2 milliarder børn under 14 år på verdensplan.
- Cirka 93 % af alle lande fejrer jul (i en eller anden form), så man antager, at 93 % af disse børn potentielt får gaver.

- Da det kun er de børn, der virkelig tror på Julemanden, der faktisk får gaver, giver det omtrent 690 millioner børn tilbage.
- Med omkring 2,3 børn per husstand globalt betyder det, at Julemanden skal besøge omkring 300 millioner husstande.
- Hvis man spreder disse husstande jævnt ud over Jordens beboelige arealer (altså fratrækker oceaner, ørkener, Antarktis, meget bjergrige områder m.m.), ender man med et areal på ca. 69 millioner km².
- For at nå alle disse husstande på én nat – og stadig have tid til at komme ind og ud af husene – skal Julemanden tilbagelægge omtrent 144 millioner kilometer på juleaften. Det er næsten samme afstand som fra Jorden til Solen.

Artiklen antager, at Julemanden har 35 timer til rådighed – takket være tidszoner – fra han afleverer den første gave til den sidste. Hvis halvdelen af tiden går med at rejse mellem husstande og resten med at komme ind og ud af husene, svarer det til, at han har ca. 17,5 timer til selve flyvningen. Det betyder, at Julemanden – for at nå det hele – skulle bevæge sig med omkring 8,2 millioner kilometer i timen. Det svarer til ca. 0,8 % af lysets hastighed.

Lad os forestille os, at vi observerer Julemanden og Rudolf med et teleskop om natten. Ved hastigheder tæt på 1 % af lysets hastighed bliver Doppler-effekten relevant. Doppler-effekten fortæller som bekendt, at bølgelængden af lys fra et objekt, fx Rudolf, der bevæger sig hurtigt, bliver rødforskudt, når det bevæger sig væk fra os, og blåforskudt, når det bevæger sig imod os.

Den klassiske røde farve i lys – for eksempel fra Rudolfs næse i hvile – har en bølgelængde på ca. 694,3 nanometer. Hvis vi antager, at Julemanden vil hurtigt hjem til julemiddagen og derfor flyver med 10 % af lysets hastighed, vil den røde farve blive ændret.

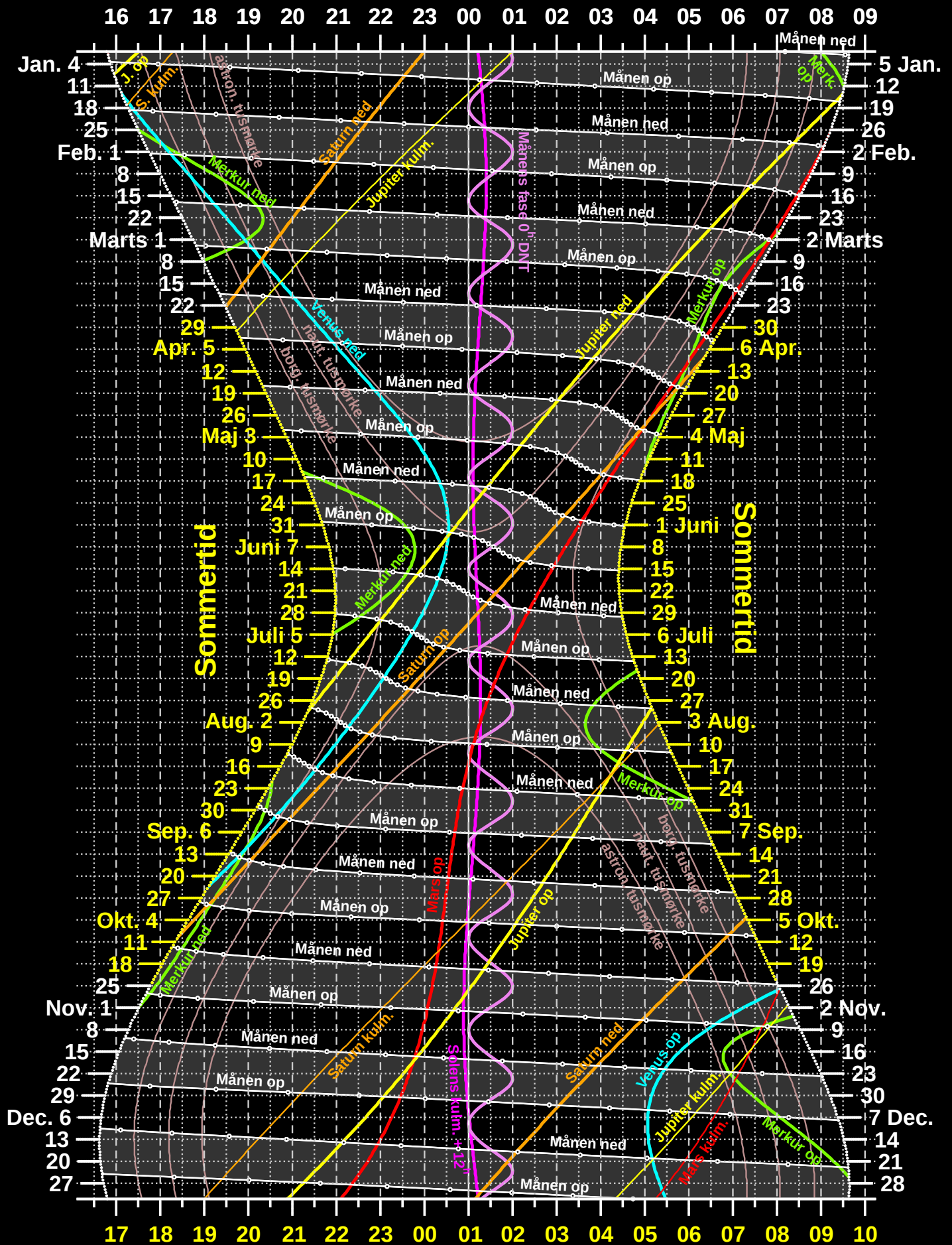
Når Rudolf bevæger sig mod os, vil farven blive blåforskudt til ca. 624 nm og vil se ud som klar orange i stedet for rød. Når Rudolf bevæger sig væk fra os, vil farven blive rødforskudt til ca. 763 nm, hvilket er en meget dyb rød, næsten sort farve. Den mørkeste røde farve, menneskeøjet kan se, ligger omkring 780 nm. Den rødforskudte Rudolf-næse vil altså se næsten sort ud. Artiklen konkluderer derfor, at farven på Rudolfs næse kan bruges til at bestemme Julemandens hastighed.

Så hvis dit barn spørger, hvorfor det ikke kan se Julemandens kane og Rudolf med den røde tud på himlen juleaften, er det simpelthen fordi, de bevæger sig så hurtigt, og at Rudolfs næse ved den hastighed slet ikke er rød!

Kilde: L. N. Driessen (2024) "I've calculated Santa's speed on Christmas Eve – and this is what it would do to Rudolph's nose", The Conversation, doi.org/10.64628/AA.yt4gr3jf.

Planetkalender for København 2026

Dansk Normaltid



Jordens klima (1. del): Fra istider til nutidens forandringer

Jens Olaf Pepke Pedersen, DTU Space

Artiklen gennemgår forskellen mellem vejr og klima og viser, hvordan Jordens klima historisk har varieret kraftigt fra istider og varmeperioder til Den Lille Istid og den nyere opvarmning. Artiklen er første del af en serie, der fortsættes i 2026.

Uanset hvor man lever på Jorden, har vejret betydning for dagligdagen og tilværelsen, og selvom vi i Danmark har indrettet os med mange moderne bekvemmeligheder, er vi på adskillige måder fortsat afhængige af vind og vejr. Vi er også vant til, at vejret er omskifteligt, og at det altid er forbundet med en stor usikkerhed at planlægge aktiviteter, der er afhængige af en bestemt vejrtype. Heldigvis har mennesket haft en enorm evne til at tilpasse sig naturen, og har derfor været i stand til at klare sig i områder fra ekstrem kulde til ekstrem varme.

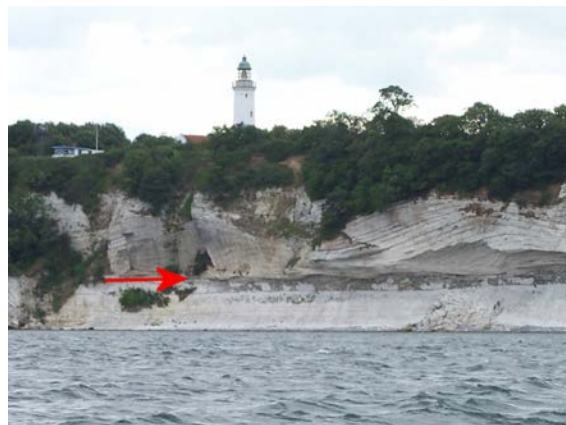
Når vi taler om vejret, mener vi som regel atmosfærens tilstand på et bestemt sted og tidspunkt, og her er vi typisk interesserede i oplysninger om temperatur, vind, skydække og regn. Vi er også gerne interesserede i vejrudsigterne nogle timer eller dage ud i fremtiden. Denne artikel handler om Jordens klima, hvor klimaet kan defineres som det gennemsnitlige vejr og vejrets variationer over en længere periode, som man traditionelt vælger til 30 år. Klimaet er således ikke blot gennemsnitlige værdier af fx temperatur og nedbør, men også hvor meget parametrene varierer i løbet af et år samt hyppigheden og styrken af ekstreme vejrfænomener som kraftige orkaner eller voldsomme skybrud. På trods af at der kan være stor forskel på fx sommervejret fra år til år, så holder klimaet sig som regel nogenlunde konstant.

Klimaændringer

En klimaændring er derfor en ændring i det gennemsnitlige vejr (og variationerne) over en længere periode, som det typisk tager flere årtier at konstatere. Klimaet kan godt ændre sig meget hurtigt, men når der alligevel er brug for lang tid til at fastslå en ændring, skyldes det, at Jordens klima er en meget kompleks og dynamisk størrelse, hvor det er svært at se, om en ændring er en kortvarig og tilfældig fluktuation eller et tegn på en mere generel ændring af klimasystemets tilstand. Generelt kan man sige, at desto mindre klimaændringen er, desto længere tid er der brug for at kunne identificere den. Klimaforskning kræver derfor stor tålmodighed og systematiske observationer over lange tidsrum.

Jordens klima har altid været under forandring. Fra boringer i aflejringer på oceanernes bund og ned gennem Indlandsisen i Grønland og iskappen på Antarktis ved vi, at istider gennem de seneste tre millioner år har afløst hinanden i et regelmæssigt mønster, og specielt under de kolde istider indikerer målingerne, at klimaet

har været meget ustabil. Det skyldes sandsynligvis, at temperaturforskellene mellem Ækvator og polerne var større under istiderne, hvilket giver grundlag for kraftigere storme.



Figur 1. Fiskeleret ved Stevns Klint er et verdensberømt, tyndt, mørkt lerlag, der markerer grænsen mellem Kridt-tiden og Palæogen (K/Pg-grænsen) og vidner om dinosaurernes masseuddøen for 66 millioner år siden, kendetegnet ved et højt indhold af iridium fra et meteornedslag. Foto: Niels Elgaard Larsen.

