

KVANT November 3 2025

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 36. årgang

- 
- ALUMINIUM FYLDER 200 ÅR
 - DIGITALISERING AF LUGT • HVOR KOMMER GULDET FRA?
 - KVANT21 – FOKUS PÅ FREMTIDEN I FYSIKUNDERVISNINGEN
 - KLIMAMODELLER: GRUNDPRINCIPPER, OPBYGNING OG ANVENDELSE
 - NÅR ATOMERNE BLIVER SYNLIGE • LYS HJÆLPER OS MED AT FORSTÅ DATA
 - NOBELPRISEN I FYSIK • TRE VÆRKER OM ATOMBOMBEN • PANDEKAGEVENDING

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
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 på www.kvant.dk.
Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:
christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

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

1/4 side: 1600 kr.

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

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 4-2025 udkommer ca. 15. december

Nr. 1-2026 udkommer ca. 15. marts

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

Indhold:

Klimamodeller: Grundprincipper, opbygning og anvendelse

Hans von Storch 3

Hvor kommer guldet fra?

Bernhard Lind Schistad 8

Digitalisering af lugt: At bygge bro over den sanselige kløft i telekom-
munikation

Roana de Oliveira Hansen 14

Et andet jubilæum: aluminium fylder 200 år

Helge Kragh 17

KVANT21 – fokus på fremtiden i fysikundervisningen

Carsten Claussen og Gert Hansen 20

Lys hjælper os med at forstå data – Fra kvantesamples til klarhed i
datastrukturer

Josefine Bjørndal Robl 22

Pandekagevending – breddeopgave 116

Jens Højgaard Jensen 24

Aktuelle bøger: Tre værker om atombomben

*Michael Cramer Andersen, Jens Olaf Pepke Pedersen og Christopher
Pethick* 23

Når atomerne bliver synlige – Kan vi simulere os til et bedre helbred?

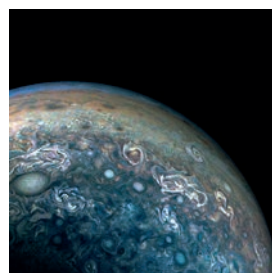
Luise Jacobsen 29

Mindeord for Henning E. Jørgensen

Erik Høg 30

Nobelprisen i fysik 2025: Makroskopisk kvantemekanik

Christine Pepke Gunnarsson Bagsiden



Forsidebilledet er en farveforstærket op-
tagelse af Jupiter den 12. maj 2024 med
rumsonden Juno. Billedet viser kaotiske
skyer og cykloniske storme i planetens
nordlige “foldede filamentregion”. På op-
tagelsestidspunktet befandt Juno sig ca.
29.000 km over skytoppene ved 68 grader
nordlig bredde. Skabt af Gary Eason ud fra
rådata fra JunoCam.

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).

Kvant omdeles med PostNord. Såfremt bladet udebliver, opfordres du til at
kontakte PostNords kundeservice på telefon 70 70 70 30 samt orientere Kvant
på e-mail kvant@kvant.dk, så vi kan sende et erstatningseksemplar.

Klimamodeller:

Grundprincipper, opbygning og anvendelse

Hans von Storch

Klimamodeller er centrale redskaber til at forstå, hvordan Jordens klima fungerer, og hvordan det kan udvikle sig i fremtiden. Artiklen introducerer de grundlæggende idéer bag klimamodellering – fra simple energibalancemodeller til komplekse, kobledede modeller, der beskriver samspillet mellem atmosfære, oceaner, land og is. Vi ser på, hvordan modellerne bygger på fysiske principper, hvordan småskala-processer håndteres gennem parameteriseringer, og hvorfor intern variabilitet spiller en vigtig rolle for usikkerheden i klimafremskrivninger. Endelig forklares, hvordan modeller bruges til at forstå menneskeskabte klimaændringer og til at udvikle scenarier for fremtidens klima. Artiklen bygger især på [1], men også [2] og [3] er centrale introduktioner til emnet.

Modelbegrebet

Før vi forklarer logikken bag, opbygningen af og anvendelsen af klimamodeller, er det nødvendigt først at diskutere nogle grundlæggende principper om modeller.

Ordet *model* kan betyde mange ting. I klimaforskning forstås en model som *en analogi til et virkeligt system*, enten i forskerens tanker eller i en computer. Vi skelner grundlæggende mellem to typer:

- **Kognitive modeller**, som er enkle og bruges til at skabe forståelse og indsigt. De er kendetegnet ved minimal kompleksitet.
- **Computermodeller**, som er kvasi-realistiske og bruges til at skabe virtuelle laboratorier eller erstatningsvirkeligheder. De har maksimal kompleksitet inden for det, nutidens computere kan håndtere, og omtales i dag ofte som “digitale tvillinger” af et fysisk system.

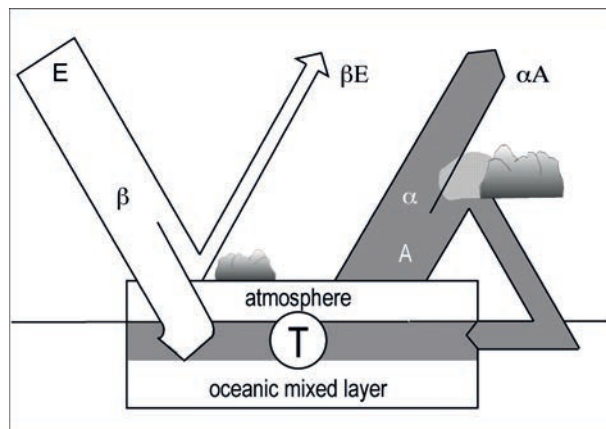
Kvasi-realistiske modeller er ikke resultatet af ad hoc-idéer fra enkelte forskere, men systematisk opbygget af et bredt videnskabeligt fællesskab. De bygger på teoretiske principper kombineret med fænomenologisk indsigt. Det kræver nøje overvejelser at repræsentere variable, tilnærme ligninger, parameterisere processer i naturen og diskretisere ligningerne. Disse modeller er ikke en “stor teori om klimaet”, men fungerer som laboratorier til at udvikle og teste hypoteser samt til at lave forudsigelser.

Minimumskompleksitet: Energibalance-modellen

Et klassisk eksempel på en enkel klimamodel er den endimensionale energibalancemodell, hvor den eneste tilstandsvariabel er atmosfærens temperatur. Modellen beskriver balancen mellem indkommende kortbølget solstråling og udgående langbølget varmestråling.

Solens stråling E rammer jordsystemet, og en del (βE) reflekteres med det samme tilbage til rummet af skyer eller lyse overflader (albedo). Den resterende del opvarmer systemet, der – ligesom sorte legemer – udsender langbølget stråling proportional med fjerde potens af temperaturen. En del af denne langbølgede

stråling fanges af atmosfæren og sendes tilbage mod overfladen, hvilket øger temperaturen yderligere. Når udgående og indkommende stråling er i balance, er systemet i ligevægt.



Figur 1. Skitse af den endimensionale energibalancemodell. Fra [2].

Energibalancemodellen forklarer den gennemsnitlige temperatur ved jordoverfladen og mekanismen bag den antropogene drivhuseffekt, nemlig en forstærket absorption af udgående langbølget stråling, hvilket resulterer i, at temperaturen ved overfladen stiger. Til gengæld kan modellen ikke beskrive regionale detaljer, ocean-atmosfære-interaktioner eller intern variabilitet. Til sådanne formål kræves modeller med langt større kompleksitet.

De primitive ligninger

Kernen i klimamodeller med høj opløsning er de såkaldte *primitive ligninger*, som beskriver atmosfærens hydro- og termodynamik. De er ikke i sig selv klimamodeller, men danner grundlaget for dem.

Ligningerne udledes fra fundamentale dynamiske love med en række tilnærmelser, herunder især den hydrostatiske tilnærmelse, som ser bort fra vertikale accelerationsled.

Tilstandsvariablerne er:

$\mathbf{v}_h = (u, v)$	horisontale vindkomponenter
w	vertikal vindkomponent
ρ	densitet
q	specifik fugtighed
S	saltholdighed i oceanet
T	temperatur
p	tryk

Ligningerne skrives normalt i sfæriske koordinater med længdegrad θ , breddegrad ϕ og højde z .

For **atmosfæren** er et sådant sæt af primitive ligninger:

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{Du}{Dt} - \frac{uv}{a} \tan \phi - f v \right) &= -\frac{1}{a \cos \phi} \partial_{\theta} p + \mathcal{F}_u \\ \rho \left(\frac{Dv}{Dt} + \frac{u^2}{a} \tan \phi + f u \right) &= -\frac{1}{a} \partial_{\phi} p + \mathcal{F}_v \\ 0 &= -\partial_p z - g \rho \\ \frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) &= 0 \\ \rho \frac{Dq}{Dt} &= \mathcal{G}_q \\ \rho c_p \frac{DT}{Dt} &= \mathcal{G}_T + \alpha \frac{Dp}{Dt} \\ p &= R_m(q) \rho T\end{aligned}$$

med

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

hvor f er Coriolis-parameteren, a Jordens radius, c_p den specifikke varmekapacitet, α den termiske ekspansionskoefficient, og R_m gaskonstanten.

De første to ligninger beskriver de horisontale komponenter af bevægelsesligningen for væsken, mens den tredje udtrykker den vertikale komponent, tilnærmet ved den hydrostatiske ligning. Den følgende ligning er kontinuitetsligningen, der udtrykker bevarelse af masse, efterfulgt af bevaarelsesligninger for vanddamp og intern energi. Den sidste ligning er tilstandsligningen.

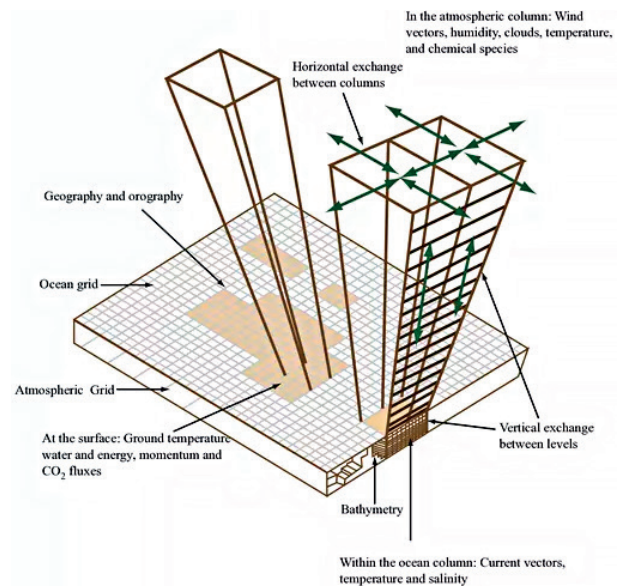
Ved numerisk løsning af de primitive ligninger opstår der hurtige trykbølger (lydbølger), som matematisk er indlejret i kontinuitetsligningen. Disse bølger bevæger sig med lydens hastighed og har ingen væsentlig betydning for klimaets langsomme storskala-dynamik, men de sætter en kraftig begrænsning på modellernes tidsintegration. Hvis man skal beskrive lydbølger eksplícit, bliver tidsskridtene meget små, og beregningerne derfor både tunge og langsomme. For at undgå dette benytter man den *anelastiske tilnærmelse*, hvor variationer i tætheden antages at være små omkring en kendt baggrundstilstand. Denne antagelse fjerner lydbølgerne fra ligningssystemet, uden at det går ud over modellens evne til at beskrive de meteorologisk og klimatisk relevante processer.

Når den anelastiske tilnærmelse anvendes, ændres kontinuitetsligningen fra en *prognostisk* til en *diagnostisk ligning*. Det betyder, at den ikke længere bruges til at integrere en variabel frem i tiden, men i stedet til at udlede en sammenhæng mellem de øvrige feltvariable.

Dermed reduceres antallet af *prognostiske variable* – dvs. variable, der udvikles i tid ved integration af differentilligninger – til fire: de horisontale vindkomponenter u og v , den specifikke fugtighed q og temperaturen T . De resterende variable, herunder trykket p og den vertikale hastighed w , bliver *diagnostiske variable*, som bestemmes ud fra de prognostiske størrelser på hvert tidsskridt.

Denne opdeling har stor praktisk betydning. Prognostiske variable er beregningstunge, fordi de kræver numerisk integration over lange tidsperioder, mens diagnostiske variable kan beregnes direkte og hurtigt. Ved at filtrere lyd ud og reducere antallet af prognostiske variable opnår man derfor både en betydelig effektivisering og en numerisk mere stabil model, samtidig med at den fanger de relevante atmosfæriske processer. Den anelastiske tilnærmelse er derfor en central forenkling i mange moderne atmosfæriske og klimatiske modeller (se fx [1]).

Den reelle udfordring er termerne $\mathcal{F}_u$, $\mathcal{F}_v$, $\mathcal{G}_q$ og $\mathcal{G}_T$, som repræsenterer effekterne af uopløste processer, såsom subgrid-skala-hvirvler, friktionsprocesser samt frigivelse og optagelse af latent varme ved faseovergange. Disse processer bliver “parametriseret” (se nedenfor).



Figur 2. Rumlig struktur i en klimamodel. Atmosfæren og havet opdeles i tredimensionelle gitterbokse (gridceller), hvor de fysiske ligninger løses numerisk. Atmosfæriske variable som vind, fugtighed, temperatur og kemiske komponenter beregnes i de lodrette søjler, mens havstrømme, temperatur og saltholdighed beregnes i oceanets lag. Energi-, masse- og impulsudveksling sker både vertikalt (mellem lag) og horisontalt (mellem kolonner).

For storskala-dynamik i havet gælder meget lignende ligninger, som går under betegnelsen Boussinesq-approximationen. En væsentlig forskel er, at det antages, at havet er inkompressibelt, og at der i stedet for fugtighed q som tilstandsvariabel bruges saltindholdet S .

Parameteriseringer

Numerisk integration af ligningerne sker på et gitter med endelig opløsning. Skalaer under $4\text{--}10 \Delta$, hvor

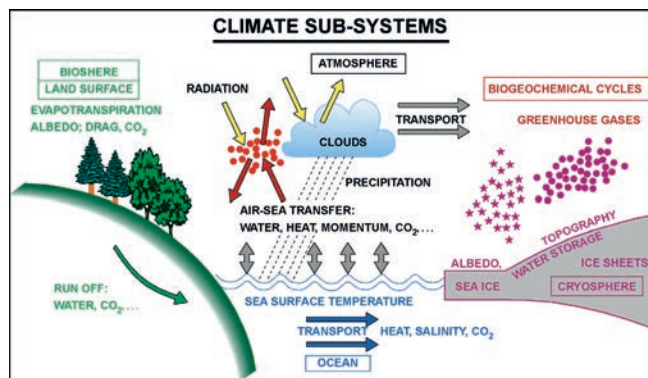
Δ er længden af gitterboksene, kan ikke beskrives pålideligt, og i klimamodeller foregår mange fysiske processer netop på skalaer, der er mindre end modellens gitteropløsning. De kan derfor ikke beskrives direkte.

Hvad der er mere signifikant, er termerne $\mathcal{F}_u$, $\mathcal{F}_v$, $\mathcal{G}_q$ og $\mathcal{G}_T$, som ikke kan beskrives alene ved hjælp af grundlæggende fysiske principper. Det vil sige, at disse termer specificeres ad hoc, og det er derfor ikke muligt at bestemme, hvad der sker, når den rumlige opløsning Δ øges.

For at repræsentere deres effekt anvender man *parameteriseringer* – formler eller algoritmer, der estimerer den uopløste dynamiks virkning ud fra den tilstand, modellen beskriver på de store skalaer.

Tilgangen er i praksis stokastisk: for en given storskala-konfiguration kan små-skala-processer variere inden for bestemte grænser. Denne variation kan beskrives som en stokastisk fordeling, hvis generelle form bestemmes ud fra fysisk indsigt og observationer. I de fleste tilfælde angives effekten som forventningsværdien (den betingede gennemsnitsværdi) af denne stokastiske variabel, men i nogle tilfælde benytter man også en tilfældig udvælgelse fra fordelingen for at indfange naturlig variabilitet [2, 3].

Parameteriseringer er en af de vigtigste årsager til, at klimamodeller kan give forskellige resultater. De afhænger af modellens rumlige opløsning og af, hvordan udviklerne vælger at beskrive de fysiske processer under gitterstørrelsen. I fagsproget omtales parameteriseringer ofte som “fysik”, fordi de repræsenterer uopløste fysiske processer, men det er egentlig en pragmatisk og teknisk løsning snarere end “ren fysik”. Dette fagudtryk kan derfor virke misvisende for ikke-specialister.



Figur 3. Komponenter af en fuld klimamodel [4].

Maksimalt komplekse klimamodeller

For at konstruere en rumligt detaljeret klimamodel, skal man koble en ocean- og en atmosfærisk model, hvilket er en stor udfordring. Desuden er lange integrationer nødvendige, og andre faktorer bliver derfor også vigtige, såsom emissioner, transport og aflejring af stoffer, eller ændringer i vegetationer, som skitseret i figur 3.

I takt med at computerkraften er vokset, er klimamodeller blevet stadig mere avancerede – både med hensyn til rumlig opløsning og i antallet af processer og komponenter i klimasystemet, som modellerne kan beskrive. Hvor tidlige modeller kun omfattede få variable og simple tilnærmelser, kan nutidens modeller håndtere

komplekse vekselvirkninger mellem atmosfære, oceaner, havis, biosfære og andre systemkomponenter.

En central egenskab ved sådanne modeller er, at de *genererer intern variabilitet*: naturlige svingninger på mange forskellige tidsskalaer og rumlige skalaer, som ikke kan tilskrives nogen specifik ekstern påvirkning. Denne variabilitet omtales ofte som “støj”. Støjen kan gøre det vanskeligere at identificere klimatiske signaler forårsaget af konkrete påvirkninger (som drivhusgasser eller solvariationer), men den er samtidig en uundgåelig og fysisk vigtig del af klimasystemets dynamik. Den sætter grænser for, hvor præcise klimaprognoser kan blive, og spiller en væsentlig rolle i fremkomsten af ikke-lineære fænomener som *tipping points*.

For at forstå og håndtere denne interne variabilitet anvendes en *ensembletilgang*, hvor mange modelkørsler med næsten identiske betingelser udføres. Ved at sammenligne og analysere disse kørsler kan man skelne mellem signal og støj og vurdere usikkerheden i modellens resultater. Klaus Hasselmann var den første til systematisk at beskrive denne støjs fundamentale rolle: hvordan hurtige, kortsigtede fluktuationer (“hvid støj”) kan integreres til langsigtede variationer (“rød støj”) og dermed forme klimaets naturlige baggrundsvariabilitet. Denne indsigt blev afgørende for udviklingen af metoder til *detektion og attribution* af menneskeskabte klimaændringer og blev anerkendt med tildelingen af Nobelprisen i fysik til Hasselmann i 2021 [5].

Anvendelse af klimamodeller og deres merværdi

I det følgende fokuserer vi på klimamodeller med høj, såkaldt *maksimal kompleksitet*. Som nævnt tidligere skaber sådanne modeller ikke i sig selv ny teoretisk viden om klimasystemets dynamik. Deres styrke ligger derimod i, at de kan *generere omfattende datasæt*, som gør det muligt at teste og videreudvikle eksisterende teorier, hypoteser og modeller med lavere kompleksitet. Ved at sammenholde modellens output med forenkede fysiske beskrivelser eller observerede mønstre kan forskere formulere og afprøve nye ideer om processer og sammenhænge i klimasystemet.

En anden vigtig anvendelse er brugen af klimamodeller som *interpolatorer*: modellerne kan rekonstruere og estimere det fulde fire-dimensionelle tilstandsbillede af atmosfæren og havet, selv når observationerne kun dækker en begrænset del af tid og rum. Dette sker gennem såkaldt *dataassimilering*, hvor observationer kombineres med modeldynamik for at skabe et konsistent billede af klimasystemet. Denne metode spiller en central rolle i både vejrprognoser og klimaforskning, men vi vil ikke gå i detaljer med den her.

Konsolidering af viden om klimasystemet

Som tidligere nævnt kan klimamodeller med maksimal kompleksitet betragtes som *numeriske laboratorier*, hvor forskere både kan teste eksisterende hypoteser og udvikle nye. De udgør et centralt redskab til at udforske den komplekse dynamik i Jordens klimasystem, fordi de simulerer de fysiske og kemiske vekselvirkninger mellem centrale komponenter som atmosfæren, ocea-

nerne, landoverfladen og kryosfæren. Selvom modellerne ikke kan gengive alle processer og detaljer fuldstændigt realistisk, giver de et konsistent og fysisk baseret billede af klimasystemets samlede opførsel.

