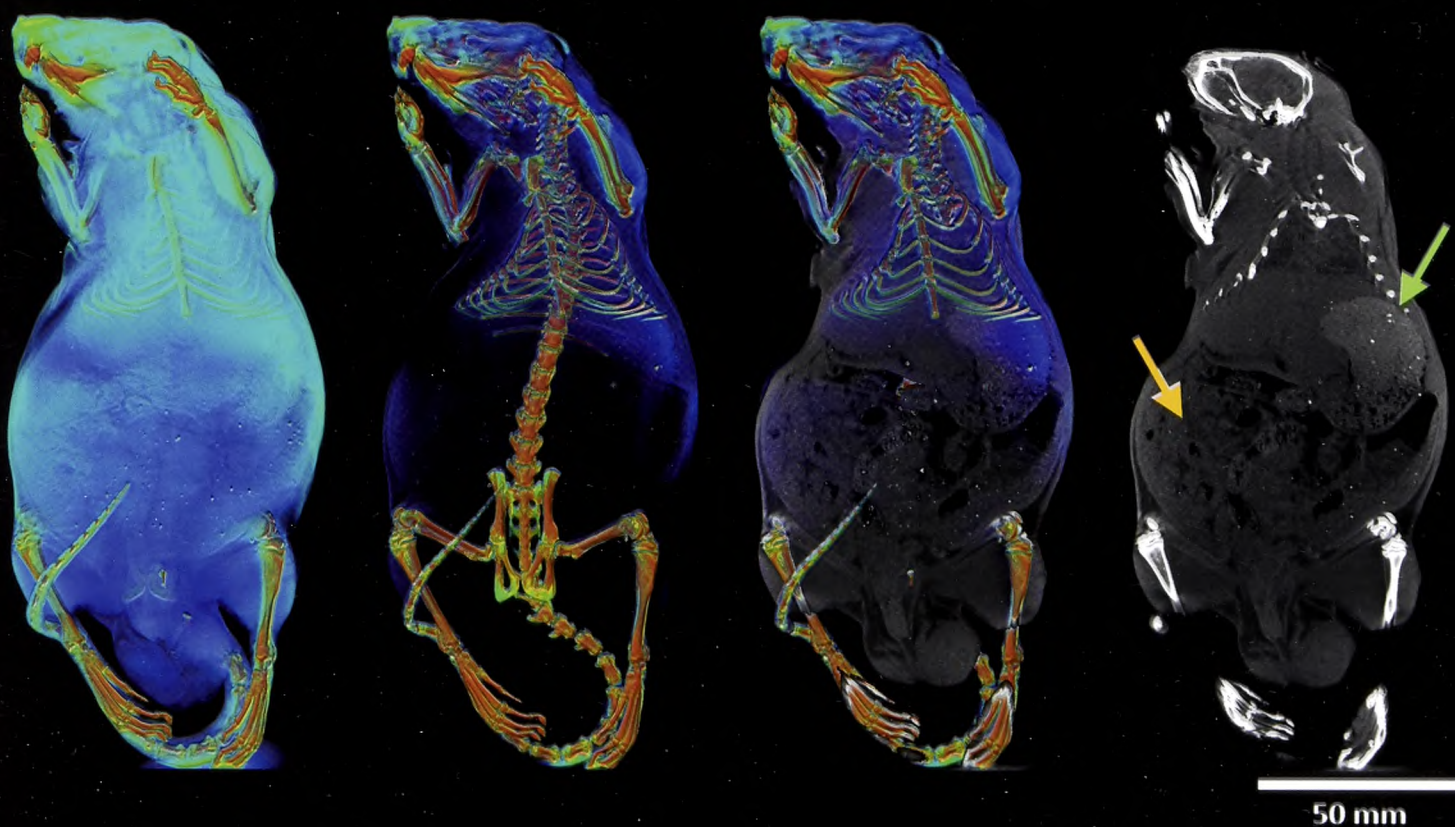


# KVANT December 4 2021

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 32. årgang



## MINI-TEMANUMMER OM BIOFYSIK

- MOLEKYLERNES VEJ IGENNEM HUMAN HUD
- MIKROCONTAINERE – FREMTIDENS VACCINER
- DET GRØNNE FLUORESCERENDE PROTEINS FOTOAKTIVE MOLEKYLE
- KVANTEMEKANISK SAMMENFILTRING – BELLS ULIGHEDER
- KLIMAET: ER DET SOLENS SKYLD? • PRÆCIS POSITIONERING
- FREMRAGENDE FORMIDLERE • PLANETKALENDER • FOREDRAG
- KOMETERNES OG NATURVIDENSKABENS JUL • NYHEDER • AKTUELLE BØGER

Løssalgspris: 50 kr.



# KVANT

## Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk)

E-mail : [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk)

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

ISSN (trykt) : 0905-8893

ISSN (web) : 2245-4942

### Udgives af

Astronomisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

### Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),  
DTU Space

Michael Cramer Andersen,

Christianshavns Gymnasium

Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-  
redaktør), DTU Health Technology

Steen Lærke ([astro@kvant.dk](mailto:astro@kvant.dk)),

Astronomisk Selskab

John Rosendal Nielsen,

Aurehøj Gymnasium

Dorte Olesen (SNU),

DTU Compute

Finn Berg Rasmussen,

Niels Bohr Institutet, KU

Svend Erik Rugh

**Abonnementspris** : 180 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er med-  
lemsblad for de udgivende selskaber.

Abonnement tegnes på [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk).

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

### Annoncpriser

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

1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reprojekteret  
materiale i farver. Henvendelser om annon-  
cer til redaktøren på: [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk)

### Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



### Produktionsplan

Nr. 1-2022 udkommer ca. 15. marts

Nr. 2-2022 udkommer ca. 15. juni

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

## Indhold:

Det grønne fluorescerende proteins fotoaktive molekyle: Hvad tænder det?

*Jeppe Langeland, Christina Kjær, Lars H. Andersen og Steen Brøndsted Nielsen* . . . . . 3

Mikrocontainere: fremtidens vacciner kan være på størrelse med sandkorn

*Philip Hassing Ronøe Carlsen, Rolf Bech Kjeldsen og Juliane Fjelrad Christfort* . . . . . 7

Nyt fra Astronomisk Selskab . . . . . 11

“Förster resonance energy transfer”-målinger af den molekulære rute igennem human hud

*Irina Iachina og Jonathan Brewer* . . . . . 12

Er det Solens skyld?

*Erik Høg* . . . . . 15

Du er her! – Præcis positionering

*Jens Olaf Pepke Pedersen* . . . . . 19

Kvantemekanisk sammenfiltrering – Bells uligheder

*Jan Myrheim* . . . . . 22

Kvant-nyheder

*Christine Pepke Gunnarsson* . . . . . 27

Planetkalender 2022

*Martin Götz* . . . . . 29

Brandslange – breddeopgave 94 med didaktisk kommentar

*Jens Højgaard Jensen* . . . . . 30

Fremragende formidlere . . . . . 32

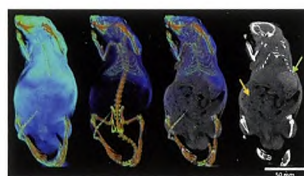
Kommende foredrag . . . . . 33

Aktuelle bøger

*Jens Olaf Pepke Pedersen* . . . . . 34

Kometernes og naturvidenskabens jul

*Jens Olaf Pepke Pedersen* . . . . . Bagsiden



**Billedet på forsiden** viser et CT-skanningsbillede af en rotte aflivet 5 timer efter oral dosering af mikrocontainere fyldt med bariumsulfat. Pilene viser henholdsvis maven (grøn) og tyndtarmen (gul). Læs mere i artiklen side 7 om mikrocontainere af Philip Hassing Ronøe Carlsen, Rolf Bech Kjeldsen og Juliane Fjelrad Christfort.

Kvant har denne gang et minitema om biofysik, og foruden artiklen om minicontainere kan du også læse om det grønne fluorescerende proteins fotoaktive molekyle i artiklen på næste side, samt om målinger af molekylernes vej gennem menneskets hud i artiklen side 12.

Derudover afslutter vi sommerens tema om kvantemekanik med anden del af Jan Myrheims artikel om Kvantemekanisk sammenfiltrering.

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 Fotonik, DTU Fysik samt Institut for Naturvidenskab og Miljø (RUC).

Kvant omdeles fra 2021 med PostNord. Såfremt bladet udebliver opfordres du til at kontakte PostNords kundeservice på telefon 70707030 samt orientere Kvant på e-mail [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk).

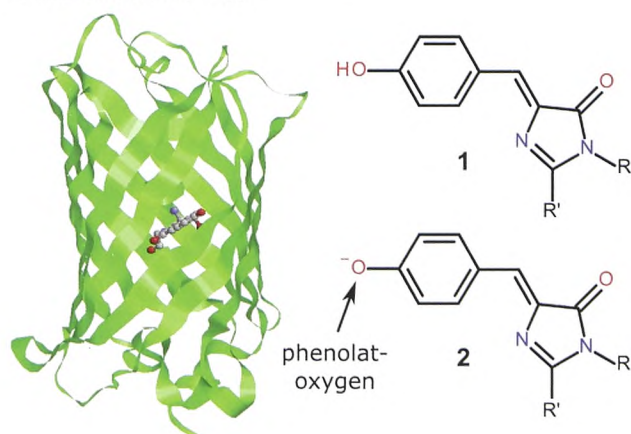


# Det grønne fluorescerende proteins fotoaktive molekyle: Hvad tænder det?

Jeppe Langeland, Christina Kjær, Lars H. Andersen og Steen Brøndsted Nielsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Naturen er farverig, hvilket ofte skyldes proteiner, der indeholder lysabsorberende eller fluorescerende molekyler. Eksempler er fotosynteseproteiner i planter og alger, opsiner i øjet, luciferase i ildfluer og andre insekter, hæmoglobin i røde blodlegemer, og det grønne fluorescerende protein (GFP) i gopler. I denne artikel vil vi se, hvad vi kan lære, når vi tager proteinets fotoaktive molekyle (kromoforen) ud og studerer det alene i vakuum og i samspil med kontrollerede omgivelser.

Det grønne fluorescerende protein findes i gopler kaldet *aequorea victoria*. Proteinets absorberer blåt lys og udsender grønt lys med en kvanteeffektivitet på 80%, dvs. kun 20% af de absorberede fotoner ender op som varme. Det fotoaktive molekyle (1) sidder i proteinets midte, og er delvist skjæret fra kontakt med vandmolekyler som følge af proteinets tøndelignende struktur (figur 1). Dvs. inden i proteinlommen er der kun få vandmolekyler. Efter lysabsorption overfører molekylet i sin anslåede tilstand en proton til en tætsiddende aminosyre. Den dannede negative kromofor-ion (anionen 2) er også elektronisk anslået og falder tilbage til grundtilstanden ved udsendelse af en grøn foton, – det vi kalder fluorescens.



**Figur 1.** Det grønne fluorescerende protein (GFP) (1GFL fra Protein Data Bank). Kromoforen, der ses i midten, er en modificeret form af tripeptidet Ser65-Tyr66-Gly67 (Ser = serin, Tyr = tyrosin, Gly = glycin). Den er hovedsageligt tilstede i sin neutrale form (1), men afgiver en proton efter lysabsorption og danner anionen (2). De to R-grupper er peptidkæder, som er erstattet af  $\text{CH}_3$  i vores modelsystem.

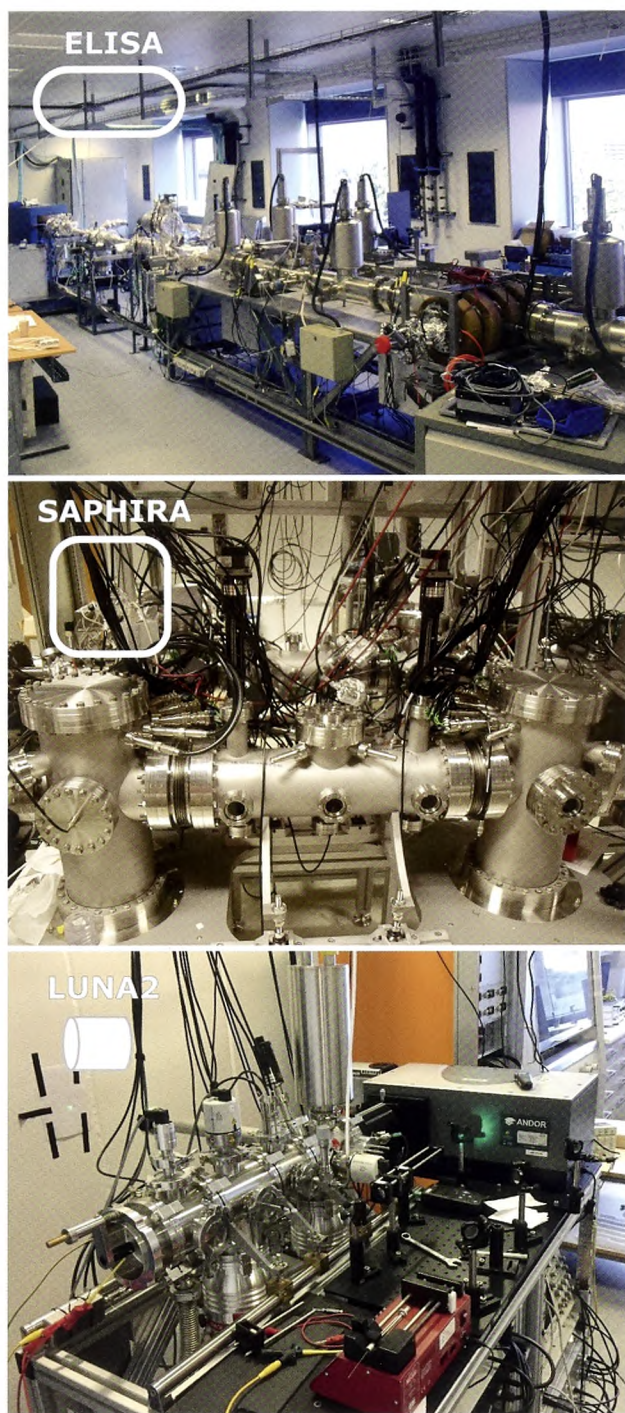
*Proteinets er afgørende for anionens fluorescens:* Tager man anionen ud af GFP, og har den enten i vandig opløsning eller isoleret i gasfase, lyser den ikke! Molekylets fotofysik er naturligvis bestemt af dets egne egenskaber, men også det omgivende mikromiljø, dvs. vekselvirkninger med proteinets aminosyrer og evt. et vandmolekyle. Et oplagt spørgsmål er: Hvilke vekselvirkninger tænder for fluorescensen? Det er her, at vi som fysikere kommer ind i billedet med vores nedefra-og-op tilgang: *beskriv den isolerede ion og påfør gradvist et mikromiljø.*

## Gasfasespektroskopi

Det er nu mere end tyve år siden, at vi begyndte at studere den isolerede ion (2) i gasfase vha. massespektroskopiske teknikker. Vores første eksperiment involverede måling af ionens absorptionsspektrum for at sammenligne med proteinet, som absorberer maksimalt ved 475 nm, når kromoforen er på sin negative form. Dette eksperiment er ikke så simpelt, som det måske lyder. Først skal ionerne på gasform uden at gå i stykker. Løsningen er “electrospray ionisering” (ESI), en såkaldt “blød” ioniseringsteknik udviklet i 80’erne af John Fenn, og som er detaljeret beskrevet i litteraturen. Kort fortalt dannes ioner ved atmosfæretryk og føres herefter ind i massespektrometeret. Tætheden af ioner er imidlertid meget lavere end i opløsning, og der er for få ioner til at kunne detektere en reduktion i transmitteret lysintensitet, hvis ionerne bestråles med lys. Absorptionsspektret kan derfor kun måles indirekte. Vores metode baserer sig på fotodestruktion af ioner: En ion, der har absorberet lys ved en bestemt bølgelængde, går i stykker i to fragmenter, et ladet og et neutralt. Sker der ingen absorption, sker der ingen spaltning. Enten detekteres fragment-ionen eller også det neutrale fragment. Udbyttet af fragment-ioner eller neutrale fragmenter som funktion af excitationbølglængden repræsenterer således (til god approksimation) absorptionsspektret. Vi benyttede i 2000 lagerringen ELISA (ELectrostatic Ion Storage ring in Aarhus, figur 2) til at måle neutrale fragmenter dannet fra 2 efter lysbeskyddning [1].