Går vi længere tilbage gennem Jordens geologiske perioder, kan vi se, at der undervejs har været dramatiske episoder med store klimaændringer og katastrofale udryddelser af livsformer. Mange af de geologiske overgange og masseudryddelserne falder sammen med langvarige udbrud fra supervulkaner og i et enkelt tilfælde også med nedslag af en stor asteroide, nemlig for 66 millioner år siden, da alle dinosaurerne (bortset fra de flyvende, som vore dages fugle nedstammer fra) forsvandt. Der er også geologiske tegn på, at Jorden på et tidspunkt har været helt isdækket, og i lange perioder har klimaet været meget varmere end i dag. De geologiske aflejringer fortæller os imidlertid også, at livet har eksisteret på Jorden lige siden det opstod for mindst 3,5 milliarder år siden. Forholdene på vores planet har altså i hele dette enorme tidsrum alligevel ikke ændret sig mere end at livet har kunnet overleve, og i den nuværende mellemistid kan vi endda betegne klimaet på Jorden som relativt stabilt.

Klimaændringer siden istiden

En af de mest dramatiske klimaændringer i menneskets historie indtraf for omkring 14.700 år siden, da temperaturen på få årtier steg brat, og de kilometertykke

iskapper, som dækkede store dele af Nordeuropa, begyndte at smelte. Vores landskab er ligefrem formet af isens bevægelser og de enorme mængder morænematerialer, som den efterlod, og hvor isen trak sig tilbage, indvandrede planter og dyr sydfra. Landskabet har i begyndelsen været åben tundra med dyr som rensdyr og bjørn, som blev fulgt af de første beboere, men efter en periode med varme temperaturer vendte de arktiske forhold brat tilbage, og kuldeperioden Yngre Dryas begyndte.

Først for 11.700 år siden sluttede istiden endeligt, og igen steg temperaturen brat på ganske få år. I mange tusinde år var temperaturen højere end i dag med milde vintre og varme somre. Det kan blandt andet ses af de pollen, der er fundet i højmoser, som har afsløret, at der voksede varmekrævende planter som vin, hornnød og najade. Vedbend, mistelten og kristtorn var også mere almindelige end i dag. Moser og stenalderens bopladser indeholder også knogler af varmekrævende dyr, som sumpskildpadder og store pelikaner, og et andet tegn på de varme temperaturer er fiskeri af malle, tun, pilrokke, havrude og bars.

De første træer, der indvandrede, var enebær og birk, og kort efter kom fyrretræ og siden hassel. Hassel- og fyrreskov har herefter domineret i en lang periode, indtil landet blev indtaget af høje skovtræer som lind, eg, elm, ask og el, som udskyggede den lavere hassel og den lyskrævende fyr. Denne "atlantiske urskov", der var tæt og mørk, dominerede frem til landbrugets start omkring 4.000 f.Kr., hvorefter mennesket har præget landskabets udvikling. Til gengæld har det åbne landskab givet plads til andre planter og dyr.

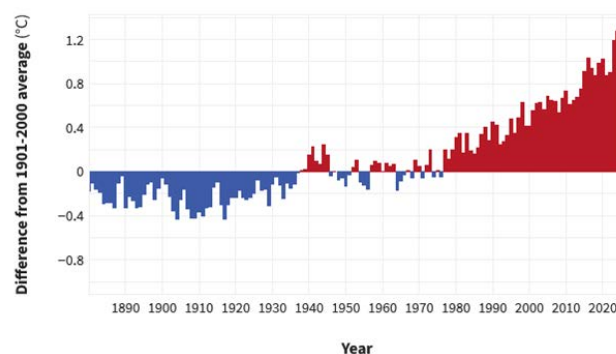


Figur 2. Ruinerne af Hvalsø Kirke, som blev opført af nordboerne omkring år 1300 ikke langt fra det nuværende Qaqortoq i Sydgrønland. Kirken er opført i slutningen af den lange middelaldervarme og var formodentlig i brug til sidst i 1400-tallet. Foto: JOPP.

Siden er klimaet generelt blevet koldere og vådere, og for omkring 3.000 år siden indvandrede bøgen og fortrængte lind som den mest dominerende træart. I vikingetiden og tidlig middelalder oplevede vi dog igen en lang varmeperiode, hvor klimaet var varmere end i dag, og som blandt andet gjorde det muligt for vikingerne at bosætte sig og dyrke agerbrug i Grønland, indtil "Den Lille Istid" begyndte i 1300-tallet.

Herefter fulgte en periode på mange århundreder, som blev den koldeste siden afslutningen af den

"store" istid, med ekstremt kolde vintre og korte, regnvåde somre med dårlig høst. Nordboerne forlod igen Grønland sidst i 1400-tallet, og da Den Lille Istid kulminerede i 1600-tallet, blev England, Norge og Færøerne ramt af hungersnød som følge af ringe høst og dårligt fiskeri. Tilfrosne bælter blev helt almindelige om vinteren, hvor isen blev en fast transportvej. I 1635 kunne man gå over isen fra Skåne til Bornholm og i vinteren 1659 kunne hele den svenske hær marchere over isen fra Jylland via Fyn og Lolland til Sjælland. En rekord for isbådstransporten blev sat i vinteren 1798-99 med 114 dages isbådstransport, og endnu den 11. maj 1799 kunne man se drivende is i Øresund. Vandre- og kaneture over Øresund var almindelige til langt ind i 1800-tallet. Den 28. februar 1845 gik 5.000 mennesker således over Øresund, og nogle år tidligere havde en bornholmer mistet orienteringen i vintervejret, da han var gået ud på isen for at fange laks. Han dukkede op igen tre dage senere på den tyske ø Rygen.



Figur 3. Ændringer i den globale middeltemperatur 1880-2024, hvor et gennemsnit for perioden 1901-2000 er valgt som nulpunkt. (NOAA Climate.gov).

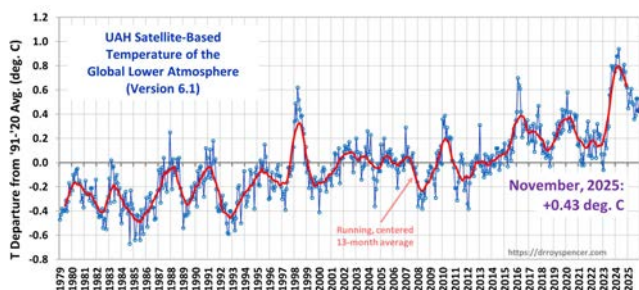
Siden afslutningen af Den Lille Istid er der igen sket en klimaforbedring, som er fortsat gennem 1900-tallet, hvor især perioden fra 1910-1940 var præget af opvarmning (se figur 3). Fra midten af 1940'erne til sidst i 1970'erne blev det varme vejr imidlertid afløst af en køligere periode, hvor klimaforskere til sidst begyndte at blive bekymret for, at en ny istid var under opsejling.

Temperaturen steg dog igen op gennem 1980'erne og 1990'erne, hvilket i stedet førte til en ny bekymring for, at klimaet i stedet kunne blive for varmt. Fra omkring 1998 til 2014 holdt den globale temperatur sig nogenlunde konstant (den såkaldte "hiatus"), mens siden da er stigningen fortsat med kraftige udsving som følge af El Niño-begivenheder i Stillehavet. Figur 3 viser satellitmålinger af atmosfæretemperaturen siden 1979, som viser en gennemsnitlig stigning i perioden på 0,16 °C pr. årti.

Hvorfor ændrer klimaet sig?

Det er således ikke nogen nyhed, at klimaet ændrer sig, og det er heller ikke nyt, at mennesket har bemærket ændringerne. Helt tilbage i det antikke Grækenland og senere i 1800-tallets USA havde man endda overvejet, om det havde betydning for mængden af regn, at man havde fældet store skovområder, og dermed om ændringen i nedbør skyldtes menneskelige aktiviteter,

men ellers var forskernes tilgang til emnet i mange år, at det da var interessant, at de ligefrem kunne observere klimaændringer, men usandsynligt, at mennesket havde nogen andel i det. Det var således tilfældet i 1930'erne, da forskerne begyndte at blive opmærksomme på opvarmningen, og hvor man antog, at det var resultatet af en naturlig variation i klimaet, som man jo havde set så mange gange tidligere i historien, og temperaturen ville jo nok falde igen før eller senere.



Figur 4. Ændringer i den globale middeltemperatur 1979 – september 2025, hvor et gennemsnit for perioden 1991–2030 er valgt som nulpunkt. (www.drroyspencer.com).

Der var derfor ikke den store interesse for at finde årsagen til de aktuelle klimaændringer, og interessen samlede sig i stedet om at forklare de store istider, som man kunne se tydelige spor af i landskabet. Især den serbiske fysiker Milutin Milanković (1879–1958) bidrog til en forklaring på istiderne med sin teori om, at istiderne var styret af små variationer i solindstrålingen på grund af ændringer i Jordens bane og rotationsakse.

I meget lang tid var der heller ikke den store opmærksomhed om CO₂. Ganske vist havde den franske fysiker og matematiker Joseph Fourier (1768–1830), som nok er mere kendt for at have fået Fourier-transformationen opkaldt efter sig, allerede i 1827 beskrevet drivhuseffekten kvalitativt. Det var noget af en bedrift på et tidspunkt, hvor termodynamikken først var ved at blive udviklet, men det var ikke et resultat, der vakte større opsigt i samtiden.

Noget uretmæssigt bliver den svenske kemiker Svante Arrhenius (1859–1927) ofte nævnt som opdageren af drivhuseffekten, men hans fortjeneste er, at han som den første i 1896 beregnede, hvor meget en fordobling af CO₂-koncentrationen i atmosfæren ville betyde for den globale temperatur. Denne størrelse kaldes også for klimafølsomheden overfor CO₂. Arrhenius kom frem til, at en CO₂-fordobling ville øge temperaturen med 6°C, hvilket nogle gange bliver fremhævet som overraskende tæt på moderne resultater. I Arrhenius' tilfælde var resultatet nu mere held end gode beregninger, for selvom hans beregning var baseret på datidens state-of-the-art, indeholdt den to store fejkilder, som trak i hver sin retning. Hans svenske kollega, fysikeren Knut Ångström (1857–1910) viste kort efter ved at måle spektret af CO₂, at absorptionsbåndene for CO₂ i atmosfæren allerede var mættede. Konklusionen var derfor, at mere CO₂ i atmosfæren ikke ville ændre noget på energibalancen i atmosfæren og dermed heller ikke have nogen særlig effekt på den globale temperatur, hvilket herefter blev den videnskabelige konsensus i omkring 75 år.