Ved hjælp af sådanne modeller kan forskere blandt andet:

- undersøge den naturlige klimavariabilitet på forskellige tidsskalaer,
- analysere klimasystemets respons på eksterne påvirkninger såsom ændrede paleogeografiske konfigurationer, udledning af drivhusgasser, vulkanudbrud og variationer i solindstråling,
- studere centrale feedbackmekanismer, herunder dem der involverer skyer, vanddamp og is-albedo-effekter.

Klimamodeller fungerer dermed som et integreret værktøj til at samle og konsolidere viden om klimasystemets tilstand, dynamik og følsomhed over for både naturlige og menneskeskabte påvirkninger.

Merværdi af klimamodeller

Når man undersøger et komplekst system videnskabeligt, opstår altid spørgsmålet: Hvilken *merværdi* giver modellen? En model deler typisk nogle egenskaber med den virkelige verden – disse kaldes *positive analoger*. Andre egenskaber findes kun i modellen og ikke i virkeligheden (som fx de lydbølger, der blev filtreret væk i den anelastiske tilnærmelse) og kaldes *negative analoger*. Endelig findes der egenskaber, hvor man endnu ikke ved, om de er realistiske; disse betegnes *neutrale analoger*.

Validering handler i høj grad om at identificere positive og negative analoger. Den egentlige *videnskabelige værdi* af modeller ligger dog i de neutrale analoger: de egenskaber, der endnu ikke er bekræftet eller afkræftet, og som kan føre til ny indsigt, hvis de viser sig at være realistiske. Det er her, modeller bidrager til at udvide vores forståelse af klimasystemet.

Modeller er altså mest interessante på grund af det, de potentielt kan afsløre – ikke kun det, vi allerede ved. Validering er vigtig og uundgåelig, men det er modellens rolle i udforskningen af det ukendte, der gør den til et centralt forskningsværktøj.

Blandt de vigtigste neutrale analoger og anvendelsesområder kan nævnes:

- Klimamodeller samler en bred vifte af fysiske, kemiske og biologiske processer i én konsistent ramme og giver dermed et *holistisk billede* af klimasystemet.
- De giver mulighed for detaljerede analyser af rumlige mønstre og regionale påvirkninger, fx ændringer i vejrmønstre eller hydrologi.
- Ved at køre mange simuleringer kan man kvantificere usikkerhed og intern variabilitet.
- Modeller muliggør *detektion og attribution*: Først estimeres den interne variabilitet i systemet, hvorefter observerede ændringer sammenlignes

med modelreaktioner for at identificere de mest plausible eksterne påvirkninger.

- Klimamodeller bruges til at teste hypoteser, der er udviklet ud fra teori eller minimumskompleksitetsmodeller, og til at undersøge, om de holder i en kompleks, højdimensionel dynamik. Dette gælder fx analyser af tipping points, tidlig detektion af klimaændringer samt sammenligninger med empiriske nedskaleringer.

Klimamodeller og menneskeskabte klimaændringer

Allerede i 1896 foreslog Arrhenius [6], at en forhøjet koncentration af drivhusgasser i atmosfæren ville føre til stigende lufttemperaturer. Hypotesen var baseret på en enkel energibalance-model, men blev i mange år ikke anerkendt som videnskabeligt underbygget. Først i den sidste tredjedel af det 20. århundrede blev den taget alvorligt – i takt med, at målingerne af CO₂-koncentrationerne ved Mauna Loa på Hawaii tydeligt viste en kontinuerlig stigning i atmosfærens CO₂-indhold. Dette skabte et presserende behov for både robuste beviser for sammenhængen mellem CO₂ og temperaturstigninger samt for scenarier over fremtidige klimaændringer.

I 1990'erne var klimamodellerne blevet tilstrækkeligt avancerede – med både atmosfære- og oceankomponenter – til at kunne simulere klimaets respons på ændrede CO₂-koncentrationer. Ensemblekørsler med stigende CO₂-niveauer viste konsekvent, at dette førte til global opvarmning, hvis styrke afhang af, hvor hurtigt drivhusgasserne akkumuleredes. Et robust resultat var, at opvarmningen var kraftigst over land og svagere over havet, hvilket stadig er en af klimaforskningens mest stabile forudsigelser.

Denne udvikling muliggjorde en mere systematisk tilgang til *detektion* af klimaforandringer. Ved at projicere observerede temperaturændringer på mønstre, som modellerne forudsiger, reduceres det komplekse signal i et højdimensionelt rum til et lavdimensionelt statistisk problem. Hvis denne projicerede ændring overstiger, hvad man kan forvente fra den interne naturlige variabilitet, kan man med statistisk sikkerhed konkludere, at en ekstern påvirkning er aktiv – dvs. at mindst en del af den observerede opvarmning er menneskeskabt. Modellerne fungerer her som et analytisk filter, der hjælper forskeren med at "finde nålen i høstakken".

Det er vigtigt at understrege, at argumentet **ikke** er: "Fordi modeller viser opvarmning ved stigende CO₂, er den observerede opvarmning antropogen." Argumentet er derimod: "Fordi den observerede ændring er større end den forventede interne variabilitet, må mindst en del af ændringen skyldes menneskelig påvirkning." Modellerne bruges dermed til at strukturere og kvantificere den statistiske test, ikke til at "bevise" årsagssammenhængen i sig selv.

Det næste trin er *attribution* (tilskrivning), hvor målet er at bestemme den mest sandsynlige kombination af årsager til den observerede ændring. Her testes en nulhypotese mod forskellige kombinationer af påvirkninger – fx drivhusgasser, aerosoler,

solpåvirkning og vulkansk aktivitet – repræsenteret gennem mønstre fra klimamodeller. Formålet er ikke at forkaste nulhypotesen, men at finde den kombination af påvirkninger, der bedst forklarer observationerne.

Attribution har været en central del af klimaforskningen siden 1990'erne, især for lufttemperatur. Et nyere eksempel er [7], som viste, at ændringer i forårsregn i det nordlige Sydamerika ikke kun kunne forklares med stigende CO₂-niveauer, men også med ændringer i landanvendelse. Dermed spiller klimamodeller en endnu vigtigere rolle i attribution end i detektion: de gør det muligt at adskille og kvantificere de forskellige påvirkningsfaktorer bag observerede klimaændringer

Klimascenarier

Klimamodellers evne til at beskrive og analysere igangværende klimaforandringer giver et stærkt *plausibilitetsargument* for, at de også kan anvendes til at *estimere fremtidige udviklinger* – givet forskellige antagelser om drivhusgasudledninger. Den centrale udfordring ligger naturligvis ikke i selve modelleringen, men i at *forudsige fremtidige udledningsforløb*.

Tidligere blev klimascenarier udarbejdet på baggrund af vurderinger af samfundsmæssige og især økonomiske udviklingsbaner. Disse scenarier beskrev plausible og konsistente fremtidige udledninger og blev derefter indarbejdet i klimamodeller. Denne tilgang var dog tidskrævende, og processen med at opdatere scenarierne og få dem integreret i modellerne viste sig at være for langsom til at følge IPCC's rapportcyklus.

Som svar på dette udviklede man de såkaldte *Representative Concentration Pathways* (RCP'er), som er defineret ud fra *strålingspåvirkning* (radiative forcing) i slutningen af det 21. århundrede, snarere end ud fra socioøkonomiske forløb. RCP'erne repræsenterer således forskellige mulige udviklingsbaner for atmosfærens samlede drivhusgaspåvirkning:

- RCP2.6: Strålingspåvirkningen topper omkring 3 W/m² midt i århundredet og falder derefter til 2,6 W/m² i 2100.
- RCP4.5 og RCP6.0: Stabilisering på hhv. 4,5 W/m² og 6,0 W/m² efter 2100.
- RCP8.5: En fortsat stigning til 8,5 W/m² i 2100.

RCP4.5 anses i dag for at være et realistisk referencescenarie, mens en udvikling svarende til RCP2.6 ville forudsætte omfattende og hurtige globale reduktioner i drivhusgasudledninger.

Interessant nok har senere analyser vist, at det høje scenarie RCP8.5 kun kan realiseres under meget ekstreme og urealistiske forudsætninger – såsom en atmosfærisk CO₂-koncentration på omkring 1400 ppm i 2100, hvilket ville kræve en kontinuerlig og dramatisk stigning i de globale udledninger og en massiv udbygning af kulkraft svarende til etablering af et nyt kulkraftværk næsten dagligt. Selvom sådanne scenarier fortsat har værdi i forskningssammenhæng, fx til at undersøge følsomheden i modelsystemerne, er de ubrugelige til praktisk politisk vejledning. Men dette urealistiske scenarie blev "solgt" som en "business as usual"-prognose, dvs. som en udvikling, der

med sikkerhed forventes, hvis der ikke implementeres væsentlige begrænsninger af udledninger. Således gennemgik scenariet en metamorfose fra en videnskabeligt interessant, men meget usandsynlig udvikling, til en meget sandsynlig prognose, som kun kan undgås, hvis der implementeres strenge klimabeskyttelsesforanstaltninger.

Hvilket scenarie der i sidste ende viser sig mest realistisk, afhænger i høj grad af *afbødningstiltag* – dvs. timingen og styrken af den globale reduktion af CO₂- og andre drivhusgasudledninger. De forskellige scenarier giver et spænd af mulige klimaforløb og dermed et beslutningsgrundlag for planlægning.

Klimascenarier gør det muligt – inden for de usikkerheder, der skyldes naturlig variabilitet – at skitsere regionale konsekvenser og klimarisici. Det gælder fx forekomsten af hedeølger, ekstremnedbør, storme og tørke. Disse oplysninger er afgørende for at kunne udvikle tilpasningsstrategier på områder som landbrug, vandforsyning, kystsikring og byplanlægning.

Litteratur

- [1] P. Müller and H. von Storch. *Computer Modelling in Atmospheric and Oceanic Sciences - Building Knowledge*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 2004.
- [2] H. von Storch, S. Güss, and M. Heimann. *Das Klimasystem und seine Modellierung. Eine Einführung*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1999.
- [3] W.M. Washington and C. Parkinson. *Introduction to Three-Dimensional Climate Modeling*. University Science Books, 2005.
- [4] H. von Storch and K. Hasselmann. Climate variability and change. In G. Hempel, editor, *The Ocean and the Poles. Grand Challenges for European Cooperation*, pages 33–58. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart, New York, 1996.
- [5] H. von Storch. Nobelprisen 2021 i Fysik tildelt klimaforskeren Klaus Hasselmann. *Vejret*, 170:8–11, 2022.
- [6] S.A. Arrhenius. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251):237–276, 1896.
- [7] A. Barkhordarian, H. von Storch, A. Behrangi, P. C. Loikith, C. R. Mechoso, and J. Detzer. Simultaneous regional detection of land-use changes and elevated GHG levels: The case of spring precipitation in tropical south america. *Geophysical Research Letters*, 45(12):6262–6271, 2018.



Hans von Storch har læst matematik, fysik og dansk på universitetet i Hamborg. Han har ledet gruppen for statistisk analyse og modellering ved Max Planck-Institutet for Meteorologi i Hamborg, hvor han arbejdede sammen med den senere nobelpristager Klaus Hasselmann. Fra 1996 til 2015 var han direktør for Institut for Kystforskning i Geesthacht nær Hamborg.

Hvor kommer guldet fra?

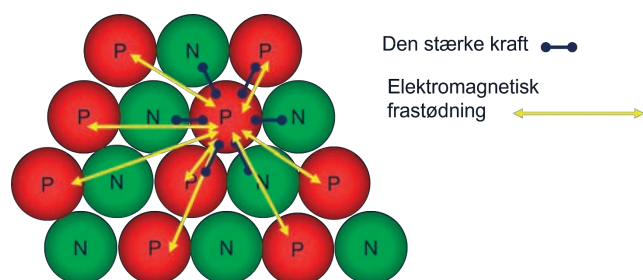
Bernhard Lind Schistad, Midtbyens Gymnasium, Mercantec

I jordskorpen estimerer vi at der findes ca. 400 millioner tons guld. Ved den nukleosyntese der skete i de første 20 minutter af Big Bang, blev der dannet lette grundstoffer som deuterium, helium og litium. De tungere grundstoffer er dannet ved fusionsprocessen i stjerner. Men fusion kan kun producere grundstoffer op til og med jern (atomnummer 26). Alligevel indeholder jorden tunge grundstoffer op til atomnummer næsten 100, heriblandt guld (atomnummer 79). Disse tunge grundstoffer kan ikke være dannet ved fusion i stjerner. De må være dannet på en anden måde. Vi vil her se på hvorledes de tunge grundstoffer dannes og prøve at besvare spørgsmålet: Hvor kommer guldet fra?

Bindingsenergi i atomkernen

Atomkernen består af protoner og neutroner. De har næsten samme masse, men protonen har elektrisk ladning mens neutronen er neutral. Begge kan mærke den stærke kernekraft, da de er opbygget af kvarker. Men mens den elektromagnetiske frastødning mellem protonerne falder med afstanden i anden potens, har den stærke kernekraft meget kort rækkevidde, kun nogle få nukleondiametre. Hvis en kerne består af protoner og neutroner, vil den enkelte nukleon derfor kun mærke tiltrækningen fra sine umiddelbare naboer, mens alle protoner kan mærke frastødningen fra de andre protoner.

Dette er illustreret på figur 1 hvor vi ser de kræfter som virker på en proton inde i kernen.

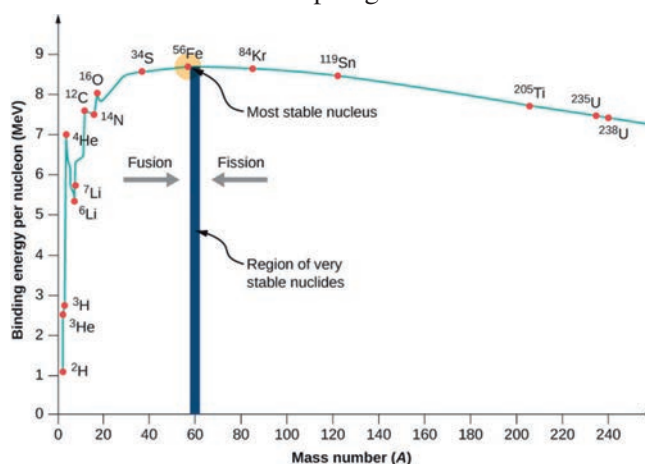


Figur 1. Kræfter på en proton i kernen.

Protoner og neutroner kan forvandle sig til hinanden ved at udsende en elektron eller en positron (antielectron). Den udsendte energi svarer til massedifferencen plus forskellen i bindingsenergi. Da massedifferencen er meget lille (kun 1,4 promille), vil en forskel i bindingsenergien kunne medføre at protoner eller neutroner forvandler sig til hinanden hvis dette giver en højere bindingsenergi. Videre er protoner og neutroner fermioner, der adlyder Paulis eksklusionsprincip. Dette medfører, at der kun kan være to nukleoner i samme energitilstand (fermioner har to spintilstande). Dette favoriserer kerner med ca. samme antal protoner og neutroner. Dog vil der være overtal af neutroner i tunge kerner på grund af den elektrostatiske frastødning mellem protonerne, som kræver ekstra neutroner som "lim".

Når vi kombinerer disse kræfter, og tager hensyn til, at nukleoner i overfladen af kernen ikke har lige mange naboer som nukleoner inde i kernen, får kur-

ven for bindingsenergien per nukleon som funktion af atomnummer. Den er vist på figur 2.



Figur 2. Bindingsenergi per nukleon som funktion af atomnummer.

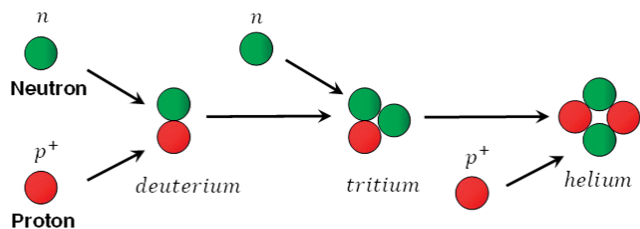
Som vi ser, har Fe (jern) den højeste bindingsenergi. Dette medfører at vi kan frigøre energi ved at fusionere kerner der er lettere end jern eller dele (fissionere) kerner der er tungere end jern.

Nukleosyntesen

Fra ca. 10^{-10} til 10^{-6} sekunder efter Big Bang var universet fyldt af fotoner, neutrinoer og et plasma af kvarker og gluoner. Da temperaturen var faldet så meget, at den kinetiske energi for kvarkerne var mindre end bindingsenergien i protoner og neutroner (ca. 1 GeV/c), blev protonerne og neutronerne dannet. Dette skete efter et mikrosekund.

De første kerner af tunge grundstoffer end brint, blev dannet fra et til hundrede sekunder efter Big Bang.

Når en proton og en neutron kommer tæt på hinanden (nogle få protondiametre), kan de binde sig til hinanden og danne en kerne bestående af de to partikler. Denne kerne kaldes en deutron, og er kernen i deuterium, som er en tung isotop af brint. Denne proces kan fortsætte så kernen optager en neutron mere. Denne kerne er en meget tung isotop af brint, kaldet tritium. Den er ikke stabil, derfor finder vi den ikke i universet (men den bruges i brintbomber). Hvis tritium kernen fanger en proton mere, danner den en kerne bestående af to protoner og to neutroner. Dette er helium, det næstmest forekommende grundstof i universet. Reaktionskæden er vist på figur 3.



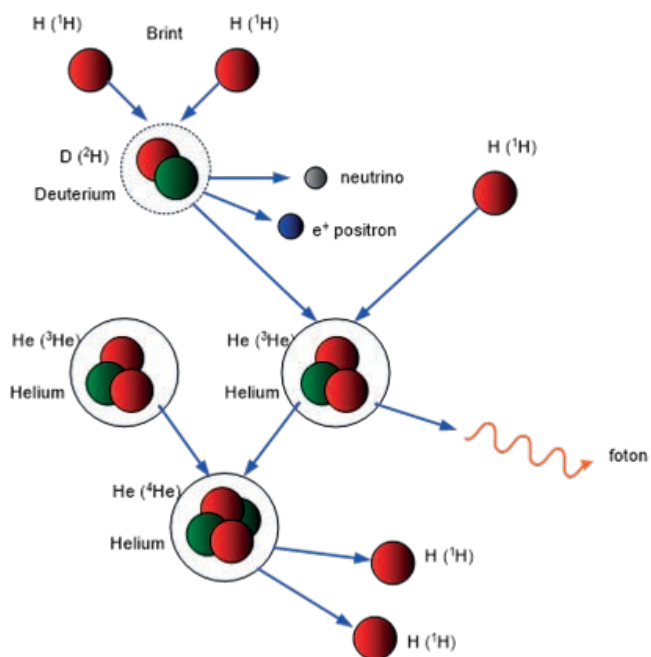
Figur 3. Dannelse af deuterium og helium i nukleosyntesen.

Bindingsenergien mellem protoner og neutroner er af størrelsesorden en million elektronvolt, mens bindingsenergien mellem elektroner og kerner i et atom er ca. 10 elektronvolt. Det vil sige at bindingsenergien i kerner er ca. 100.000 gange større end i atomer. Hvis en kerne rammes af fotoner med energi lig med bindingsenergien (eller større) vil fotonen kunne slå kernen i stykker. Dannelsen af kerner begyndte derfor først da universets fotonenergi var faldet til mindre end 1 million elektronvolt. Dette skete da universet var ca. et sekund gammelt.

Da protonens masse er mindre end summen af masserne for partiklerne i sluttstanden, kan denne proces kun finde sted ved meget høje temperaturer, hvor protonens termiske energi er lig med energidifferensen. Det vil sige, at så længe universets temperatur er høj nok, vil der være termisk ligevægt mellem protoner og neutroner, og de vil forvandle sig frem og tilbage mellem hinanden, men når temperaturen er faldet så meget, at den termiske energi er mindre end massedifferensen, vil der ikke længere kunne dannes neutroner, og forholdet mellem neutroner og protoner vil "fryse". Dette sker ved en termisk energi på 0,8 millioner elektronvolt, svarende til en temperatur på ca. 10^9 K.