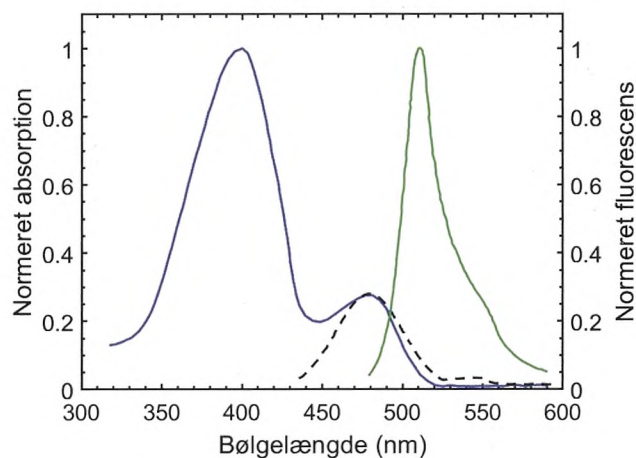
Det målte “absorptionsspektrum” af de nøgne 2 ioner er vist i figur 3 sammen med proteinets. Det var en stor overraskelse at se, at spektrene er nærmest identiske! Ionens absorption i vandig opløsning er derimod skiftet mod det blå, med maximum ved 426 nm. Lommen, som 2 sidder i inde i proteinet, er derfor mere lig vakuum end vand. Det stemmer også med, at vands dielektricitetskonstant (80) er meget højere end den, der typisk benyttes for proteiner (4) [3] (højere værdier benyttes nogle gange). Der er dog lokale elektriske felter i proteinet, men vores resultat viser, at hvis de skifter overgangsenergien, gør de det sådan, at den totale effekt er minimal.





**Figur 2.** Instrumenter i Aarhus, som vi har benyttet til at undersøge de fotofysiske egenskaber af nøgne 2-ioner. Øverst og i midten: Lagerringene ELISA ("racerbane") og SAPHIRA (firkantet). I disse accelereres ioner til høj kinetisk energi, hvorefter de ønskede ioner masseselekteres med en elektromagnet. I ringen holdes ionerne i deres bane vha. elektriske felter til de går i stykker eller taber en elektron som følge af enten restgaskollisioner eller laserbeskyndning med lys fra pulserende lasere. Nogle af de neutrale produkter detekteres og giver vores signal. Ved ELISA laves typisk "absorptionsspektroskopi" mens SAPHIRA benyttes til at måle anslåede tilstandes levetider. Nederst: LUNA2. Her akkumuleres ioner i en Paul-fælde, idet ionerne køles i deres translationsbevægelse i kollisioner med helium-buffergas. Efter masseselektion beskydes ionerne med laserlys, igen fra en pulseret laser. Paul-fælden er lavet som en cylinder med et metalnet i den ene ende, hvorved så mange fotoner som muligt slipper ud af fælden og opsamles. Fotonerne adskilles efter bølglængde i spektrometeret og detekteres med et CCD-kamera. Paul-fælden er kølet til ca. 100 K.

Resultatet vakte stor opsigt, og andre grupper kastede sig også over ionen. Blandt andet en række teoretikere, som ønskede at beregne overgangsenegien. Gasfasespektroskopi giver overgangsenegien af den nøgne ion, som er simplere at udregne, end når vekselvirkninger fra fx vandmolekyler skal medtages. Vores spektrum kunne så at sige bruges til at teste beregningsmetoder, særligt relevant for molekyler af denne betydelige størrelse med rigtig mange elektroner!



**Figur 3.** Absorptionsspektre af isoleret 2 (sort stiplede kurve) og GFP (blå kurve). De to bånd for proteinet tilskrives 1 og 2, maxima ved hhv. 395 nm og 475 nm. Proteinets fluorescensspektrum (grøn kurve) er også vist. Data er fra [2] (protein) og [1] (nøgne ion).

Men vores eksperiment er dog ikke perfekt. Et problem er, at absorption af to fotoner er nødvendig for at forårsage den negative ions dissociation inden for den tidsskala, vi observerer spaltning på (op til omkring 100 ms). Absorptionstværsnittet kan være forskellig for absorption af anden foton i forhold til den første foton, og kan derved give et misvisende billede af ionens absorption. En løsning på problemet kom for nyligt af Webers gruppe på University of Colorado i Boulder. Hans gruppe kølede ionerne ned til omkring 50 K i en cryokølet ionfælde. Ved denne temperatur er det muligt at binde kvælstofmolekyler ( $N_2$ ) til ionerne, og et  $N_2$ -molekyle tabes let efter absorption af en enkelt foton. Gruppen målte ganske simpelt absorptionsspektret som udbyttet af 2 dannet fra  $2 \cdot N_2$  som funktion af bølglængden [4]. Bortset fra et lille skift af spektret mod det blå grundet den lavere temperatur er spektret i fin overensstemmelse med vores.

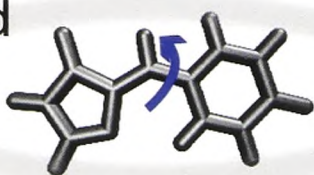
Nu det er fastlagt, at 2's absorption ikke er meget forskelligt fra proteinets, er det næste oplagte spørgsmål, *hvad med fluorescens?* Det viser sig som sagt, at hvis ionen er i vandig opløsning, lyser den ikke. Der skal køles til meget lave temperaturer for at se fluorescens. Men er det vekselvirkninger med vandmolekyler, der måske slukker for lysudsendelsen? Nej, for ionen lyser heller ikke, når den er isoleret i gasfase [5]! Forklaringen er, at de to ringe drejer ift. hinanden i den anslåede tilstand, hvilket fører til et punkt på den potentielle energioverflade, hvor energien er lig den i grundtilstanden, et såkaldt konisk krydsningspunkt. Bevægelsen der fører til stabilisering på den anslåede



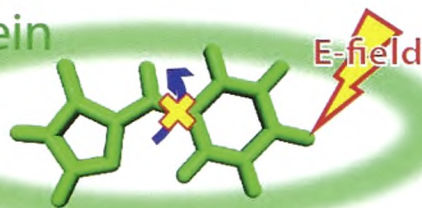
overflade, er ultrahurtig, og ionen kommer derfor tilbage i grundtilstanden på under et picosekund ( $10^{-12}$  s) [6]. Den tid er for kort til, at ionen kan nå at udsende lys. Typiske tider for fluorescens er nanosekunder, dvs. tre størrelsesordener længere end levetiden. Da ionen lyser, når den sidder inden i proteinet, må proteinmiljøet forhindre denne rotationsbevægelse, men hvorledes? Er det fordi, der simpelthen ikke er plads inden i lommen til at lave denne bevægelse? Eller er det en enkelt lokal vekselvirkning med en aminosyre, der skal til for at tænde for fluorescensen?

En amerikansk gruppe foreslog det sidste baseret på kvantekemiberegninger, og de identificerede en protoniseret arginin i nærheden af **2**'s phenolatgruppe [7]. Den positive ladning forhindrer ifølge deres model elektrontæthed i at bevæge sig fra det negative phenolatoxygen og ind i broen mellem de to ringe efter fotoexcitation (figur 4). Resultatet er, at barrieren for rotation af de to ringe ift. hinanden øges betydeligt! Vi besluttede os for nogle år siden at undersøge dette nærmere eksperimentelt for den isolerede ion.

## Isolated



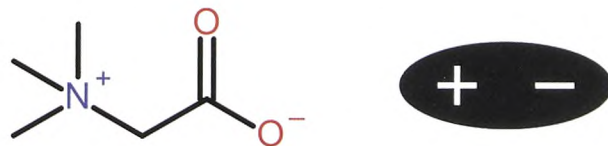
## In protein



**Figur 4.** Når **2** er isoleret i gasfase, er der intet til hinder for en rotation af de to ringe i forhold til hinanden, hvilket hurtigt bringer molekylet tilbage til grundtilstanden uden lysudsendelse. I proteinet forhindres rotationen muligvis af et højt elektrisk felt, idet feltet holder på den negative ladning ved phenolat-oxygenet (jf figur 1). Figuren er reproduceret fra [7] med tilladelse fra American Chemical Society ©2016.

Ifølge teorigruppen er det elektriske felt ved phenolat-oxygen 100 MV/cm grundet den positive ladning. Vi kan ikke bare se på komplekset mellem **2** og protoniseret arginin, da den samlede ladning er nul. Massespektrometri kræver en ladning, så vi kan styre vores ioner i magnetiske og elektriske felter. I stedet tænkte vi, at man måske kan realisere et stort elektrisk felt ved at hæfte et meget polært molekyle på ionen. Valget faldt på betain (*N,N,N*-trimethylglycin, figur 5), der har et dipolmoment på hele 12 Debye (til sammenligning er vandmolekylets 1,85 Debye; betainmolekylet er mere end seks gange så polært som et vandmolekyle). Baseret på beregnet afstand mellem betain og phenolatoxygen giver det anledning til et felt på omkring 70 MV/cm, ikke helt det i proteinet, men trods alt signifikant. Komplekset **2**•betain er let at lave med ESI, og det kræver kun en enkelt synlig foton at slå

komplekset i stykker, idet bindingsenergien er omkring 1 eV. Først målte vi kompleksets absorptionsspektrum, som vi fandt var blåskiftet en smule fra den nøgne ions [8]. Dette resultat viser, at der sker noget ladningsoverførsel fra den negative ende af ionen imod den anden ende, om end begrænset. Ja umiddelbart er det måske overraskende, at spektret ikke ændres mere, når man tænker på den store perturbation af elektronstrukturen, som det polære molekyle forårsager. Men resultatet passer fint med, at proteinmiljøet ikke påvirker absorptionen meget. Som det næste vil vi undersøge, om komplekset fluorescerer efter fotoexcitation.



**Figur 5.** Betain-molekylet har både en positiv og negativ ende, hvilket giver det et stort dipolmoment, der er mere end seks gange højere end vandmolekylets. Det er derfor et ideelt molekyle til at simulere de høje elektriske felter, der måtte være i et protein.

Til måling af lysudsendelse fra isolerede ioner i gasfase lagrer vi ioner i en såkaldt Paul-fælde (en RF-fælde). I denne 'fluorescens-celle' køles ioner i deres bevægelse ned ved kollisioner med helium-atomer, så de til sidst befinder sig i fældens centrum, hvor de bestråles med laserlys. Så mange som muligt af de udsendte fotoner opsamles derefter og detekteres. Imidlertid vil der også i de uelastiske kollisioner mellem ionerne og helium-atomerne ske omdannelse af kinetisk energi til indre energi i ionerne, hvilket kan føre til spaltning. Det er særligt et problem for komplekser med lav dissociationsenergi som **2**•betain, og desværre havde vi ikke tilstrækkeligt med komplekser, der overlevede de hårde betingelser i fælden. Vi kan derfor endnu ikke sige noget om vigtigheden af et elektrisk felt for lysudsendelse.

*Men hvad sker der så ved lav temperatur i gasfasen?*

Det har vi undersøgt med et andet lagerringsinstrument (SAPHIRA, figur 2), hvor ionernes levetid i den anslåede tilstand kan måles vha. femtosekund pumpe-probe spektroskopi (eksperimentet svarer til transient absorptionsspektroskopi). Ved stuetemperatur er ionernes levetid rigtignok kort ( $< 1$  ps); men ved en temperatur på omkring 100 K er der en brøkdel af ioner, der lever tre størrelsesordener længere, dvs. nanosekunder [6]. Kunne det tænkes, at disse ioner fluorescerer?

Det fører til vores næste opgave, at undersøge, om køling af **2** til 100 K tænder for fluorescensen. Vi har inden for de sidste to år konstrueret et nyt instrument (LUNA2, figur 2) til måling af fluorescens fra kolde ioner [9]. Ionerne lagres og fotoexciteres igen i en Paul-fælde, men nu er fælden kølet til omkring 100 K, idet fælden er i fysisk kontakt med en kobberbeholder fyldt med flydende kvælstof, en kold finger så at sige. Indtil videre har vi ikke kunnet detektere fluorescens fra **2**, hvilket måske skyldes, at støjniveauet i vores CCD-kamera er for højt. Instrumentet er under stadig udvikling, og vi håber at kunne flytte detektionsgrænsen



for udsendte fotoner et par størrelsesordener ved brug af en fotomultiplier istedet. Det er også værd at bemærke, at en lavere temperatur giver den fordel, at det måske er lettere at få 2•betain-komplekserne til at overleve i fælden, inden de bliver beskydt af fotoner.

### Afsluttende bemærkninger

Hvad der helt præcist får 2 til at lyse, når det sidder i proteinets lomme, har vi endnu ikke svaret på, men vi håber, at vores eksperimenter inden for den nærmeste fremtid kan løfte sløret.

Det er afslutningsvist også værd at bemærke, at GFP-proteinet ikke kun er interessant, fordi det får gopler til at lyse, men også fordi man kan bruge det i cellebiologi til at følge biologiske processer som cervækst. Proteinmodifikationer er udviklet for at flytte emissionen mod rødt lys, der har en bedre gennemtrængelighed i væv. Det er forholdsvis let at modificere det fotoaktive molekyles kemiske struktur såvel som de omkringliggende aminosyrer vha. molekylærbiologiske teknikker. Men problemet er, at alle udviklede proteinvarianter, der lyser rødt (røde fluorescerende proteiner, RFP), har lavt fluorescenskvanthebbytte. For at komme videre er det nødvendigt med fundamental viden om kromoforens fotofysik og at belyse hvilke vekselvirkninger, der tænder eller slukker for fluorescensen. At tænde for den isolerede GFP kromofor-anions emission og at øge fluorescenskvanthebbyttet for RFP kan vise sig at være to sider af samme sag!

### Litteratur

- [1] S.B. Nielsen, A. Lapierre, J.U. Andersen, U.V. Pedersen, S. Tomita og L.H. Andersen (2001) Absorption spectrum of the green fluorescent protein chromophore anion in vacuo, *Phys. Rev. Lett.*, bind **87**, side 228102.
- [2] H. Morise, O. Shimomura, F.H. Johnson og J. Winant (1974) Intermolecular energy transfer in the bioluminescent system of Aequorea, *Biochemistry*, bind **13**, side 2656–2662.
- [3] M.K. Gilson og B. Honig (2004) Calculation of the total electrostatic energy of a macromolecular system: solvation energies, binding energies, and conformational analysis, *Proteins: Struct., Funct., Bioinf.*, bind **4**, side 7–18.
- [4] W. Zagorec-Marks, M.M. Foreman, J.R.R. Verlet og J.M. Weber (2019) Cryogenic ion spectroscopy of the Green Fluorescent Protein Chromophore in Vacuo, *J. Phys. Chem. Lett.*, bind **10**, side 7817–7822.
- [5] M.W. Forbes og R.A. Jockusch (2009) Deactivation pathways of an isolated Green Fluorescent Protein model chromophore studied by electronic action spectroscopy, *J. Am. Chem. Soc.*, bind **131**, side 17038–17039.
- [6] A. Svendsen, H.V. Kiefer, H.B. Pedersen, A.V. Bochenkova og L.H. Andersen (2017) Origin of the intrinsic fluorescence of the green fluorescent protein, *J. Am. Chem. Soc.*, bind **139**, side 8766–8771.
- [7] J.W. Park og Y.M. Rhee (2016) Electric field keeps chromophore planar and produces high yield fluorescence in Green Fluorescent Protein, *J. Am. Chem. Soc.*, bind **138**, side 13619–13629.
- [8] J. Langeland, C. Kjær, L.H. Andersen og S. Brøndsted Nielsen (2018) The effect of an electric field on the spectroscopic properties of the isolated green fluorescent protein chromophore anion, *ChemPhysChem*, bind **19**, side 1686–1690.
- [9] C. Kjær, J. Langeland, T.T. Lindkvist, E.R. Sørensen, M.H. Stockett, H.G. Kjærgaard og S. Brøndsted Nielsen (2021) A new setup for low-temperature gas-phase ion fluorescence spectroscopy, *Rev. Sci. Instrum.*, bind **92**, side 033105.



Jeppe Langeland er tidligere ph.d.-studerende fra Lars H. Andersens gruppe og har siden 2021 været post.doc. ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.



Christina Kjær er tidligere ph.d.-studerende fra Steen Brøndsted Nielsens gruppe og har siden 2019 været post.doc. ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet.



Lars H. Andersen er professor og har forsket i molekylers egenskaber og reaktion i gasfasen ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, siden 1992.



Steen Brøndsted Nielsen er professor og har lavet spektroskopi på ioner ved Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet, siden 2000.



# Mikrocontainere: fremtidens vacciner kan være på størrelse med sandkorn

*Philip Hassing Ronøe Carlsen, Rolf Bech Kjeldsen og Juliane Fjelrad Christfort, IDUN Centre of Excellence, DTU Sundhedsteknologi*

De meget tids- og ressourcekrævende planer om massevaccination af verdens befolkning mod COVID-19 har vist et stort behov for en teknologi designet til at kunne give vacciner oralt. Dette ville principielt set kunne optimere logistiske aspekter samt give en hurtigere massevaccination, og det ville desuden blandt mange anses som værende meget mere bekvemt end vaccinstik. En lovende teknologi til oral levering af vacciner er såkaldte mikrocontainere, se figur 1. Disse kan fyldes med en given vaccine-formulering (eller andre lægemidler), hvorefter de kan levere indholdet intakt til tyndtarmen. Herudover er det i rotter blevet vist, at de kan forøge retentionstiden af hvor længe vaccinen forbliver i tyndtarmen, hvilket er en ret kritisk faktor ved oral levering af vacciner.