Der var dog også skeptikere, som den britiske ingeniør Guy Stewart Callendar (1897–1964), der imidlertid kun havde meteorologi som hobby. Han argumenterede for drivhusteorien med den begrundelse, at selvom CO₂ allerede absorberede den infrarøde stråling fra Jorden, ville mere CO₂ betyde, at absorptionen skete højere oppe i atmosfæren, hvilket ifølge hans beregninger ville føre til opvarmning. Callendar kunne også – omend på et noget spinkelt grundlag – beregne, at temperaturændringen ved en CO₂-fordobling var 2°C. Han påpegede også, at både temperatur og CO₂ i atmosfæren var steget i løbet af det sidste halve århundrede, hvilket den daværende direktør for det britiske meteorologiske institut – og autoriteten på området – George Simpson (1878–1965) dog afviste som en tilfældighed. Selvom Callendar holdt fast ved sin teori helt frem til sin død i 1964, blev den i hele perioden bestridt eller fortiet af hovedparten af det videnskabelige samfund.

Problemet var blandt andet, at den globale temperatur siden 1940'erne var begyndt at falde igen, og vi skal helt frem til midten af 1970'erne, før drivhuseffekten begynder at blive taget mere seriøst. På det tidspunkt var bekymringen for global afkøling, og dermed muligheden for en ny istid, imidlertid større end bekymringen for global opvarmning.

En af de førende klimatologer var tyskeren Helmut Landsberg (1906–85), der i en oversigtsartikel i 1970 skrev, at vi ikke vidste meget om menneskeskabte klimaændringer, og i værste fald mente han, at stigningen i CO₂-koncentrationen med den nuværende hastighed højest ville medføre en temperaturstigning på 2°C i løbet af de næste 400 år. Den engelske klimatolog Hubert H. Lamb (1913–97), der er grundlæggeren af den britiske Climatic Research Unit, mente, at virkningen af CO₂ var tvivlsom, og han påpegede ganske korrekt, at CO₂ ikke kunne redegøre for de mange klimaændringer, han havde afdækket fra middelalderen til nutiden.

Sidst i 1970'erne blev det klart, at afkølingen siden 1940'erne på ny var afløst af en periode med opvarmning, og samtidig begyndte der at komme isker-nemålinger fra Grønland og Antarktis, der viste, at CO₂-koncentrationen i atmosfæren havde ændret sig meget med temperaturen over tusinder af år. CO₂ måtte derfor have betydning som drivhusgas, der i hvert fald kunne forstærke ændringer i klimasystemet. Det amerikanske videnskabsakademi, National Academy of Sciences, nedsatte derfor en ad hoc-gruppe, ledet af meteorologen Jule Charney (1917–81), som skulle undersøge, om CO₂ fra fossile brændstoffer kunne påvirke klimaet. I en kort rapport på 22 sider konkluderede gruppen, efter at have gennemgået stabiliserende mekanismer i klimasystemet, at CO₂ måtte betragtes som en væsentlig faktor i klimaet. På grundlag af en gennemgang af forskellige modelberegninger anslog gruppen endvidere, at klimafølsomheden for CO₂ lå et sted mellem 1,5 og 4,5°C.

Herefter blev der stigende opmærksomhed omkring CO₂'s rolle, og da den globale temperatur samtidig begyndte at stige igen, førte det også til voksende bekymring for klimaændringer, men nu overfor et varmere

klima. Det førte i 1988 til oprettelsen af FN's klimapanel (IPCC), som siden har offentliggjort i alt seks store klimarapporter. Da den femte rapport (AR5) udkom i 2013, var konklusionen fortsat, at klimafølsomheden for CO₂ ligger et sted mellem 1,5 og 4,5°C, og først med den sjette rapport (AR6) fra 2021 blev intervallet reduceret til 2,5–4,0°C med 3,0°C som det bedste estimat.

Når det er så svært at bestemme klimafølsomheden, skyldes det, at vi ikke bare kan måle den direkte i selve klimasystemet. Desuden forstærkes effekten af CO₂ af vanddamp, skyer og andre komponenter i Jordens atmosfære. En CO₂-fordobling vil i sig selv kun give anledning til en opvarmning på omkring 1°C. Men fordi denne opvarmning ændrer på blandt andet mængden af vanddamp, forstærkes opvarmningen og bliver større. Mange af disse effekter er omgærdet af stor usikkerhed, og derfor er klimafølsomheden en svær størrelse at få styr på. I stedet må man ty til modelberegninger eller se på, hvordan temperatur og CO₂ har varieret førhen. Disse analyser er vanskelige, fordi temperatur og CO₂-koncentration ikke korrelerer 1:1, og der ligefrem har været perioder, hvor temperaturen er faldet, selvom CO₂-koncentrationen er steget.

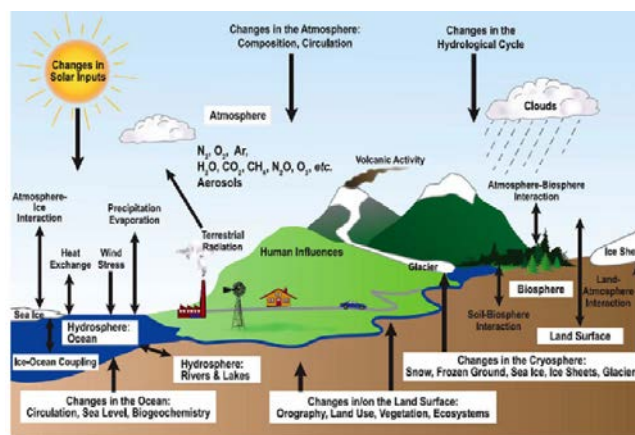
Netop på grund af de naturlige variationer er det vanskeligt at afgøre, om klimaet er ved at ændre sig, og hvor stor en del af ændringerne, der er menneskeskabte. Ganske vist kan vi jævnligt læse beretninger om ekstreme vejrforhold, som kraftige orkaner, voldsomme skybrud og varme- eller kulderekorder, men en enkelt rekordvarm sommer eller stor orkan er ikke et tegn på en klimaændring. Først hvis vi i en længere periode ser en større hyppighed af hedeølger eller store orkaner, kan man begynde at se det som et udtryk for en klimaændring. Her er det igen et problem, at vi på globalt plan ofte kun har gode målinger, der rækker 50 år tilbage, og derfor kan det være svært at afgøre, om vi ser klimaændringer eller tilfældige fluktuationer.

Meget af vores viden om Jordens klima bygger derfor på en kombination af systematiske målinger og anvendelse af modeller. Da vi som nævnt kun har direkte målinger af fx temperatur og nedbør for en begrænset periode, er rekonstruktioner af klimaet, som bygger på indirekte målinger eller såkaldte proxydata, meget vigtige. Boringer i Indlandsisen i Grønland har således skaffet os viden om temperaturændringer og atmosfærens sammensætning helt tilbage til den forrige mellemistid for 130.000 år siden, og fra boringer i gamle sedimenter har vi fået viden om klimaet mange millioner år tilbage i tiden.

Vi kender en lang række faktorer, der kan få klimaet til at ændre sig. På geologiske tidsskalaer ser kontinentdriften ud til at have betydning. Langvarige vulkanudbrud og små ændringer i Jordens bane omkring Solen påvirker også klimaet, ligesom atmosfærens sammensætning, partikler (aerosoler) i atmosfæren og jordoverfladens udseende (lys eller mørk) har betydning. Nogle af disse ændringer er menneskeskabte, men før vi diskuterer dette, vil vi se på, hvordan Jordens klimasystem er sat sammen.

Jordens klimasystem

Man kan anlægge et holistisk syn på Jordens klima, hvor man anskuer det som et komplekst system af forbundne komponenter, som antydnet på figur 3. Komponenterne er Jordens forskellige "sfærer", som atmosfæren, oceanerne, kryosfæren (ismasserne), hydrosfæren (søer, floder, grundvand), litosfæren (fastlandet) og biosfæren (alt det levende, men især planter og træer). Alle disse komponenter er forbundet med hinanden gennem en udveksling af stof og energi, og hvis vi vil beskrive klimaet, må vi derfor se på såvel de enkelte komponenter som på de globale kredsløb. Mange af kredsløbene griber ind i hinanden, og derfor kan en ændring et sted i klimasystemet få en overraskende effekt et helt andet sted.



Figur 5. Skematisk oversigt over komponenterne i klimasystemet og deres vekselvirkninger (Fra FN's Klimapanel "Climate Change 2007: The Physical Science Basis").

Af klimasystemets komponenter er Jordens atmosfære den mest omskiftelige, som hurtigt reagerer på ydre påvirkninger og har en lav varmekapacitet. Hvis vi ser bort fra vanddamp, som varierer meget, så udgør kvælstof og ilt 99 % af atmosfærens volumen, og 99 % af massen befinder sig nedenfor 30 km fra Jordens overflade. Set fra rummet syner atmosfæren kun som en tynd hinde omkring Jorden, men dette tynde lag er afgørende for vores eksistens. Da solstrålingen især opvarmer Jordens overflade, som overfører varme til atmosfæren, bliver atmosfæren opvarmet nedefra, og da varm luft udvider sig og stiger til vejrs, bliver atmosfæren turbulent. Den lave varmekapacitet betyder samtidig, at atmosfærens "hukommelse" kun er nogle få uger. I modsætning til atmosfæren er oceanerne en meget træg komponent, der har en stor varmekapacitet og kan opmagasinere enorme energimængder. Oceanerne virker derfor som en støddæmper i klimasystemet. Samtidig opvarmes havet fra oven og er derfor langt mere stabilt, og hvor overfladelagene kan reagere på ydre påvirkninger i løbet af måneder eller få år, kan det tage århundreder, før væsentlige ændringer registreres i dybhavet.

De store iskapper i Grønland og på Antarktis virker også dæmpende på klimaet – det kræver meget energi at smelte is, og ismasserne er derfor meget robuste komponenter, som det vil tage mange tusinde år at smelte. Man kan fx se, at den forrige mellemistid,

Eemtiden, var flere grader varmere end den nuværende, og selv efter 10.000 års opvarmning var det meste af Indlandsisen i Grønland stadig intakt.

At der er liv på Jorden, og at der derfor er en biosfære, er også med til at påvirke klimaet, og det gør Jordens klima langt mere dynamisk end klimaet på døde planeter som Venus og Mars.

Som nævnt forbindes komponenterne af strømme af energi og stof. Udvekslingen af energi sker især ved stråling gennem atmosfæren samt ved transport af fri varme i atmosfæren og oceanerne, ved latent varme (vanddamp i atmosfæren) og bevægelsesenergi.

De vigtigste stoftransporter er vand og kulstof, men det har også betydning for klimaet, hvordan fx svovlkredsløbet opfører sig, og ikke mindst kredsløbene med næringsstoffer som fosfat og nitrat spiller en rolle, fordi de indgår i biomassen.

Klimasystemets opførsel afhænger derfor af, hvorledes energi- og massestrømme ændres, og hvorledes disse strømme påvirker systemet. Kredsløbene er karakteriserede ved meget forskellige tidsskalaer for deres dynamik, og de omfatter både biologiske, geologiske, kemiske og fysiske mekanismer. Under et kaldes de for biogeokemiske kredsløb, og for at forstå dem kræver det typisk et samarbejde mellem forskere fra mange discipliner som meteorologi, oceanografi, geologi, kemi, fysik og biologi. Når vi mennesker griber ind i kredsløbene, ændrer vi stof- og energitransporten – fx kan vi betragte forurening som en flytning af stoffer fra et sted i klimasystemet til et andet sted.