Fusionsprocessen i stjerner

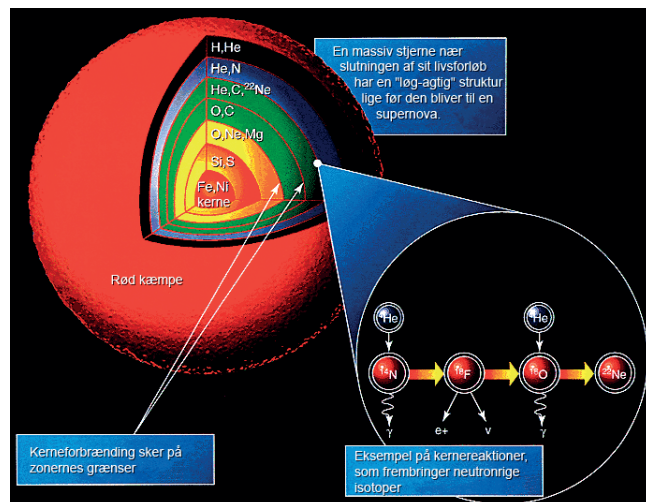
Alle stjerner er startet som en sky af brint (og helium).



Figur 4. Fusion af brint til helium i stjerner.

I unge stjerner, som mest består af brint, vil den dominerende proces være fusion af brint til helium som vist på figur 4.

Efterhånden som stjernen ældes, og der bliver mere helium, begynder også fusion af tungere kerner og der dannes grundstoffer op til jern. Kerner med højere atomnummer end jern kan ikke dannes ved fusion, og vil derfor ikke eksistere i stjerner. Når en stjerne bliver gammel, vil den indeholde alle grundstoffer op til jern, hvor de tungeste vil befinde sig i centrum som vist på figur 5.



Figur 5. Fordeling af grundstoffer i gammel stjerne.

Men fordi Fe-kerne har den højeste bindingsenergi, kan der ikke dannes tungere kerner ved fusion.

En stjernes kollaps

Når en stjerne bliver gammel, begynder den at løbe tør for brint i kernen. Dette medfører, at energiproduktionen via brint til helium processen standser. Selv om den kan fusionere tungere kerner, kræver dette en meget højere temperatur, da tunge kerner har mange protoner som frastøder hinanden elektrostatiske. Temperaturen i kernen stiger nu så meget, at den vil opvarme den omgivende brint, så der vil dannes en skal af hydrogenfusionerende brint rundt om en central kerne, som består af helium og tungere grundstoffer [1]. For at denne kerne skal kunne modstå det øgende tryk fra omgivelserne, må densiteten af stige henimod midten af kernen.

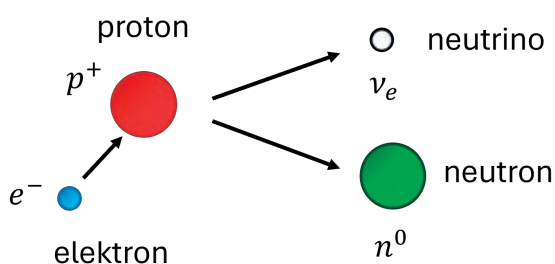
Men der er en grænse for hvor meget en gas kan komprimeres. Dette skyldes Paulis eksklusionsprincip, som siger at der kun må være en elektron i hver kvantetilstand. Dette vil medføre, at stjernes centrum bliver degenereret, idet alle mulige energiniveauer er opfyldt med elektroner. Når kernen er degenereret, kan den ikke optage mere energi, og trykket fra omgivelserne vil føre til, at en stigende del af kernen er degenereret. Nu er det elektron-degenerationstrykket, som balancerer mod tyngdekraften og forhindrer at kernen kolliderer. Dette tryk er givet ved [2]

$$P_e = \frac{(3\pi^2)^{2/3} \hbar^2}{5m_e} \rho^{5/3} \quad (1)$$

hvor m_e er elektronmassen, ρ er densiteten af elektroner og $\hbar$ er Plancks konstant. For en hvid dværg, giver dette et tryk på $1,9 \cdot 10^{22}$ Pa.

Når hydrogenandelen af kernens masse falder under ca. 5%, vil hele stjernen begynde at kollapse. Dette vil medføre, at temperaturen i kernen stiger. Efterhånden vil kernen begynde at fusionere helium og tungere grundstoffer. Det betyder, at kernen, ud over helium, indeholder en række tungere grundstoffer. Samtidig vil stjernens lysstyrke øge voldsomt og temperaturen i den omgivende skal af brint vil stige, så den begynder at fusionere.

Men der er en grænse for hvor højt tryk kernen kan tåle. Dette skyldes, at hvis elektronernes energi overstiger massedifferencen mellem neutroner og protoner ($1,29 \text{ MeV}/c^2$), vil protonerne begynde at absorbere elektronerne og danne neutroner ved omvendt betahenfald (figur 6)



Figur 6. Omvendt betahenfald.

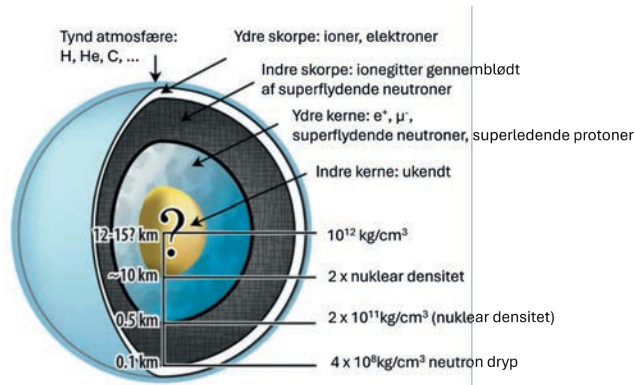
Neutronstjerner

Hvis stjernens masse ikke er for stor, vil elektrondegenerationstrykket kunne holde tyngdekraften i skak, og stjernen ender med at blive en hvid dværg, hvor fusionsprocessen går i stå, når der ikke er flere lette grundstoffer at fusionere. Men hvis stjernens masse overstiger Chandrasekars grænse på 1,44 solmasser, vil tyngdekraften overvinde trykket og stjernen vil begynde at kollapse. Når densiteten overstiger 10^{12} kg/m^3 , vil protonerne i tunge kerner som jern ($^{56}_{26}\text{Fe}$) begynde at absorbere elektroner og blive til neutroner. Stjernen vil nu bestå af et plasma af tunge kerner, neutroner, protoner og elektroner. Ved øgende densitet vil stjernen bestå af stadig mere neutronrige kerner som jern, nikkel og krypton. Denne proces kaldes neutronisering. Da der ikke er ledige energitilstande for frie elektroner, kan neutronerne ikke forvandle sig tilbage til protoner.

Når densiteten overstiger $4 \cdot 10^{14} \text{ kg/m}^3$ vil der dannes et stigende antal neutroner udenfor kernerne. Denne proces kaldes neutrondryp. Fordi neutroner er fermioner (ligesom elektronerne), adlyder de også Paulis eksklusionsprincip, og det bliver nu neutrondegenerationstrykket, som holder tyngdekraften i skak. Nu bliver stjernen til en blanding af neutronrige kerner, degenererede neutroner og degenererede elektroner. De degenererede neutroner vil danne et Bose-Einsteinkondensat, og bliver en superflydende væske. Efterhånden som densiteten og trykket øges, vil næsten

alle protonerne absorbere elektroner og stjernen bliver en slags kæmpestor kerne bestående af hovedsagelig degenererede neutroner. Dens radius er nu kun 10 km.

Det indre af en sådan neutronstjerne er vist på figur 7.



Figur 7. Det indre af en neutronstjerne.

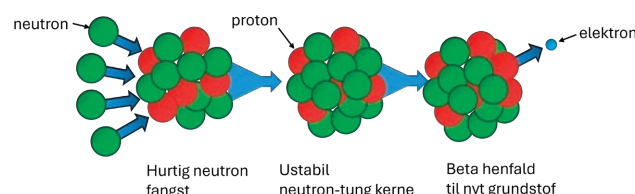
Så længe tyngdekraften er mindre end neutrondegenerationstrykket er en neutronstjerne stabil, men hvis massen er større end ca. fire solmasser, vil stjernens radius blive mindre end Swartzschild radien og stjernen kolliderer til et sort hul.

R-processen

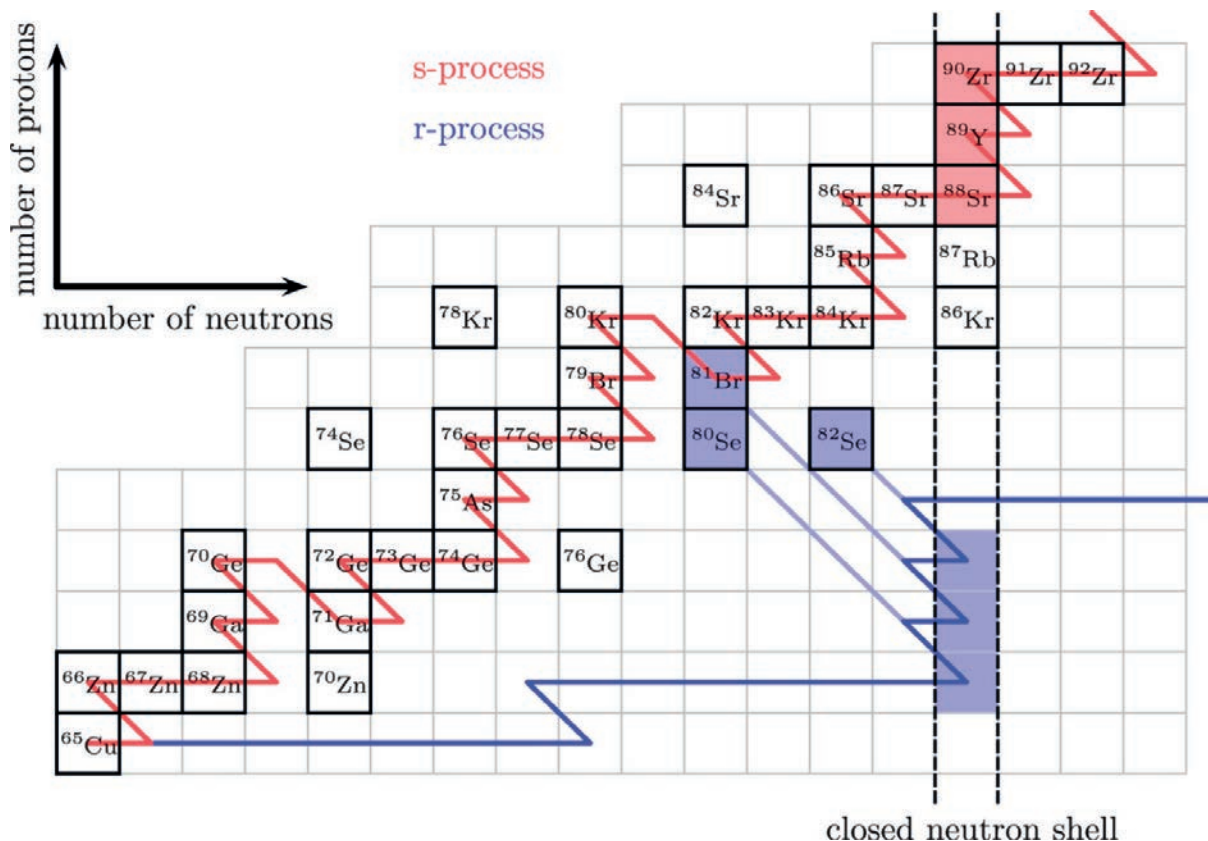
Fusionsprocessen i stjerner kan frigøre energi ved at fusionere kerner op til jern. At danne tungere kerner, kræver energi. Denne kan komme fra frie neutroner eller protoner. Der er tre mulige processer som kan danne tungere kerner end jern [3].

- s-processen, hvor kernen langsomt absorberer neutroner enkeltvis
- r-processen hvor kernen absorberer mange neutroner i et meget kort interval
- p-processen hvor kernen absorberer protoner.

Ved s-processen bliver kernen til en anden isotop af det samme grundstof. Men hvis den nye kerne er ustabil, vil den ændre atomnummer ved betahenfald. Dette vil kunne ske, før kernen absorberer den næste neutron. Ved r-processen absorberes neutronerne så hurtig, at ustabile kerner ikke når at henfalde inden næste neutron absorberes (se figur 8). Dette giver forskellige "veje" gennem det periodiske system eftersom der dannes tungere kerner. Disse veje er vist i figur 9.

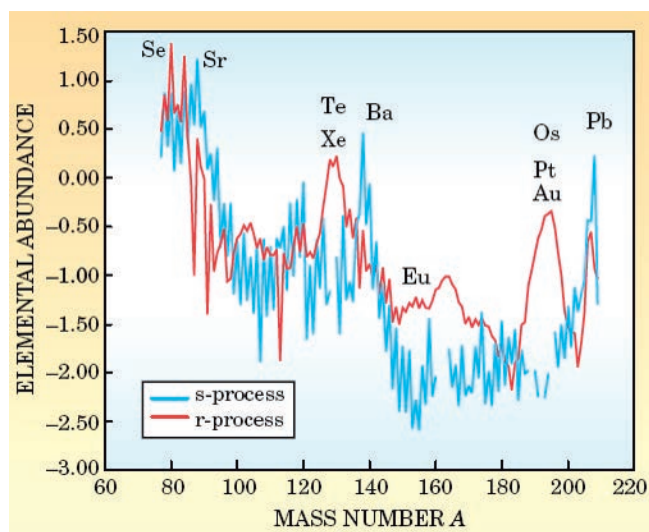


Figur 8. r-processen.



Figur 9. r- og s-processernes veje i det periodiske system.

Dette medfører, at de tunge grundstoffer dannes ved fortrinsvis ved den ene eller den anden proces. Det viser sig at guld (Au), dannes ved r-processen [5] (figur 10).



Figur 10. Processer der danner tunge grundstoffer.

Men hvor kan vi finde betingelser hvor der er så stort et overskud af neutroner at r-processen kan finde sted?

I en neutronstjerne er der masser af neutroner, men de fleste er degenererede og kan ikke deltage i en r-proces. For at processen skal finde sted, skal der være masser af frie neutroner. Det ville der blive hvis to neutronstjerner kolliderer, og udløser en byge af frie neutroner.

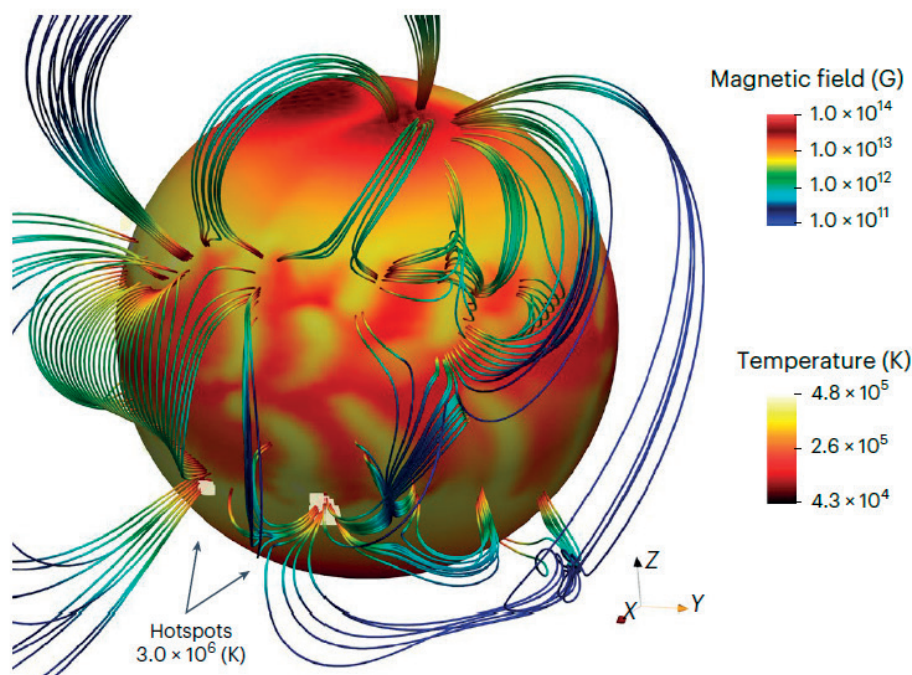
I august 2017 opdagede Ligo- og Virgodetektorerne tyngdebølger fra en voldsom begivenhed, som havde fundet sted i galaksen NGC 4993 i en afstand af 140 millioner lysår fra Jorden. Kort tid efter observerede NASAs Fermirumteleskop et kraftigt gammaglimt fra samme kilde. Den efterfølgende analyse viste, at der var tale om kollision og fusion af to neutronstjerner. Ved at analysere spektret af lyset fra begivenheden viste det sig, at der var blevet dannet store mængder af tunge grundstoffer, blandt andet guld og platin [6]. Dette var den første bekræftede observation af r-processen i praksis.

Men denne begivenhed kan ikke være forklaringen på ophavet til det guld, der befinder sig i solsystemet. Kollision mellem neutronstjerner er nemlig så sjælden en begivenhed, at vi ikke kan være sikre på, at det overhovedet er sket en eneste gang i Mælkevejens levetid. Vi må derfor lede efter en anden måde at lave r-processen på.

Magnetarer

Der findes en speciel type neutronstjerner som har et ekstremt kraftigt magnetfelt. De kaldes magnetarer. Mens jordens magnetfelt er på ca. 0,5 μT , kan en magnetar have en feltstyrke på 10^{11} T. Til sammenligning har verdens kraftigste supraledeende magnet en feltstyrke på 45 T.

Vi ved ikke præcis, hvorledes magnetarernes stærke magnetfelt (figur 11) opstår, men den mest lovende teori går ud på, at der dannes turbulens i ultratunge flydende plasma i den nyopståede neutronstjerne.



Figur 11. Magnetfelt fra magnetar.

Denne turbulens vil danne “dynamoer” ved hjælp af de elektrisk ladede partikler i hvirvelbevægelse [8]. Dette vil forstærke det allerede eksisterende magnetiske felt, ligesom jordens kerne danner jordens magnetfelt ved bevægelse af flydende jern.

På grund af den stærke turbulens i plasmaet kombineret med det stærke magnetfelt, udsender magnetarer gigantiske udbrud af gammastråler, når de snoede magnetiske feltlinjer brister. Disse gammastråler vil medføre en voldsom opvarmning og udstødning af plasma i form af neutroner og kerner. I denne proces viser det sig også, at der kan dannes tunge kerner ved hjælp af r-processen [7]. Vi kan observere denne proces i form af byger af højenergetiske fotoner med varighed på flere uger. Et sådant udbrud er vist på figur 12.

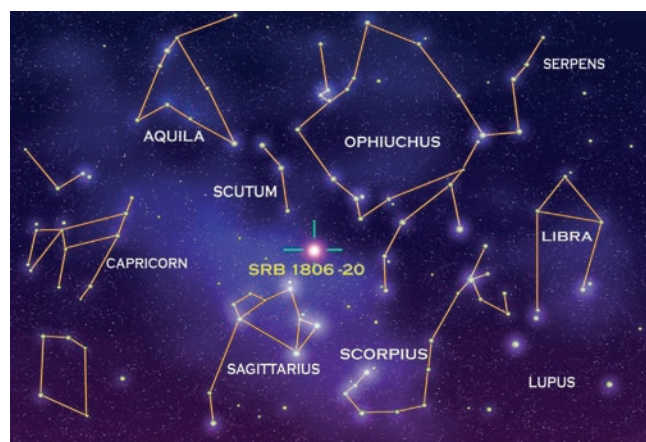


Figur 12. Udbrud fra magnetar.

Således dannes guld

SRB 1806-20 er en magnetar, som ligger i stjernebilledet Skytten, 42.000 lysår fra Jorden (figur 13). Den har

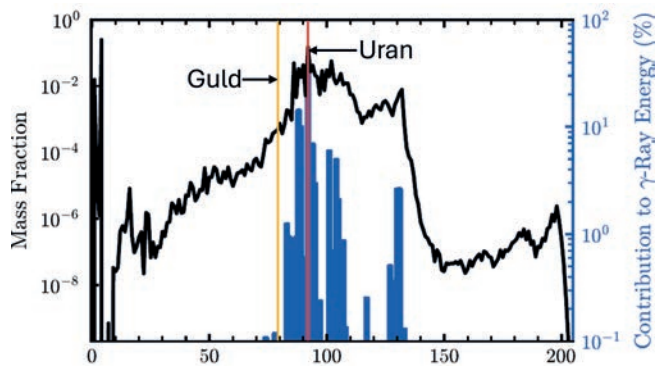
en diameter på kun 20 km og roterer med en periode på 7,5 s. Det vil sige, at dens ækvatoriale hastighed er ca. 8 km/s.



Figur 13. Magnetaren SRB 1806-20 i Skytten.