**Figur 1.** Tomme (venstre) og fyldte (højre) mikrocontainere henholdsvis uden for eller inde i gelatinekapsler til oral dosering. Foto: Jesper Scheel, DTU Sundhedsteknologi.

I medicinalindustrien er der meget fokus på begrebet “patient compliance”. Kort sagt betyder dette begreb i hvilken grad patienten overholder den anbefalede behandling. Den doseringsform, som har den højeste “patient compliance”, er orale lægemidler, hvilket vil sige, at mennesker generelt finder det lettest blot at sluge/synke et lægemiddel frem for eksempelvis at inhalere det eller at få en injektion. Udover at det er nemmere for patienten at sluge/synke medicin, så er der også store logistiske fordele ved den orale doseringsform [1].

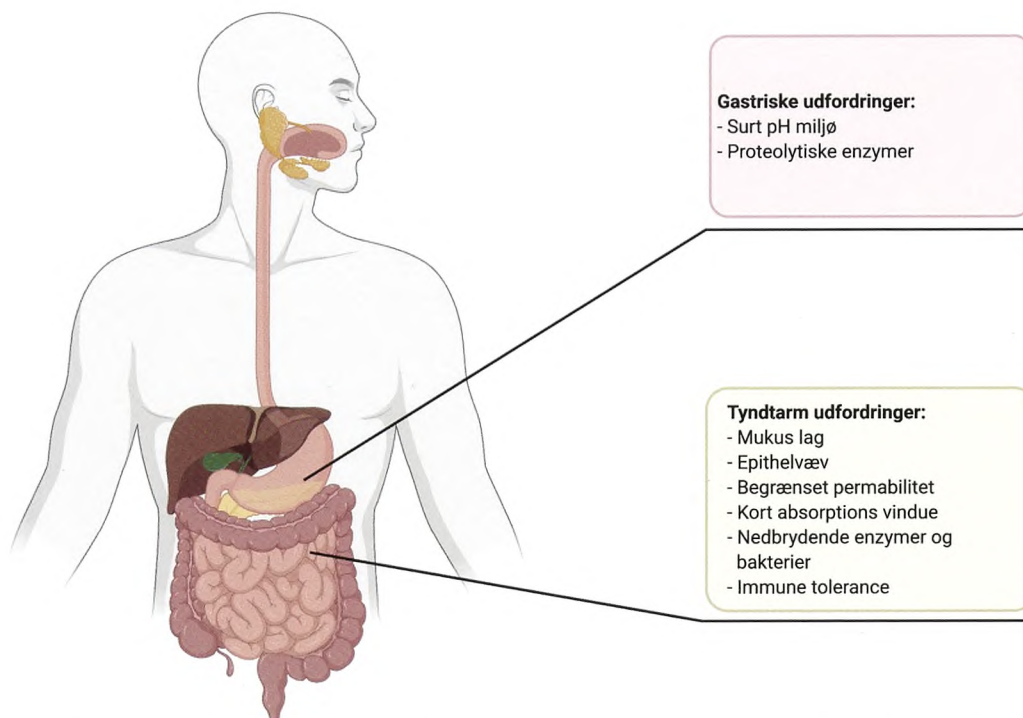
Coronapandemien viste især, hvor besværligt og tidskrævende det er både at transportere, lagre samt dosere de nyproducerede vacciner til store befolkninger. Alle de producerede vacciner skulle først og fremmest lagres meget koldt, i nogle tilfælde endda helt ned til  $-20^{\circ}\text{C}$ . Dette er ekstremt energikrævende under selve oplagringen i et varehus, men også under den videre transport til hospitaler og lignende institutioner. Til selve doseringen er der desuden brug for medicinsk personale samt kanyler, sprøjter og andet udstyr til injektion af vaccinerne, hvilket resulterer i en relativ høj udgift. Endvidere skulle folk stå i særdeles lange køer,

som indlysende nok er ret tidskrævende, for at blive stukket i armen, hvilket mange ikke finder særlig behageligt. Disse nævnte problemstillinger kan teoretisk set løses ved at muliggøre oral dosering af vacciner [2].

En sådan proces indebærer dog i sig selv rigtig mange andre problemstillinger. For at kunne gøre en vaccine mere stabil og temperaturbestandig skal den først og fremmest være kompatibel med såkaldte tørringsteknologier. Disse er ikke i fokus for denne artikel, men kort beskrevet er det processer, som fjerner vandet fra vaccine-formuleringerne og erstatter vandmolekylerne med et stabiliserende stof. Alt dette medfører, at formuleringerne bliver til et pulver, der er mindre temperaturfølsomt end den originale opløsning, og desuden har en længere lagringstid. Ulempen med tørringsprocesser er, at ikke alle former for vacciner eller lægemidler er kompatible med dem, hvilket i værste fald kan resultere, i at deres virkning ophører. Derfor er det vigtigt at tjekke og optimere processerne når de tages i brug [3].

Fokus i denne artikel er såkaldte “delivery systems” til oral levering af medicin og vacciner. Når mennesker indtager noget oralt, altså sluger/synker noget, passerer det igennem menneskets fordøjelsessystem. Fordøjelsessystemet er helt specifikt designet til at nedbryde præcis de nøglekomponenter, som en vaccine består af. Det betyder altså, at hvis man doserer en vaccine oralt, som den kommer i en kanyle, så vil den ganske enkelt ikke have nogen gavnlig virkning i sidste ende. Figur 2 opsummerer de processer og barrierer i vores fordøjelsessystem, som i tilfælde af oral vaccine-levering skal overkommes for at opnå et effektivt immunrespons. Hvis det antages at et menneske sluger/synker en vaccine, så vil den først møde mavesækken. Maven indeholder mavesyre, som har en pH-værdi omkring 1–3, samt proteolytiske enzymer, der i synergi kan nedbryde store proteinkomplekser (fx stykker af mad) ned til enkelte proteinstrukturer og molekyler. Herefter vil vaccinen fortsætte ind i tyndtarmen, hvor der i vævet findes en akkumulering af immun-reaktive celler. Ved brug af de rigtige værktøjer og teknologier vil disse celler kunne udnyttes til oral vaccinerings.





**Figur 2.** Afbildning af det menneskelige fordøjelsessystem, med opstilling af udfordringer i henholdsvis maven og tyndtarmen, som findes i relation til oral levering af vacciner.

Tyndtarmen er derfor den placering i fordøjelsessystemet hvor vacciner gerne skal bremses og ultimativt optages over epithelvævet. Derudover ønsker vi at undgå de proteinnedbrydende bakterier og enzymer, som også findes i tyndtarmen [2].

For at opsummere, er der altså brug for et “delivery system”, som effektivt kan beskytte vaccinen gennem det hårde miljø i maven for derefter at levere vaccinen i tyndtarmen over så lang tid som muligt for at øge absorptions-tiden.

### Mikrocontainere

En type “delivery system” til oral levering er mikrocontainere [4]. Mikrocontainere er åbne beholdere i mikrostørrelse, som har et indre hulrum, hvor fx generelle lægemidler og vacciner kan fyldes i. Når mikrocontainerne er blevet fyldt med et givent lægemiddel, kan den åbne overside forsegles med et polymerisk låg. Alt efter typen af lægemiddel, og hvor i kroppen man ønsker at det skal frigives, kan der påføres forskellige typer af polymerer som låg. Polymerens fysisk-kemiske egenskaber vil afgøre, hvornår lægemidlet frigives fra mikrocontainerne. Ofte arbejdes der med låg af pH-følsomme polymerer. Sådanne polymerer vil være intakte ved lave pH-værdier, som det blandt andet er tilfældet i maven, men opløses når den omkringværende pH overstiger en vis værdi. Dette gør det muligt for mikrocontainere at beskytte lægemidlet mod den lave pH-værdi i maven, men derimod frigive det, når mikrocontainerne efterfølgende rammer den højere pH-værdi i tyndtarmen. Efter frigivelse af lægemidlet bliver det optaget gennem tarmvæggen og over i blodbanen. I tilfælde af vacciner, hvor den foretrukne lokation for frigivelsen af formuleringen er i tyndtarmen, vil man da

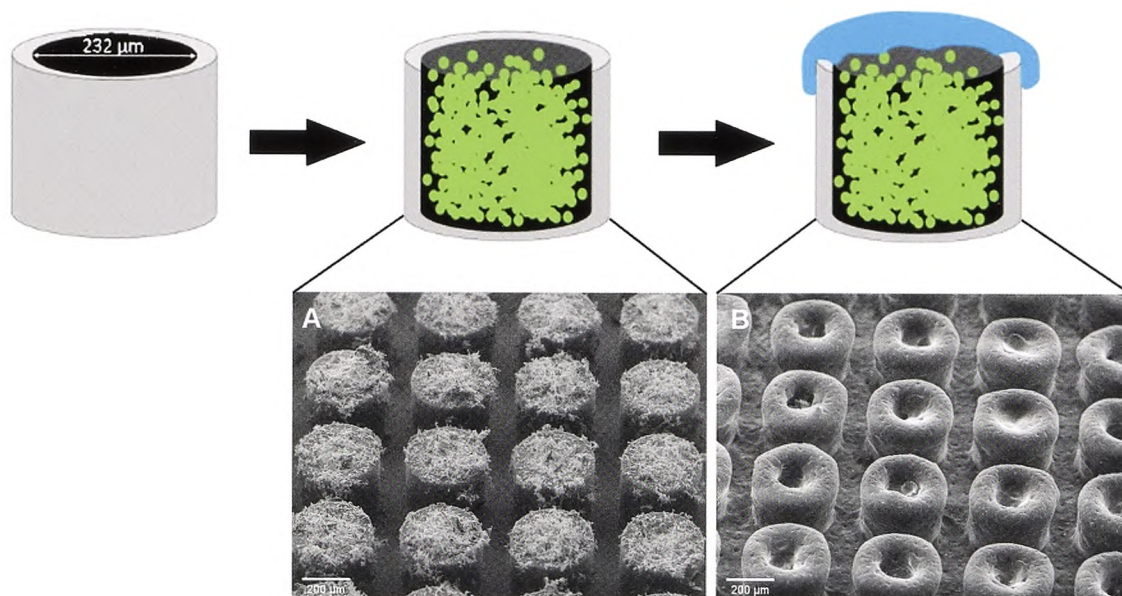
vælge en polymer som opløses ved  $\text{pH} \sim 6$ , idet dette omtrent svarer til pH-værdien i tyndtarms-området.

De mikrocontainere, som bruges til at teste nye anvendelser, bliver lavet af den biokompatible fotopolymer SU-8. Mikrocontainerne er cirka  $220 \mu\text{m}$  i diameter og  $270 \mu\text{m}$  i højden, og de fremstilles ved en to-trins fotolitografi-proces i renrummet på DTU [5]. En af fordelene ved mikrocontainere er, at de kan fremstilles med ensartet størrelse og morfologi. Derved undgår man en meget varierende størrelse, og dermed også en senere varierende lægemiddel-dosis, hvilket er tilfældet ved mikropartikler, som ellers er den mest traditionelle måde at indkapsle lægemidler på [6]. Desuden kan lægemidlet kun frigives i én retning, hvilket er modsat partikler der frigiver til alle sider samtidig. Forskning har vist at netop det, at lægemidlet frigives i én retning tæt på tarmvæggen, kan fremme den efterfølgende absorption. Derudover har studier i vores forskningsgruppe vist, at mikrocontainerne sætter sig fast i mucuslaget i tarmen, hvorfor de kan forventes at have en længere transittid og dermed også en længere samt større absorption af lægemidler. Det har dog indtil nu været svært at undersøge transittider i tarmen nærmere da vi ikke har haft en god procedure til at måle dem præcist.

### Fyldning af mikrocontainere og påføring af polymerisk låg

Efter fremstilling af mikrocontainerne skal de fyldes med et lægemiddel. Der er gennem tiden blevet udviklet mange forskellige metoder til at fylde mikrocontainerne [4]. De bedst udviklede metoder til at fylde mikrocontainerne på er ved at fylde dem med lægemidlet i pulverform. Det kan gøres ved at fordele pulveret ud over en chip med 625 mikrocontainere, imens mellem-





**Figur 3.** Skematisk illustration samt elektron-mikroskopi-billeder af hvordan mikrocontainere først fyldes med paracetamol og derefter overtrækkes med en pH-sensitiv polymer kaldet Eudragit® S100. Genoptrykt fra [6] med tilladelse.

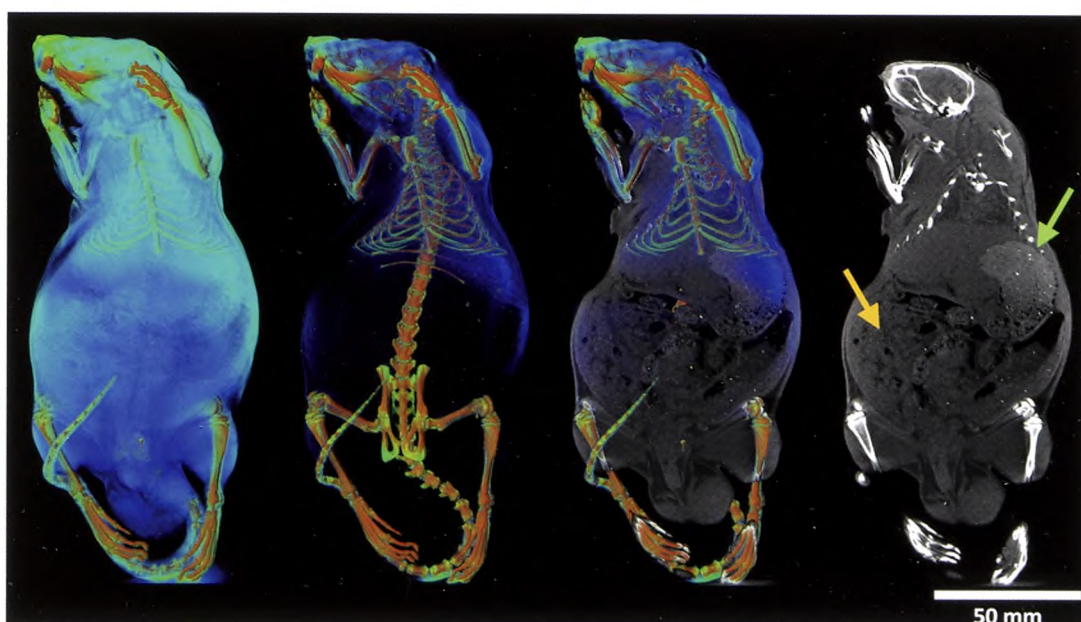
rummet mellem mikrocontainerne dækkes af med en skyggemaske. Derved kan pulveret efterfølgende nemt fyldes ned i mikrocontainerne ved hjælp af en børste. Alternativt kan mikrocontainerne fyldes med en polymer, hvorefter der kan anvendes andre metoder til at fylde mikrocontainerne med lægemiddel. Én af disse metoder er CO<sub>2</sub>-imprægnering, hvor lægemidlet først opløses i CO<sub>2</sub> og derefter trænger ind i en given polymer, som på forhånd var fyldt ind i mikrocontainerne. Når mikrocontainerne er blevet fyldt med lægemiddel, påføres deres åbne overside med et polymerisk låg, som på simpel vis sprayeres på ved hjælp af en spray-coater. Figur 3 viser et eksempel på hvordan mikrocontainere først fyldes med paracetamol, for derefter at blive påført med en pH-sensitiv polymer kaldet Eudragit® S100.

Effekten af de pH-følsomme låg undersøges i la-

boratoriet ved brug af simulerede mave- og tarmopløsninger. Ved hjælp af sådanne undersøgelser har vi bekræftet, at lægemidlet ikke frigives ved en pH-værdi der svarer til den vi har i maven, men at det i stedet først frigives, når pH-værdien øges til en neutral værdi svarende til den i tarmen. Baseret på disse forsøg kunne det altså konkluderes, at det pH-følsomme låg virker, og at frigivelsen af lægemidlet kun sker i tarmen som ønsket.