Energistrømme

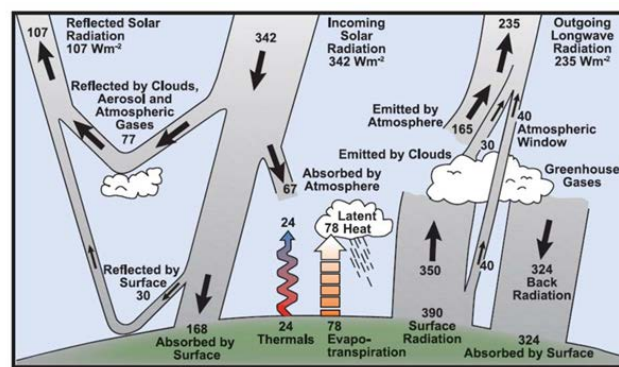
Næsten hele energien til at drive kredsløbene kommer fra Solen. Det er således solstrålingen, der leverer energien til cirkulationer i atmosfæren og oceanerne, som dermed også leverer energien i vind- og vandkraftværker. Det gælder også biomasse, og på en måde kan vi også betragte kul, olie og naturgas som oplagret solenergi, selvom de har ligget i undergrunden i mange millioner år.

Da Jorden ikke virker tilbage på Solen, betragter vi ikke Solen som en del af klimasystemet, men som en ydre påvirkning. Hvis solstrålingen ophørte for en periode, fx hvis et kæmpe meteornedslag sendte store mængder støv og vanddamp op i atmosfæren, ville Jordens temperatur falde dramatisk i løbet af få år, men heldigvis ser der ud til at gå mange millioner år mellem disse begivenheder. Solens udstråling har dog ikke været konstant under hele Jordens udvikling, og Solen udstråler i dag ca. 30 % mere energi end da Jorden blev dannet. Alligevel har klimaet og livet justeret sig efter den øgede indstråling.

Over tid vil den mængde energi, der indstråles fra Solen, sendes tilbage til verdensrummet enten direkte ved refleksion eller som langbølget stråling. Figur 6 viser de gennemsnitlige energistrømme mellem Verdensrummet og Jordens overflade.

Målt udenfor Jordens atmosfære er mængden af energi, der kommer fra Solen, i gennemsnit ca. 1370 W/m². Denne størrelse kaldes solkonstanten, hvilket er et uheldigt navn, for energiindstrålingen fra Solen

varierer – endda på mange forskellige tidsskalaer – hvilket bl.a. er konstateret ved kontinuerlige målinger fra satellitter siden 1979.



Figur 6. De globale middel-energistrømme mellem Jordens overflade, atmosfære og Verdensrummet.

Da Solens energi skal fordeles udover vores kugleformede planet, og da Solen kun skinner på halvdelen af Jorden (hvor det er dag), bliver den gennemsnitlige mængde af energi, der modtages ved toppen af atmosfæren, en fjerdedel af solkonstanten eller ca. 342 W/m².

Figur 6 illustrerer, hvad der sker med den energi, der kommer ind fra Solen. Af de 342 W/m² reflekteres ca. 30 % (107 W/m²) direkte tilbage til verdensrummet. Det er jordoverfladens udseende og atmosfærens sammensætning (gasser, partikler og skyer), der bestemmer, hvor meget solstråling, der tilbagekastes. Is- og snedækkede områder tilbagekaster meget sollys. Hvide skyer (især lavtliggende skyer med mange små skydråber) tilbagekaster også en meget stor del af sollyset, hvorimod højtliggende tynde is-skyer lader det meste af solstrålingen passere igennem. De 70 % af solenergien, som ikke reflekteres, absorberes enten i atmosfæren eller på jordoverfladen. Både jordoverfladen og atmosfæren opvarmes således af sollyset, og for at være i balance må energien derfor sendes ud i Verdensrummet igen.

Jordoverfladen afgiver solenergien igen på flere måder. Energien bruges til at opvarme atmosfæren via opstigende luftstrømme eller til fordampning af vand, og en stor del af energien stråles op i atmosfæren som varmestråling (infrarød stråling). Atmosfæren afgiver også sin energi ved varmestråling, men varmestrålingen udsendes i alle retninger, så mens en del sendes ud i Verdensrummet, sendes en del ned mod overfladen. Derfor cirkulerer en del af varmestrålingen mellem atmosfæren og jordoverfladen, og temperaturen bliver således højere, end den ville være uden en atmosfære.

Det er særdeles heldigt, for hvis der ikke var nogen atmosfære, ville temperaturen ved jordoverfladen være mindst 30°C lavere! En af de væsentligste årsager til denne forskel er drivhuseffekten, som altså er en naturlig effekt, der er afgørende for de nuværende former for liv på Jorden. Drivhuseffekten virker ved, at bestemte luftarter (drivhusgasserne) og skyerne absorberer en del af den varmestråling, der kommer nedefra, mens de ikke absorberer ret meget af Solens stråling, fordi solstrålingen har en anden (og kortere) bølgelængde. Drivhusgasserne og skyerne virker på denne måde som

en slags isolerende lag, der holder på varmen i atmosfæren, oceanerne og jordoverfladen.

De vigtigste drivhusgasser er vanddamp, kuldioxid, metan og lattergas. Per molekyle er vanddamp ikke særlig effektiv, men da vanddamp forekommer i store koncentrationer i atmosfæren, er det langt den vigtigste drivhusgas.

Figur 6 illustrerer også, hvordan ændringer på jordoverfladen eller i atmosfæren vil forrykke energibalancen. Det kan være en ændring af overfladens udseende, som påvirker, hvor meget sollys, der absorberes, fx hvis en skov omdannes til dyrkede marker eller bebygges, eller det kan være ændringer i atmosfæren som luftforurening eller udledning af drivhusgasser.

En forbedret beskrivelse af atmosfæren i figur 6 vil være at opdele den i et antal (horisontale) lag med hver sin temperatur og så se på energistrømmene mellem hvert lag. Denne beskrivelse kan forbedres yderligere ved også at tage højde for, at solindstrålingen ikke er jævnt fordelt over kloden, men afhænger af breddegraden, dvs. om man er i troperne eller ved polerne.

Netop fordi Jorden er rund, modtager områderne omkring ækvator mere energi end områderne ved polerne – Solen står højere på himlen i landene omkring ækvator og afleverer derfor solstrålingen mere koncentreret, dvs. med flere W/m^2 . Den gennemsnitlige temperatur kommer således til at afhænge af breddegraden.

Varmeudstrålingen sker imidlertid fra hele jordoverfladen, og selvom der er mere udstråling fra en varm tropejord end fra en kold isoverflade i Arktis, bliver der ikke helt så stor forskel på udstrålingen, som der er på indstrålingen. Områder omkring polerne og høje breddegrader udstråler derfor mere energi, end de modtager fra Solen, og omvendt modtager områder i troperne og subtropene mere energi fra Solen, end de kan afgive igen ved varmestråling. Det skaber en konstant ubalance i Jordens klimasystem med et "energioverskud" omkring ækvator og lave breddegrader og et "energiunderskud" på høje breddegrader. Denne energiforskel bliver udlignet gennem energitransporter i klimasystemet og er en helt grundlæggende drivkraft i cirkulationerne i atmosfæren og oceanerne. Hvis ikke der var vinde og havstrømme, ville temperaturerne i troperne være langt højere og temperaturerne ved polerne langt lavere. De store bevægelser i havene og atmosfæren, som sørger for energitransporten, har stor betydning for det regionale klima.

I Det nordlige Atlanterhav driver cirkulationer i atmosfæren således Golfstrømmen (Den nordatlantiske Strøm), der transporterer varmt vand nordpå i Atlanterhavet, og undervejs afgiver sin varme til atmosfæren. På vore breddegrader bringer de fremherskende vestenvinde herefter varmen fra havstrømmen ind over land og er således med til at gøre klimaet i Nord- og Vesteuropa så mildt som det er.

Det kan være svært at forudsige præcis, hvordan en ændring i klimasystemet vil påvirke cirkulationerne og parametre som temperatur, nedbør mv. En ændring i et kredsløb kan vise sig at være koblet til et andet kredsløb, som så også ændres og virker tilbage igen på det første kredsløb. Det kaldes tilbagekobling (feedback), og den kan både være positiv – dvs. forstærke en

ændring – eller negativ, hvor den dæmper en ændring.

Et eksempel på en positiv forstærkning er sammenhængen mellem havis og refleksion af solindstrålingen. Hvis havtemperaturen falder, vil der blive dannet mere is, og den hvide overflade vil øge refleksionen af solstrålingen således, at havet optager mindre energi. Dermed afkøles havet yderligere, og der dannes endnu mere havis osv.

Stofkredsløbene

Man kan også se af figur 6, at vandets kredsløb er helt afgørende for klimaet. Således bruges omkring halvdelen af energien i den indkommende solstråling til at fordampe vand, og en stor del af resten bruges til at opvarme vand i oceanernes overflade, der dækker mere end 70 % af Jordens overflade. Oceanerne indeholder 97 % af klodens vandmasser, og varmetransport med havstrømme er således et vigtigt bidrag til at udligne den ovennævnte temperaturforskel mellem ækvator og polerne, ligesom vandmasserne kan oplagre store energimængder og dermed dæmpe svingninger i klimaet.

I forhold hertil er atmosfærens indhold af vanddamp forsvindende, kun ca. 0,001 %. Alligevel er vand i atmosfæren en meget vigtig – og sårbar – komponent i klimasystemet, fordi mængden af vanddamp øjeblikkeligt reagerer på ændringer i klimaet. Fordelingen af vand i atmosfæren er derfor kritisk – dels fordi vanddamp er en drivhusgas, og dels fordi vanddampen ofte kondenserer andre steder end den fordampes og derfor bidrager til energitransporten i atmosfæren. Endelig er fordelingen af nedbør naturligvis afgørende for biosfæren.