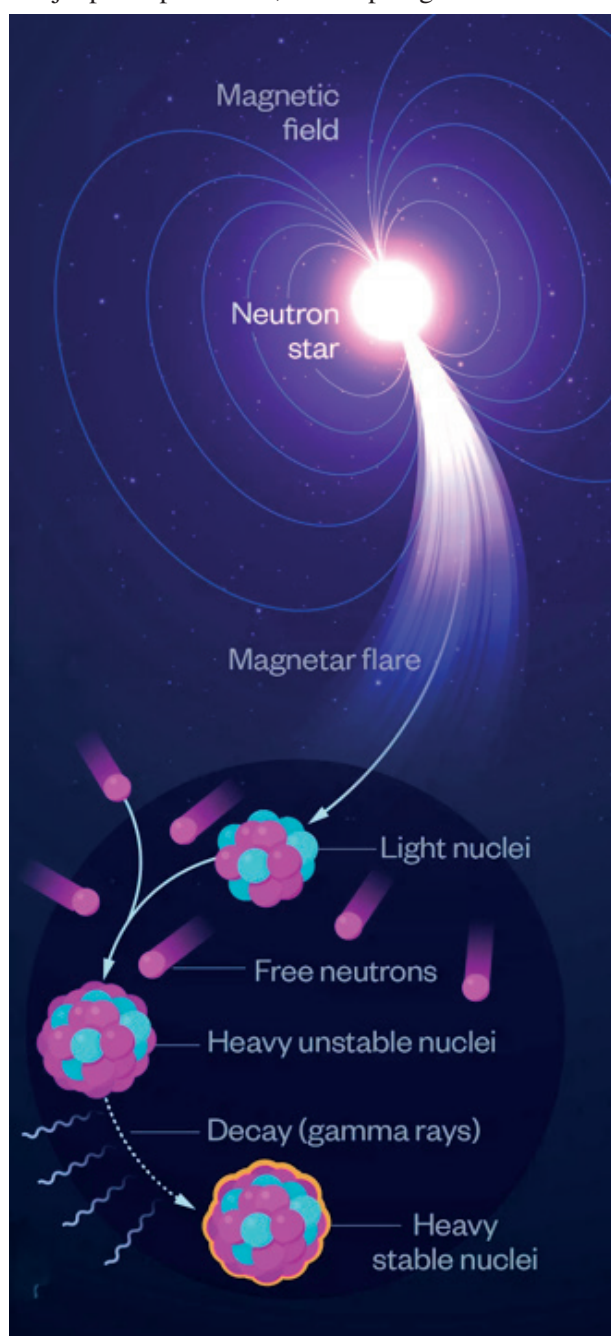
Den 27. december 2004 registrerede observatorier på Jorden en byge af fotoner fra et udbrud i denne magnetar [8]. Denne byge viste at magnetaren havde udsendt mere energi på et tiendedelssekund end Solen udsender på 150.000 år.

Nu har en nøjagtig analyse af spektret fra den observerede stråling fra SRB 1806-20 vist et massivt indhold af fotoner fra tunge grundstoffer [9]. Resultaterne er vist på figur 14. Her kan vi se fordelingen af de forskellige kerner som er ophav til fotonerne som funktion af atomnummer. De blå søjler viser den individuelle procentvise andel af radioaktive kerner i forhold til den totale gammaenergi i tidsintervallet 103 til 104 sekunder efter udbruddets start.



Figur 14. Spektret af fotoner i udbruddet fra SGR 1806-20 som funktion af atomnummer.

Som vi kan se, indeholder spektret et betydeligt bidrag fra guld (atomnummer 79) og uran. Processen, hvor udbrud fra magnetarer danner tunge grundstoffer ved hjælp af r-processen, er vist på figur 15.



Figur 15. Dannelse af tunge grundstoffer i magnetar.

Konklusion

Det ser ud til at den vigtigste kilde til guld og andre tunge grundstoffer er r-processen, hvor lette kerner absorberer en række neutroner så hurtig, at ustabile kerner ikke når at henfalde, inden de absorberer næste neutron. Denne proces er observeret ved kollision mellem neutronstjerner, men da dette er en meget sjælden begivenhed, er den næppe ophav til det guld vi finder i solsystemet.

Men der findes mange magnetarer i Mælkevejen. Når disse går i udbrud, vil de kunne producere store mængder tunge kerner, inklusive guld, ved r-processen.

Det guld vi finder på Jorden, må derfor være udslynget fra en magnetar der eksisterede før solsystemet blev dannet. Dette materiale har blandet sig med hydrogen og andre lette kerner, som er ophavet til Solen og planeterne

Litteratur

- [1] R. R. Tayler (1993) "The Stars, their structure and evolution", Cambridge University Press, side 207–220.
- [2] B. W. Carroll og D. A. Ostlie (2006) "An Introduction to Modern Astrophysics", 2. udgave, side 567–569.
- [3] B. S. Meyer (1994) "The r-, s-, and p- Processes in Nucleosynthesis", *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, bind 32, side 153–190.
- [4] J. J. Cowan m.fl. (2021) "Origin of the heaviest elements: The rapid neutron-capture process", *Rev. Mod. Phys.*, bind 93, side 015002.
- [5] J. J. Cowan og F.-K. Thielemann (2004) "R-Process Nucleosynthesis in Supernovae", *Physics Today*, oktober, side 47–53.
- [6] E. Pian m.fl. (2017) "Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger", *Nature*, bind 551, side 67–70.
- [7] A. Igoshev m.fl. (2025) "A connection between proto-neutron-star Tayler–Spruit dynamos and low-field magnetars", *Nat Astron*, bind 9, side 541–551.
- [8] D. Palmer m.fl. (2005) "A giant γ -ray flare from the magnetar SGR 1806–20", *Nature*, bind 434, side 1107–1109.
- [9] A. Patel m.fl. (2025) "Direct evidence for r-process nucleosynthesis in delayed MeV emission from the SGR 1806-20 magnetar giant flare", *The Astrophysical Journal Letters*, bind 984, side L29.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han underviser i fysik og matematik på Midtbyens Gymnasium, Mercantec, i Viborg.

Digitalisering af lugt: At bygge bro over den sanselige kløft i telekommunikation

Roana de Oliveira Hansen, NanoSYD, Syddansk Universitet

Takket være fremskridt inden for telekommunikation kan vi i dag ubesværet overføre lyd og billeder over store afstande i vores dagligdag. Denne evne har forandret måden, vi forbinder os med hinanden på, og åbner mulighed for at mennesker, adskilt af kontinenter, kan dele samtaler, følelser og oplevelser i realtid. Alligevel er lugtesansen stadig fraværende i den digitale verden. På trods af dens store betydning for vores oplevelser og minder, er det endnu ikke lykkedes fuldt ud at overføre dufte digitalt.

Lugtesansen har en enorm kraft og er tæt forbundet med vores følelser og hukommelse. Den spiller en afgørende rolle i mange aspekter af livet, herunder nydelsen af mad, sikkerhed og personlig trivsel. Men i modsætning til lyd og syn, som effektivt er blevet digitaliseret og transmitteret, udgør lugt stadig en teknologisk udfordring.

Lyd, billede og lugt repræsenterer hver især forskellige sansemodaliteter. Men når de skal overføres via telekommunikation, kan de alle forstås som signaler, der skal opfanges, kodes, transmitteres og genskabes. Lyd består af trykbølger, der varierer i frekvens og amplitude. En mikrofon opfanger disse bølger og omdanner dem til elektriske signaler, som derefter kan blive transmitteret og genskabt som hørbare vibrationer i en højttaler. Denne teknologi danner grundlaget for telefonen. På samme måde består billeder af lysmønstre, der reflekteres fra objekter. Et kamera opfanger dette lys og konverterer det til digitale data, som derefter kan blive transmitteret og genskabt på en skærm som et gitter af pixels – hver med sin farve og lysstyrke – og dermed rekonstruere det oprindelige visuelle billede på en såkaldt *televideo*-enhed.

Selvom lugt kemisk er mere komplekst, følger den tilsvarende logik. Den består af flygtige organiske forbindelser (*Volatile Organic Compounds* – VOC), som spredes gennem luften og binder sig til receptorer i næsen. En elektronisk næse efterligner denne biologiske proces ved hjælp af kemiske sensorer, der opfanger VOC'er og koder deres tilstedeværelse som digitale signaler. I en *telescent*-enhed kan disse digitale signaler blive transmitteret til en modulær duftemitter, som blander lagrede aromastoffer for at genskabe den oprindelige duft. Ligesom mikrofoner og kameraer fungerer som inputenheder for lyd og billede – og højttalere og skærme som output – udgør elektroniske næser og duftemittere et input-output-par for lugtbaseret kommunikation og baner vejen for en ny æra af multisensorisk digital interaktion.

Til forskel fra lyd og billeder, som kan genskabes ud fra veldefinerede fysiske enheder som bølgefrekvenser og farvepixels, er lugte komplekse kemiske signaturer uden et universelt system for syntese. Det gør digitaliseringen af lugt til en langt mere indviklet udfordring. Det kræver både præcis kemisk detektion og evnen til at

genskabe duften med høj nøjagtighed – en ambition, der først nu er ved at blive teknologisk mulig takket være fremskridt inden for sensorteknologi, maskinlæring og mikrofluidik.



Elektroniske næser

“Har du nogensinde målt en lugt? Kan du sige, om én lugt er dobbelt så stærk som en anden? Kan du måle forskellen mellem to slags lugte? Det er tydeligt, at vi har mange forskellige slags lugte – lige fra duften af violer og roser til stanken af asafetida. Men før du kan måle deres ligheder og forskelle, kan du ikke have nogen videnskab om lugt. Hvis du er ambitiøs og vil finde en ny videnskab, så mål en lugt.”

Alexander Graham Bell, 1914

Allerede i 1914 forudså telefonens opfinder, Alexander Graham Bell, at lugt kunne blive genstand for videnskabelig måling og teknologisk udvikling. Siden da er vi kommet langt – især med udviklingen af elektroniske næser, som i dag åbner mulighed for at måle, analysere og genkende lugte digitalt.

I det biologiske lugtesystem binder flygtige molekyler sig til specifikke receptorer i næsen. Disse forskellige receptorer sender elektriske signaler til lugtebulbus (hjernens "duftcenter", som er placeret lige over næsehulen), hvor signalerne behandles og sammenlignes med tidligere oplevelser lagret i hjernen. Det er denne kombination af kemisk sansning og neural mønstergenkendelse, der sætter os i stand til at identificere og skelne mellem tusindvis af forskellige lugte.

Elektroniske næser efterligner denne proces. I stedet for biologiske receptorer anvender de kemiske sensorer, som reagerer på flygtige organiske forbindelser ved at ændre deres elektriske egenskaber. Disse forskellige ændringer omdannes til elektriske signaler, som sendes til en mikroprocessor. Her behandles dataene og sendes videre til et neuralt netværk, hvor maskinlæring anvendes til at genkende mønstre i sensorernes respons. Over tid kan den elektroniske næse trænes til at identificere et bredt spektrum af lugte – præcist og reproducerbart – baseret på det unikke "fingeraftryk", som hver lugt efterlader i sensorarrayet. Ligesom hjernen bruger erfaring og hukommelse til at tolke lugte, bruger den elektroniske næse databaser og algoritmer til at lære og genkende duftprofiler.

At omsætte kemiske signaler til elektriske output

Elektroniske næser er afhængige af en række forskellige sensortechnologier, som hver især bygger på unikke fysiske principper, for at kunne detektere VOC'er. Disse forskellige teknologier åbner mulighed for at oversætte kemiske interaktioner til elektriske signaler, som kan behandles digitalt og bruges til at identificere og kvantificere lugte.

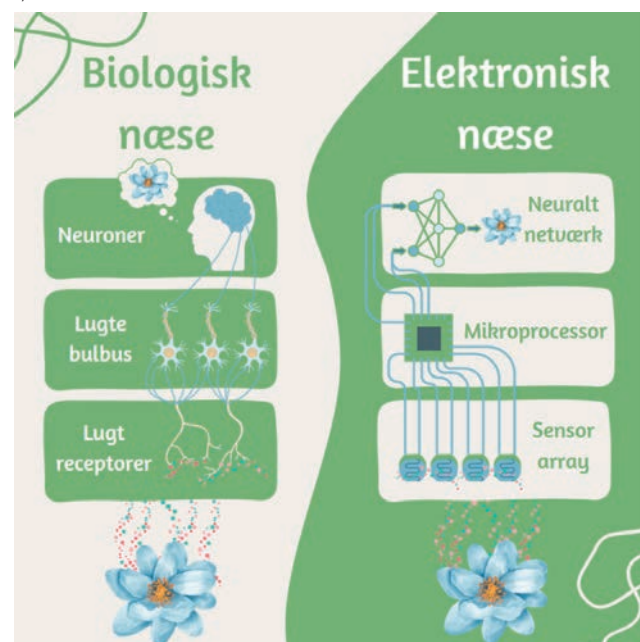
Metaloxid-sensorer fungerer ved at måle ændringer i elektrisk ledningsevne. Når VOC'er interagerer med den opvarmede metaloxidoverflade, donerer eller fjerner de elektroner, hvilket ændrer materialets modstand. Denne ændring registreres som en variation i strøm eller spænding og giver et simpelt, men meget følsomt elektrisk signal. Metaloxid-sensorer er robuste, billige og udbredt i anvendelser som luftkvalitetsmåling og overvågning af fødevarerfordærv.

Piezo-resonator-sensorer, såsom mikrocantilevere og kvarts-krystal-mikrovægtsensorer (*Quartz Crystal Microbalances* – QCM), registrerer ændringer i masse og mekaniske egenskaber. Mikrocantilevere er små, fleksible bjælker, der bøjer eller ændrer deres resonansfrekvens, når molekyler adsorberes på deres overflade. QCM-sensorer anvender en piezoelektrisk kvarts-krystal, som oscillerer ved en præcis frekvens. Når VOC'er binder sig til krystaloverfladen, øges massen, hvilket medfører et målbart fald i frekvensen. Da denne frekvensændring er proportional med den adsorberede masse, er QCM-sensorer særligt velegnede til præcis kvantificering af selv meget små mængder af flygtige forbindelser.

Overfladeakustiske bølgesensorer (*Surface Acoustic Waves* – SAW) anvender ligeledes piezoelektriske materialer, men detekterer VOC'er ved at sende akustiske bølger hen over materialets overflade. En interdigital transducer (IDT) genererer disse bølger, som er ek-

stremt følsomme over for ændringer i overfladens masse, elasticitet eller ledningsevne. Når VOC'er binder sig til en funktionaliseret overflade, ændres bølgernes hastighed og amplitude. Disse forskellige ændringer registreres som forskydninger i frekvens eller fase, og omdannes til elektriske signaler, hvilket åbner mulighed for hurtig og følsom detektion af kemiske interaktioner.

Ledende polymersensorer udnytter ændringer i de elektriske egenskaber af organiske polymermaterialer, når de udsættes for VOC'er. Materialer som polypyrrol, polyanilin og polythiofen er naturligt ledende og kan kemisk tilpasses til at reagere selektivt med bestemte forbindelser. Når VOC'er absorberes i polymermatricen, kan de forårsage svulmning, ladningsoverførsel eller ændringer i dopingsniveauet, hvilket ændrer materialets modstand. Disse forskellige ændringer måles og fortolkes som elektriske signaler, der afspejler både tilstedeværelse og koncentration af målanalytterne. Ledende polymersensorer er attraktive på grund af deres lave omkostninger, fleksible design og kemiske følsomhed.



Optiske sensorer registrerer VOC'er ved at overvåge, hvordan lys interagerer med en funktionaliseret overflade. Afhængigt af designet kan denne interaktion involvere ændringer i lysabsorption, fluorescens, spredning eller brydningsindeks. I absorptionsbaserede sensorer kan VOC'er ændre intensiteten eller bølgelængden af det lys, der absorberes af en farvestofbelagt overflade. Fluorescensbaserede sensorer måler ændringer i lysudsendelse, når VOC'er dæmper eller forstærker fluorescensen. En særlig følsom metode er overfladeplasmonresonans (*Surface Plasmons Resonance* – SPR), hvor lys exciterer elektronoscillationer på en tynd metalfilm. Adsorption af VOC'er ændrer det lokale brydningsindeks, hvilket forskyder resonansbetingelsen og giver mulighed for præcis måling. Disse forskellige optiske teknikker tilbyder enestående specificitet og følsomhed og anvendes bredt i kemisk analyse, miljøovervågning og medicinsk diagnostik.

Sensorarrays

Disse forskellige sensortyper kan integreres i et samlet sensorarray i en elektronisk næse, hvor hver sensor bidrager med et unikt responsmønster over for en given flygtig forbindelse. Denne konfiguration spejler det biologiske lugtesystem, hvor hundredvis af lugtreceptorer – hver især følsom over for specifikke molekulære egenskaber – arbejder sammen for at danne en kombinationskode, som hjernen bruger til at genkende dufte. I den elektroniske næse samles de elektriske signaler fra hver sensor i et multidimensionelt datapunkt, også kaldet et “duftfingeraftryk”, som sendes videre til en mikrocontroller. Denne mikrocontroller fungerer analogt med lugtebulbus i hjernen og står for at kuratere, forbehandle og fortolke de indkomne signaler ved hjælp af mønstergenkendelsesalgoritmer, så dufte kan identificeres og klassificeres med høj præcision og pålidelighed.

Træning i duftgenkendelse

Lugtesystemet er aktivt allerede ved fødslen. Et nyfødt barn kommer til verden med et fuldt sæt lugtreceptorer, neurale forbindelser og en lugtebulbus – klar til at opfatte duften af mælk, den blide duft af moderens hud eller den skarpe lugt af en nærliggende blomst. Men selvom barnet kan registrere disse lugte, ved det endnu ikke, hvad de betyder. Genkendelsen kommer med erfaring. Over tid begynder barnet at forbinde den søde duft af mælk med næring, den jordagtige lugt af et tæppe med tryghed, eller den gennemtrængende lugt af fisk med noget ukendt. Disse forskellige associationer opbygges gradvist gennem gentagen eksponering og integration med andre sanseindtryk – syn, berøring, smag og lyd – indtil barnet kan forbinde en bestemt lugt med et specifikt objekt eller en kontekst.

Denne læringsproces i det menneskelige lugtesystem minder om, hvordan en elektronisk næse trænes til at genkende dufte. Selv om den elektroniske næse er udstyret med sensorer i stedet for biologiske receptorer, starter den også med rå perception – den registrerer tilstedeværelsen af flygtige forbindelser uden at vide, hvad de betyder. For at tolke disse signaler anvender den maskinlæring. Når man udsætter systemet for kendte prøver – som duften af modne jordbær, sur mælk eller industrielle opløsningsmidler – lærer enheden at forbinde specifikke sensorresponsmønstre med bestemte lugte. Med tilstrækkelige data og træning kan den efterhånden identificere komplekse duftprofiler med imponerende nøjagtighed.

En stor fordel ved elektroniske næser er deres evne til at kvantificere duftintensitet – noget den menneskelige næse kun vurderer omtrentligt. Hvor vi måske beskriver en lugt som “svag” eller “overvældende”, kan en elektronisk næse måle koncentrationsniveauer præcist og indarbejde disse data i sine genkendelsesalgoritmer. Denne kvantitative evne åbner op for nye anvendelser. For eksempel kan elektroniske næser i fødevarerindustrien overvåge den gradvise opbygning af fordærvelige forbindelser og forudsige holdbarhed

mere pålideligt end visuel inspektion eller menneskelig lugt alene. Til sammenligning er vores biologiske lugtesans, selvom den er rig på nuancer og følelsesmæssig resonans, primært kvalitativ og påvirkelig af træthed, tilvænning og individuelle forskelle.

Når man efterligner strukturen og læringsprocessen i det menneskelige lugtesystem – og samtidig forbedrer det med præcision, konsistens og datadrevet intelligens – bliver elektroniske næser ikke blot detektorer, men forståelsesværktøjer, der kan tolke det usynlige kemiske sprog, som omgiver os hver dag.

TeleScent-projektet

På Syddansk Universitet udforsker vi med Villum Experiment-projektet TeleScent grænselandet for opsamling og transmission af duft. Ligesom telefonen revolutionerede kommunikation ved at åbne mulighed for realtids stemmeudveksling, og fjernsynet ændrede underholdning ved at bringe bevægelige billeder ind i hjemmet, stræber TeleScent efter at tilføje en ny sanselig dimension til digital interaktion: lugt. Når man integrerer duft i virtuelle og udvidede virkeligheder, ønsker TeleScent at gøre fjernoplevelser mere medrivende, følelsesladede og livagtige.