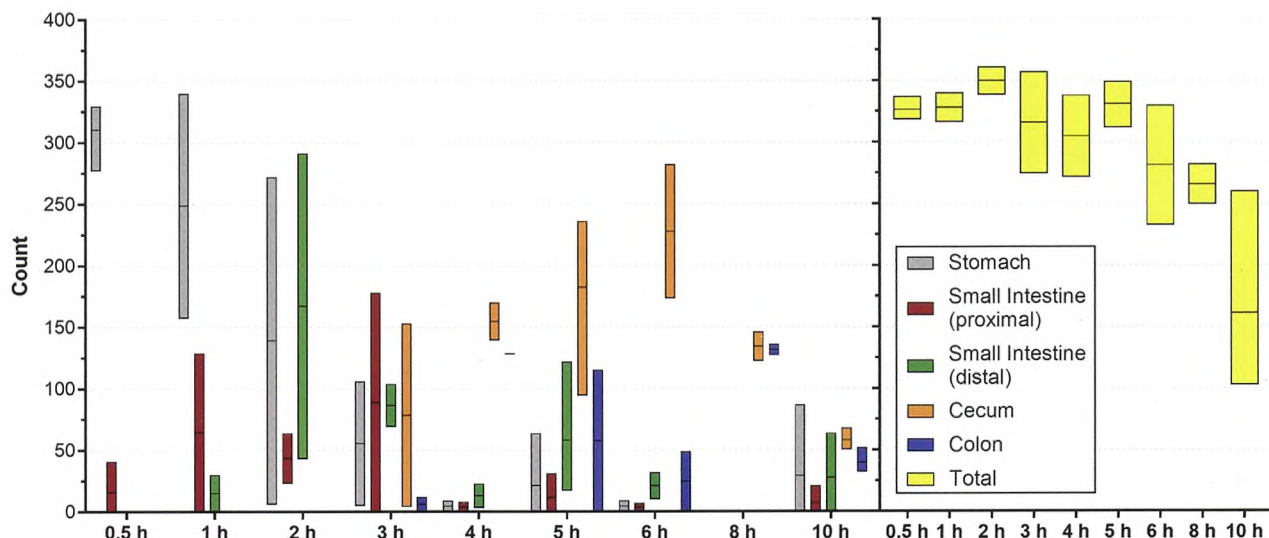
#### Tracking af mikrocontainere til måling af retentions- og transittid

For bedre at kunne undersøge retentions- og transittid af mikrocontainere i tarmene er vi nu begyndt at teste brugen af forskellige typer røntgenbilleddannelse (både 2D og 3D) til at tracke dem [7]. Mikrocontainere giver



**Figur 4.** CT-skanningsbillede af en rotte aflivet 5 timer efter oral dosering af mikrocontainere fyldt med bariumsulfat og med synliggørelse af den gastrointestinale tragt ved hjælp af et orthoslice. Pilene indikerer lokationen af henholdsvis maven (grøn) og tyndtarmen (gul). Genoptrykt fra [7] med tilladelse.





**Figur 5.** Flydende bar plot af mikrocontainernes placering i mave- og tarmsystemet over tid fra dosering. Grå: mavesækken. Rød og grøn: henholdsvis første og anden halvdel af tyndtarmen. Orange og blå: tyktarmen opdelt. Gul: samlet antal for alle de tidligere lokationer. Genoptrykt fra [7] med tilladelse.

dog i sig selv ikke ret meget kontrast, og den lave kontrast de trods alt giver er nogenlunde på samme niveau som den fra biologisk væv (hud, organer, tarme og lignende). Derfor er mikrocontainerne enten blevet fyldt med bariumsulfat, der er et allerede alment kendt og anvendt røntgenkontraststof, eller det er blevet inkorporeret ind i selve mikrocontainerne. Indtil videre er røntgenbillede-dannelse af doserede mikrocontainer kun foretaget i rotter og mus, men på sigt kan et lignende setup anvendes på større dyr (kaniner og grise) i prækliniske forsøg, og i sidste ende på mennesker i kliniske studier.

Figur 4 viser et CT-skanningsbillede fra en rotte aflivet 5 timer efter oral dosering af mikrocontainerne, der på forhånd var blevet fyldt med bariumsulfat. For at lokalisere mikrocontainernes placering i tarmene er kontrasten i CT-skanningsbilledet først og fremmest justeret således at huden forsvinder, hvorved man kan se "ind" i selve rotten og se mikrocontainerne (de mange små røde pletter). Dernæst kan et såkaldt orthoslice tilføjes og flyttes rundt i forskellige højder samt retninger, hvilket giver en ret tydelig indikation af rottens mavesæk (grøn pil), tarmene (gul pil) og andre organer. I det her tilfælde ses det at mikrocontainerne mere eller mindre har forladt mavesækken, og at de i stedet er helt eller delvist spredt ud i tarmene. Et lignende billede taget 10 timer efter oral dosering viste at mikrocontainerne primært var i den sidste del af tarmene, og at flere af dem faktisk allerede havde forladt tarmene helt.

En endnu mere præcis retentions- og transitid kan efterfølgende bestemmes ved at tage hele tarmen ud af rotten, hvorefter simplere plan-røntgenskanning af tarmstykket foretages. På den måde kan hver enkelt mikrocontainer efterfølgende nemt identificeres, og deres eksakte placering i tarmstykket kan noteres og plottes som funktion af tid fra oral dosering. Figur 5 viser et sådan plot for mikrocontainerne fyldt med bariumsulfat, hvor det ses at de bliver i mavesækken 0,5–2 timer, kommer ned til tyktarmen efter 3–4 timer og mere eller mindre forlader tarmene helt 8–10 timer efter dosering.

### Fremtidig levering af vacciner ved brug af mikrocontainerne

De beskrevne funktioner af mikrocontainerne gør dem til en stærk kandidat til oral levering af vacciner. Først og fremmest kan de beskytte deres indhold igennem maven, for derefter at øge retentionstiden i tarmen. For en rotte er den normale transit af mad fra maven til cecum (starten af tyktarmen) omkring 1–2 timer, og i tilfældet for mikrocontainerne er denne forøget til 3–5 timer [8]. I forhold til vacciner er det ret essentielt at kunne øge retentionstiden så meget som muligt, så kroppens immunsystem får længere tid til at reagere. I tarmen er der en meget høj immuntolerance, hvilket vil sige at kroppen ikke reagerer på alle de fremmede bakterier og molekyler som passerer igennem fordøjelsessystemet. Dette er nødvendigt da det ellers ville overbelaste vores krop ekstremt. For vacciner skal den tolerance overkommes da det er et sammenspil mellem mikrocontainer-teknologien og vaccine-formuleringen der så at sige skal provokere immunsystemet tilstrækkeligt til at lave et immunrespons. To kritiske faktorer i denne process er at vaccine-formuleringen er aktiv ved ankomst til tyndtarmen, og at den har længst muligt tid til at opnå en gavnlig virkning. De næste skridt herfra er at teste mikrocontainerne sammen med en vaccine-formulering i eksempelvis rotter. Valget af vaccine-formulering bør tages på baggrund af data fra andre studier som viser respons fra enten orale studier eller sågar respiratoriske studier, da vævet i lungerne er stort set identisk med det som findes i tarmen [9]. Dette er for at sikre at det er mikrocontainernes evne til at levere vacciner oralt som evalueres. Det er også en mulighed at den øgede retentionstid der opnås i rotter ikke er tilstrækkelig, da de indre organer hos en rotte proportionelt er meget små. Fremadrettet kan det derfor også være nødvendigt at anvende større dyremodeller såsom kaniner eller grise til lignende prækliniske studier.



## Litteratur

- [1] M. Shepherd og E. Shepherd (2020) Medicines administration 2: procedure for administration of oral medicines, *Nursing Times*, bind **116**, nr. 7, side 42–44.
- [2] Y. Zhang m.fl. (2021) Advanced oral vaccine delivery strategies for improving the immunity, *Advanced drug delivery review*, bind **177**, side 113928.
- [3] M.Y. Chan m.fl. (2017) Lyophilization of Adjuvanted Vaccines: Methods for Formulation of a Thermostable Freeze-Dried Product, *Methods.Mol.Biol.*, bind **1494**, side 215–226.
- [4] L.H. Nielsen m.fl.(2018) Microfabricated devices for oral drug delivery, *Lab on a Chip*, bind **18**, side 2348–2358.
- [5] L.H. Nielsen m.fl. (2012) Spatial confinement can lead to increased stability of amorphous indomethacin, *European journal of pharmaceuticals and biopharmaceutics*, bind **81**, side 418–425.
- [6] J.F. Christfort m.fl. (2021) In vitro and in vivo comparison of microcontainers and microspheres for oral drug delivery, *International Journal of Pharmaceutics*, bind **600**, side 120516.
- [7] R.B. Kjeldsen m.fl. (2021) X-ray Imaging for Gastrointestinal Tracking of Microscale Oral Drug Delivery Devices, *ACS Biomaterials Science & Engineering*, bind **7**, side 2538–2547.
- [8] A. Munakata m.fl. (1995) Effects of Dietary Fiber on Gastrointestinal Transit Time, Fecal Properties and Fat Absorption in Rats, *Exp.Med.*, bind **176**, side 227–238.
- [9] E.C. Lavelle m.fl. (2021) Mucosal vaccines – fortifying the frontiers, *Nat.Rev.Immunol.*, side 1–15.



*Philip H. R. Carlsen* er ph.d.-studerende på DTU. Han er cand.scient. i bioteknologi fra Københavns Universitet med speciale i immunologi og arbejder med vacciner mod infektionssygdomme. I sit ph.d.-projekt arbejder han primært med oral levering af vacciner. Dette sker i tæt samarbejde med adjuvansafdelingen på Statens Serum Institut.



*Rolf Bech Kjeldsen* er ph.d.-studerende på DTU. Han er cand.scient. i nanoscience fra Aarhus Universitet og arbejder med interdisciplinær forskning inden for områderne “natural science” og “applied science”. I sit PhD-projekt arbejder han primært med røntgenbilleddannelse til gastrointestinal sporing af mikroskala-devices anvendt til oral levering af lægemidler.



*Juliane Fjelrad Christfort* er cand.pharm. i farmaci fra Københavns Universitet og ph.d fra DTU. I sit ph.d-projekt arbejdede hun primært med oral levering af probiotika ved hjælp af mikrocontainere og udvikling af *in vitro*- og *in vivo*-modeller til at undersøge brugen af mikrocontainere til oral levering.

## Nyt fra Astronomisk Selskab

### Foredragsrækken forår 2022

Teamet for Astronomisk Selskabs foredragsrække bliver “Hvad er der ude i rummet?” Mange har hørt om stjerner, men faktisk er det kun en mindre del af det vi kan kalde det “normale stof” som man idag finder i stjerner. Denne foredragsrække handler om stoffet mellem stjernerne og galakserne – om det interstellare, det cirkumgalaktiske og det intergalaktiske stof.

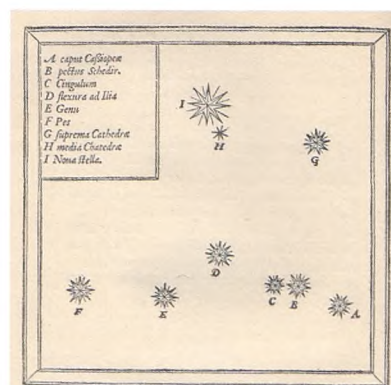
Se mere i foredragskalenderen side 33.

### Generalforsamling

Generalforsamlingen er planlagt til at finde sted den 2. april 2022. Nærmere information om tid og sted følger.

### Medlemsundersøgelse

Astronomisk Selskab har gennemført en medlemsundersøgelse, som viste, at rigtig mange af medlemmerne sætter stor pris på Kvant. Undersøgelsen viste også, at medlemmerne interesserer sig bredt for astronomiske emner, men især for Big Bang og universets udvikling, observationel astronomi, stjerner og supernovaer samt galakser.



**Figur 1.** Tycho Brahes nye stjerne (I på figuren).

Blandt forslagene til forbedring blev der efterspurgt lidt flere populærfaglige artikler i Kvant samt en mulighed for at stille spørgsmål i bladet. Kvant redaktion vil arbejde videre med forslagene og planlægger også et temanummer næste år om supernovaer i anledning af, at det er 450 år siden, at Tycho Brahe opdagede sin nye stjerne i 1572.



# “Förster resonance energy transfer”-målinger af den molekulære rute igennem human hud

Irina Iachina, Mads Clausen Instituttet, SDU NanoSYD, Syddansk Universitet, og Jonathan Brewer, Institut for Biokemi og Molekylær Biologi, Syddansk Universitet

“Förster resonance energy transfer” (FRET) kombineret med fluorescensmikroskopi tillader undersøgelse af interaktioner i biologiske systemer i deres naturlige omgivelser og tilstand med nm-skala nøjagtighed. Dette kan bruges til at belyse forskellige biofysiske processer som molekulære interaktioner eller som beskrevet her; den nanoskopiske molekulær rute igennem human hud. Hvordan molekyler bevæger sig igennem huden, er vigtigt for at forstå hudens barriereegenskaber og designe succesfulde medicinafgivelsessystemer til brug i gennem huden.

Forskning indenfor biofysikken indebærer at undersøge og forstå forskellige biologiske systemer og fænomener ud fra grundlæggende fysiske og kemiske teknikker og modeller.

En meget udbredt observationsmetode indenfor biofysik er optisk mikroskopi. I optisk mikroskopi gør man brug af synligt lys og linser, for at generere billeder af objekter, der er meget mindre (200 nm), end hvad man kan se med det blotte øje (20  $\mu\text{m}$ ). Optisk mikroskopi er også relativt uskadeligt over for biologiske prøver, og bliver derfor ofte brugt til observationer af fx celler og væv fra både mennesker, dyr og planter.

En specifik type af optisk mikroskopi er fluorescensmikroskopi, hvor man gør brug af det fysiske fænomen fluorescens [1]. Her har man et molekyle, kaldet en fluorofor, der har en høj andel af delokaliserede elektroner (ofte en del dobbeltbindinger), som når det bliver belyst med en foton, absorberer energien af denne foton og derved bliver exciteret. Når molekylet henfalder, udsender det en ny foton, som har en lavere energi end den, der blev brugt til at excitere. Disse fluoroforer kan så bruges til mærke et specifikt område i sin prøve, fx vil lipidlignende fluoroforer helst placere sig ved andre lipider, og man kan derfor tage billeder af specifikke områder og/eller molekyler i sin prøve.

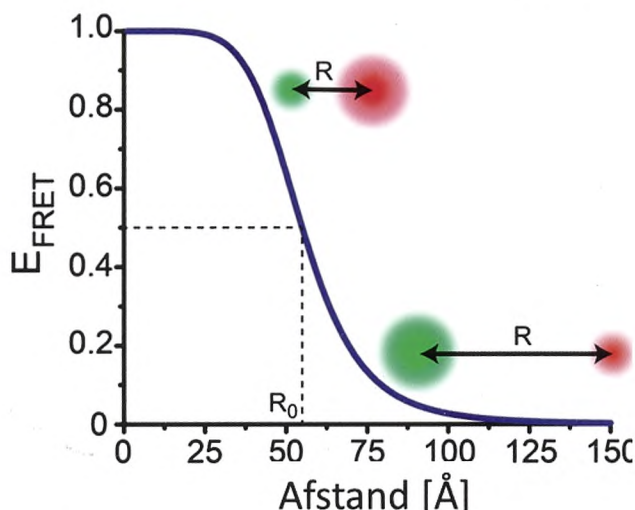
Almindelig optisk mikroskopi er på grund af diffraktion begrænset i sin opløsning til ca. 200 nm [2]. Det vil sige, at genstande som er tættere på hinanden end 200 nm, ikke kan skelnes. En del af de interessante strukturer og interaktioner indenfor biologien foregår på en størrelsesskala langt under de 200 nm. For eksempel er typiske cellemembraner kun 4–10 nm tykke, mens proteiner er typisk 2–6 nm i diameter. For at undersøge interaktioner i denne størrelsesorden, skal der derfor bruges andre metoder end almindelig optisk mikroskopi.

En metode til at løse dette er “Förster resonance energy transfer” (FRET) [3,4]. FRET er en spektroskopisk teknik, som tillader måling af intermolekulære afstande ned til under 1 nm. I FRET bruger man to fluoroforer, hvor det ene molekyle (donor) i sin exciterede tilstand kan overføre sin energi til det andet molekyle (accepter) via dipol-dipol interaktioner uden frigivelse af en foton. Det vil sige, at FRET-effekten medfører, at donoren lyser mindre, mens accepteren

lyser mere. Denne metode er meget følsom overfor afstanden mellem donor- og acceptermolekylet, da effektiviteten af FRET er afhængig af afstanden mellem de to fluoroforer som  $1/r^6$ . Dette gør metoden særlig brugbar til at måle meget korte afstande. FRET-effektiviteten ( $E_{FRET}$ ) er givet ved

$$E_{FRET} = \frac{1}{1 + \frac{R^6}{R_0^6}}, \quad (1)$$

hvor  $R$  er afstanden imellem donor og acceptor, og  $R_0$  er den såkaldte Försterafstand, som er en konstant, der er afhængig af blandt andet overlappet imellem emissionsspektret af donoren og accepternes absorptionspektrum, samt deres rumlige orientering i forhold til hinanden. Figur 1 viser en graf af FRET-effektiviteten som funktion af afstand. Det ses, at når afstanden mellem donor og acceptor er  $R_0$  så er  $E_{FRET} = 0,5$ .