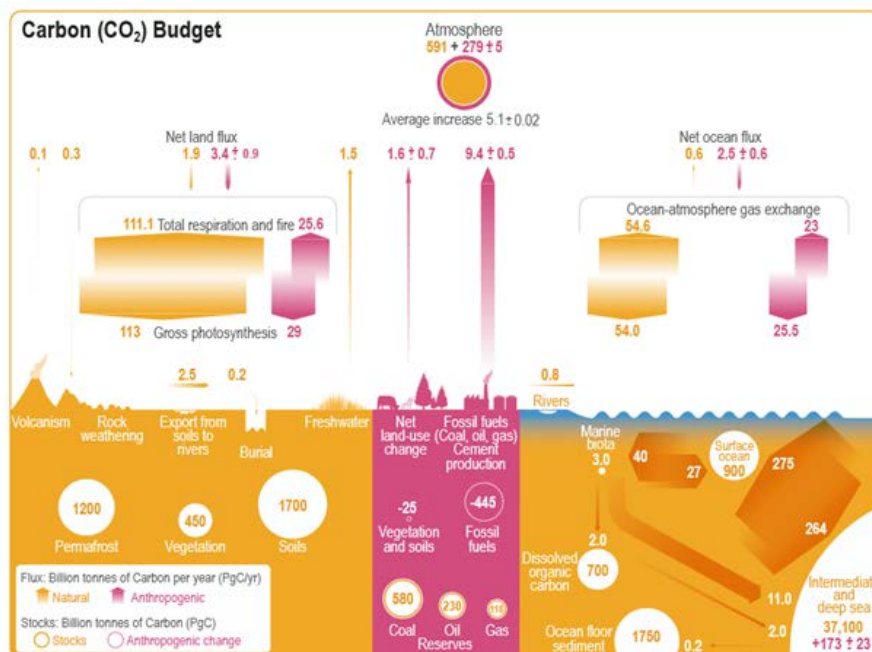
Kulstofkredsløbet er også med til at forbinde de forskellige sfærer til hinanden, især fordi kulstof indgår i planternes fotosyntese og dermed i biosfæren, ligesom det ligeledes har en direkte indflydelse på klimaet, fordi det regulerer to vigtige drivhusgasser, nemlig kuldioxid (CO_2) og metan (CH_4). I sammenligning med vandets kredsløb er kulstofkredsløbet meget mere komplekst, og nogle af mekanismerne, blandt andet nedbrydning af bjergarter, er meget langsommere. Det introducerer til gengæld muligheden for feedback-mekanismer med meget lange tidskonstanter i klimaet.

Svovl, kvælstof og fosfor er nogle af de andre stofkredsløb, der kobler komponenterne sammen og påvirker klimaet. Svovl er fx ansvarlig for dannelsen af aerosoler, der ændrer refleksionen af solstrålingen, ligesom aerosolerne fungerer som kim for dannelse af skydråber. Mængden af såvel kvælstof som fosfor i oceanernes overfladelag udgør også en begrænsning for den biologiske produktivitet i oceanerne og dermed for CO_2 -kredsløbet.

Kulstofkredsløbet

I denne del ser vi kun kort på kulstofkredsløbet, som i næste artikel bliver centralt for diskussionen af menneskets påvirkning af klimaet.

Kulstof er en afgørende bestanddel i alle organismer på Jorden, og det indgår i de fossile brændstoffer og i flere drivhusgasser. Samtidig er der stor politisk opmærksomhed om netop kulstofkredsløbet, som derfor behandles nærmere her.



Figur 7. De vigtigste dele af det globale kulstofkredsløb i milliarder ton kulstof (Gt). Tallene angiver størrelsen af kulstoflagrene og den årlige transport i Gt/år. De orange tal er tallene før den industrielle revolution og de røde tal er ændringen siden da. De røde tal er et gennemsnit for perioden 2010-2019 (1 Gt = 1 Pg). Fra FN's klimapanel's rapport "Climate Change 2021".

De vigtigste kulstofreservoirer er vist på figur 7, som også viser størrelsen af den årlige udveksling mellem reservoirerne. Tallene i kasserne viser kulstofmængderne i gigatons (Gt, det samme som en milliard tons) og tallene ved pilene viser transporten af kulstof i enheder af Gt per år. I atmosfæren optræder kulstof især som CO₂, og i mindre grad som CH₄ og CO, mens kulstoffet i den levende biomasse og i jordlaget er bundet i organisk materiale. Bemærk, at der er omtrent lige store mængder kulstof i atmosfæren og i den levende biosfære.

I oceanerne optræder kulstof som opløst CO₂, bikarbonat-ioner (HCO₃⁻) eller karbonat-ioner (CO₃²⁻), som under ét betegnes som DIC ("dissolved inorganic carbon"). Hertil kommer mindre mængder opløst organisk kulstof (DOC ("dissolved organic carbon") og små partikler af organisk materiale (POM). Mange alger danner skaller af calciumcarbonat, som over mange år aflejres som limsten på havbunden. Dermed trækkes kulstof langsomt ud af havet.

Oceanerne kan opdeles i et overfladelag og dybhavet. Vandmasserne i overfladelaget blandes af vindene og er konstant i kontakt med og udveksler CO₂ med atmosfæren. I forhold til mængden af kulstof i overfladelaget, der er af samme størrelse som kulstofmængden i atmosfæren, er der enorme kulstofmængder oplagret i dybhavet. Til gengæld er udvekslingen mellem overfladelaget og dybhavet beskeden i forhold til de andre udvekslinger, og det betyder, at mens fx kulstoffet i atmosfæren udskiftes i løbet af få år, er opholdstiden i dybhavet flere hundrede år.

Menneskeskabte ændringer

De menneskeskabte påvirkninger af kulstofkredsløbet kommer især fra forbrænding af fossile brændstoffer samt fra ændringer i vegetationen. Afbrænding af kul,

olie og naturgas frigiver årligt ca. 9,4 Gt kul, mens ændringerne i vegetationen, der hovedsageligt skyldes skovrydninger i tropen, bidrager med ca. 1,6 Gt årligt. Af det årlige menneskeskabte udslip på i alt ca. 11 Gt akkumuleres ca. 5 Gt i atmosfæren, mens det skønnes, at oceanerne netto optager ca. 3 Gt. Hvor resten af kulstoffet (ca. 3 Gt årligt) bliver af, har man ikke styr på, og det omtales lidt vittigt som "the missing sink". Naturligvis forsvinder kulstoffet ikke, så selvom der fortsat globalt ryddes skovområder, må biosfæren netto optage mere kulstof, end den afgiver. På figur 7 er dette kulstofoptag betegnet som "Net land flux", men der er uenighed om, hvor optaget sker. Det er dog sandsynligt, at der optages store mængder i skovene på mellembreddegraderne på den nordlige halvkugle, specielt i Nordamerika. Optag af kulstof kan fx ske ved, at skoven vender tilbage på landbrugsarealer, der ikke længere benyttes, ligesom den øgede mængde CO₂ i atmosfæren stimulerer fotosyntesen, så biomassen optager mere kulstof. Den samme effekt kan være opnået ved, at Jordens gennemsnitstemperatur er steget, og endelig kan et (utilsigtet) resultat af luftforurening med kvælstofoxider (NO_x) være, at tilførslen af kvælstof virker som gødning på planteproduktionen og dermed har øget kulstofoptaget.

Opmærksomheden har i mange år været rettet mod CO₂-indholdet i atmosfæren, der som illustreret i figur 7 fra et førindustrielt niveau på 589 Gt er øget med 280 Gt og derfor nu ligger omkring 50 % over det førindustrielle niveau. Der er ikke tvivl om, at stigningen skyldes menneskets aktiviteter, bl.a. fordi isotopsammensætningen af kulstoffet afslører, at en stigende del af kulstoffet i atmosfæren kommer fra fossile brændstoffer.

Spørgsmålet er, hvor meget den ekstra mængde kulstof i atmosfæren har betydet for klimaet? Hvis vi

ser igen på figur 1, kan vi se, at temperaturerne både har været stigende og faldende de sidste 150 år, selvom vi må gå ud fra, at CO₂-koncentrationen i samme periode har været stigende. Som man kan se af figur 7, så vokser mængden af kulstof i atmosfæren med ca. 5 Gt om året. De sidste 15 år har mennesket således udledt omkring 75 Gt kulstof, hvilket svarer til en fjerdedel af alt det kulstof, som vi har udledt til atmosfæren siden industrialiseringen.

Som nævnt har FN's Klimapanel i sin seneste rapport konkluderet, at klimafølsomheden sandsynligvis ligger et sted mellem 2,5 °C og 4,0 °C med 3,0 °C som det bedste estimat. Det er vigtigt at være opmærksom på, at disse tal er den såkaldte langsigtede klimafølsomhed ECS (*Equilibrium Climate Sensitivity*). Den angiver den endelige temperaturstigning, når klimasystemet – inklusive oceanerne – har opnået fuld ligevægt efter en CO₂-fordobling. Det tager typisk flere århundreder, fordi dybhavet reagerer meget langsomt. ECS beskriver altså det langsigtede, fuldt udfoldede svar fra hele klimasystemet.

Et mere praktisk mål er derfor den transiente klimafølsomhed, TCR (*Transient Climate Response*), som er temperaturstigningen på det tidspunkt, hvor CO₂-koncentrationen netop er fordoblet i en model, hvor koncentrationen gradvist vokser med 1 % om året. Klimapanelet vurderer, at TCR sandsynligvis ligger mellem 1,4 og 2,2 °C.

Fortsættelse følger

Jordens klima har gennem hele sin historie været præget af store naturlige udsving, og selv i den periode, hvor mennesket har været til stede, har temperaturer, nedbør og cirkulationsmønstre ændret sig markant. I dag befinder vi os igen i en periode med klimaændringer, men i modsætning til tidligere tider spiller både menneskets påvirkning og vores teknologiske og samfundsmæssige udvikling en central rolle.

I næste del af artikelserien ser vi nærmere på, hvordan klimaændringerne påvirker samfund, økonomi og menneskers sundhed, og hvordan videnskabelige resultater omsættes til politik, strategi og offentlig debat. Dermed bevæger vi os fra klimaets fysiske dynamik til de samfundsmæssige konsekvenser – og videre til spørgsmålet om, hvordan vi bedst træffer beslutninger i en verden, hvor klimaet både forandrer sig.



Jens Olaf Pepke Pedersen er seniorforsker ved DTU Space og redaktør af Kvant.

Meteren, en fantastisk fortælling

Peer Jespersen

Artiklen fortæller historien om den franske meters tilblivelse under revolutionen og Nationalforsamlingens beslutning om at definere et universelt længdemål baseret på Jordens meridian. De to astronomer Jean Baptiste Joseph Delambre og Pierre Méchain fik til opgave at opmåle strækningen fra Dunkerque til Barcelona ved hjælp af triangulering og Bordas cirkelinstrument. Opmålingerne blev præget af politiske uroligheder, arrestationer, krig og tekniske udfordringer, herunder Méchains hemmeligholdte målefejl. Efter flere års arbejde kunne de aflevere et samlet datagrundlag, der dannede basis for den første definition af meteren. Artiklen gennemgår både den historiske proces og de matematiske principper bag trianguleringen.

Den 14. juli 1789 stormede parisiske borgere Bastillen. De slog vagterne ihjel og frigav fangerne. Revolutionen var i gang. Enevældet og adlen blev afskaffet. Nationalforsamlingen blev dannet med direkte valg.

I 1790 fremsatte C. M. de Talleyrand-Périgord et forslag i Nationalforsamlingen om definitionen af et længdemål ud fra en uforanderlig størrelse. Nationalforsamlingen støttede forslaget og besluttede, at længdemålet, én meter, skulle defineres som $1/10.000.000$ af afstanden fra Ækvator til Nordpolen målt langs meridianen, der går gennem Paris.