Kernen i TeleScent-systemet er dets evne til at digitalisere og genskabe dufte ved hjælp af elektroniske næser og mikrofluidik. Aromastoffer opbevares i modulære beholdere og håndteres som mikrodropletter, der blandes efter behov for at genskabe specifikke dufte. Denne modulære tilgang åbner mulighed for at transmittere og udsende et bredt spektrum af dufte med høj præcision og åbner døren for realtids lugtkommunikation.

Selv om digital dufttransmission stadig befinder sig i en tidlig fase, er potentialet enormt. En af de største udfordringer er at udvikle standardiserede metoder til kodning og afkodning af komplekse duftprofiler – noget lyd- og billedteknologier for længst har mestret. Men udviklingen går hurtigt. Virksomheder som Osmo AI har allerede demonstreret udviklingen af et “odor map” ved hjælp af avancerede teknikker som gaskromatografi-massespektrometri (GC-MS) og kunstig intelligens. Disse forskellige innovationer, kombineret med fremskridt inden for mobilteknologi og kemiteknik, bringer os tættere på en fremtid, hvor duft kan streames lige så let som lyd og video.



Roana de Oliveira Hansen er ph.d. i nanoteknologi og lektor ved Syddansk Universitet i Sønderborg.

Et andet jubilæum: aluminium fylder 200 år

Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

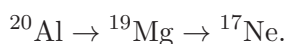
Det er umuligt at forestille sig et moderne samfund uden aluminium. Dette lette metalliske grundstof blev opdaget af H. C. Ørsted i 1825, uden at hverken han eller andre kunne ane de senere monumentale konsekvenser. Det er værd at mindes 200-året for grundstof nummer 13 i det periodiske system.

Det internationale kvantear YQ (International Year of Quantum Science and Technology) har fyldt rigtig meget i 2025. Og forståeligt nok, for skabelsen af kvantemekanikken for 100 år siden var en milepæl ikke blot i den videnskabelige erkendelses historie, men også, i det mindste potentielt, i teknologihistorien. Men midt i al kvantevirakken går andre videnskabelige jubilæer let i glemmebogen. Et af dem er opdagelsen af metallet aluminium, der fandt sted for 200 år siden og efter en langvarig famlende start resulterede i en veritabel teknologisk revolution.

De to begivenheder er ikke umiddelbart sammenlignelige, men i et industrielt og samfundsmæssigt perspektiv kan man med en vis ret hævde, at aluminium er vigtigere end kvantemekanikken. På trods af al retorik lever vi jo ikke i en kvantealder. Nej, som vi engang levede i stenalderen, og derefter i bronzealderen og jernalderen, så lever vi i dag i aluminiumsalderen. Udtrykket optræder allerede i en amerikansk reklame for aluminium fra 1929 [1, s. 11].

Z = 13

Det metalliske grundstof med atomnummer 13 er monoisotopisk, da det kun har en enkelt stabil isotop ($A = 27$, $N = 14$). En lang række radioaktive isotoper er blevet kunstigt frembragt, hvoraf den letteste med $A = 20$ og $N = 7$ blev påvist så sent som juli 2025 af en gruppe fysikere ved det kinesiske videnskabsakademi [2]. Opdagelsen vakte en del opsigt, da den neutronfattige kerne henfalder ved en proces, der ikke tidligere har været kendt. Først udsender kernen en enkelt proton og umiddelbart derefter to protoner:



Mere væsentligt og mindre eksotisk er det, at aluminium med en hyppighed på 8,2 % er det tredjemest almindelige grundstof i jordskorpen, mere almindeligt end jern (5,0 %) og kun overgået af oxygen (46,6 %) og silicium (27,7 %). Desuden er det med en massefylde på 2,7 g/ml bemærkelsesværdigt let i forhold til jern (7,9 g/ml). I modsætning til fx jern og kobber findes aluminium ikke naturligt i metallisk form, men hovedsageligt som oxider og hydroxider. Den vigtigste kilde er stenarten bauxit, hvor metallet findes righoldigt som Al_2O_3 eller rettere den hydratiserede form $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]\text{Cl}_3$. Da ionerne Al^{3+} og O^{2-} er bundet tæt sammen, kræver det stor energi for at adskille dem, hvilket forklarer aluminiums sene opdagelse.

I øvrigt er aluminium den eneste af de i dag kendte

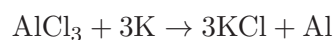
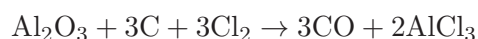
118 grundstoffer, der er opdaget af en dansk videnskabsmand, nemlig H. C. Ørsted. Grundstoffet med atomnummer 43, hafnium, blev ganske vidst opdaget i København i starten af 1923, og endda navngivet efter byen, men opdagerne på Bohrs institut var hollænderen Dirk Coster og ungarenen George Hevesy.



Figur 1. DTUs digitale kopi af Ørsteds buste med oprindeligt forlæg i en porcelænsbuste lavet af billedhuggeren H. W. Bissen i 1859.

Ørsteds opdagelse

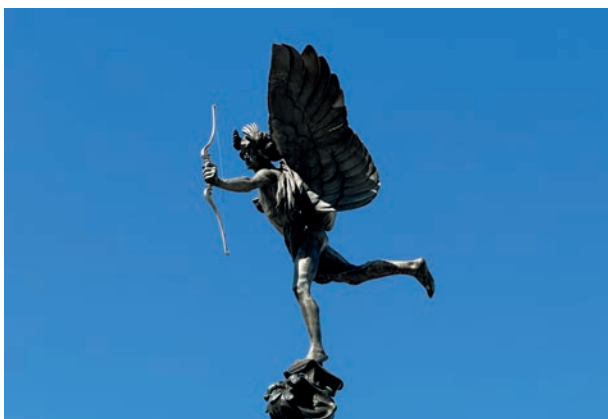
Omkring 1820 vidste kemikere, at der fandtes et metal i alunlerjord og det havde endda et navn. Humphry Davy, der forgæves havde søgt at isolere det elektrolytisk, kaldte det først 'alumium' og senere "aluminum". Stavemåden "aluminium" stammer fra 1812. Hvad mere er, den svenske kemiker Jöns Jacob Berzelius kunne i 1823 bestemme dets atomvægt til 27,4. Når det i februar 1825 lykkedes H. C. Ørsted at isolere metallet, omend i en uren form, skyldtes det en ny metode, hvor han først fremstillede vandfrit aluminiumchlorid og dernæst reducerede det med kalium:



I arbejdet, der foregik på Københavns Universitets nye kemiske laboratorium i Studiestræde, blev Ørsted assisteret af den unge farmaceut Schack Køster [3]. Da Ørsted den 25. marts 1825 meddelte sin fremstilling af "en Metalklump som i Farve og Glands noget nærmer

sig Tinet” til Videnskabernes Selskab, kaldte han det “argillium” eller “Leerær” på dansk. Det var så det, og ikke meget mere, bortset fra at meddelelsen også fremkom på tysk. Den travle Ørsted fulgte ikke op på sin opdagelse, der i stedet blev udviklet af Friedrich Wöhler i Tyskland og senere af Henri Sainte-Clair Deville i Frankrig.

I lang tid var det almindeligt at give Wöhler æren for aluminiums opdagelse, men i dag er der ingen tvivl om Ørsteds prioritet [4, s. 102-121]. For at understrege hans afgørende rolle i det mageløse metals historie sørgede Nordisk Aluminiumindustri A/S i 1937 for, at der blev støbt en buste af ham i det pureste aluminium. I 2020 – jubelåret for elektromagnetismens opdagelse – lykkedes det forskere på DTU at lave en digital kopi af busten ved hjælp af en særlig konstrueret 3D-printer.



Figur 2. Den såkaldte Eros-statue i Piccadilly Circus, London, blev i 1892 lavet af aluminiumsbronze som surrogat for guld. Legeringen består af 90 % kobber og 10 % af det væsentligt dyrere aluminium. Foto: Matt Brown.

Intermezzo

Ved Ørsteds død i 1851 blev aluminium fremstillet kommercielt, men metallet var voldsomt dyrt og mest brugt til luksus- og kunstgenstande. I en kort periode omkring 1860 blev aluminium fremstillet ud fra det grønlandske mineral kryolit ved reduktionsprocessen



Metoden, der blev promoveret af finansmanden C. F. Tietgen, var teknisk set god, men ikke rentabel. Prisen forhindrede, at Ørsteds metal kunne bruges i større mængder til praktiske formål, men i det mindste kunne man fantasere om fremtidige anvendelser. Det var, hvad Charles Dickens gjorde 13. december 1856 i tidsskriftet *Household Words*:

What do you think of a metal as white as silver, as unalterable as gold, as easily melted as copper, as tough as iron; which is malleable, ductile, and with the singular quality of being lighter than glass? Such a metal does exist, and ... we may expect soon to see it in the hands of the civilized world at large.

Dickens' profeti blev til virkelighed, om end ikke i hans levetid.

På samme tid kunne man i det danske tidsskrift *Nord og Syd* læse: “Naar man anende eller propheterende taler om Luftskebsfart, synes Aluminiumet formedelst dets Lethed at maatte komme til at spille en stor Rolle.” Et mere realistisk billede blev i 1879 tegnet af den danske industrikemiker August Thomsen, der var docent ved Polyteknisk Læreanstalt [5]: “Der var en Tid,” skrev han, “da man troede, at det nye Metal havde en stor Fremtid for sig, men den høie Priis af 30 Kroner for 1 Pund har gjort en almindelig Anvendelse umulig.”



Figur 3. I 1856 fik kong Frederik VII (1808–1863) smedet en prægtig rytterhjelme, der i dag findes i samlingen på Rosenborg Slot. Hjelmen af det pureste aluminium vakte behørig beundring i de europæiske fyrste- og kongehuse. Billedet viser rytterstatuen af Frederik VII på Christiansborg Slotsplads. Foto: Michael Button.

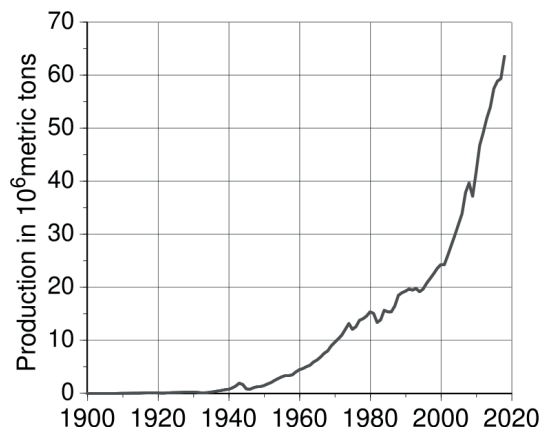
Thomsens pessimisme blev dog snart gjort til skamme gennem et afgørende teknologisk nybrud. I 1886 opfandt Paul Héroult i Frankrig og Charles Hall i USA nemlig uafhængigt af hinanden en energikrævende elektrolytisk proces, hvor en smelte af Al_2O_3 ved høj temperatur omdannes til ren aluminium [6]. For at nedsætte smeltepunktet tilsættes kryolit, først i naturlig form fra Grønland og senere fremstillet syntetisk. Da kryolitten kun indgår fysisk, er dens indhold af aluminium kemisk set irrelevant.

Med udbredelsen af Héroult-Hall processen faldt prisen per kilogram aluminium drastisk, med en faktor af størrelsesordenen 1000. De første store aluminiumsværker, prototyper for de nuværende gigantiske værker, stammer fra 1890'erne. Det var begyndelsen på aluminiums alderen, men kun en spæd begyndelse. Først med opfindelsen af legeringen kaldet duralumin (96 % Al, 3,5 % Cu, 0,5 % Mg) i 1909 fandt Ørsteds metal så småt videre anvendelser. Mens rent aluminium er ret blødt, egner duralumin sig glimrende til bl.a. tog, fly, skibe og bygninger.

I dag

Hvad der på Ørsteds tid var en kuriositet, er i dag det næstmest producerede metal efter jern, der har en suveræn førsteplads (2,5 milliarder tons i 2024). Faktisk produceres der mere aluminium end af alle ikke-jernmetaller tilsammen. Aluminiums alderen startede for alvor efter anden verdenskrig, hvor produktionen af det lette metal eksploderede. Mens der i 1900 kun blev produceret sølle 6,8 tons, var produktionen i 1954

vokset til 2,8 millioner tons og i 1970 til omkring 10 millioner tons. I året 2024 var den samlede globale produktion 72 millioner tons, hvoraf Kina alene tegner sig for 43 millioner, altså 60 %. Andre storproducenter af aluminium, men slet ikke af Kinas størrelse, omfatter Indien, Rusland, Canada og Australien.



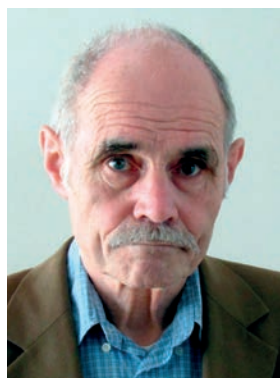
Figur 4. Væksten i global produktion af aluminium ca. 1900–2018. Graf: Wikipedia.

Som nævnt er fremstillingen af aluminium særdeles energikrævende, nemlig ca. 17 kWh for hvert kilogram af metallet. Næsten 10 % af Australiens samlede produktion af elektricitet går til landets aluminiumsværker! Det hører med til billedet, at en meget stor del af det producerede aluminium genbruges, hvilket nedsætter energiforbruget og de miljømæssige skader. Hele denne mægtige industri er i dag behersket af nogle få, enormt

store selskaber, hvoraf de seks største er fra Rusland, Kina, USA, Canada, Australien og Norge. Ørsted ville have undret sig.

Litteratur

- [1] M. Sheller (2014) "Aluminium Dreams: The Making of Light Modernity", MIT Press.
- [2] X. D. Xu et al. (2025) "Isospin symmetry breaking disclosed in the decay of three-proton emitter Al-20", *Physical Review Letters*, bind **135**, side 022502.
- [3] H. Kragh (2019), "Kemikeren H. C. Ørsted", *Kvant*, bind **30**, nr. 4, side 16-19.
- [4] H. H. Kjølser (1965) "Fra Skidenstræde til H. C. Ørsted Institutet", Gjellerup.
- [5] A. Thomsen (1879) "Naturkræfterne i Menneskets Tjeneste", Philipsen.
- [6] T. Williams (1993) "Aluminium: Latecomer to the metal industry", *Endeavour*, bind **17**, side 89-93.



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

Vakuumdstyr - Rådgivning, support og service

Vi tilbyder vakuumdstyr til ultimativt vakuum helt ned til 1×10^{-11} mbar.

Inden for dette område kan vi tilbyde følgende: Vakuumpumper, turbo-/diffusions- og ionpumper, membran-/skrue- og scrollpumper, vakuummåleudstyr, fittings og vakuumentiler, specialolier og vakuumfedt samt helium læksøgere.



BUCH  HOLM

Buch & Holm A/S - Marielundvej 39 - 2730 Herlev - tlf.: 44 54 00 00
e-mail: b-h@buch-holm.dk - www.buch-holm.dk

KVANT21 – fokus på fremtiden i fysikundervisningen

Carsten Claussen og Gert Hansen, Kvant21-projektets styregruppe



Kvant21 er et gymnasialt udviklingsprojekt om kvantefysik- og teknologi. Projektet er fireårigt og skal for det første udvikle og afprøve undervisningsmateriale til fysik i gymnasiet på A- og B-niveau, og for det andet skal der etableres omfattende efteruddannelsesforløb for fysiklærerne. Materialet udgøres af såvel lærebogsmateriale som eksperimentelle aktiviteter og prototyper på eksperimentelt udstyr tillige med relevante digitale værktøjer og inspirationsmaterialer.

Kvanteteknologi er et nationalt og internationalt indsatsområde for forskning og udvikling. Store fonde og staten investerer langsigtet milliarder i en dansk udvikling, og i udlandet går udvikling, uddannelse og gymnasieundervisning på området stærkt frem. Vi er måske lidt bagefter, men nu sker der noget.

Hvis investeringerne for alvor skal være til gavn for det danske samfund, må der også i fremtiden være fysik- og ingeniørstuderende, som er interesserede i området. Så hvis alle indsatserne for alvor skal have gennemslagskraft, skal fremtidens studerende og forskere lære om det i gymnasiet. Med en stor bevilling fra Novo Nordisk Fonden til Fysiklærerforeningen, forskningscentret NQCP på Niels Bohr Institutet og DTU Fysik i samarbejde med de øvrige universitetsfysikmiljøer i Danmark skal der i de næste fire skoleår arbejdes målrettet for at udvikle fysikundervisningen inden for området kvantefysik og kvanteteknologi på såvel A-niveau og B-niveau på stx- og htx-uddannelserne.

Ifølge Jon Gaarsmand, formand for Fysiklærerforeningen, så sætter fysiklærerne med dette projekt selv ind på at udvikle den gymnasiale fysikundervisning, så den bliver endnu mere spændende, aktuel og peger på områder med stort nationalt og internationalt fokus.

Målet med projektet med navn Kvant21 er flersidigt.

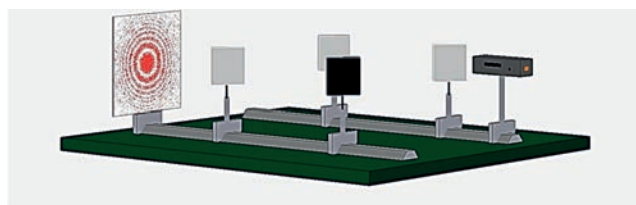
Undervisningskoncept og -materialer til A-niveau

For det første skal vi udarbejde et sammenhængende undervisningskoncept, der omfatter lærebogsmateriale og et bredt udvalg af elevaktiviteter. De første to år vil udviklingsfokus være på A-niveauet, hvor vi sigter på at udarbejde et materiale, som vil kunne bruges til området Fysik i det 21. århundrede på stx og som supplerende læsning på htx.

Vi ved endnu ikke, hvilke faglige områder og teknologier, vi kommer til at behandle, men det er væsentligt for hele projektet, at den teoretiske behandling af stoffet kombineres med såvel opgaveregning som elevernes eksperimentelle arbejde, vel at mærke såvel med konkret udstyr og med relevante simuleringer. Et nærliggende område, som vi kan inddrage, er polariseret lys, som kvantemæssigt kan beskrives som et system med netop to forskellige tilstande, som spiller en rolle i fx Mach-Zender-interferometret.

Sådanne eksperimenter er ikke umiddelbart til at

udføre med det udstyr, som er tilgængeligt i en normal fysiksamling. Det er derfor en del af projektet, at vi skal afprøve forskellige allerede tilgængelige former for udstyr. Særlig interesse knytter sig til et prisbilligt udstyr udviklet til undervisningsbrug ved Universitetet i Münster, Tyskland, men vi er nødt til at undersøge, om det er driftssikkert og i givet fald kan bruges i tilstrækkeligt omfang i Danmark.



Figur 1. Mach-Zender-interferometer – laseren sender strålen mod den forreste stråledeler, som splitter den i to stråler, der begge ved hjælp af et spejl sender mod den anden stråledeler, hvor strålerne interferer. Tegning fra computersimulering udviklet af Albert Huber.

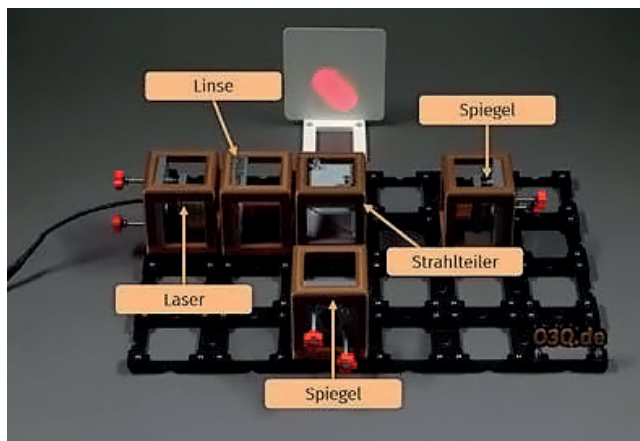
I forbindelse med projektet vil vi også arbejde med simuleringer af forskellige eksperimenter, eksempelvis kan det være enkeltfoton-eksperimenter, som ikke vil kunne realiseres i skolelaboratorier. Simuleringerne kan være udenlandske produkter, som vi tilpasser til dansk brug, eller måske kan vi ligefrem selv udvikle andre. Endelig vil vi prøve at fremstille nogle korte videoer, som kan bruges til inspiration i forbindelse med undervisningen, og som samtidigt måske kan vise nogle af de jobmuligheder, der er på området, gerne i samspil med nogle af de mange spinoff-firmaer, der allerede findes i landet.