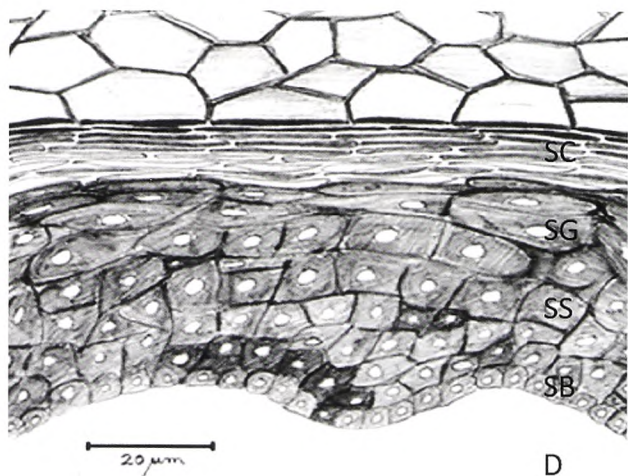
**Figur 1.** Graf af FRET-effektiviteten som funktion af afstand. Grafen viser, at FRET er følsom over for afstand i nm-skalaen. Ved korte afstande, hvor der er meget FRET, lyser den grønne donor mindre og den røde acceptor mere. Ved større afstande, hvor der er mindre FRET, lyser den grønne donor mere og den røde acceptor mindre.

FRET-effektiviteten kan måles enten ved at måle intensiteten af donoren med og uden acceptor, eller ved at måle donorens fluorescerende levetid (hvor lang tid fluoroforen er exciteret, inden den udsender en foton)



med og uden acceptor. Det kan gøres både i en cuvette med et fluorometer eller med et mikroskop. I vores målinger bruger vi levetidsmålinger [5].

Lad os kigge på et specifikt eksempel på, hvordan både fluorescensmikroskopi og FRET kan bruges til at undersøge noget vi alle kender; vores hud.



**Figur 2.** En skitse af epidermis, som viser den generelle struktur med stratum corneum (SC) øverst og de følgende lag under: stratum granulosum (SG), stratum spinosum (SS) and stratum basales (SB). Under SB er dermis (D).

Menneskers hud repræsenterer kroppens hovedforsvar ved at forhindre penetration af fremmede substanser gemmen huden, og beskytte os mod fysisk og kemisk skade [6]. At forstå hudens barriereegenskaber er væsentligt for at forstå forskellige hudsygdomme, hvordan vi bedst beskytter huden mod miljøet, lave fysiologiskbaseret matematiske hudmodeller, og medicin-afgivelse gennem huden. I det sidstnævnte eksempel, er det vigtigt at forstå hvilken vej, molekyler bruger til at diffundere gennem huden, for at designe succesfulde medicinafgivelsessystemer gennem hud [7,8].

Den komplekse struktur af huden, som består af lipider og proteiner, giver den dens unikke barriereegenskaber. Huden består af to primære lag: epidermis, som er det yderste lag og består af epitelceller. Tykkelsen af

dette lag varierer fra 75 til 150 µm afhængig af, hvor på kroppen vi kigger. Under epidermis er der et lag af fiberrigt bindevæv kaldet dermis. Da vi beskæftiger os med hudens barriereegenskaber, vil vi kun kigge nærmere på epidermis.

Epidermis består selv af flere forskellige lag, som er defineret ud fra deres stadie af differentiering. Disse lag er fra det alleryderste lag: stratum corneum (SC), stratum granulosum (SG), stratum spinosum (SS) og stratum basales (SB), se figur 2.

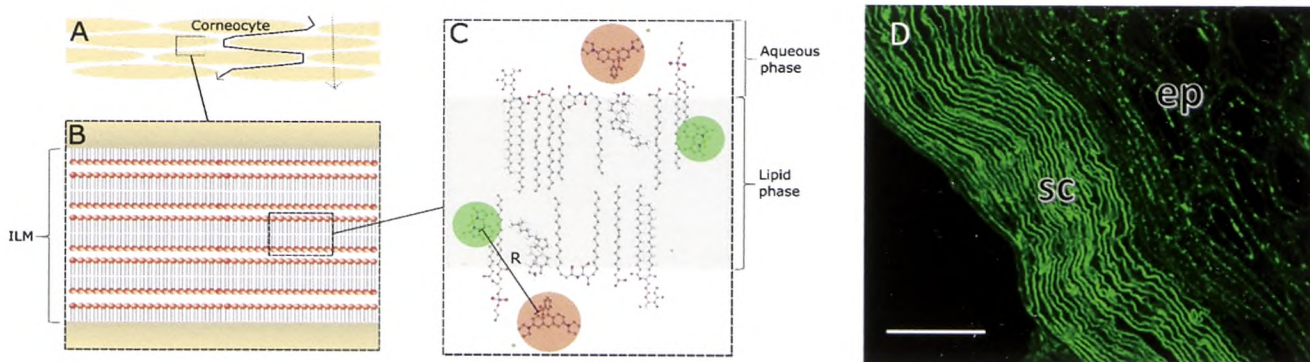
Det er SC, som udgør hovedkomponenten af hudens barriereegenskaber. SC, som består af keratinfyldte corneocytter (flade, kerneløse celler), er bedst beskrevet med en "mursten og mørtel"-model. Corneocytterne (murstenene) er i SC omgivet af "mørtel", som består af omkransende proteiner som kovalent er bundet til et lag ceramider.

Det, der deler corneocytterne, er den intercellulære lipidmatrix (ILM), som består af lipidark bestående af flere stablede lipidbilag (se figur 3A og 3B) [9].

For at kigge nærmere på hudens opbygning bruges to lipofile fluoroforer TopFluor PC og ATTO 488 DPPE til at mærke lipiderne i epidermis, og derefter tages der et billede med fluoroscensmikroskopi. Dette billede ses nedenfor (figur 3D), og her ses det, at man både kan se lipiderne i cellemembranerne i epidermis og omkring corneocytterne i SC.

For at få informationer vedrørende tykkelsen af de stablede lipidlag i den intercellulære lipid matrix, samt den molekulære vej gennem huden på et nanoskopisk niveau, kan man måle FRET-effektiviteten. Den vil nemlig gøre muligt at måle afstanden mellem vandopløselige og lipofile fluorescerence-molekylepar i huden, som er langt under opløsningen af et optisk mikroskop.

Ved at bruge en lipofil donorfluorofor (TopFluor PC), som vil placere sig blandt de intercellulære lipiders hydrocarbonkæder, og en mere hydrofil fluorofor som acceptor, er det muligt at måle afstanden imellem de to fluoroforer, og derved bestemme hvor det hydrofile molekyle ligger i forhold til de intercellulære lipiders bilag, se figur 3C.

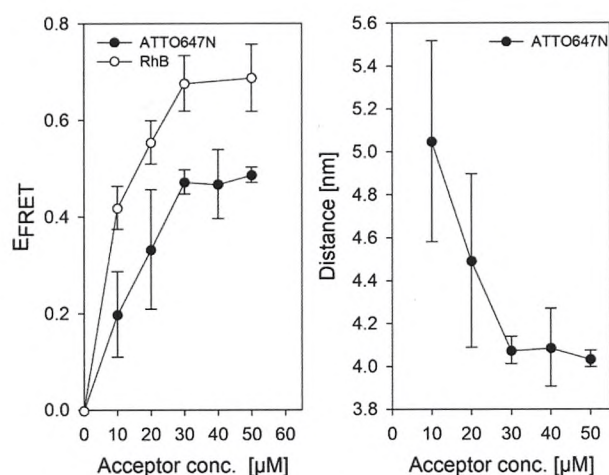


**Figur 3.** Den molekulære rute gennem SC kan enten være igennem corneocytterne (transcellulær), gennem lipidmatricen (intercellulær) eller gennem hårfollikler. I denne artikel kigger vi kun nærmere på den trans- og intercellulære rute. Lipofile molekyler kan blive indkorporeret i hydrocarbonkæderne i lipidbilagene i ILM, mens de mere polære vandopløselige molekyler vil foretrække vandet eller de polære hovedgrupper af lipiderne. Det er derfor forventet, at lipofile og vandopløselige molekyler vil bruge forskellige ruter igennem SC. D: Fluoroscensbillede af epidermis i hud skåret i skiver mærket med de lipofile fluoroforer TopFluor PC og ATTO 488 DPPE. De lysende grønne striber viser den intercellulære lipidmatrix. Målestokken er 10 µm; sc – stratum corneum; ep – epidermis.



FRET-målinger blev foretaget for to forskellige vandopløselige accepterfluoroforer, ATTO647N og Rhodamine B (RhB). Målingerne blev lavet ved forskellige koncentrationer af accepter. Resultatet af målingerne kan ses i figur 4. Det er tydeligt at se, at både ATTO647N og RhB når en maksimal FRET-effekt ved en koncentration på omkring 30  $\mu\text{M}$ , hvorefter den er konstant. Dette tyder på, at donor- og acceptermolekylerne er forhindret i at komme tættere på hinanden end en bestemt afstand. Ved at måle donor- og acceptermolekylernes orientering i SC, er det muligt ud fra FRET-målingerne at bestemme afstanden imellem TopFluor PC og ATTO647N[5]. Fra figur 4 kan det ses, at denne afstand når et konstant minimum på omkring 4 nm.

Resultaterne viser, at de vandopløselige accepterfluoroforer bevæger sig meget tæt på den lipofile donor i de intercellulære lipider i SC, dog bliver de forhindret i at komme helt tæt på hinanden. Dette tyder på, at de mere hydrofile molekyler i SC bevæger sig blandt de intercellulære lipiders hydrofile hovedgrupper og er forhindret i at bevæge sig blandt lipiders hydrocarbonkæder. Det vil sige, at vandopløselige molekyler også bruger den intercellulære rute gennem SC. Endvidere viser resultaterne, at afstanden imellem lipidbilagene må være mere end 8 nm.



**Figur 4.** Den molekulære rute gennem SC kan enten være igennem corneocyterne (transcellulær), gennem lipidmatrixen (intercellulær) eller gennem hårfollikler. I denne artikel kigger vi kun nærmere på de trans- og intercellulære ruter. Lipofile molekyler kan blive inkorporeret i hydrocarbonkæderne i lipidbilagene i ILM.

“Förster resonance energy transfer” (FRET) kombineret med fluorescensmikroskopi er en stærk metode til undersøgelse af interaktioner i biologiske systemer på nm-skala, da det kan bruges på biologiske prøver i deres naturlige omgivelser og tilstand. I dette arbejde har vi vist, at FRET kunne ses imellem lipofile og vandopløselige molekyler i ILM. Målingerne viste en minimumslængde på 4 nm imellem de vandopløselige og lipofile molekyler. Tilsammen viser vores resultater, at de vandopløselige molekyler bevæger sig igennem den intercellulære lipidmatrix via området med lipiders polære hovedgrupper.

## Litteratur

- [1] H.R. Petty (2007) Fluorescence microscopy: established and emerging methods, experimental strategies, and applications in immunology, *Microsc.Res.Tech.*, bind **70**, side 687–709.
- [2] E. Abbe (1873) Beitrage zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung, *Archiv fur Mikroskopische Anatomie*, bind **9**, side 413–420.
- [3] R.M. Clegg (2009) Chapter 1 Förster resonance energy transfer – FRET what is it, why do it, and how it’s done, in *Laboratory Techniques in Biochemistry and Molecular Biology*, Elsevier, side 1–57.
- [4] E.A. Jares-Erijman og T.M. Jovin (2003) FRET imaging, *Nat.Biotech.*, bind **21**, side 1387–1395.
- [5] I. Iachina m.fl. (2019) The nanoscopic molecular pathway through human skin, *Biochim.Biophys.Acta. Gen.-Subj.*, bind **1863**, side 1226–1233.
- [6] K.C. Madison (2003) Barrier function of the skin: “La Raison d’Etre” of the epidermis, *Journal of Investigative Dermatology*, bind **121**, side 231–241.
- [7] J. Brewer m.fl. (2013) Spatially resolved two-color diffusion measurements in human skin applied to transdermal liposome penetration, *The Journal of investigative dermatology*, bind **133**, side 1260–8.
- [8] J. Dreier, J.A. Sørensen og J.R. Brewer (2016) Super-resolution and Fluorescence Dynamics Evidence Reveal That Intact Liposomes Do Not Cross the Human Skin Barrier, *PloS one*, bind **11**, side e0146514.
- [9] I. Iwai m.fl. (2012) The Human Skin Barrier Is Organized as Stacked Bilayers of Fully Extended Ceramides with Cholesterol Molecules Associated with the Ceramide Sphingoid Moiety, *Journal of Investigative Dermatology*, bind **132**, side 2215–2225.



*Irina Iachina* er ph.d.-studerende ved SDU NanoSYD (Mads Clausen Institutet, SDU Sønderborg).



*Jonathan Brewer* er leder for Bio-imaging-sektionen ved Syddansk Universitet, Odense, og er direktør for Danish Molecular Biomedical Imaging Center ([www.dambic.dk](http://www.dambic.dk)).



# Er det Solens skyld?

Erik Høg, Niels Bohr Institutet

Klima og miljø bekymrer os i dag. Hvor ligger årsagen til problemerne, og gør vi det rigtige for at løse dem? Det er der rejst tvivl om. Denne kritik gøres der rede for, og den sættes til diskussion hos eksperter.<sup>1</sup>

Hos FNs Klimapanel (IPCC) står det klart, at CO<sub>2</sub> er skyld i den globale opvarmning. CO<sub>2</sub> og andre drivhusgasser i atmosfæren hindrer strålingen fra Jordens overflade i at slippe ud til verdensrummet. Så når indholdet af CO<sub>2</sub> stiger, vil kloden blive varmere. Indholdet af CO<sub>2</sub> stiger faktisk og det gør det, fordi vi afbrænder fossile brændstoffer. Problemet er altså menneskeskabt. Det er efterhånden blevet almen viden, også hos politikere.

Da jeg for nylig nævnte min tvivl for en kvik gymnasieelev, min brors barnebarn, sagde hun straks: "Jamen tror du da ikke, at ...?" og så fulgte hele denne tankekæde.

Der er imidlertid rejst tvivl om hele opvarmningen er menneskeskabt af grunde, som denne artikel skal behandle. Disse grunde beskrives i reference [1], der indeholder en pressemeddelelse med reference til en udførlig videnskabelig publikation i *Research in Astronomy and Astrophysics* (RAA) på 68 sider [2] forfattet af 23 eksperter i solvariationer og klima fra 14 forskellige lande.

Denne store indsats går imod strømmen, imod den offentlige mening. Det bør påskønnes, og det kan vel bedst ske ved, at hele artiklen bliver udsat for en detaljeret og kritisk gennemgang. En første vurdering af artiklen findes nedenfor i udtalelser fra en geofysiker og en astronom og med svar fra en af forfatterne. Jeg håber dette kan sætte gang i mere.

Nu til selve sagen med den artikel: Kan man få en konkret vurdering af validiteten af forfatternes analyse? Dette foreslås af geofysiker Aksel Walløe Hansen i et indlæg, og fra astronom Hans Kjeldsen er kommet en vurdering. Fra en af RAA-artiklens forfattere, Jan-Erik Solheim, har jeg modtaget en forklaring af beregningsmetoden og svar på den kritik, der rejses af de to nævnte. Sammenfatninger af dette følger i tre paragrafer efter et resume af selve artiklen.

FNs klimapanel, IPCC, har en meget professionel hjemmeside [3], som er overvældende og som synes ganske uoverskuelig. Jeg har fundet noget forholdsvis overskueligt i [4] nemlig sammenfatningen af IPCCs femte rapport AR5. I tabel 1.1 på side 124–125 kan man se, hvordan deres vurdering har udviklet sig. De var allerede i den første rapport fra 1990 ret sikre i deres konklusion om den globale opvarmnings størrelse og udvikling.

Aksel Walløe Hansen bemærker, at Connolly m.fl. [2] ikke fremfører nogen ny tvivl om IPCC's rationale. Solen som årsag til og styring af det jordiske klimas

fluktuationer er en gammel hypotese, som også har været vurderet undervejs af IPCC i arbejdet med de seks rapporter fra AR1 til AR6.

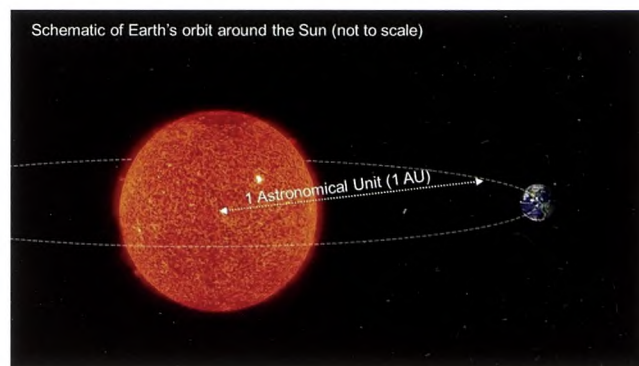
Efter diskussionen om artiklen slutter jeg med et afsnit om energierne i Nordsøen og atomkraftværker og med min egen mening om vores menneskelige civilisations fremtid på langt sigt.