I praksis valgte man at bestemme afstanden fra det gamle fyrtårn i Barcelona til fyrtårnet i Dunkerque. Nationalforsamlingen havde også besluttet, at opmålingen skulle ske ved triangulering ved brug af instrumentet Bordas cirkelinstrument.

I juni 1791 sendte man astronomen og landmåleren Pierre Méchain (1744–1804) til Barcelona og astronomen Jean Baptiste Delambre (1749–1822) til Dunkerque. Méchain skulle opmåle afstanden fra Barcelona til Rodez, mens Delambre opmålte afstanden fra Dunkerque til Rodez.

Opmålingen

Delambre startede sin opgave i juni 1791. I første omgang ledte han efter trianguleringspunkter omkring Paris. Hans autorisation til opgaven var givet af kong Ludvig 16., og han blev derfor arresteret. Imidlertid blev kongen selv arresteret natten mellem den 20. og 21. juni.

Efter at Delambre modtog en ny autorisation fra Nationalforsamlingen, blev han løsladt. Han blev dog arresteret et par dage senere, da Bordas cirkelinstrument virkede mistænkeligt. Var han mon spion?

Han fik igen et nyt officielt papir fra Nationalforsamlingen og kunne nu fortsætte opgaven. Der var dog kun lidt fremskridt i arbejdet inden han vendte tilbage til Paris, hvor han tilbragte vinteren. Om foråret 1792 begyndte han at arbejde sig sydover fra Dunkerque.

Nye besværligheder kom i slutningen af 1793, hvor *Komiteen for den Offentlige Sikkerhed* fik ham fjernet fra opgaven. Først i maj 1795 blev Delambre genindsat.

I sidste del af 1795 triangulerede han mellem Orléans og Bourges, og i løbet af sommeren 1796 mellem Bourges og Evaux. Han kunne derfor allerede i 1797 afslutte trianguleringsopgaven ved triangulering

mellem Evaux og Rodez.

Vinteren 1795/96 tilbragte han i Dunkerque for at beregne bredde- og længdegrader meget præcis. Endvidere skulle der opmåles en præcis basislinje, så beregninger kunne blive nøjagtige. Udover basislinjen ved Dunkerque opmålte Delambre også en præcis basislinje i Melun, sydøst for Paris i april 1798.

Efter alle opmålinger kom det store arbejde med beregninger, og Delambre kunne aflevere sin rapport til *Komiteen for Vægt og Mål* i februar 1799.



Figur 1. Delambres og Méchains triangulering.



Figur 2. Jean Baptiste Joseph Delambre.

Den 28. juni 1792 rejste Méchain til Barcelona. I løbet af sommeren fandt han trianguleringspunkter i Catalonien. Igennem efteråret anvendte han Bordas cirkelinstrument til at bestemme præcise placeringer af trianguleringspunkterne.

Vinteren 1792/93 tilbragte han i Barcelona for at bestemme den præcise måling af bredde- og længdegraderne. De spanske myndigheder samarbejdede positivt med Méchain og han fik lov til at benytte slottet på toppen af Mont Juïc.



Figur 3. Pierre Méchain.

I marts 1793 brød en krig (Pyrenæerkrigen, marts 1793 – juli 1795) ud mellem Frankrig og Spanien. Méchains arbejde i Spanien blev afbrudt, og han drog til Pyrenæerne, hvor han triangulerede bjergenes tinder. Da han ikke kun få instrumenterne, som stadig var på slottet Mont Juïc, anvendte han instrumenter fra kroen,

hvor han boede. I marts 1794 opdagede Méchain at instrumenterne fra kroen ikke gav de samme resultater, som hans egne instrumenter fra Mont Juïc. Han informerede imidlertid ingen om dette, og i april 1795 tog han til Perpignan for at genoptage opmålingen.

Delambre sendte Méchain alle de data, han havde opmålt og beregnet. Omvendt nægtede Méchain at sende sine data. Ligeledes nægtede han at vende tilbage til Paris for at møde Delambre. Han frygtede vel, at hans fejl ville blive opdaget.

Før Méchain sendte sin rapport ændrede han sine data. Ændringerne betød ikke at gennemsnittet blev ændret, men at afvigelsen fra gennemsnittet blev mindsket. Méchain indsendte sin rapport i juni 1799. Han døde i 1804 på en ny ekspedition for at korrigere sine målinger. Fejlen var dog meget lille og i størrelsesordenen 0,23 mm på 1 meter.

Triangulering

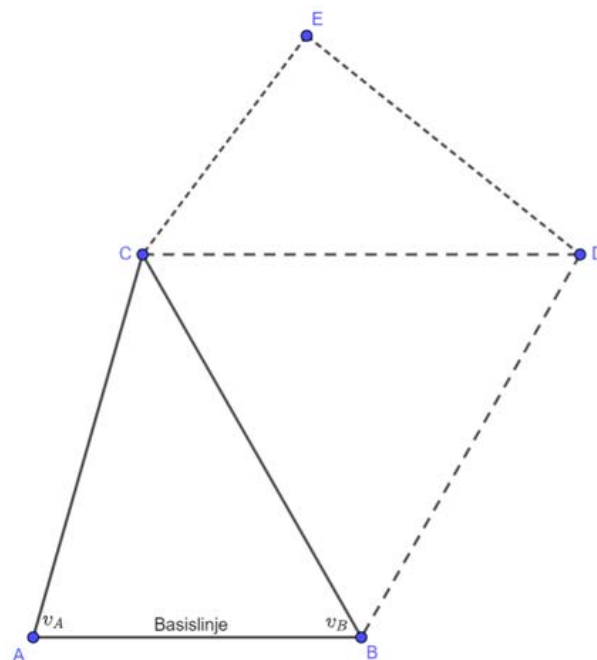
Triangulering foregår ved, at man definerer sin basislinje, som opmåles præcis. På figur 4 er linjestykket AB vores basislinje.

Trianguleringspunktet C bestemmes og vinklerne v_A og v_B opmåles ved hjælp af Bordas cirkelinstrument. Da vinkelsummen i en trekant er konstant 180° kan vinklen $v_C = \angle ACB$ beregnes. Ved brug af sinusrelationen:

$$\frac{|AB|}{\sin(v_C)} = \frac{|AC|}{\sin(v_B)} = \frac{|BC|}{\sin(v_A)} \quad (1)$$

kan afstandene $|AC|$ og $|BC|$ nu bestemmes.

Trianguleringen fortsætter nu til trianguleringspunktet D , hvor linjestykket BC fungerer som basislinje.

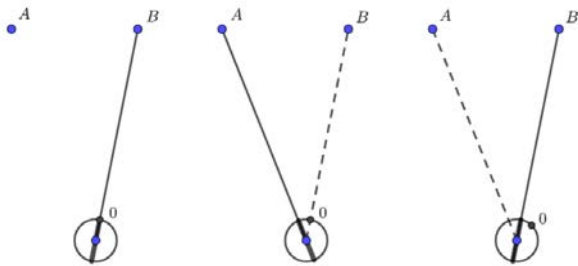


Figur 4. Triangulering.

Bordas cirkelinstrument

Bordas cirkelinstrument består af en cirkel, som langs kanten er inddelt i 720 lige store dele. Svarende til $\frac{1}{2}$

grad. Cirklen kan drejes begge veje, men kan også låses fast til en underliggende arm. Ovenpå cirklen er placeret et kikkertsigte. Ligesom cirklen kan kikkerten drejes begge veje, og kan låses fast på den drejelige cirkel.



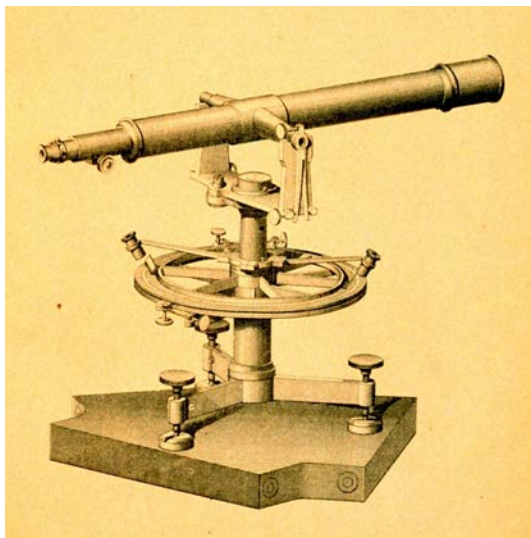
Figur 5. Arbejdsmetode for Bordas cirkelinstrument.

Bordas cirkelinstrument funktionsmetode:

1. Fastlås kikkertsigte ved cirkelens nulpunkt og drej cirklen, så kikkertsigtet peger mod punkt B . Når kikkertsigtet peger mod B låses cirklen fast til den underliggende arm.

2. Lås nu kikkertsigtet op og drej det mod venstre, så det peger mod punkt A . Når kikkertsigtet peger mod A låses kikkertsigtet fast til cirklen.

3. Lås nu cirklen fri af den underliggende arm og drej cirklen med kikkertsigtet, så det peger mod punkt B . Når kikkertsigtet peger mod punkt B låses cirklen fast på armen

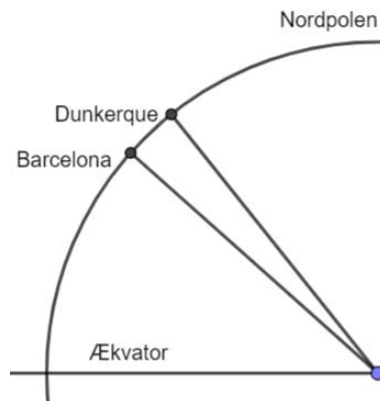


Figur 6. Bordas cirkelinstrument.

Dette (punkterne 2 og 3) gentages et bestemt antal gange, n . Efter sidste gentagelse bestemmes den samlede vinkel og denne deles med antal gange målingen er foretaget for at få den søgte vinkel. Men hvorfor gentagelsen?

Hvis den søgte vinkel er v , så har hver måling en usikkerhed på v . Den enkelte måling kan dermed opfattes som en stokastisk variabel med middelværdi v og spredning v ; $X_i \sim N(v, \sigma)$, $i = 1, 2, \dots, n$. Gennemsnittet af de n stokastiske variable er også en normalfordelt stokastisk variabel, $\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum X_i$ med samme middelværdi v , men med en spredning

på $\sigma/\sqrt{n}$. Dermed vil gennemsnittet afvige væsentlig mindre fra den søgte vinkel end hver enkelt måling.



Figur 7. Vinklen mellem Barcelona og Dunkerque.

Afsluttende beregninger

Delambre og Méchain har i beregningerne anvendt samme længdemål i opmålingen af basislinjen og de efterfølgende beregninger. Det længdemål de har anvendt er en toise (favn).

Delambre og Méchains konklusion var, at mellem Barcelona og Dunkerque var der 550.400 toise. Da buen mellem Barcelona og Dunkerque er $9,7^\circ$ kan længden af 1 meter nu beregnes som

$$\frac{550.400 \cdot 90}{9,7 \cdot 10.000.000} \quad (2)$$

hvilket giver, at 1 meter = 0,51068 toise.