Kvanteteknologi er nært forbundet med dette i form af nye tilgange til fx kryptering, nye typer af sensorer baseret på kvantesystemer eller kvantecomputere. I projektet kommer der ikke til at være en udførlig behandling af alle disse områder, men det bliver vigtigt for os at introducere begreber, muligheder og perspektiver. Noget af det bliver nok i form af supplerende materialer, som vil kunne indgå som oplæg til projekter, talentprogrammer m.m.

Undervisningskoncept og -materialer til B-niveau

Fokus vil i de sidste to skoleår vil være på B-niveauet, hvor vi vil arbejde med en samlet tilgang til området

kvantefysik, som forhåbentlig kan fungere som inspiration i forbindelse med de tilpasninger af læreplanerne, som må forventes at ske i forbindelse med indførelse af epx i 2030. Også i denne sammenhæng skal der indgå eksperimenter og opgaveregning.



Figur 2. Eksperimentel realisering af Mach-Zender-interferometer. Dette byggesæt, der er opbygget af 3d-printede elementer, udgør en fleksibel basis for at gennemføre mange af de eksperimenter, som er relevante for behandling af fotoners egenskaber. Udstyret er udviklet ved Universitetet i Münster / Nils Haverkamp.

Efteruddannelse

En ny tilgang til undervisningen i kvantefysik vil være en udfordring for de fleste gymnasielærere, fordi den på mange måder vil bryde med vores faglige baggrund i form af bølgefunktioner, Schrödinger-ligningen med meget mere. Nu er fokus på kvanteinformation og behandling af abstrakte tilstande, som direkte har forbindelse til de teknologiske anvendelser.

Projektet er enestående, fordi det er startet af lærer-siden og retter sig mod udvikling af undervisningen ved at tilbyde såvel undervisningsmaterialer med grundfaglig viden med eksperimenter, it-støttede aktiviteter, en skriftlig dimension og teknologiske anvendelser som et efteruddannelsesstilbud, som vil sætte lærerne i stand til at gennemføre undervisningen.

Projektet har derfor som mål at give et markant efteruddannelsesstilbud til fysiklærerne. Der skal udvikles relevant materiale til såvel et kursusforløb som et baggrundsmateriale, der kan sikre lærerne en simpel adgang til relevant fagligt og didaktisk materiale. Vi forestiller os, at efteruddannelsen struktureres over to dagens kursusforløb med en mellemliggende arbejdsperiode hjemme på skolerne, hvor man kan afprøve dele af materialerne. Efteruddannelsesstilbuddet forventes at starte med to pilotkurser i skoleåret 2026-27, nærmere betegnet foråret 2027. Kurserne er udbudt via Novo Nordisk Fondens hjemmeside [1].

Hvem står bag?

Bag projektet står en styregruppe med initiativtager, forhenværende fagkonsulent og rektor emeritus Carsten Claussen som formand, lektor emeritus og tidligere formand for Fysiklærerforeningen og for opgavekommissionen Gert Hansen som næstformand, lektor Kim Splittorff NQCP og lektor og medlem af Fysiklærerforeningens styrelse Jens Bang-Jensen. Som projektleder

er udpeget næstformand i Fysiklærerforeningen, lektor Jeppe Willads Petersen.

NQCP og DTU Fysik er medansøgere på Kvant21, hvorved vi får mulighed for at udvikle eksperimenter i samarbejde med Quantum Training Lab, NQCP og QuantumLab/Nanoteket, DTU, samt trække på deres faglige ekspertise og hyre studentermedhjælp i det omfang, det er ønskeligt.

Hvad nu?

Vi vil i løbet af efteråret udsende et spørgeskema til medlemmerne af Fysiklærerforeningen for at input til de nødvendige prioriteringer af indhold, udstyr, supplerende materialer og ønsker.

De første efteruddannelseskurser, der afvikles i foråret 2027, er nu udbudt, og vi bidrog til Science-konferencen i Odense den 20.-21. november 2025, hvor vi præsenterede projektet og lagde op til diskussion om indhold og muligheder. Konferencen var et fælles kursus for gymnasiefagene biologi, fysik, kemi og matematik.

I projektets første år vil der være fokus på udvikling af emner til større skriftlige opgaver og materialer til et særskilt 3g-forløb (A-niveau). Desuden er det planen at etablere kontakt med udenlandske aktører inden for området.

Projektet har et sådant omfang, at vi også skal have flere fysiklærere involveret i såvel udarbejdelse af materialer til undervisning og efteruddannelse som udvikling af eksperimenter, videomaterialer, simulationer og meget mere. Hvis du har interesse for at være med til noget af dette eller har ideer til projektet, så send gerne en epost til Carsten Claussen (carstenclausen@outlook.dk).

Litteratur

- [1] <https://novonordiskfonden.dk/kursusliste2026-27/kvant21-paa-forkant-med-udviklingen/>



Carsten Claussen er forhenværende fagkonsulent og rektor emeritus samt formand for Kvant21-projektets styregruppe.



Gert Hansen er næstformand for Kvant21-projektets styregruppe, lektor emeritus og tidligere formand for Fysiklærerforeningen og opgavekommissionen i stx-fysik.

Lys hjælper os med at forstå data – Fra kvantesamples til klarhed i datastrukturer

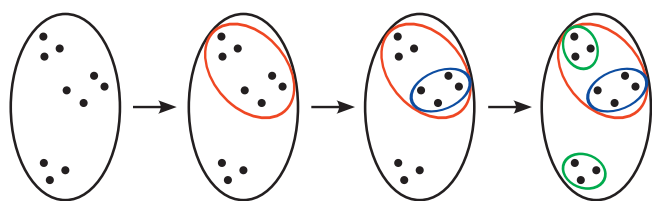
Josefine Bjørndal Robl, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Verden bombarderer os hele tiden med information. Den vælter ind gennem vores skærme, målinger og samtaler – vi drukner i mængden. Og alligevel er vi i stand til at finde mening i den. Hvorfor? Fordi vi ser mønstre.

At kunne finde struktur i en uoverskuelig kompleksitet er ikke blot en menneskelig evne – det er en nødvendighed for at forstå den verden, vi lever i. I dataanalyse kaldes denne opgave for *clustering*; kunsten at gruppere datapunkter, der ligner hinanden, uden på forhånd at vide, hvad vi leder efter. Men selv om idéen lyder enkel, så er implementeringen det langt fra, især når datasættene bliver store.

Hvordan vi finder strukturer ved at splitte

En intuitiv tilgang til clustering er den såkaldte *divisive hierarchical clustering* metode [1]. Her starter alle datapunkter i én samlet gruppe kaldet en *supercluster*. Metoden forsøger herefter at opdele denne gruppe i mindre *subclusters* ved at undersøge grupperinger af et faldende antal punkter. Hvis vi eksempelvis starter med 10 datapunkter som i figur 1, så leder metoden først efter mulige *subclusters* bestående af 9 punkter, dernæst 8, 7 og så videre. Når en gruppe opfylder et foruddefineret tæthedskrITERIUM, så markeres den som en subcluster – på figur 1 er dette eksempelvis tilfældet for de 7 punkter omgivet af en rød ring. Herefter fortsætter metoden, men nu udelukkende inden for de etablerede grupper, i vores eksempel enten inden for den røde gruppe med de 7 datapunkter eller inden for de resterende 3 datapunkter.



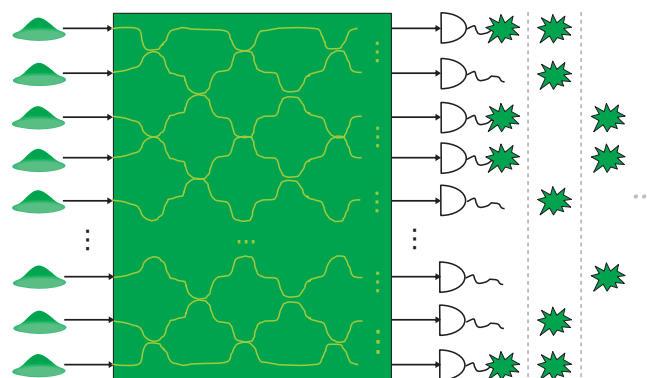
Figur 1. I divisive hierarchical clustering starter alle datapunkter i én stor cluster (sort), her af størrelse 10. Metoden tjekker nu iterativt om der er clusters af størrelse 9, dernæst 8, 7, osv.. Når et antal punkter, fx 7, ligger tættere end andre kombinationer af samme størrelse, så markeres de som en mindre subcluster (rød), og processen foregår inde i hver af disse; de 7 punkter i en subcluster og de resterende 3 punkter. Efter sidste tjek viser algoritmen et hierarki af clusters.

Denne metode er også kendt som en top-down-tilgang, da den gradvist afslører datastrukturer i flere lag – fra store overordnede grupper til små tætte clusters. Dette kommer dog med en pris: Antallet af mulige opdelinger vokser eksponentielt med antallet af datapunkter. Hvis man vil at finde de optimale grupperinger, så skal metoden gennemgå et enormt antal mulige

kombinationer, hvilket hurtigt bliver beregningsmæssigt uoverskueligt.

Fotoniske kvanteberegninger

Men hvad gør man, når de klassiske metoder ikke længere rækker? Når datasættene bliver så store, at det bliver urealistisk at gennemgå alle mulige opdelinger? I stedet for at kæmpe imod kompleksiteten med mere klassisk regnekraft må man skifte spor og vende sig mod kvanteverdenen, hvor der findes beregningsmodeller, der udnytter de fundamentale fysiske principper på en helt anden måde. Én af disse er *Gaussian boson sampling*: En specialiseret kvanteberegningsmodel, som benytter fotoner til at generere output baseret på komplekse statistiske fordelinger [2].



Figur 2. En Gaussian Boson Sampler består af et lineært interferometer, hvori der indsendes squeezed vacuum, og hvor output er et fotonmønster ved hjælp af fotondetektorer, der registrerer antallet af fotoner i hver udgang. Når man samler fra en Gaussian Boson Sampler, vil antallet af målte fotoner og hvilke detektorer, der registrerer dem, variere. Dette skyldes en underliggende sandsynlighedsfordeling, der er for kompleks til at kunne simuleres klassisk.

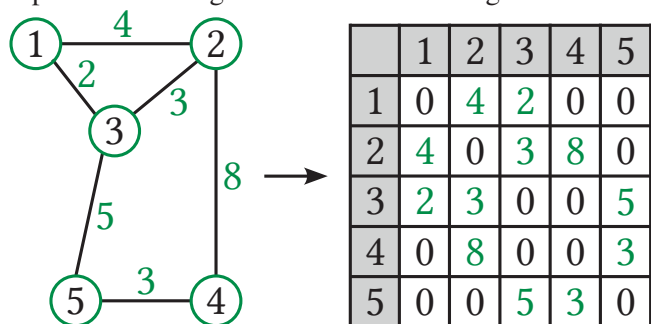
I en Gaussian Boson Sampler (figur 2) sendes *squeezed vakuumtilstande* – ikke-klassiske kvantetilstande af lys med reduceret kvantestøj i enten position eller impuls og forøget støj i den anden – ind i et lineært optisk interferometer. Her spredes og interfererer lyset gennem en række beam-splitters og phase-shifters, hvorefter det måles af fotondetektorer, som registrerer antallet af fotoner i hver udgang. En sådan måling kaldes en *sample* – et specifikt fotonmønster, der angiver, hvilke detektorer har målt hvor mange fotoner.

Hvis vi samler fra en sådan Gaussian Boson Sampler, altså gentager eksperimentet mange gange, vil vores samples ændre sig både i antal og i selve mønsteret. Samler vi længe nok, så vil vi se, at disse samples nærmer sig en kompleks sandsynlighedsfordeling. Og det er netop strukturen i denne sandsynlighedsfordeling, som gør Gaussian boson sampling så interessant.

Sandsynligheden for at måle de forskellige samples afhænger nemlig af en underliggende matrixfunktion kaldet *Hafnianen* og måden denne beregnes på gør den meget svær at beregne klassisk.

Kan fotoner gøre clustering nemmere?

Men hvordan hænger denne sandsynlighedsfordeling sammen med clustering? For at besvare dette spørgsmål skal vi først tale om grafer – matematiske objekter bestående af et antal knuder og kanter mellem dem. Som eksempel kan vi tage grafen på figur 3, hvor vi kan se, at alle punkterne er forbundet med kanter, som hver især er vægtet baseret på eksempelvis punkternes afstand til hinanden. En sådan graf kan beskrives ved en matrix kaldet en *adjacency matrix*, som på elegant vis repræsenterer en grafs struktur uden at tegne den.



Figur 3. En graf består af en række knuder forbundet med kanter. Disse kanter kan være vægtede med baseret på eksempelvis afstanden mellem knuderne. En sådan graf kan beskrives ved dens adjacency matrix, som har 0'er, hvis der ikke er en kant mellem to knuder, og vægtingen af kanten, hvis der er en kant.

I dette grafteoretiske billede kan hvert fotonmønster, altså hver sample, tolkes som en unik *subgraf* – et udsnit af knuder og deres indbyrdes kanter – af den oprindelige graf. Det vil sige, at hver gang vi måler en sample, så svarer det til at udvælge en bestemt gruppe af datapunkter og deres indbyrdes værdier.

Det interessante er netop, *hvilke* subgrafer der optræder hyppigst. Det er nemlig vist, at sandsynligheden for at måle en given subgraf afhænger direkte af dens tæthed [3], da denne egenskab er relateret til *Hafnianen*. Jo tættere en subgraf er, desto større er sandsynligheden for, at det tilsvarende fotonmønster bliver samplet.

Og lige præcis dette interne bias er nøglen til at løse vores clusteringproblem. For det er netop sådanne tætte grupperinger, vi forsøger at finde i clustering. Denne observation er grundlaget for min forskning, hvor jeg har kombineret samples fra en Gaussian Boson Sampler med den hierarkiske clusteringmetode for at udvikle en *sampling-baseret clustering-algoritme*. Min forskning har ikke blot vist, at denne metode faktisk virker og kan identificere clusters i en graf, men antyder også, at dette muligvis kan gøres uden brugen af eksponentielt mange samples [4]. Denne indikation er vital, da dette vil betyde, at vi ikke blot udnytter, at tætte subgrafer er mere sandsynlige at sample, mens ikke-tætte subgrafer er mere usandsynlige, men i stedet at de fleste ikke-tætte subgrafer er *så* usandsynlige, at de kan negligeres og vi altså kun behøver at kigge på et lille udsnit af subgrafer for at finde clusters. Dette er derfor stadig et åbent spørgsmål, jeg aktivt undersøger i min forskning.

Et kig fremad

Et naturligt næste skridt er at undersøge, om denne metode bevarer sin styrke i mere realistiske scenarier. Indtil videre er metoden kun testet med i støjfri simuleringer, men skal den gøre sig gældende som et reelt værktøj, må den være robust og kunne fungere på virkelig kvantehardware, hvor støj og tekniske begrænsninger er uundgåelige.

Vi befinder os lige nu i *NISQ*-æraen; en tid hvor kvantecomputere stadig er små og udsatte for fejl, men alligevel kraftige nok til at løse problemer uden for klassiske computers rækkevidde. Fotoniske platforme, hvilke Gaussian boson sampling baserer sig på, er blandt de mest modne eksperimentelle platforme, hvilket gør det oplagt at undersøge, hvordan man kan udnytte deres naturlige bias i praktiske algoritmer. Her handler det ikke nødvendigvis om at opnå universelle kvanteberegninger, men lige så meget om at finde nichemodeller, der gør nytte af de begrænsede ressourcer, vi har til rådighed. Netop derfor er Gaussian boson sampling interessant: Det er ikke et forsøg på efterligne en klassisk beregning, men i stedet en model som udnytter sit eget bias til at løse et klassisk hårdt problem.

Selvom metoden stadig befinder sig i et udviklingsstadium, hvor yderligere forskning er nødvendig, demonstrerer den, hvordan kvanteberegninger kan tilføre nye perspektiver til komplekse problemer. Det understreger vigtigheden af at fortsætte udforskningen af disse metoder, da de kan bane vejen for innovative løsninger – selv inden for de nuværende teknologiske begrænsninger.

Litteratur

- [1] L. Kaufman og P. J. Rousseeuw (1990) "Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis", *John Wiley & Sons*.
- [2] C. S. Hamilton, R. Kruse, L. Sansoni, S. Barkhofen, C. Silberhorn og I. Jex (2017) "Gaussian Boson Sampling", *Phys. Rev. Lett.*, bind **119**, nr. 17, side 170501.
- [3] J. M. Arrazola og T. R. Bromley (2018) "Using Gaussian Boson Sampling to Find Dense Subgraphs", *Phys. Rev. Lett.*, bind **121**, nr. 3, side 030503.
- [4] J.B. Robl, F.K. Marqvorsen, A.B. Michelsen (under forberedelse) "Exponential Speedup of Divisive Hierarchical Clustering through Gaussian Boson Sampling".



Josefine Bjørndal Robl er ph.d-studerende ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet samt ved Kvantify. Hun arbejder med Gaussian boson sampling og dets anvendelser inden for clustering.



Pandekagevending – breddeopgave 116

Jens Højgaard Jensen¹, IMFUFA, INM, RUC

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 116 her i Kvant):

Breddeopgave 116. Pandekagevending

Hvordan vende en pandekage i luften? Den skal tilføres en rotation omkring en diameter, samtidigt med, at den tilføres en opadgående fart. Men hvordan skal sammenhængen imellem farten og vinkelhastigheden i rotationsbevægelsen være? Begrund svaret.

Løsning

Fra $\dot{v} = -g$, hvor g er tyngdefeltstyrken, fås $v(t) = v(0) - gt$ for farten som funktion af tiden, efter at pandekagen til en start havde farten $v(0)$, til tiden $t = 0$. Det tager derfor pandekagen tiden $t = v(0)/g$ at nå sit toppunkt, hvor farten er 0. Da nedturen herfra til panden tager lige så lang tid som opturen, er tidsrummet, pandekagen er i luften, $\tau = 2v(0)/g$. I dette tidsrum skal pandekagen nå at rotere præcis en halv omgang. Altså $\omega\tau = \pi$, hvor ω er vinkelhastigheden i rotationsbevægelsen. For at vende en pandekage i luften skal farten og vinkelhastigheden i rotationsbevægelsen derfor hænge således sammen:

$$v(0) = \pi g / 2\omega. \quad (1)$$

Lille vinkelhastighed kræver stor fart, og stor vinkelhastighed kræver lille fart. Medmindre pandekagen vendes flere gange i luften.

Kommentar

Den første eksterne censor på breddekursus eksamen tilbage i 1976, Ove Nathan, kaldte eksamen, med den valgte opgavegenre, for en modenhedsprøve. Hans hovedbekymring var, om det ville være muligt at finde på nye opgaver, der var overkommelige for de studerende, efter at de mest nærliggende ideer var brugt. I øvrigt bakkede han op om konceptet.

Per august 2022 er samlingen af breddeopgaver [1] vokset til at indeholde 870 opgaver. Så Ove Nathans bekymring viste sig ubegrundet. Men han havde ret så langt, at man ikke kan få ideer til nye breddeopgaver på forlangende. For mig dukker de op på uventede tidspunkter med inspiration fra mange hold. Jeg har så noteret ideerne ned i en foreløbig formulering med det samme, inden jeg glemmer dem. Det har ført til en idebank, der kan tages udgangspunkt i, når der skal udarbejdes eksamenssæt.

Inspirationen til opgaveideer kan fx komme fra artikler i Kvant. Eller fra andre fysiktidsskrifter. Men også fra aviser og bøger i bredere almindelighed. Eller fra undervisningen på breddekurset. Men også fra livet

uden for fysikundervisningen. Fx var der en periode, hvor de studerende sporede kimen til de såkaldte “sve-rigesopgaver” til den ødegård i Blekinge, som jeg har part i, og hvor det årlige strategi-seminar for personale og studerende fra IMFUFA fandt sted i en årrække.

Cirka halvdelen af opgaverne i breddeopgavesamlingen er fra skiftende andre undervisere på breddekurset end mig. Den anden halvdel er fra min hånd. Imidlertid kan mine opgaveideer ofte være modnet i diskussion med andre, eller direkte overtaget fra andre, uden at jeg helt ved af det. Jeg er glad for, at der, angående fysikopgaver, hverken er krav til inspirationsreferencer, eller er tradition for at hævde paternitet. Det ville ødelægge fornøjelsen ved at udvikle dem.



Hvordan jeg fik ideen til pandekagevendingsopgaven, ved jeg godt. I mit arkiv havde jeg lagt et sakset udklip fra Politiken den 5. marts 2003. I udklippet er nogle engelske studerende refereret for at have udregnet en pandekageligning svarende til ligning (1). Udklippet dukkede så op fra arkivet til brug for eksamensopgavesættet august 2022.