## Artiklen i RAA

Denne artikel [2] sammenfattes ved at citere fra pressemeddelelsen [1] med de to figurer nedenfor:

### FN's klimapanel misfortolker sol- og klimadata

Resume: Et panel af forskere fra hele verden har offentliggjort en rapport, der viser, at vi ved for lidt om årsagerne til klimaforandringerne til at give drivhusgasser skylden. Vores forskning giver resultater, der ikke stemmer overens med konklusionerne fra FNs Klimapanel, som er baseret på ufuldstændige data og manglende forståelse af solstråling.



Figur 1. Solen og Jorden.

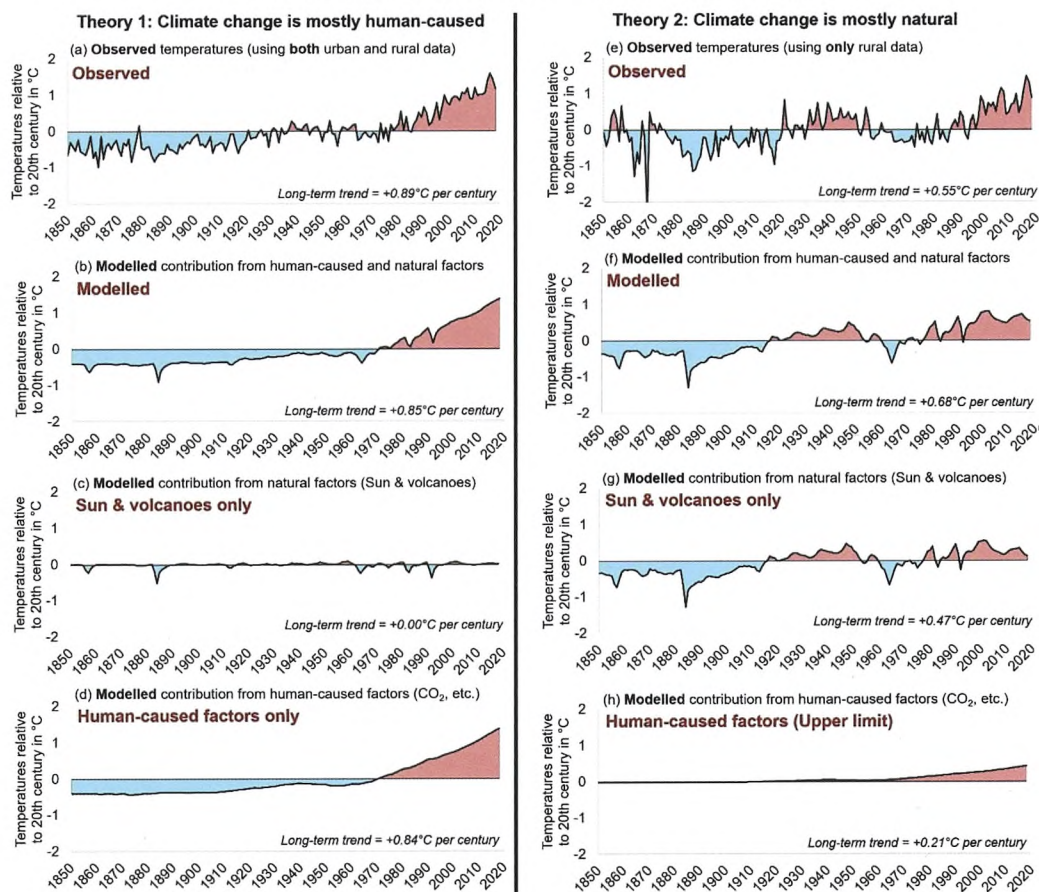
Det meste af den energi, der findes i Jordens atmosfære, kommer fra Solen. Det har længe været kendt, at ændringer i den totale solindstråling (TSI), eller mængden af energi modtaget fra Solen i løbet af de sidste århundreder, kan have bidraget væsentligt til de seneste klimaændringer. De seneste rapporter fra IPCC bruger dog kun forskningsrapporter, der viser små solvariationer. Som følge heraf har Klimapanelet konkluderet, at Solen ikke har haft nogen effekt på klimaet i de sidste 100–150 år.

En nyligt offentliggjort videnskabelig oversigtsartikel [2] viser, at Klimapanelets konklusioner om, at klimaforandringerne skyldes menneskelig aktivitet, er svagt videnskabeligt funderede.

<sup>1</sup>Jeg er tak skyldig til ingeniør Svend Erik Lyse-Petersen for gode råd og information især om energierne. En stor tak skylder jeg også Hans Kjeldsen, Jan-Erik Solheim, Aksel Walløe Hansen og Niels Wessel for deres indlæg og for deres tilladelse til at citere.



## The "attribution" problem for Northern Hemisphere temperatures



Figur 2. Grafer over temperaturudviklingen.

I rapporten sammenligner forskerne i alt 16 forskellige estimater af strålingsvariationer fra Solen, inklusive data brugt af IPCC. Disse sammenlignes med 26 forskellige estimater af temperaturvariationer på Jordens nordlige halvkugle siden 1850 (sorteret i fem kategorier), inklusive datasæt brugt af IPCC. Grunden til at rapporten fokuserer på den nordlige halvkugle er, at der er længere og fyldigere dataserier her end for den sydlige halvkugle. Men vi antager, at vores resultater er globalt gyldige.

Vores undersøgelse viser, at forskere kommer til modsatrettede konklusioner om årsagen til de observerede klimavariationer, alt efter hvilke datasæt der bruges. I figur 2 viser graferne til venstre, hvordan hele temperaturudviklingen kan forklares med menneskelig aktivitet ( $\text{CO}_2$  emissioner), hvis temperaturserier, der omfatter temperaturer målt i byer og bebyggede områder (lufthavne), anvendes sammen med serier, der viser beskedne variationer i solstråling. De menneskeskabte bidrag er da  $0,84^{\circ}\text{C}$  per hundrede år og de naturlige bidrag fra sol og vulkaner omkring nul. Graferne til højre viser, at størstedelen af temperaturstigningen skyldes Solen og vulkanerne, hvis vi bruger temperaturdata uden for byer og bebyggede områder samt soldata med større variationer.

Den sjette rapport fra IPCC (2021/2022) bruger dataserier som vist til venstre med målestationer fra byer og bebyggede områder fra hele verden, og kun få eller ingen solvariationer. IPCCs rapport undlader at

rapportere om forskning, der viser, at temperaturerne uden for byer stiger langsommere, og at mange forskere har fundet ud af, at Solen varierer langt mere end den måleserie, som Klimapanelet bruger, samtidig med at de hævder, at der er konsensus blandt forskerne om, at deres fortolkning er korrekt.

Når Klimapanelet ikke er i stand til at give en korrekt præsentation af forskningen på området, må panelets konklusioner afvises som ufuldstændige og for tidlige. Der er brug for mere forskning for at klarlægge årsagen til de forskellige fortolkninger og finde en begrundelse for, at den ene fortolkning er mere korrekt end den anden.

Vores konklusion er, at klimapanelets konklusioner om menneskets påvirkning af Jordens klima ikke repræsenterer acceptabel forskning.

Ole Humlum, professor emeritus, Oslo Universitet, og Jan-Erik Solheim, professor emeritus, Norges Arktiske Universitet UiT (medlemmer af Klimarealisternes faglige råd, [www.klimarealistene.com](http://www.klimarealistene.com)).

### Geofysikerens kommentar

Aksel Walløe Hansen, lektor emeritus, Niels Bohr Institutet, har skrevet udførlige kommentarer i [5], som her gengives kort, men læseren opfordres til at opsøge den fulde tekst.

Der er ikke blevet tid til at dykke ned i RAA-artiklen. Desværre. Til temperaturmålingerne dog dette: IPCC og mange andre grupperinger laver en kritisk



gennemgang af temperaturmålingerne, før disse bruges til at lave globale gennemsnit og korrigerer herigennem for byeffekter. Jeg troede faktisk, at alle grupperinger nu var nået frem til, at dette er gjort godt nok. Altså en form for enighed.

Jeg synes, at det vil være fint, hvis hele artiklen bliver udsat for en detaljeret og kritisk gennemgang. Så man én gang for alle kan få en konkret vurdering af validiteten af forfatterens analyse. Og en vurdering af teorien sammenholdt med den dominerende videnskabelige forståelse af den klimatiske udvikling. Jeg kan desværre ikke selv påtage mig dette, men jeg vil prøve at kontakte Torben Stockfleth Jørgensen, tidligere DMI. Jeg har samarbejdet med ham i mange år, men jeg har ikke hørt fra ham i længere tid. Han har altid været skarp.

Jeg står ved mine skeptiske, faglige bemærkninger. Du må meget gerne bruge disse. Jeg synes ikke, at Jan-Erik forklarer særligt meget i sit svar. Grundlæggende mener han, at temperaturserierne er ødelagt af byeffekterne, og at Svensmark har en god sag. Deri er jeg uenig.

Klimaets udvikling synes at være inde i en udvikling over mange årtier. Gående mod højere overfladetemperaturer generelt set. Evidenserne for, at dette skyldes en forcering skabt af menneskehedens udslip af drivhusgasser, er mange og vægtige. Andre teorier kan ikke tilsvarende forklare alle de aspekter, vi ser.

Med dette sagt skal det dog også bemærkes, at naturen selv har en indbygget dynamik, der tillader et varierende klima. Så det er en udvikling med indbyggede bump.

Imidlertid siger alle fremtidsprojektioner på 100 årsskalaen, at disse bump vil være insignifikante, hvis vi ikke snart får kontrol over vores energiforbrug, arealanvendelse mv.

### Solheims svar

Jan-Erik Solheim svarer, her i et resume af [6], som læseren opfordres til at opsøge for at læse hele svaret.

Solheim forklarer i [6a] den metode, der er brugt til analyse af temperaturmålingerne. I [6b] svarer han på kommentar fra Aksel Walløe Hansen. I [6c] svarer han på kommentar fra Hans Kjeldsen.

Solheim nævner i [6b], at artiklen redegør for flere forskellige beregninger af total solindstråling (TSI – Total Solar Irradiance) og flere beregninger af temperatur. Afhængig af hvilke beregninger, der bruges, får man god eller svag sammenhæng mellem Solens og klimaets variationer. Forfatterne mener, at konklusionen hos IPCC om at solindstrålingen kun har haft lille betydning for klimaet de sidste 150 år må være forkert, når solen har haft sin stærkeste aktivitetsperiode i flere tusind år i det forrige århundrede. Han fastholder som hovedpointe i artiklen i RAA: “at der er flere mulige tolkninger af sammenhæng mellem sol og klima.”

Solheim nævner fra sine egne arbejder vedrørende iskanten i Barentshavet, at den begyndte sin bevægelse mod nord omkring 1900 – længe før vi startede vore voksende udslip af CO<sub>2</sub> i 1960'erne.

Artikler som er eller bliver publiceret i vort nye tidsskrift *Science of Climate Change*

([scc.klimarealistene.com](http://scc.klimarealistene.com)) viser, at de menneskelige bidrag til CO<sub>2</sub> i atmosfæren kun er nogen få procent.

Solheim tilføjer i [6c], at han er enig med Hans Kjeldsen i, at den beregnede ændring i solindstråling er væsentlig mindre end den, som behøves for at forklare temperaturforøgelsen siden år 1700. Gennem mange tusind år er det observeret, at stærk kosmisk stråling falder sammen med kølige perioder på Jorden. Når Solen har svag magnetisk aktivitet, er Jorden mindre beskyttet mod kosmisk stråling. Henrik Svensmark har fundet, teoretisk og eksperimentelt, en sammenhæng mellem kosmisk stråling og dannelse af skyer. Der kan også være andre sammenhænge mellem Solens aktivitet og Jordens klima.

### Astronomens kommentar

Hans Kjeldsen, Professor, Aarhus Universitet, svarer, her i et resume af [7], som jeg atter opfordrer læseren til at opsøge for at læse hele kommentaren.

Artiklen af Connolly m.fl. [2] indeholder en detaljeret analyse af Solens udstråling, som viser, at Solen gennem de seneste 400 år har ændret sin udstråling. Hovedresultatet af analysen viser, at der er en lineær korrelation mellem TSI og den observerede temperaturvariation på Jordens overflade.

Et problem ved analysen er dog, at det som udgangspunkt ikke er nok at finde en korrelation og bestemme størrelsen af korrelationskonstanten, som indgår. For at skabe evidens for resultatet er det vigtigt at sikre, at størrelsen af korrelationen er fysisk funderet. Ser man på størrelsen af variationerne i TSI virker de umiddelbart mere end en størrelsesorden for små til at kunne bidrage væsentligt til den observerede temperaturstigning fra 1900 og frem til i dag. Derfor er det vanskeligt at se, at den fundne korrelation kan udfordre IPCCs konklusioner.

Hvis variationerne i TSI bidrager væsentligt til Jordens temperaturstigning, vil denne derfor ikke kunne forklares som et resultat af direkte opvarmning. Det skal sandsynliggøres, at TSI via andre mekanismer end forøget energioptag kan påvirke temperaturen på Jorden med den korrekte størrelsesorden. På den baggrund deler jeg forfatterens opfattelse af, at man bør etablere en langt bedre forståelse af de mulige effekter fra Solen på Jordens temperatur, og at dette bør ske gennem videnskabelige studier af Solens egenskaber og de tidlige variationer.

### CO<sub>2</sub>-fri energi: Energiøer i Nordsøen og atomkraft

Der er vel ikke tvivl om, at den store elektrificering af hele transportsektoren vil være godt for at mindske forureningen fra bilerne i de store byer. Hvorvidt det gavner i problematikken med CO<sub>2</sub>, er ikke indlysende, da det afhænger af hvordan elektriciteten produceres. Så kunne man tro, at man har løsningen gennem vindkraft, men det er ikke givet, hvad jeg vil belyse ved at omtale statens initiativ med energiøer i Nordsøen.

Staten vil bygge energiøer til vindmøller i Nordsøen for 30 mia. kroner, den største investering nogensinde af den danske stat [8]. Senere er det samlede beløb ifølge *Ingeniøren* blevet til 200 mia. kroner! Vil de



give et nettoudbytte for CO<sub>2</sub> regnskabet? Det må man spørge om, fordi vindmøller, opførelse af øerne, kabler dertil, vedligeholdelse og miljørigtig bortskaffelse efter 30 år vil koste enorme mængder fossilt brændstof. Den CO<sub>2</sub>-omkostning må sammenlignes med at producere elektriciteten i konventionelle kraftværker.

Har nogen lavet det regnestykke? Jeg har spurgt sagkyndige ingeniører, som siger nej, og de siger at industrien selvfølgelig ikke laver beregningen uden ordre til det. For industrien er glad for den kæmpeopgave, der ligger i disse energier.

Måske skal der ikke lægges kabler ud til øerne, idet vindkraften fra møller i havet omkring øen eller øerne kan omsættes til brint ved elektrolyse i en fabrik derude. Brinten kan derefter sejles eller sendes i rør til det sted, hvor den skal bruges, dvs. igen omsættes til elektricitet.

Brug af atomkraft til produktion af elektricitet er en oplagt vej til at spare både CO<sub>2</sub> og metan, som er en 80 gange stærkere drivhusgas. Moderne atomkraftværker vil være mere sikre og meget forskellige fra traditionelle atomkraftværker, idet der foregår en udvikling imod anvendelse af grundstof nr. 90, thorium, som ikke giver farlige fissionsprodukter. Imidlertid må der advares mod det store og stadig voksende energiforbrug, fordi dette i sig selv giver en opvarmning, der ikke i samme takt kan udstråles til verdensrummet.

Atomkraft anvendes i mange lande, men er ikke mulig i Danmark efter de trufne politiske beslutninger. Ganske vist giver opførelsen af et atomkraftværk ved brug af fossile brændstoffer hertil en CO<sub>2</sub> mængde, som svarer til det man sparer gennem ti års drift af værket, men et værk har jo en levetid på 40-50 år. Så det skulle vel gå an. Men her er ikke medregnet problemer ved opbevaring og bortskaffelse af de radioaktive affaldsprodukter fra driften. Dette om atomkraft uddybes i [5d].

## Afslutning

Da jeg spurgte den unge pige om klima og sol, havde jeg knap nok tænkt på at skrive herom, det kom først efter en række tilfældige hændelser. Pigen og jeg var gæster ved en fest hos min bror, og efter denne fik jeg kørelejlighed hjem med Niels Wessel, som på turen blev så interesseret i sagen, at han straks skrev til geofysikeren Aksel Walløe Hansen. Jeg hørte et foredrag om Solen af astronomen Hans Kjeldsen, og en snak med ham i pausen førte til et vægtigt indlæg. Opfordringen til at skrive i Kvant kom fra redaktøren Jens Olaf allerede dagen efter festen, idet jeg kort forinden havde sendt materialet til ham efter forslag fra Johan Fynbo. Det har været dejligt at opleve denne spontane interesse.