Litteratur

- [1] www.bookofthrees.com/the-metre-the-repeating-circle-triangulation/
- [2] www.kenalder.com/measure/maps.htm
- [3] lex.dk/meter
- [4] lex.dk/toise
- [5] www.marinehist.dk/orlogsbib/Maritimk/Maritimk25.pdf
- [6] mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Delambre/
- [7] mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Mechain/
- [8] www.op.no/meteren-en-fantastisk-historie/o/5-36-1018587



Peer Jespersen er kandidat i matematik og datalogi fra Aarhus Universitet (1979) og har undervist på erhvervsakademier, ingeniørhøjskoler og gymnasier samt arbejdet i den private sektor. I dag er han pensionist med interesse for historisk matematik. Han er forfatter til "Elementer af matematikkens historier" (udkommer på LMFK-forlaget) og er ved at færdiggøre "Den græske matematik". Han undersøger nu kinesisk matematik.

Stenudslyngning – breddeopgave 117 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen¹, 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. 117 her i Kvant):

Breddeopgave 117. Stenudslyngning

En pige slynger et glat og stift plastikrør rundt i et vandret plan. På indersiden af røret sidder en lille sten fast i noget snavs. Stenen river sig løs. Hvor stor er stenens energi, når den forlader røret? Begrund svaret.

Løsning

Stenens hastighed, når den forlader røret, er vektorsummen af hastigheden af rørspidsen v_r og den hastighed, stenen da har i forhold til røret, v_{sr} . Da v_r og v_{sr} er vinkelrette på hinanden, er stenens energi E når den forlader røret:

$$E = \frac{1}{2}mv_r^2 + \frac{1}{2}mv_{sr}^2, \quad (1)$$

hvor stenens masse er kaldt m .

Hvis plastikrøret slynges rundt med vinkelhastigheden ω , og røret har længden l_r , er v_r lig med $l_r\omega$. Det første bidrag til energien i ligning (1) er derfor:

$$\frac{1}{2}mv_r^2 = \frac{1}{2}m(l_r\omega)^2. \quad (2)$$

Det andet bidrag kan findes ved at integrere arbejdet, centrifugalkraften udfører i rørets roterende system. I det roterende system er stenen, udover af centrifugalkraften, påvirket af en tyngdekraft, en Corioliskraft og en normalreaktion fra kontakten med røret. Men tyngdekraften og Corioliskraften ophæves af normalreaktionens henholdsvis lodrette og vandrette komponent, da stenen, bedømt fra rørets system, kun bevæger sig i retningen langs røret. Hvis stenen river sig løs i afstanden l_s fra centrum af det roterende system, har vi derfor:

$$\frac{1}{2}mv_{sr}^2 = \int_{l_s}^{l_r} m\omega^2 r dr = \frac{1}{2}m\omega^2(l_r^2 - l_s^2). \quad (3)$$

¹ Jens Højgaard Jensen døde den 3. april 2025 og efter familiens ønske bringer vi i dette og de kommende numre de opgaver, som han havde forberedt. Se også mindeord fra Kristine Niss og Jeppe Dyre på bagsiden af Kvant nr. 2 (2025).

Ved indsættelse af ligningerne (2) og (3) i (1) fås da

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2(2l_r^2 - l_s^2) \quad (4)$$

som svar på opgaven.

Kommentar

Opgaven, som skyldes Poul Winther Andersen, er som vist ikke nødvendigvis matematikkrævende. Alligevel er den nok ikke så nem. Udfordringen ligger ikke i det matematiske, men i det fysisk begrebsmæssige. Regning i det roterende system som input til et resultat i inertialsystemet er usædvanligt.

Hvordan kan man mon nå det samme resultat ved at holde sig til inertialsystemet hele vejen? I inertialsystemet påvirkes stenen kun af tyngdekraft og normalreaktion, hvor normalreaktionens lodrette komponent og tyngdekraften ophæver hinanden. Tilbage til at levere arbejdet i inertialsystemet, der forøger stenens energi til E i ligning (4), er alene normalreaktionens vandrette komponent. Hvordan lader det sig gøre? For at svare på det må der matematisk formalisering til.

Lad $e(t) = (\cos\omega t, \sin\omega t)$ være en enhedsvektor i inertialsystemet i rørets retning, og $e_v(t) = (-\sin\omega t, \cos\omega t)$ en enhedsvektor vinkelret herpå. Så kan vi udtrykke stenens position i inertialsystemet som $r(t) = r(t)e(t)$ og normalreaktionens vandrette komponent som $N(r(t)) = N(r(t))e_v(t)$ til indsætning i Newtons II lov i inertialsystemet:

$$N(r(t))e_v(t) = m \frac{d^2 r(t)e(t)}{dt^2}. \quad (5)$$

Idet $de(t)/dt = \omega e_v(t)$ og $de_v(t)/dt = -\omega e(t)$, fører de to gange differentiation i ligning (5) til:

$$N(r(t))e_v(t) = 2m\omega \frac{dr(t)}{dt}e_v(t) + m\left(\frac{d^2 r(t)}{dt^2} - \omega^2 r(t)\right)e(t). \quad (6)$$

Heraf ses af nødvendighed, at $d^2 r(t)/dt^2 - \omega^2 r(t) = 0$, (som er bevægelsesligningen for $r(t)$ i rørets system). Det ses også, at $N(r(t))$ nødvendigvis er lig med $2m\omega dr(t)/dt$, (svarende til Corioliskraften i rørets sy-

stem). Udtrykket kan benyttes til at udregne arbejdet A , som den vandrette komponent af normalkraften udfører i inertialsystemet:

$$A = \int \mathbf{N}(r(t)) \cdot d\mathbf{r}(t) \quad (7)$$

Da

$$\begin{aligned} \mathbf{N}(r(t)) \cdot d\mathbf{r}(t) &= N(r(t))\mathbf{e}_v(t) \cdot [dr(t)\mathbf{e}(t) + r(t)d\mathbf{e}(t)] \\ &= N(r(t))\mathbf{e}_v(t) \cdot r(t)\omega\mathbf{e}_v(t)dt \\ &= 2m\omega[dr(t)/dt]r(t)\omega dt = 2m\omega^2 r dr, \end{aligned} \quad (8)$$

når vi frem til:

$$A = \int_{l_s}^{l_r} 2m\omega^2 r dr = m\omega^2(l_r^2 - l_s^2). \quad (9)$$

I inertialsystemet har stenen energien $\frac{1}{2}m(\omega l_s)^2$, før den river sig løs. Lægges arbejdet udført af normalkraftens vandrette komponent hertil, fastlægger det stenens energi, når den forlader røret, til at være:

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 l_s^2 + A = \frac{1}{2}m\omega^2(2l_r^2 - l_s^2), \quad (10)$$

i overensstemmelse med udregningen via det roterende system, jævnfør ligning (4).

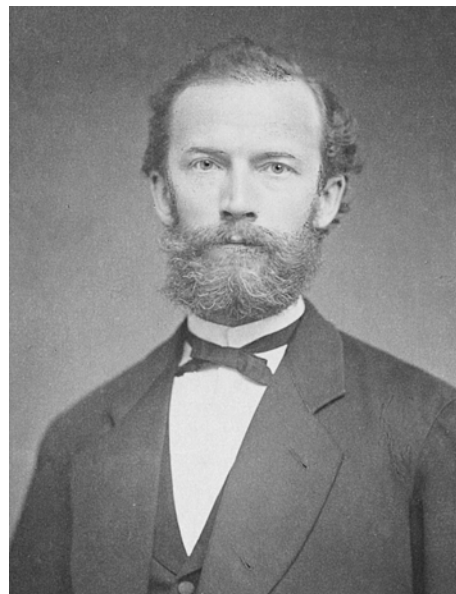
Efter sigende [1] blev en yngre kollega til fysikeren Enrico Fermi udsat for denne hårde kommentar til en udregning, han havde præsenteret Fermi for:

“There are two ways of doing calculations in theoretical physics. One way, and this is the way I prefer, is to have a clear physical picture of the process you are calculating. The other way is to have a precise and self-consistent mathematical formalism. You have neither.”

Beregningen af energien af stenens slutenergi via det roterende system, baserer sig for mig på et fysisk billede af processen vi regner på. Ligning (3) kan således helt enkelt tolkes som energibevarelse i det roterende system. Til venstre står tilvæksten af kinetisk energi. Til højre står tabet af potentiel energi hørende til det konservative centrifugalkraftfelt. På breddekurset undervises de studerende i, som Fermi foretrækker det, at have et klart fysisk billede af, hvad der regnes på ved opgaveløsning.

Anderledes forholder det sig med beregningen i inertialsystemet. Selvom normalkraften er vinkelret på røret, er den ikke vinkelret på bevægelsen i inertialsystemet, og derfor udfører den arbejde i dette system. Men jeg har her nemmere ved at vende mig til en konsistent matematisk formalisme, end at danne mig brugbare fysiske billeder.

Jeg tænker, at de to slags løsninger af opgaven illustrerer de to slags strategier, Fermi beskriver. Martin Niss har i artiklen “What Is Physics Problem-Solving Competency? The Views of Arnold Sommerfeld and Enrico Fermi” [2] karakteriseret de to strategier og knyttet dem til henholdsvis Fermi og Sommerfeld. På RUC lægger breddekurset sig op af Fermis foretrukne position, medens de øvrige kurser i højere grad dyrker opgaveløsning à la Sommerfeld.

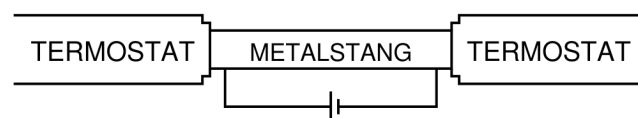


Figur 1. Den tyske fysiker Friedrich Kohlrausch (1840–1910) er især kendt for målinger af elasticitet, lysbrydning, jordmagnetisme, vægtfylde, elektrisk ledningsmodstand og elektrolyters ledningsevne. Hans *Leitfaden der praktischen Physik* (Leipzig 1870), der udkom i mange oplag, har haft stor betydning for indførelsen af praktiske øvelser i fysikundervisningen.

Breddeopgave 118. Kohlrausch’ metode

Inden næste nummer af Kvant udkommer kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 2008, nr. 118 i rækken her i Kvant):

Ved den såkaldte Kohlrausch’ metode måles forholdet mellem varmeledningsevnen og den elektriske ledningsevne for metaller ved hjælp af en opstilling som antydnet på figuren:



Figur 2. Illustration af breddeopgave 118.

En varmeisoleret metalstang anbringes mellem to termostater, der holder dens ender ved samme konstante temperatur. Stangen opvarmes ved, at der sendes en elektrisk strøm igennem den. Forholdet mellem varmeledningsevnen og den elektriske ledningsevne for metallet er da givet ved spændingen over metalstangen og temperaturforskellen mellem stangens midte og dens ender. Hvordan? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] D. N. Schwartz (2017) “The Last Man Who Knew Everything”. Basic Books (New York) side 295.
- [2] M. Niss (2018) “What Is Physics Problem-Solving Competency? The Views of Arnold Sommerfeld and Enrico Fermi”, *Science and Education*, bind 27, side 357–369.