Breddeopgave 117. Stenudslængning

Inden næste nummer af Kvant udkommer kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 2024):

En pige svinger 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 og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] J. H. Jensen (2022) “Breddeopgaver til Fysisk problemløsning I og Fysisk problemløsning II”, 5. udgave af IMFUFA tekst nr. 504a.

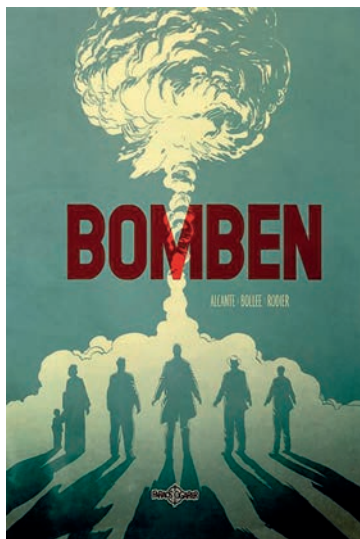
¹ Jens Højgaard Jensen døde den 3. april 2025 og efter familiens ønske bringer vi i dette og de kommende numre de opgaver, som han havde forberedt. Se også mindeord fra Kristine Niss og Jeppe Dyre på bagsiden af Kvant nr. 2 (2025).

Aktuelle bøger: Tre værker om atombomben

Michael Cramer Andersen og Jens Olaf Pepke Pedersen, KVANT, og Christopher Pethick, Niels Bohr Institutet og Nordita

Atombomben på tegneserieform

Alcante, Bollée og Rodier, "Bomben", oversat af Vigan. Forlaget Faraos Cigarer, 2025, www.forlagetfaraos.dk, 472 sider i sort/hvid, 348 kr.



Denne tegneserie fortæller historien om udviklingen og anvendelsen af de første atombomber i 1945. Det er en stor og tung bog om et tungt emne og genren er historisk fiktion. Den bygger på den virkelige historie men der er brugt kunstnerisk frihed til at skabe en sammenhængende historie.

I modsætning til filmen Oppenheimer spiller lederen af Los Alamos-projektet ikke den fremtrædende rolle som han gør i filmen. Denne bog tegner et mere bredt billede, hvor mange sidehistorier supplerer hinanden og flettes sammen. Fortælleren er grundstoffet uran, der i jeg-form starter fortællingen med opdagelsen af radioaktivitet og udvinding af uran i en afrikansk mine.

Fysikeren Leo Szilard udtænkte kædereaktionen i 1929. I 1938 forlod Szilard, som var jøde, det nazistiske Tyskland. Samme år fik Enrico Fermi nobelprisen og forlod det fascistiske Italien med sin jødiske kone. De to fysikere samarbejdede i USA om at skabe en kontrolleret kædereaktion. Fortællingen skifter til en japansk familie i Hiroshima, hvor den ældste søn som pilot deltager i krigen mod Kina.

I USA følger vi Fermi og Szilard der sidder på en café og diskuterer spaltning af atomkerner, der fører til en kædereaktion. Szilard ser for sig at det kan bruges i en bombe, men Fermi minder om at man ikke kender en isotop der afgiver neutroner ved spaltningen. Året efter demonstrerer Szilard at der dannes frie neutroner i et forsøg med uran. Szilard beder Einstein om hjælp til at

påvirke politikerne og få sikret forekomsterne af uran inden Tyskland kommer først.

Nu får politikere og militæret på begge sider af Atlanten travlt med at finde ud af, om det er muligt at anvende atomkernespløtning i et våben. Den dygtige fysiker Heisenberg træder ind på scenen i Tyskland og i USA indtager general Hoover en ledende rolle.

Med det japanske angreb på den amerikanske base ved Pearl Harbor og krigserklæringer mod USA fra både Tyskland og Italien, tvinges USA ind i krigen. Der bliver taget initiativ til at bygge fabrikker som kan fremstille uran med et højt nok indhold af uran-235, så det kan bruges til at fremstille en bombe.

I 1942 gennemføres den første kontrollerede kædereaktion i en reaktor i Chicago under ledelse af Fermi. I mellemtiden forsøger de allierede i samarbejde med norske agenter at sabotere et norsk anlæg, der producerer tungt vand. Det tunge vand kan bruges af tyskerne som moderator i deres reaktor og en sabotage ville slå fjenden tilbage. Anlægget ligger dog et ufremkommeligt sted og er godt bevogtet, så flere forsøg med luftangreb mislykkes, inden det til sidst lykkes at sabotere anlægget uden dog at sætte det helt ud af spil. Da en sending tungt vand senere sendes med færge fra Norge mod Tyskland vælger sabotørerne at sænke færgen ved en sprængning, hvilket koster civile liv.

Udviklingen af bomberne tager form i Los Alamos og de hemmelige fabrikker producerer mere og mere beriget uran. Arbejderne her får ikke engang at vide hvad maskinerne laver. Der planlægges også en bombe baseret på plutonium, som er restproduktet fra fissionsreaktorer.

I 1944 går de allierede i land i Normandiet på D-dag med store tab. Forskerne har ikke fundet det rette design på detonerer af bomben. Der er heller ikke meget viden om radioaktive stoffers virkning på kroppen og læger begynder at sprøjte plutonium i patienter der alligevel forventes at ville dø, for at studere virkningen.

I 1945 spidser krigen til i både Japan og Italien, hvor Mussolini bliver skudt, samt Tyskland, hvor Hitler begår selvmord. Men selv om krigen måske kan finde en afslutning i Europa nægter japanerne at overgive sig. Politikere, militær- og videnskabsfolk diskuterer, om man skal bruge atombomben mod japanerne og hvilke mål det skal være. De er uenige og flere videnskabsfolk prøver at standse den militære udnyttelse af deres værk. Den første bombe testes i midten af juli 1945.

Der går storpolitik i det og den amerikanske præsident vil demonstrere sin magt. Bombeflyene gøres klar og nedkaster bomber i to japanske byer. Vi ser familiefaren, der har mistet sin pilotsøn i en selvmordsmission, iagttage at den ene atombombe nærmer sig, og han pulveriseres af varmebølgen fra eksplosionen.



Figur 1. En mand udslettes af varmebølgen fra atombombeeksplosionen. Tegning fra bogen.

De efterfølgende rædsler med forbrændte ofre, der kastes i massegrave, og overlevende med stråleskader illustreres i barske billeder. Der efterrationaliseres både blandt politikere og videnskabsfolk. Kort tid efter krigens afslutning grundlagde FN Atomenergikommissionen (UNAEC), der havde til formål at regulere udnyttelsen af kerneenergi. Oppenheimer blev formand i 1947.

Initiativet til “Bomben” kom fra den belgiske tegneserieforfatter Alcante (Didier Swysen), der i flere år havde ønsket at lave en stor historisk fortælling om atombombens tilblivelse. Han kontaktede den franske forfatter Laurent-Frédéric Bollée, som er kendt for store episke fortællinger, og de udviklede over flere år et fælles manuskript med mange vinkler. Den canadiske tegner Denis Rodier blev valgt, fordi hans realistiske streg og evne til at håndtere mørke temaer passede perfekt til emnets alvor. Projektet blev udgivet i 2020 og har siden vundet en række priser.

Tegneserien er spændende læsning, og man bliver fanget af Rodiers udtryksfulde sort-hvide streg. De historiske personer ligner de virkelige personer, og dialogen udspiller sig på baggrund af bygninger og landskaber, som er med til at fastholde opmærksomheden.

Det er en kompliceret historie og tegneserien fungerer godt som en lærerig og underholdende introduktion til et vigtigt kapitel i verdenshistorien. Det betyder ikke så meget, at dele af historien er fiktion, og om der måtte være faktuelle fejl. Budskabet er ikke til at tage fejl af. Opdagelsen og udnyttelsen af kerneenergi har

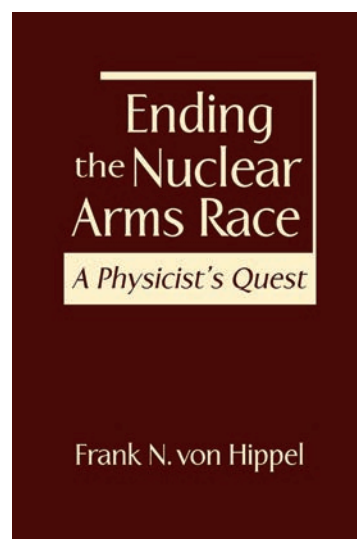
sat sit præg på verden. Atombomben var medvirkende til at afslutte anden verdenskrig, men var samtidig en demonstration af et grufuldt masseødelæggelsesvåben. Med opfindelsen fulgte et våbenkapløb, en kold krig og nedrustning. Atomvåben spiller stadig en rolle i den internationale magtbalance, men krige udkæmpes stadig med konventionelle våben. Med sine 80 år på bagen er det måske på tide at atombomben går på pension.

Bogen er udgivet med støtte fra Statens Kunstfond.

Michael Cramer Andersen

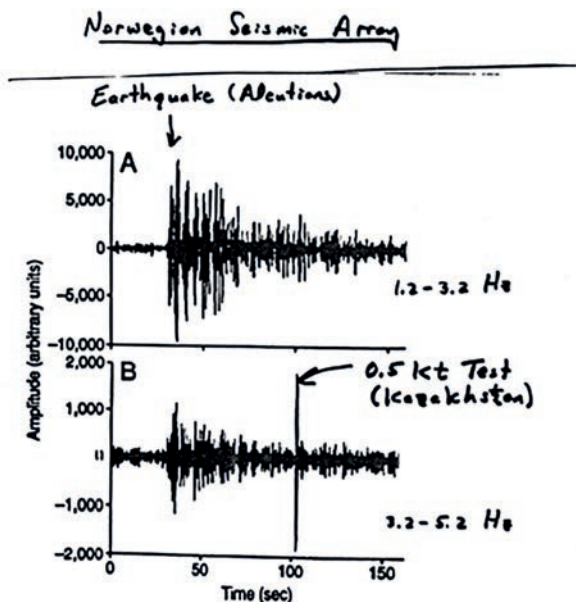
Videnskabens rolle i atomnedrustning

Frank N. von Hippel, “Ending the Nuclear Arms Race. A Physicist’s Quest”, Lynne Rienner Publishers, Boulder, USA, 2025, 297 sider, illustreret, 110 USD (hardcover eller e-bog).



Denne bog er et vidnesbyrd om styrken ved at anvende kvantitativ tænkning på samfundsmæssige udfordringer. Frank von Hippel er medstifter af Princeton Universitys program for videnskab og global sikkerhed, som gennem årene har uddannet mange af den yngre generations førende eksperter på området. Han opnåede en ph.d. i partikelfysik ved University of Oxford og havde efterfølgende postdoc-stillinger ved University of Chicago og Cornell University, før han under Vietnamkrigen blev adjunkt ved Stanford University. Her begyndte hans interesser i stigende grad at rette sig mod anvendelsen af videnskabelige metoder på problemer af bred samfundsmæssig betydning.

Selvom han også har arbejdet med andre emner, såsom effektiviteten af bilmotorer, har hans stærkeste fokus været nuklear sikkerhed – især at reducere truslen fra atomvåben. En af hans store succeser var at bidrage til en amerikansk NGO’s seismiske overvågning på sovjetisk territorium, et vigtigt skridt mod en omfattende traktat, der forbyder atomprøvesprængninger. Selvom traktaten ikke er trådt i kraft på grund af manglende ratifikation, har den etableret en norm mod sådanne sprængninger, og siden 1998 har kun Nordkorea udført prøvesprængninger – i alt seks.



Figur 1. Seismiske målinger foretaget af NORSAR, det norske seismiske institut, af en mindre sovjetisk atomprøvesprængning svarende til 500 tons TNT under et jordskælv. Selvom prøvesprængningen ikke ses i 1,2-3,2 Hz-dataene, er den tydelig i 3,2-5,2 Hz-dataene. Figur fra bogen.

I august 1985 annoncerede Mikhail Gorbatsjov, der samme år var blevet leder af Sovjetunionen, et midlertidigt stop for sovjetiske prøvesprængninger. To måneder senere mødte von Hippel fysikeren Evgenii Velikhov i København ved markeringen af 100-året for Niels Bohrs fødsel. Velikhov, en fremtrædende plasmafysiker og Gorbatsjovs rådgiver i atomvåbenkontrol, foreslog, at det sovjetiske stop kunne få større international opmærksomhed, hvis en troværdig tredjepart foretog seismiske målinger nær prøvesprængningsområdet. Von Hippel kontaktede potentielle samarbejdspartnere i USA, og resultatet blev, at et hold under ledelse af Tom Cochran fra NGO'en *The Natural Resources Defense Council* etablerede en seismisk overvågningsstation i Kasakhstan og begyndte at indsamle data i 1986. Mens skiftende amerikanske regeringer afviste et stop for prøvesprængninger, var Kongressen mere lydhør og vedtog i 1993, med folkelig opbakning, et forbud mod amerikanske prøvesprængninger.

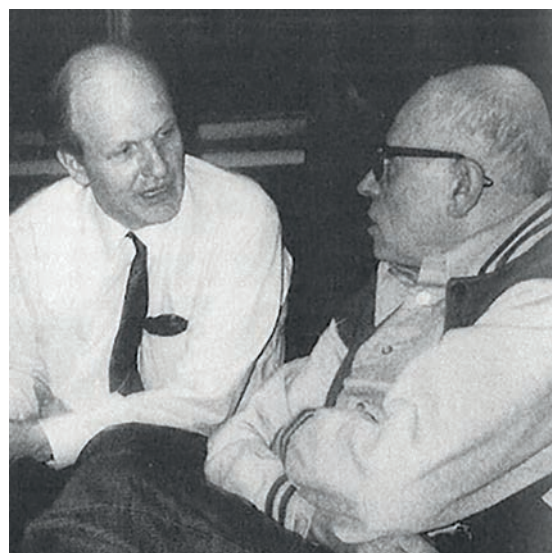
Bogen beskriver flere eksempler på fejlagtige konklusioner i officielle rapporter, og hvordan det med offentligt tilgængelige kilder var muligt at korrigere dem og i mange tilfælde påvirke politiske beslutninger. Blandt eksemplerne er en rapport om sikkerheden ved atomkraftværker, hvor antallet af kræfttilfælde efter en ulykke blev undervurderet med mere end en størrelsesorden, fordi de langsigtede virkninger blev ignoreret. Von Hippel har også været en markant modstander af brugen af plutonium som brændsel i civile reaktorer på grund af risikoen for våbenanvendelse.

En anden bemærkelsesværdig indsats var "Sortehavsekperimentet" i 1989. Sovjetunionen ønskede, at fremtidige våbenkontrolaftaler skulle omfatte både krydsermissiler fra skibe og interkontinentale ballistiske missiler. Den amerikanske regering hævdede, at det var umuligt at skelne mellem konventionelt bevæbne-

de krydsermissiler og dem med atomsprænghoveder. I eksperimentet målte sovjetiske og amerikanske hold gammastråler og neutroner fra et atombevæbnet krydsermissil om bord på et sovjetisk krigsskib og viste, at de to typer sprænghoveder kunne adskilles uden at demontere missilet. Et sådant samarbejde mellem USA og Rusland er i dag næsten utænkeligt.



Figur 2. Forsiden af den sovjetiske avis Pravda, som rapporterer om et møde mellem Mikhail Gorbatsjov (til venstre) og en gruppe internationale eksperter i våbenkontrol. På billedet til højre er Frank von Hippel den anden fra venstre på den nærmeste side af bordet, og til højre for ham sidder Evgeny Velikhov. Joseph Rotblat, som modtog Nobels fredspris i 1995 sammen med *Pugwash Conferences on Science and World Affairs*, sidder på den anden side af bordet. Fra bogen.



Figur 3. Første møde mellem von Hippel og Andrei Sakharov, i februar 1987. Foto fra bogen (af Jeremy Stone.)

I 2020 var von Hippel med til at grundlægge *The Physicists Coalition for Nuclear Threat Reduction* (physicistscoalition.org). Organisationen arbejder for at reducere truslen fra kernevåben gennem mobilisering indenfor de fysiske videnskaber både i USA og internationalt.

Det har den gjort ved, bl.a., at holde kollokvier – indtil videre flere hundrede af dem – om kernevåben

på universiteter og forskningscentre.¹

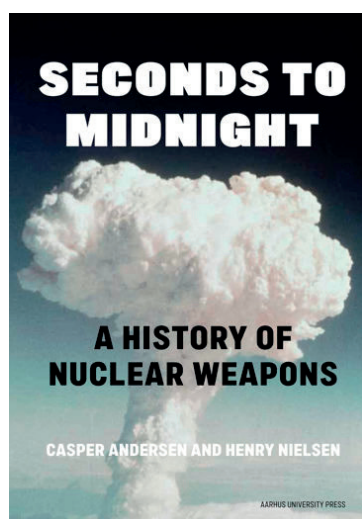
Bogen kan varmt anbefales. Den demonstrerer, hvordan en kvantitativ videnskabelig tilgang til samfundsproblemer – selv med beskedne ressourcer – kan påvirke selv de mest komplekse politiske beslutninger.

Von Hippel har også en personlig tilknytning til København. Hans forældre, Arthur von Hippel, senere professor ved MIT, og Dagmar Franck, datter af James Franck (kendt fra Franck-Hertz-eksperimentet), tilbragte et år i København efter at være flygtet fra Tyskland i 1930'erne. Arthur spillede en central rolle i opbygningen af eksperimentel kernefysik på Niels Bohr Institutet ved at hjælpe med anskaffelsen af en Cockroft-Walton-højspændingsakcelerator fra Tyskland.

Christopher Pethick

Atomvåbnenes historie

Casper Andersen og Henry Nielsen, “Seconds to Midnight. A History of Nuclear Weapons”, Aarhus Universitetsforlag, 2025, 280 sider, illustreret, 300 kr.



Casper Andersen og Henry Nielsens bog *Minutter i Midnat* er nu udkommet i en engelsk og opdateret udgave. De to forfattere har tidligere skrevet om den danske udgave af bogen fra 2022 i *Kvant*², og den engelske udgave er udvidet med et nyt og afsluttende kapitel om *Den tredje Atomalder*. Ifølge forfatterne er Den tredje Atomalder kendetegnet ved både teknologiske og politiske ændringer, som er blevet særligt tydelige efter Ruslands angreb på Ukraine i 2022, og som for første gang siden afslutningen på den kolde krig har fået antallet af atomvåben til at stige.

Forfatterne bemærker, at den teknologiske kompleksitet er vokset fordi konventionelle våben også kan bruges strategisk, og noterer især, at atomvåbenmagterne er blevet mere villige til at true med deres atomvåben

for at påvirke udfaldet af konventionelle krige. Dermed fungerer atomvåben ikke længere udelukkende som den ultimative afskrækkelse. Et andet kendetegn er, at de politiske institutioner og aftaler om våbenkontrol og ikke-spredning, som blev udviklet omkring afslutningen på den kolde krig, er blevet svækket. Samtidig øger det stigende fokus på civil udnyttelse af atomenergi risikoen for spredning af atomvåben.



Figur 1. Niels Bohr (nr. to fra venstre) i København i 1934, sammen med fire andre kernefysikere. To af dem, Edward Teller (nr. fire fra venstre) og Otto Frisch (nr. fem fra venstre) bidrog også væsentligt til udviklingen af atomvåben. Foto fra bogen.

Situationen er ikke blevet mere stabil efter genindsættelsen af Donald Trump som præsident. Han har annonceret et multilagssmissilforsvarssystem, *Golden Dome*, der skal beskytte mod ballistiske missiler, krydsermissiler og hypersoniske trusler – også fra rummet. Trump har udtalt, at systemet skal være “fuldt operationelt” inden hans valgperiode udløber i 2029. Bekymringen er, at dette blot vil accelerere atomvåbenkapløbet, fordi USA’s strategiske rivaler vil se sig nødsaget til at udvide deres atomare kapaciteter.

Trumps politik i forhold til krigen i Ukraine, hvor han stort set har støttet Putin, og usikkerheden om, hvorvidt USA’s atomare beskyttelse stadig omfatter Europa, har også haft betydning. Det har således fået Frankrigs præsident Macron til at foreslå, at de franske atomvåben kan få en “europæisk dimension”, ligesom usikkerheden om USA’s politik i Fjernøsten har fået Japan, Sydkorea og Taiwan til at overveje atomvåben.