Min egen vurdering på den lange bane er, at den menneskelige civilisation, som vi kender, kun har et enkelt eller nogle få århundreder tilbage. Hele biosfæren har lidt uopretteligt, skaden på klimaet er så fremskreden, og menneskets ønsker om et bekvemt liv er så stærke, at vi nok ikke på human måde kan hindre en folkevandring fra de varmere fattige egne til de rige land i køligere klima. Vore politiske strukturer magter kun at udskyde katastroferne i nogen tid. Men det er da også vigtigt.

Det er jo ikke kloden, der er i fare, som vi ellers

hører. Planter, dyr og mennesker vil selvfølgelig overleve og tilpasse sig. Det er "kun" den menneskelige civilisation, der snart vil gå under. Problemerne med klima, forurening, menneskesmugling og international kriminalitet vil vokse samtidig med befolkningstallet.

Til disse dystre udsigter må dog føjes, at undergangen ikke nødvendigvis vil blive oplevet af det enkelte menneske som det rene ragnarok og helvede. De fleste mennesker har sociale anlæg, som kan gøre livet værd at leve selv under de værste forhold som i slumkvarterer. Mennesker har disse genetisk betingede anlæg i meget forskellig grad, men de fleste har anlæg, som sætter dem i stand til at leve under slemme forhold som i Venezuela og Nicaragua, hvor ingen regering magter at ordne de økonomiske og sociale forhold på en holdbar måde, hvor kriminalitet dominerer, hvor seks politibetjente i en by kan blive myrdet på en enkelt nat.

Men livet vil ikke bare være *en alles kamp mod alle*, det vil også være *et med hinanden og med omsorg for de svage*. Det er disse sociale anlæg, som det bedste i alle verdens religioner bygger på og appellerer til, lige fra den allerældste religion, Zarathustras lære for tre tusind år siden.

## Litteratur

- [1] O. Humlum og J.-E. Solheim (2021) FNs klimapanel tolker sol- og klimadata feil (3 sider på norsk) og udtalelser hertil (4 sider på engelsk). [www.kvant.dk/KlimaSolWithFinalPubl2021.pdf](http://www.kvant.dk/KlimaSolWithFinalPubl2021.pdf)
- [2] R. Connolly m.fl. (2021) How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate, *Res. Astron. Astrophys.*, bind 21, nr. 6, side 131 (68 sider), [iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131).
- [3] IPCC (2021) The Intergovernmental Panel on Climate Change. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- [4] IPCCs (2017) Rapport AR5 summary. [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5\\_Chapter01\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter01_FINAL.pdf).
- [5] A.W. Hansen (2021) Kommentar til en RAA artikel. [www.kvant.dk/Walloe.pdf](http://www.kvant.dk/Walloe.pdf).
- [6] J.-E. Solheim (2021) Forklaring angående analyse af temperaturer. [www.kvant.dk/Solheim.pdf](http://www.kvant.dk/Solheim.pdf).
- [7] H. Kjeldsen (2021) En kommentar til artikel af Connolly et al. [www.kvant.dk/Kjeldsen.pdf](http://www.kvant.dk/Kjeldsen.pdf).
- [8] F.M. Hansen (2021) Ørsted advarer mod energio: "Vi frygter, det her bliver havvindens IC4-sag", artikel i Ingeniøren: [ing.dk/artikel/oersted-advarer-mod-energie-vi-frygter-her-bliver-havvindens-ic4-sag-242591](https://ing.dk/artikel/oersted-advarer-mod-energie-vi-frygter-her-bliver-havvindens-ic4-sag-242591)



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



# Du er her! – Præcis positionering

Jens Olaf Pepke Pedersen, DTU Space

Nye tjenester fra navigationssatellitter betyder at vi kan bestemme positioner mere og mere præcist. Det kommer til at drive en teknologisk udvikling, der vil forandre vores dagligdag.

Græssende køer og landmænd på markarbejde har altid været en del af det danske kulturlandskab, men i fremtiden skal vi vænne os til, at robotter og droner også vil myldre rundt på markerne. I tre år har en robot således næsten helt alene passet en 18 ha roemark på Møn, hvor den både har sået roerne samt luget mellem rækkerne, indtil roerne kunne høstes.

Roepasseren på Møn er produceret af firmaet FarmDroid i Vejen, og ifølge landmanden Benjamin Christensen ved Stege har robotens indsats betydet, at hans udgift til håndlugning været under 1.000 kr. per ha.

FarmDroid drevet af solenergi og har desuden holdt roemarken fri for ukrudt helt uden sprøjtemidler. Og så kan FarmDroid noget, som landmanden ikke kan, for robotten kan præcist huske, hvor den har sået hvert eneste frø, og derfor kan den begynde at luge før planterne har spiret.



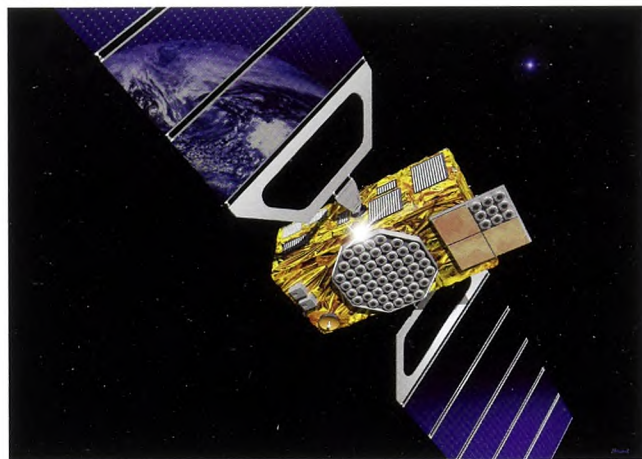
**Figur 1.** Markroboten FarmDroid FD20 vejer 900 kg og har en kapacitet på 20 ha. Tophastigheden er omkring 1 km/t.

## Globale navigationssatellitter

En forudsætning for, at den avancerede teknologi virker, er naturligvis, at robotterne præcist ved, hvor de er, og her er de helt afhængige af de navigationssatellitter, som befinder sig 20.000 km ude i rummet.

De fleste kender navigationssystemet under navnet GPS, som er et amerikansk system, og som også var det første satellitnavigationssystem, men siden er det russiske Glonass og det kinesiske BeiDou-system kommet til, ligesom både Indien og Japan har egne regionale satellitsystemer. Efter en årelang udvikling og en investering på omkring 100 milliarder kroner, har EU også fået sit eget navigationssystem, Galileo. Under et kaldes navigationssatellitterne for GNSS (Global Navigation Satellite System), og det er ved hjælp af dem, at vi med

vores smartphone kan finde ud af, hvor vi er inden for få meter.



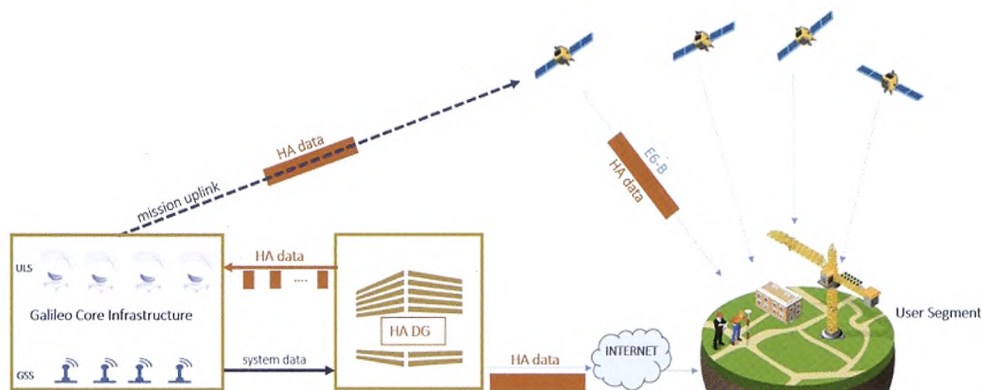
**Figur 2.** Det europæiske Galileosystem består af 24 aktive navigationssatellitter. Den første blev opsendt i 2011 og systemet blev operativt i 2016.

En nøjagtighed på et par meter er naturligvis ikke nok til, at en landbrugsrobot kan holde styr på, hvor de enkelte frø er sået. Præcisionen i GNSS-signalerne er blandt andet bestemt af de forstyrrelser og forvrængninger, som signalerne udsættes for, når de passerer gennem atmosfæren, og derfor benytter robotten private tjenester, der korrigerer fejlene i GNSS-signalerne ved hjælp af et jordbaseret referencesystem. Algoritmerne er komplicerede, men takket være denne teknologi, der kaldes Real Time Kinematic (RTK), kan præcisionen forbedres helt ned til 1–2 cm.

RTK bruges allerede i vidt omfang af landmålere og andre, der har brug for høj præcision, og systemet er også udbredt i landbruget, hvor over halvdelen af landbrugsarealet nu bliver dyrket med maskiner, som traktorer og mejetærskere, der bruger præcisionsstyring.

Tjenesten forudsætter altså, at man er i nærheden af en referencestation, men hvis det ikke er tilfældet, er Precise Point Positioning (PPP) et alternativ. Her genereres korrektionssignalerne fra et globalt netværk af referencestationer og sendes via kommunikationssatellitter eller internettet til modtageren. I princippet kan man med PPP få bestemt sin position ned til en nøjagtighed på 3 cm, men til gengæld har systemet brug for lang tid til at registrere og korrigere signaler fra flere satellitter for de atmosfæriske forhold. Afhængigt af hvor mange satellitter, der er til rådighed, tager det mellem 20 og 40 minutter, hvis positionen skal bestemmes indenfor 10 cm, så det er ikke en teknik, der egnet sig til hurtige maskiner.





**Figur 3.** Galileo-systemelementerne, som er involveret i leveringen af HAS ("High Accuracy Service"). En "High Accuracy Data Generator" (HADG) modtager data fra Galileos jordstationer (GSS) og genererer korrektioner til Galileo og GPS. Korrektionerne med høj nøjagtighed (HA) sendes i realtid gennem Uplink-stationerne (ULS) til Galileo-satellitter, som videresender HA-data til brugerne. HA-data leveres også via et jordbaseret link, som er tilgængeligt for brugerne via internettet.

### HAS og TAPAS – høj præcision

Det er heller ikke helt billigt at bruge RTK- eller PPP-tjenester, men Galileo har i mange år forberedt en ny "High Accuracy Service" (HAS), som bliver stillet gratis til rådighed. HAS-tjenesten fungerer ved, at korrektionerne udsendes fra satellitterne sammen med det egentlige positionssignal. Brugere er således hverken afhængige af, at de skal være på internettet eller i nærheden af en jordstation, ligesom de lynhurtigt kan beregne deres position. Til gengæld er nøjagtigheden på 20–30 cm også noget mindre. Den store fordel med HAS er, at den ikke skal bruge 20 eller 40 minutter, men blot få sekunder til at fastslå positionen. Til mange anvendelser indenfor for eksempel transport og logistik kan denne opløsning imidlertid være tilstrækkelig, og forventningen er også, at opløsningen vil blive bedre i fremtiden i takt med at satellitterne opgraderes og teknologien udvikles.

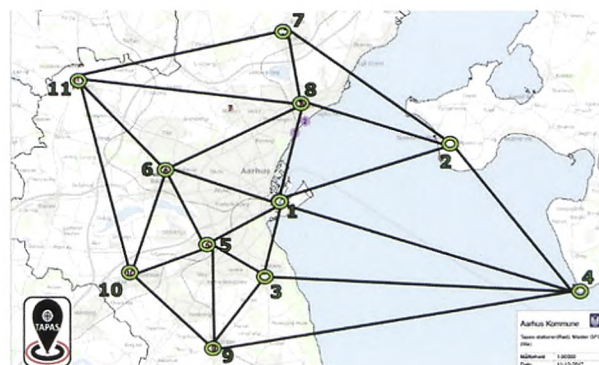
Siden maj måned i år har særlige brugere kunnet eksperimentere med HAS-tjenesten, hvis de har en modtager, der er i stand til at opfange HAS-signalerne. I denne fase vil det europæiske GNSS-agentur, der står bag Galileo, indsamle feedback fra brugerne, og forventningen er, at systemet vil blive åbnet en gang i 2022, mens det først bliver fuldt operationelt i 2024.

I Danmark er det Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering (SDFE), som er ansvarlig for implementeringen af Galileo-systemet. For at teste HAS-tjenesten har styrelsen kunstigt forvrænget signalet til en mark-robot, der var sat til at luge en kartoffelmark, således at den kun kendte sin position inden for en nøjagtighed på 20 cm. Heldigvis viste det sig, at robotten godt kunne passe sit arbejde alligevel.

Til gengæld er der virkelig brug for få centimeters præcision, hvis en robot skal luge omkring et bestemt frø, og det samme er tilfældet, når droner og førerløse biler bliver en del af bybilledet, for de skal også vide, hvor de befinder sig inden for få cm, samtidig med at de bevæger sig ganske hurtigt. Specielt inde i byerne bliver positionsbestemmelsen yderligere udfordret af, at satellitsignalerne også forstyrres af refleksioner fra fx høje bygninger.

For at virksomheder og myndigheder har mulighed

for at afprøve og udvikle deres robotsystemer har SDFE i samarbejde med DTU Space og Aarhus Kommune etableret testplatformen TAPAS, der med jordbaserede målestationer har taget forskud på de muligheder, som kommer med HAS. Systemet består af 11 basestationer, og ved at kombinere satellitdata fra både de europæiske, amerikanske, russiske og kinesiske navigationssatellitter leverer TAPAS nu positionsdata i Aarhus uden forsinkelse, så modtageren kan beregne sin position med en nøjagtighed på ned til 1 cm<sup>3</sup> – også i bevægelse.



**Figur 4.** De 11 referencestationer i TAPAS-platformen er placeret i og omkring Aarhus. Der er kun mellem 4 og 22 km mellem dem. Dermed er det et meget tæt og præcist referencesystem i forhold andre eksisterende systemer. I kombination med data fra Galileo-satellitterne fås derfor en ekstremt præcis positionering.

Når robotterne engang indtager bybilledet, vil de være udstyret med forskellige sensorer som radar og kameraer, så de også kan orientere sig i forhold til omgivelserne. De er derfor ikke nødvendigvis afhængige af et TAPAS-system, men det fungerer som et sikkerhedsnet, så robotter kan afprøves og udvikles i et komplekst bymiljø, som også er et besværligt miljø for satellitsignaler på grund af bygninger.

Danske landmænd har altid været hurtige til at tage ny teknologi til sig, men ser vi mod USA, står landbruget over for en hel high-tech-revolution. Ved at bygge videre på den teknologi, som NASA anvender til deres rovere på Mars, har University of Illinois i Urbana-Champaign således udviklet TerraSentia-robotten, der lynhurtigt kører rundt mellem planterne i marken og



indsamler data om hver enkelt plantes tilstand. Udviklerne forventer, at robotten snart vil være i stand til at måle biomassen samt opdage og identificere plantesygdomme og andre stressfaktorer.



**Figur 5.** TerraSentia-robotten bruger maskinlæring til at identificere planternes egenskaber, såsom deres højde, bredde og bladareal.

Fra luften kan en enkelt præcisionsdrone også overvåge og registrere hver eneste pante, og på en dag kan dronen undersøge flere marker end en landmand ville kunne på et helt år. I kombination med "big data"-analyser af dronens eller robotens datamateriale kan landmanden optimere produktionen ved for eksempel at sprøjte eller tilføre gødning på præcist de steder og på de tidspunkter, hvor der er brug for det. Hvis han har kvæg, kan han med GNSS-sporingsudstyr holde øje med hvert enkelt dyr, dets aktivitet og sundhedstilstand. Udstyret findes naturligvis også allerede i en amerikansk kæledyrsversion, så ejeren kan se, om hunden løber længere væk end den må eller om katten bliver fodret flere steder end derhjemme. De mere avancerede modeller har også en voice-funktion, så man kan tale til sit kæledyr. Det er ikke sikkert, at det kan få dyret til at gå hjem igen, men det betyder nok, at der ikke længere vil være så mange opslag om forsvundne kæledyr i villakvartererne.

Hertil kommer alle de andre anvendelser, hvor man har brug for præcise positions- eller tidsbestemmelser, som i transport, navigation, overvågning, finanstransaktioner, sikkerhed og eftersøgning. Blot for at nævne en mindre, men vigtig anvendelse, så kan alarmcentralerne nu spare vigtige minutter, fordi de automatisk får positionen fra den indbyggede GNSS-modtager i mobiltelefonen – indtil videre dog kun i Android-udgaven.