Nyt fra foreningerne

SNU uddeler medaljer og en pris

Bertil Dorch modtager Ørstedmedaljen for enestående naturvidenskabsformidling

Selskabet for Naturlærens Udbredelse uddelte den 15. september 2025 H.C. Ørstedmedaljen i bronze til universitetsbibliotekchef og astrofysiker Bertil Fabritius Dorch for hans mangeårige og fremragende formidling af eksakt naturvidenskab til brede målgrupper.

I promoveringen fremhævede SNU's præsident, Rasmus Larsen, det store bidrag, som Bertil Dorch har ydet til SNU's HCØ-udstilling i 2020 og SNU's jubilæumsudstilling "Fra Forsker til Folk" i 2024. Udstillingerne er blandt andre steder vist på Syddansk Universitets campusser i Odense og Sønderborg.



Figur 1. Bertil Dorch.

Dorch er uddannet astrofysiker fra Niels Bohr Institutet med en ph.d. om numeriske simulationer af Solens og andre stjerners magnetfelter. Han har arbejdet ved Det Kongelige Svenske Videnskabsakademi, Københavns Universitet og Det Kongelige Bibliotek, før han i 2013 blev chef for Universitetsbiblioteket ved SDU.

Han er forfatter eller medforfatter til over 140 videnskabelige publikationer, som er citeret mere end 2.000 gange, og han har optrådt hyppigt i danske medier. Hans formidlingsvirke rækker langt ud over SNU's udstillinger og omfatter bl.a. arbejde for Lex – Danmarks Nationalleksikon, Forskningens Døgn, Naturvidenskabsfestivalen og markeringen af 450-året for Tycho Brahes supernovaobservation.

Dorch formidler løbende ny forskning – også den svære del – og har oprettet en YouTube-kanal, hvor han hver uge gennemgår en aktuel forskningsartikel og interviewer forskerne bag.

I sin takketale pegede han på det kommende 350-års jubilæum for Ole Rømers opdagelse af "lysets tøven". Han er initiativtager til et nationalt formidlingsprojekt

i den anledning og medbragte et historisk eksemplar af Académie des sciences' forhandlinger, hvor Rømers opdagelse blev offentliggjort.

Sarah Pearson modtager Kirstine Meyers Mindelegat for banebrydende forskning i galaksedynamik

Mandag den 10. november uddelte SNU Kirstine Meyers Mindelegat til Sarah Pearson fra Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet



Figur 2. Sarah Pearson.

Modtageren udvælges på baggrund af indstillinger fra landets naturvidenskabelige institutledere og besluttes af et udvalg bestående af Jesper Gretlund, Sophie Beeren og Kirstine Berg-Sørensen.

SNU's præsident, Rasmus Larsen, fremhævede Kirstine Meyers pionerrolle som Danmarks første kvindelige dr.phil. i fysik og hendes betydning for bevarelsen af Ole Rømers og H.C. Ørstedes arbejder. Han pegede også på, at 2026 markerer begyndelsen på Ole Rømer-året, hvor 350-året for opdagelsen af lysets endelige hastighed fejres. Dette og andre historiske nedslag præsenteres i SNU's vandreudstilling Fra Forsker til Folk, der vises på DOKK1 i Aarhus fra slutningen af november.

Sarah Pearson har ydet markante bidrag til forståelsen af galaksers dynamik. Hun har bl.a. vist, hvordan den galaktiske bjælke i Mælkevejens centrum kan skabe voksende huller i stjernestrømme, og hun har udviklet analytiske metoder til at forudsige dette, hvilket hun også har skrevet om i KVANT nr. 1 i 2018.

Hun har taget en internationalt ledende rolle i både teoretiske og observationelle studier af extragalaktiske stjernestrømme og har taget de første skridt mod at kortlægge mørkt stof ud fra sådanne observationer.

Pearson modtog sin kandidatgrad fra Københavns Universitet i 2015 og sin ph.d. fra Columbia University i 2018. Efter en periode som NASA Hubble Fellow ved New York University blev hun i 2023 ansat som adjunkt ved Niels Bohr Institutet.

Linda Schneider modtager Ørstedmedaljen for inspirerende naturvidenskabsundervisning

Den 1. december 2025 tildelte SNU H.C. Ørstedmedaljen i bronze for inspirerende undervisning i naturvidenskab til lektor Linda Schneider, Gefion Gymnasium. Med medaljen følger et rejselegat på 25.000 kroner samt 50.000 kroner til et projekt på Gefion Gymnasium i samarbejde med energiselskabet Ørsted.



Figur 3. Linda Schneider omgivet af glade elever.

Lektor Linda Schneider er cand.scient. og ph.d. i cellebiologi og molekylærbiologi fra Københavns Universitet. Hun har siden 2009 været ansat på Gefion Gymnasium, hvor hun underviser i bioteknologi, kemi og biologi.

Blandt mange udsagn i indstillingen af Linda Schneider til medaljen og legatet er dette fra en elev i 3.g:

“Lindas faglige kompetencer sprænger skalaen. Hendes baggrund inden for faget rækker ud over den typiske bioteknologilærer, og med tidligere erfaring inden for forskning mener vi, at en lærer ikke kan have et bedre undervisningsgrundlag. Denne enorme mængde viden formår hun at formidle fantastisk til os ved brug af sit unikke nærvær, sin hjælpsomhed og sin ivrige indstilling til at undervise os. Hun formår at bringe en ekstraordinær nysgerrighed for naturvidenskaben frem hos hele klassen, hvilket har skabt et utroligt velfungerende klassemiljø og desuden en passion for bioteknologi, som enhver lærer kan misunde.”

Ny hjemmeside for AS

Astronomisk Selskab har fået ny, opdateret hjemmeside: Besøg <https://astronomisk.dk> og læs bl.a. mere om:

- selskabets spændende foredrag om de seneste opdagelser
- hvordan du melder dig ind i Astronomisk Selskab
- hvordan du kan låne en stjernkikkert og kigge med på stjernehimlen. Astronomisk selskabs instrumentpulje er blevet suppleret med nye teleskoper, som medlemmerne kan låne, så vi nu har fem teleskoper.



Er det længe siden, du har hørt fra foreningen via e-mail? Så mangler vi måske din (nye) e-mailadresse. Send en mail til kasserer Morten Hector Dalhoff (kasserer@astronomisk.dk), så tjekker han, om vi har den og andre relevante oplysninger om dig.

Wieth-Knudsen observatoriet

Husk også, at Wieth-Knudsen observatoriet i Tisvilde, Margot Nyholms Vej 19, 3220 Tisvildeleje, har åbent hus den anden og den sidste lørdag i måneden (uanset vejret). Der er gratis adgang, og man behøver ikke at melde sig til i forvejen. Det er naturligvis kun i klart vejr, at det er muligt at se noget på himlen, men ellers viser vi observatoriet frem, og snakker om astronomiske emner.

I vinterhalvåret har vi åbent fra kl. 21 og et par timer frem. Om sommeren, når det bliver senere mørkt, rykkes åbningstiden tilsvarende på denne måde: September til marts: kl. 21-23, april og august: kl. 22-24, samt maj, juni og juli: kl. 23-24.

Ny bestyrelse for DFS

Dansk Fysisk Selskab har afholdt valg til fire ledige pladser i bestyrelsen. Valget blev afholdt som fredsvalg, og det blev genvalg til Søren B. Korsholm fra DTU Fysik, mens der var nyvalg til Jill Miwa, Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet, Liselotte Jauffred, DTU Bioengineering, og N. Asger Mortensen, Mads Clausen Institut ved Syddansk Universitet.



Bestyrelsen har efterfølgende konstitueret sig med Ian Bearden som formand, Jill Miwa som næstformand og Louise Kindt som kasserer. Den nye bestyrelse tiltræder officielt 1. januar 2026.

Kommende foredrag i foråret 2026

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Jan				
19/1	19.00	Der er god kemi mellem molekylære simulationer og kvante-computere	Ulrich Busk Hoff	SNU
19/1	19.30	Solen	Bertil Dorch	AS (Kbh.)
26/1	19.30	Nyt om Solen og Jupiter	John Leif Jørgensen	AS (Kbh.)
Feb				
2/2	19.30	Máni og Månen	Jens Frydenvang	AS (Kbh.)
9/2	19.30	Is i Solsystemet	Christine Schøtt Hvidberg	AS (Kbh.)
16/2	19.30	Asteroider og andre smålegemer	Kim Lang	AS (Kbh.)
23/2	19.00	Titel kommer senere	Morten Kjærgaard	SNU
23/2	17.30	Solen	Bertil Dorch	AS (Aarh.)
Mar				
2/3	17.30	Nyt om Solen og Jupiter	John Leif Jørgensen	AS (Aarh.)
9/3	17.30	Is i Solsystemet	Christine Schøtt Hvidberg	AS (Aarh.)
16/3	17.30	Máni og Månen	Jens Frydenvang	AS (Aarh.)
23/3	17.30	Asteroider og andre smålegemer	Kim Lang	AS (Aarh.)
23/3	19.00	Titel kommer senere	NN	SNU
Apr				
27/4	19.00	Intra-cellulær kvante-magnetometri med NV-diamanter Med efterfølgende generalforsamling	Kirstine Berg-Sørensen	SNU
Juni				
1/6	19.00	Tyngdefeltsmålinger og navigation med kvante-accelerometre Med uddeling af HCØ-bronze-medalje til en grundskolelærer	René Forsberg	SNU

AS (Kbh.): AU, Campus Emdrup, bygning D, lokale D170, Tuborgvej 164, 2400, København NV. (astronomisk.dk).

AS (Aarh.): AU, bygning 1530, auditorium E, Ny Munkegade 118, 8000, Aarhus C.

Astronomisk Selskabs foredragsrække "Rendezvous med Solsystemet" arrangeres i samarbejde med Folkeuniversitetet i Aarhus. Medlemmer af AS modtager en mail om tilmelding med gratis adgang.

SNU: Foredragene foregår i foråret på DTU Lyngby Campus i Auditoriebygning 208 (kemiauditorierne), aud. 54 (dog aud. 53 den 1/6). (snu.dk, facebook.com/SNU1824). Husk at du kan se eller gense foredragene i SNU på Youtube. Gå ind på SNU's hjemmeside www.snu.dk → Foredrag → SNU foredrag på Youtube

Foredrag i SNU
af Selskabet for Naturiaarens Udbredelse (SNU)
Playliste • 92 videoer • 3.232 visninger

1 Jørgen Peder Steffensen - De yngste nyheder om den ældste is
Selskabet for Naturiaarens Udbredelse (SNU) • 75 visninger • for 6 timer siden
52:34

2 Line Clemmensen - Kunstig intelligens og dens anvendelse til at...
Selskabet for Naturiaarens Udbredelse (SNU) • 150 visninger • for 3 uger siden
52:57

3 Olav Breinbjerg - Lys, vi ikke ser
Selskabet for Naturiaarens Udbredelse (SNU) • 550 visninger • for 3 uger siden
1:26:54

Afspil alle