Endelig bemærker forfatterne, at offentlighedens bekymring omkring kernevåben næsten forsvandt efter den kolde krig og skiftede fokus, som i de seneste årtier har været på globale klimaændringer. De noterer dog, at interessen for atomvåben igen er stigende og håber, at truslen vil blive betragtet på linje med klimaforandringer: som en global udfordring, der angår hele menneskeheden. De advarer afslutningsvis om, at den fortsatte udvikling og spredning af atomvåben ikke skaber den tryghed, mange længes efter.?

Jens Olaf Pepke Pedersen

¹ Videoer af nogle af dem kan ses på <https://physicistscoalition.org/colloquia/>.

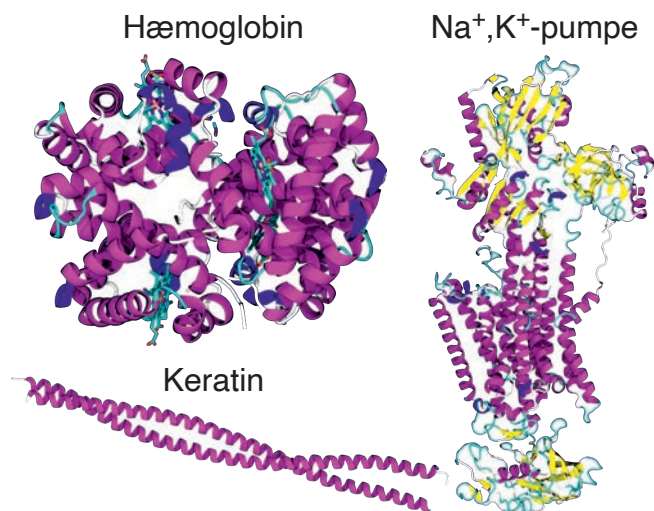
² Se artiklen “Fysikerne mellem videnskab og politik”, *Kvant*, bind 35, nr. 1 (april 2024), side 37–40.

Når atomerne bliver synlige – Kan vi simulere os til et bedre helbred?

Luisse Jacobsen, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet

Fra muskler til molekyler: Hvad er proteiner?

Når man snakker om proteiner, tænker de fleste på dem, vi skal spise for at opbygge muskler. Nogle husker endda, at det har noget med aminosyrer at gøre. Det er faktisk ikke helt forkert. Et protein er nemlig en kæde af aminosyrer, der baseret på aminosyrernes egenskaber og rækkefølge folder sig i en bestemt konformation, som kan udføre en eller flere unikke opgaver. Men proteiner er langt fra kun til for, at vi kan spise dem, de er mikroskopiske biologiske maskiner, der sørger for at levende organismers kroppe fungerer. Der er utallige funktioner udført af proteiner, for eksempel binder hæmoglobin ilt og fører det med blodet rundt til kroppen, ion-pumper og -kanaler sørger for, at elektriske signaler føres gennem nervebanerne til vores hjerne og keratin opretholder styrken og beskyttelsen af vores, hår, negle og hud. Eksempler på disse proteiner kan ses i figur 1.



Figur 1. Eksempler på proteiner. Disse proteiner kan undersøges nærmere på hjemmesiden [1] ved at søge på deres pdb ID: hæmoglobin (pdb 1shr), Na^+ , K^+ -pumpen (pdb 7e1z) og keratin (pdb 6ec0).

Proteiner er nanoskopiske, det vil sige 10^{-9} m, og kan derfor ikke ses med et klassisk lysbaseret teleskop. Specielle teknikker som atomar kraftmikroskopi eller kryo-elektronmikroskopi kan give et stilbillede af et proteins konformation, men hvis man vil undersøge dynamikken af et protein og dets interaktioner med andre molekyler, skal helt andre teknikker i brug.

Simuleringer: En rejse ind i det usynlige

Med molekylær dynamiksimuleringer kan man undersøge, hvordan proteiner opfører sig over tid helt ned på atomniveau. Desuden kan man placere proteinet i dets fysiologiske korrekte miljø, for eksempel i en cellemembran omgivet af vand med den korrekte ionkon-

centration og ved det rette tryk og temperature. Figur 2 viser opsætningen af et klassisk simuleringssystem.

Princippet bag molekylær dynamiksimuleringer er simple: hvert atom er beskrevet som en klassisk kugle, der interagerer med alle de andre kugler (atomer) i systemet baseret på foruddefinerede interaktionstyper, fx elektrostatiske og Van der Waals-interaktioner eller intra-molekylære interaktioner, som følge af kovalente bånd mellem atomerne. Baseret på den potentielle interaktionsenergi, kan atomernes øjeblikkelige acceleration bestemmes og udnyttes til numerisk at opdatere deres position. Gøres dette gentagende gange fås en simulering af systemet, altså et indblik i dets dynamik.

Den største begrænsning ved molekylær dynamiksimuleringer er deres små tids- og størrelseskalaer (mikrosekunder og nanometer). Et typisk system indeholder hundredtusindvis af atomer, som skal have deres potentielle energi og acceleration beregnet i hvert tidskridt. Tidskridtet er desuden kun få femtosekunder (10^{-15} s), fordi atomer, i særdeleshed hydrogenatomer, bevæger sig så hurtigt, at deres bevægelser ikke ville kunne beskrives ved større tidskridt. For at opnå bare 1 μs simulering skal atomernes position derfor opdateres omkring 500 mio. gange. Derfor udføres disse simuleringer typisk på supercomputere eller kraftige grafikkort.

Førhen var et andet stort problem, at der kun var et begrænset antal proteinstrukturer eksperimentelt bestemte og tilgængelige på den anerkendte database *Protein Data Bank* [1]. Simuleringsstudier af biologiske fænomener var derfor begrænset til disse kendte proteinstrukturer. Men den kunstige intelligens AlphaFold [2], som udvikledes af de forskere der modtog Nobelprisen i kemi 2024, tilbyder en softwarebaseret tilgang til at bestemme proteins struktur, og har udvidet det tilgængelige proteinkartotek fra omkring 200.000 til mere end 200 mio. proteiner. Simuleringsbaserede studier rettet mod en lang række sygdomme og biologiske mekanismer ligger derfor for vores fødder.

UCP1 øger fedtforbrændingen

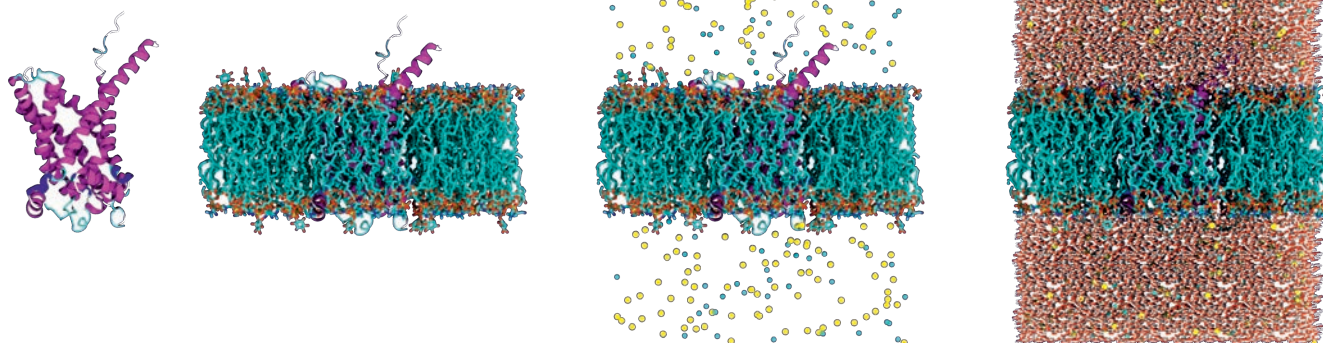
I løbet af min ph.d. har jeg anvendt simuleringer til at undersøge proteinet Uncoupling Protein 1 (UCP1). UCP1 har den specielle egenskab, at når det aktiveres af fedtsyrer, så afkobles det elektrokemiske potential i mitokondrier, som ellers bruges til at producere ATP. ATP er det molekyle, der sørger for energi til langt de fleste processer i vores krop. Potentialet bliver simpelthen spredt som varme til det omliggende væv. For at holde trit med den nødvendige ATP-produktion må de mekanismer, der opbygger potentialet arbejde mere, hvilket øger forbrændingen. Derfor er medicinsk aktivering af UCP1 et oplagt mål for fremtidig fedmebehandling.

Modeller protein

Tilføj membran

Tilføj ioner

Tilføj vand



Figur 2. Klassisk opsætning af et simuleringssystem, hvor proteinet er indlejret i en membran og omgivet af vand med ioner. Den store størrelse af biologiske simuleringssystemer skyldes, at titusindvis af vandmolekyler skal tilføjes for at opnå fysisk realisme.

Det store problem er, at man ikke vidste, hvordan fedtsyrer interagerer med og aktiverer UCP1. I løbet af min ph.d. har jeg ud fra simuleringer bestemt og kvantificeret unikke interaktionsmønstre mellem UCP1 og fedtsyrer. Jeg har desuden beskrevet, hvordan disse interaktioner funktionelt set kan lede til afkobling af det elektrokemiske potential [3, 4].

UCP1 er kun ét af mange proteiner relateret til sygdom, der nyder gavn af simulering. I den forskningsgruppe jeg er del af på Syddansk Universitet har vi desuden for nyligt studeret proteiner relateret til reparation af kræftceller og behandling af depression. Simuleringer bringer os tættere på at forstå sygdomme – atom for atom – og muliggør nye behandlinger, der tidligere virkede uopnåelige.

Litteratur

- [1] H. M. Berman m.fl. (2000) “RCSB Protein Data Bank”, *Nucleic Acids Research*, bind **28**, side 235–242. (www.rcsb.org).
- [2] J. Jumper m.fl. (2023) “Highly accurate protein struc-

ture prediction with AlphaFold”, *Nature*, bind **596**, side 583–589.

- [3] L. Jacobsen m.fl. (2023) “ATP-Bound State of the Uncoupling Protein 1 (UCP1) from Molecular Simulations”, *Journal of Physical Chemistry B*, bind **127**, side 9685–9696.
- [4] L. Jacobsen m.fl. (2025) “A Novel Model for Proton Transport by Uncoupling Protein 1”, *Protein Science*, bind **34**, side e70357.



Luise Jacobsen er ph.d.-studerende ved Syddansk Universitet, hvor hun forsker i biologiske mekanismer ved brug af molekylær dynamik-simuleringer.

Mindeord for Henning E. Jørgensen

Erik Høg, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Henning Elo Jørgensen var født den 16. januar 1938 og blev revet bort efter få dages sygdom den 23. november 2010, men vi er mange, der stadig husker ham som en samlende skikkelse ved Astronomisk Observatorium [1] gennem mange år. Det har længe naget mig, at intet findes om Henning, når man søger på nettet, ingen nekrolog eller anden omtale, skønt han betød så meget for os i lange tider.

Henning blev student fra Nykøbing Katedralskole på Falster i 1956, den skole, hvor jeg blev student i 1950. Han studerede matematik, fysik, kemi og astronomi ved Københavns Universitet fra 1956 og blev “cand.mag. et mag.scient.” med astronomi som hovedfag i 1963.

Henning blev ansat ved Københavns Universitet i 1965, fik kontor på Østervold Observatorium og blev

udnævnt til professor i “astronomi med særligt henblik på astrofysik” i 1982. Han underviste og forskede i astrofysik med særlig interesse først i stjerners fysik og senere i galakser og kosmologi og skrev lærebøger til undervisningen. Han er forfatter og medforfatter til videnskabelige publikationer i tiden 1967–2008.

Henning var bestyrer af Astronomisk Observatorium

ved Københavns Universitet i flere perioder fra ca. 1974 til 2005. I det år blev astronomi som en del af fysik lagt ind i Niels Bohrs Institut, dermed sluttede en 363-års epoke, der begyndte i 1642 med indvielsen af Observatoriet på Rundetårn.



Figur 1. Henning E. Jørgensen som stud.mag. på observatoriet i 1960 ved en elektromekanisk regnemaskine, som var standardudstyr for en astronom på den tid. Foto: Jørgen Otzen Petersen.

Henning var altid den, man kunne tale med om opgaver, problemer eller gode nyheder. Jeg kunne altid

stole på ham ved mit arbejde med de astrometriske satellitter og med Kina i firserne.

Han repræsenterede Observatoriet i mange sammenhænge: I det naturvidenskabelige fakultet, hvor han var dekan i en periode, og han var i mange år dansk repræsentant i International Scientific Committee (CCI) for observatorierne på De Kanariske Øer – altså den internationale bestyrelse for observatorierne på La Palma og Tenerife. Det var bestyrelsen bag Roque de Los Muchachos-Observatoriet, hvor Carlsberg Meridi-ankredsen fra Brorfelde og Nordisk Optisk Teleskop (NOT) blev opstillet. Han var medlem af bestyrelsen for European Southern Observatory (ESO Council), hvor han var med til arbejdet omkring bygning af verdens største optiske teleskop, Very Large Telescope (VLT) på $4\text{ m} \times 8,2\text{ m}$, som blev besluttet den 8. december 1987. Han var også medlem af bestyrelsen for Tycho Brahe Planetarium.

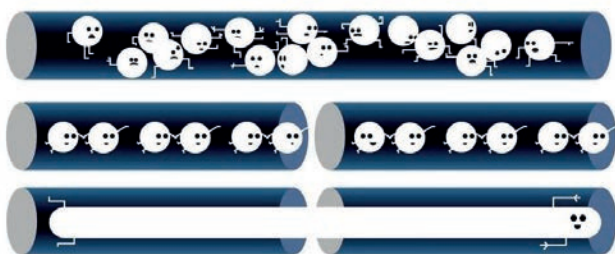
Vi husker Henning som et venligt og altid imødekommende menneske.

[1] E. Høg (2025) "Henning E. Jørgensen and Copenhagen University Observatory. With figures and reports, in Danish and English". zenodo.org/records/17390650.

Nobelprisen i fysik 2025

Fortsat fra bagsiden:

I en Josephson-junction kan Cooper-par tunnelere gennem det isolerende lag imellem superlederne – og kredsløbet kan opføre sig som et kunstigt atom med diskrete energiniveauer.



Figur 3. Cooper-par i en Josephson-junction. Øverst: I en normal leder oplever elektronerne modstand fra hinanden og fra materialet. Midten: I en superleder er elektronerne sammensat i Cooper-par og de danner en strøm uden modstand. Nederst: Cooper-par kan opføre sig som om de var en enkelt partikel der fylder hele det elektriske kredsløb med en enkelt bølgefunktion. Det er derfor muligt for Cooper-parrene at tunnelere gennem det isolerende materiale i en Josephson-junction.

For at studere kvantefænomenerne sendte forskerne en svag strøm ind i Josephson-junctionen og målte spændingen over kredsløbet. Spændingen over Josephson-junctionen var i starten 0 som forventet. Men efter et stykke tid sprang systemet spontant ud af denne tilstand – som om det "tunnelerede" ud gennem en usynlig barriere.

De studerede derefter, hvor lang tid det tog for systemet at tunnelere ud af denne "0 Volt"-tilstand og at skabe en spænding, hvilket der i kvantemekanikken er en sandsynlighed for, at systemet gør. Eksperimenterne

viste, at kredsløbet kunne befinde sig i to tilstande og springe mellem dem ved hjælp af kvantetunnelering – og at systemets energi er kvantiseret, så kun bestemte energi niveauer tillades – ligesom i et atom.

Tunneleringen demonstrerede, hvordan det eksperimentelle setups Cooper-par opfører sig som en stor partikel. Forskerne sendte desuden mikrobølger med forskellig frekvens ind i Josephson-junctionen. Nogle bestemte bølger blev absorberet og systemet bevægede sig til et højere energiniveau. Det viste, at systemets energi kun kunne ændres i kvantiserede trin – præcis som i et atom. Eksperimenterne viste altså to centrale ting:

1. Et makroskopisk kredsløb kan eksistere i to kvantetilstande, som systemet kan springe imellem ved kvantetunnelering.

2. Systemets energi er kvantiseret – kun bestemte energiniveauer er tilladte.

Det var første gang, man med egne øjne kunne observere makroskopisk kvantetunnelering – et kvantespring i bogstavelig forstand.

Det, der begyndte som ren nysgerrighed – "kan kvanteeffekter eksistere i store systemer?" – har i dag lagt fundamentet til kvantecomputere. De samme superledende kredsløb, som Clarke, Devoret og Martinis brugte i deres eksperimenter, danner i dag grundlaget for qubits.

I en superledende qubit består de to energiniveauer af forskellige tilstande for Cooper-parrene i Josephson-junctionen. De kan repræsentere de to tilstande 0 og 1 og de kan være i superposition af begge tilstande på én gang.

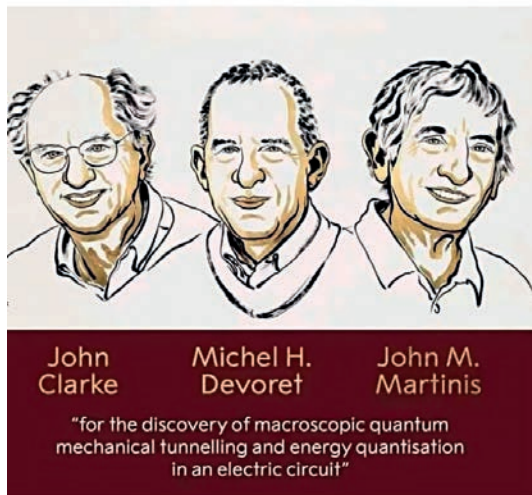
Det er netop denne egenskab, der giver kvantecomputere deres enorme beregningspotentiale.

Kilder: nobelprize.org.

Nobelprisen i fysik 2025: Makroskopisk kvantemekanik

Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Nobelprisen i fysik gik i år til John Clarke (University of California, Berkeley i USA), Michel H. Devoret (Yale University i USA) og John M. Martinis (University of California, Santa Barbara i USA), for deres "opdagelse af makroskopisk kvantemekanisk tunnelering og energikvantisering i et elektrisk kredsløb".

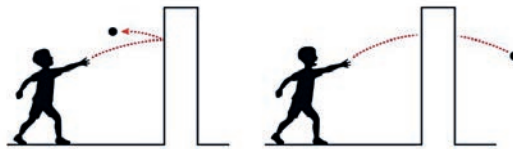


Figur 1. Nobelprismodtagerne i fysik 2025.

Forestil dig at du kaster en bold mod en mur – den rammer og ryger tilbage til dig. Bolden opfører sig som vi forventer i klassisk fysik. Men i kvantemekanikkens univers er der en lille, men reel sandsynlighed for, at bolden kan gå lige igennem muren, selvom den klassisk ikke har nok energi til at komme over muren. Det skyldes, at partikler i kvanteverdenen ikke blot er små kugler, men bølger, og bølger kan strække sig ind på den anden side af en barriere. Dette kaldes kvantetunnelering.

Kvantemekanikken beskriver som regel det usynlige: elektroner, atomer og enkelte små partikler. Nobelprisen handler netop om, at forskere har demonstreret de kvantemekaniske effekter tunnelering og energikvantisering i et elektrisk kredsløb, hvilket er et system der er stort nok til at betragtes som makroskopisk. De har altså vist at et

makroskopisk system kan opføre sig kvantemekanisk og har flyttet kvantefysikken ud i den håndgribelige verden.



Figur 2. Klassisk vil en bold, der rammer en mur, blive kastet tilbage, men i den atomare verden er der en lille sandsynlighed for, at bolden kan gå igennem muren.

Studierne, som førte til Nobelprisen, blev udført i 1980'erne da de tre fysikere udførte flere eksperimenter sammen på University of California i Berkeley. Her byggede de et superledende kredsløb med en Josephson-junction, som er en forbindelse af to superledende materialer. Superledere kan lede strøm uden nogen elektrisk modstand, og de to superledere i Josephson-junctionen er adskilt af et tyndt lag af isolerende materiale, der ikke kan lede nogen strøm.

En Josephson-junction kræver ekstreme forhold da systemet skal køles ned til tæt på det absolutte nulpunkt (-273°C). I eksperimentet viste de, at de kunne kontrollere og undersøge et fænomen i hvilket alle de ladede partikler i superlederen opførte sig kollektivt, som om de var en enkelt partikel. Fysikerne kunne også vise at systemet er kvantiseret, hvilket betyder, at kun bestemte energiniveauer er tilladte. Eksperimenterne viste også, hvordan kvantetunnelering kan blive observeret på makroskopisk skala med flere partikler.

Et Cooper-par er et par elektroner, der er bundet sammen ved lav temperatur, og som bevæger sig sammen, som om de var en partikel med en bølgefunktion. De kan bevæge sig gennem et superledende materiale uden at støde på noget, og netop det er grunden til, at superledere kan lede strøm uden elektrisk modstand.

Fortsættes side 31.