Det forudsætter alt sammen, at droner og robotter præcist ved, hvor de befinder sig, og dermed, at infrastrukturen i rummet er på plads. Så selvom det kostede 100 mia. kr. at etablere det europæiske Galileo-system, er det en samfundsinvestering, der hurtigt har tjent sig selv hjem igen. I dag understøtter positioneringstjenester næsten 24% af det danske BNP, og ifølge en rapport fra det Europæiske GNSS-Agentur skønnes det globale marked for GNSS-tjenester alene i år at være på over 1.000 mia. kr. Forventningen er, at markedet vil blive mere end fordoblet i løbet af dette årti.

Med den øgede afhængighed af GNSS-systemet stiger imidlertid også behovet for at sikre systemet bedre. Den civile del af GPS-systemet er således ikke beskyttet, og det er derfor muligt at snyde modtagerne

med såkaldt GPS-spoofing til at tro, at de er et andet sted. Da satellitsignalerne er forholdsvis svage, er det ikke så svært at overdøve dem, og under borgerkrigen i Syrien beskyldte Israel således Rusland for at genere flytrafikken i lufrummet omkring Ben Gurion-lufthavnen ved at udsende falske GPS-signaler. Det var dog næppe for at genere israelerne, men snarere fordi russerne ville sløre deres luftbase i Syrien for at forhindre angreb på basen med droner.

Data fra TAPAS-plattformen har også afsløret stigende forstyrrelser af GNSS-systemerne, og mistanken samler sig om GPS-jammere, som lastbilchauffører nemt kan montere og dermed blokere for satellitsignalerne, så lastbilen ikke kan spores, hvilket formodentlig også er chaufførens hensigt [1]. Forstyrrelserne sker nemlig i dagtimerne og især omkring hovedindfaldsvejene og havnen i Aarhus. Det forstyrrer imidlertid også andre brugenes signaler, og i Norge oplever ambulance- og beredskabsmyndigheder stigende problemer med GPS-jamming. I Europa er det i øvrigt forbudt at sælge eller købe jammere, der heller ikke har nogen lovlige anvendelsesområder. De europæiske Galileo-satellitter har nu indlagt en række nye autentifikationstjenester, som gør det mere besværligt at jamme og forstyrre satellitsignalerne.

Spørgsmålet om sikkerhed, databeskyttelse og retten til privatliv bliver også en del af "Tingenes internet" (Internet of Things), som er på vej overalt. Vores mobiltelefon og PC forbindes med flere og flere apparater, som udveksler enorme mængder data til producenter og operatører, som både gør vores dagligdag nemmere og apparaterne smartere, men også registrerer vores færden og adfærd stort set overalt. Det er allerede ti år siden, at der var flere "ting" end mennesker forbundet til nettet, og i dag anslås det, at omkring 50 milliarder apparater er forbundet til nettet. Også her spiller GNSS-systemerne en nøglerolle ved blandt andet at holde styr på, hvor de mange milliarder "ting" befinder sig – eller, hvis de bevæger sig – hvor de er på vej hen.

## Litteratur

- [1] L. Hovgaard (2020) Mystiske GPS-forstyrrelser registreret i Aarhus: Ulovlige jammere under mistanke, *Ingeniøren*, 23. november.
- [2] European GNSS Service Centre: [www.gsc-europa.eu](http://www.gsc-europa.eu).
- [3] Galileo General Introduction (2021) [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_General\\_Introduction](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction)
- [4] Galileo High Accuracy Service (HAS) Info Note (2020) European GNSS Agency.



Jens Olaf Pepke Pedersen er seniorforsker på DTU Space samt medlem af Kvants redaktion. Han forsker i klimaændringer og rumvejr, herunder forstyrrelser af satelliternes positioneringssignaler på grund af rumvejr.



# Kvantemekanisk sammenfiltrering – Bells uligheder

Jan Myrheim, Institutt for Fysikk, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet

Fænomenet kvantemekanisk sammenfiltrering er relateret til kvantemekaniske systemer med flere delsystemer, hvor der sker kobling mellem delsystemerne, selv når de er langt fra hinanden. Den kvantemekaniske baggrund blev beskrevet i første del af artiklen, der blev trykt i Kvant i oktober 2021 [1], mens konsekvenser og eksperimentelle tests omtales i denne del.<sup>1</sup>

## Lokal realisme og skjulte variable

I den første del af denne artikel, der beskrev Bells protonspredningseksperiment, talte vi alene om at måle begge spinkomposanter langs en bestemt akse, som vi kaldte  $z$ -aksen. Vi må nu erindre, at denne akse var valgt tilfældigt, og at der findes uendelig mange retninger (matematisk set ikke-tælleligt mange), som vi kan vælge som  $z$ -akse, før vi måler spinkomposanterne langs den valgte retning.

Uanset hvordan vi vælger  $z$ -aksen, vil vi måle spinkomposanter som ifølge teorien er fuldstændig antikorrelerede. Det er måske ikke indlysende, uden at gå lidt dybere ind i den kvantemekaniske teori for spin. Men en måde at se det på er, at antisymmetrien for spinbølgefunktionen

$$\psi_{\text{spin}}(s_1, s_2) = -\psi_{\text{spin}}(s_2, s_1)$$

gælder uanset retningen af  $z$ -aksen. Det vigtige er, at vi måler spinkomposanten for begge protoner langs samme akse, for så observerer vi altid antikorrelation. Retningen af den fælles akse er ligegyldig.

Hvis vi insisterer på en forklaring, der ikke involverer en spøgelsesagtig fjernpåvirkning, så må vi antage, at når de to protoner støder sammen, fordeler de spinnene  $+$  og  $-$  mellem sig, ikke kun for en enkelt retning, men for alle mulige retninger samtidig. Protonerne kan ikke på forhånd vide, hvilken  $z$ -akse de vil blive målt mod.

Lad nu  $\vec{a}$  være en enhedsvektor. Hver proton må være forberedt på at svare på spørgsmålet, om den har spinkomposant  $+$  eller  $-$  langs denne akse. Den må altså have en huskeseddel med sig, som vi kan kalde  $a$ , hvorpå svaret,  $+$  eller  $-$ , står skrevet. De to protoner må have hver sin huskeseddel  $a$ , fordi de observeres uafhængigt af hinanden, og det, som sker med den ene proton, skal ikke kunne påvirke, hvad der sker med den anden. Fysikken er lokal, i hvert fald kan vi godt lide at tro det.

Og det er ikke nok med én huskeseddel. Hver proton må have uendelig mange huskesedler med sig fra kollisionen, så den er forberedt på at få målt sin spinkomposant langs en hvilken som helst akse. Sådanne huskesedler er fremmedelementer i kvantemekanikken, og derfor kaldes de skjulte variable. Hvis protonernes

adfærd styres af skjulte variable, så er kvantemekanikken en ufuldstændig teori.

Ifølge den ortodokse fortolkning af kvantemekanikken, repræsenteret ved Bohr og Heisenberg, er den imidlertid en fuldstændig teori, som ikke har noget behov for skjulte variable. De er ikke bare overflødige, men de er forbudte, fordi en fysisk størrelse som fx en spinkomposant langs en akse ikke har nogen værdi, før vi måler den. Teorier som postulerer det modsatte, at måleresultater er forhåndsbestemte af skjulte variable, kaldes realistiske. De er realistiske i den forstand, at en måling er en konstatering af et måleresultat, som eksisterer før vi måler. Lidt løst sagt, går realistiske teorier ud fra, at virkeligheden er objektiv og eksisterer uafhængigt af, om vi observerer den eller ej.

Lokalrealistiske teorier begrænser mulighederne, for her antages det, at alle de skjulte variable er lokale. Altså at der ikke findes skjulte variable, som koordinerer resultaterne af samtidige spinmålinger på to forskellige steder.

Det er enkelt at lave en ikke-lokal teori med skjulte variable som reproducerer alle forudsigelserne fra kvantemekanikken. Som John Bell pointerede, er det netop den type modeller vi laver, hver gang vi simulerer et fysikeksperiment med såkaldte Monte Carlo-metoder. Teorien kan være deterministisk, således at sandsynligheder kun optræder, fordi vi ikke har fuldt kendskab til systemets tilstand. Problemet opstår når vi kræver, at alle skjulte variable skal være lokale. Kravet om lokalitet lægger så stærke begrænsninger på hvilke teorier, som er mulige, at man kan bevise, at lokalrealistiske teorier aldrig kan reproducere kvantemekanikken. Forudsigelserne fra sådanne teorier må nemlig opfylde Bells uligheder, og det gør forudsigelserne fra kvantemekanikken ikke altid.

## En simpel teori med skjulte variable

Det kan se ud som om en teori med uendelig mange skjulte variable, eller huskesedler, må blive en alt for kunstig konstruktion. Men det er enkelt nok at finde på en teori, hvor antallet af huskesedler er ganske lille. For eksempel kan vi forestille os, at hver proton blot husker tre tal, nemlig tre spinkomposanter:  $s_x$  langs  $x$ -aksen,  $s_y$  langs  $y$ -aksen og  $s_z$  langs  $z$ -aksen. Altså en

<sup>1</sup>Artiklen er en redigeret udgave af forfatterens artikel i Norsk Fysisk Selskabs tidsskrift "Fra Fysikkens Verden" (FFV) [5]. Bells ulighed og Aspects eksperimenter har også været omtalt i FFV i en artikel af Jon Magne Leinaas i 1989 [6], ligesom Arnt Inge Vistnes har skrevet om sammenfiltrering af fotoner i FFV [7]. Oversat fra norsk af Jens Olaf Pepke Pedersen.



spinvektor

$$\vec{s} = s_x \vec{i} + s_y \vec{j} + s_z \vec{k}. \quad (1)$$

Spinkomposanten langs en akse  $\vec{a}$  er skalarproduktet

$$s_a = \vec{a} \cdot \vec{s} = a_x s_x + a_y s_y + a_z s_z. \quad (2)$$

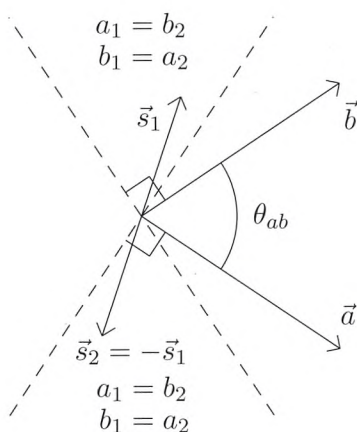
Vi postulerer således, at når vi måler spinkomposanten langs  $\vec{a}$ , så registrerer vores måleapparat blot fortegnet af  $s_a$ , altså  $a = +$  hvis  $s_a > 0$ , eller  $a = -$  hvis  $s_a < 0$ .

Hvis de to protoner har modsatte spinvektorer, altså hvis  $\vec{s}_1 = -\vec{s}_2$ , så forudsiger denne teori antikorrelation for ethvert valg af akse, som er minimumskravet for, at den skal stemme overens med kvantemekanikken og med det, som observeres eksperimentelt.

Denne enkle teori forudsiger også, hvordan samtidige spinmålinger af proton 1 langs en akse  $\vec{a}$  og af proton 2 langs en anden akse  $\vec{b}$  er korrelerede, såfremt retningen til spinvektoren  $\vec{s}_1$  og til spinvektoren  $\vec{s}_2 = -\vec{s}_1$  er uniformt fordelt. Hvis vi projicerer spinvektorene ned på planet, som er udspændt af enhedsvektorene  $\vec{a}$  og  $\vec{b}$ , som illustreret på figur 1, kan vi ræsonnere os frem til sandsynligheden  $P(a_1 = b_2)$  for at fortegnet  $a_1$  til  $\vec{a} \cdot \vec{s}_1$  er det samme som fortegnet  $b_2$  til  $\vec{b} \cdot \vec{s}_2 = -\vec{b} \cdot \vec{s}_1$ . Vi finder at

$$P(a_1 = b_2) = P(b_1 = a_2) = \frac{\theta_{ab}}{\pi}, \quad (3)$$

hvor  $\theta_{ab}$  er vinklen mellem vektorene  $\vec{a}$  og  $\vec{b}$ . Sandsynligheden er 0 hvis  $\vec{a} = \vec{b}$  og 1 hvis  $\vec{a} = -\vec{b}$ .



**Figur 1.** Beregning af sandsynligheden for at  $a_1 = b_2$  i den enkle teori med skjulte variable. At  $a_1 = b_2$  betyder at  $\vec{a} \cdot \vec{s}_1$  og  $\vec{b} \cdot \vec{s}_1 = -\vec{b} \cdot \vec{s}_2$  har modsat fortegn. Altså at  $\vec{s}_1$ , projiceret ned på planet udspændt af  $\vec{a}$  og  $\vec{b}$ , ligger mellem de stiplede linjer på figuren, som er ortogonale på  $\vec{a}$  og  $\vec{b}$ . Vinklen mellem disse linjer er  $\theta_{ab}$ .

Denne forudsigelse stemmer ikke med forudsigelsen fra kvantemekanikken, se ligning (7) nedenfor. De to formler stemmer kun overens i tre specielle tilfælde, nemlig når vinklen  $\theta_{ab}$  er enten  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  eller  $180^\circ$ .

Denne enkle teori er altså ikke holdbar, fordi den ikke stemmer overens med kvantemekanikken og folgelig heller ikke med eksperimenterne. Men den var bare et eksempel, som vi fandt på i farten. Måske kunne vi

finde på en mere kompliceret lokalrealistisk teori som passer bedre?

Det kan vi ikke ifølge John Bell. I alle sådanne teorier må sandsynlighederne nemlig opfylde et sæt uligheder, som ikke er opfyldt i den virkelige verden.

### Bells uligheder

For at udlede et eksempel på en Bellulighed, forestiller vi os, at vi måler spinkomposanterne for hver af de to protoner langs tre forskellige akser. Lad  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  og  $\vec{c}$  være tre forskellige enhedsvektorer, således at vi kan vælge mellem de tre retninger, når vi måler en spinkomposant for den ene eller den anden proton. Ifølge en lokalrealistisk teori må hver proton have tre huskesedler med sig fra kollisionen, nemlig tre skjulte variable  $a, b, c$ .

Hvis vi vælger samme retning for begge protoner, så måler vi altid, at de har modsat spin, uanset om aksen er  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  eller  $\vec{c}$ . Hvis fx proton 1 har  $a_1 = +$ , så må proton 2 have  $a_2 = -$ . For de tre akser findes der otte muligheder for værdierne af de skjulte variable. Hvis fx proton 1 er af typen  $abc = + - -$ , så må proton 2 være af typen  $abc = - + +$ .

Lad  $P$  betegne en sandsynlighed. Antikorrelationen betyder, at vi altid har  $a_1 = -a_2$ ,  $b_1 = -b_2$  og  $c_1 = -c_2$ , altså er

$$P(a_1 = a_2) = P(b_1 = b_2) = P(c_1 = c_2) = 0. \quad (4)$$

Men vi er ikke nødt til at måle begge protoners spin langs samme akse.

Vi kan fx måle spinnene for proton 1 langs  $\vec{a}$ , samtidig med, at vi måler spinnene for proton 2 langs  $\vec{b}$ . Sandsynligheden  $P(a_1 = b_2)$  for at de skjulte variable  $a_1$  og  $b_2$  har samme værdi, må variere på en eller anden måde med retningerne  $\vec{a}$  og  $\vec{b}$ , og siden fysikken er rotationsinvariant, må den være en funktion af vinklen  $\theta_{ab}$  mellem  $\vec{a}$  og  $\vec{b}$ . I grænsetilfældet  $\theta_{ab} = 0$ , som betyder at  $\vec{a} = \vec{b}$ , er spinnene fuldstændig antikorrelerede, det vil sige at

$$P(a_1 = b_2) = P(b_1 = a_2) = 0. \quad (5)$$

Den andre yderlighed er at  $\theta_{ab} = \pi$ , hvilket betyder at  $\vec{b} = -\vec{a}$ . At måle spinkomposanten langs  $-\vec{a}$  er det samme som at måle langs  $\vec{a}$ , blot vil vi få det modsatte resultat. Måler vi den ene proton langs  $\vec{a}$  og den anden langs  $\vec{b} = -\vec{a}$ , vil vi altid få samme resultat, og i så fald er

$$P(a_1 = b_2) = P(b_1 = a_2) = 1. \quad (6)$$

For en vinkel mellem 0 og  $\pi$  må sandsynlighederne ligge mellem 0 og 1. Kvantemekanikken siger, at de afhænger af vinklen ifølge formelen

$$P(a_1 = b_2) = P(b_1 = a_2) = \sin^2\left(\frac{\theta_{ab}}{2}\right). \quad (7)$$

Tilsvarende formler gælder for de andre to kombinationer af akser,  $ac$  og  $bc$ .

Bell viste, at i en lokalrealistisk teori findes der uligheder, som disse sandsynligheder må opfylde, men



som ikke altid opfyldes af de kvantemekaniske sandsynligheder. Et eksempel på en sådan Bellulighed er:

$$P(a_1 = b_2) + P(a_1 = c_2) + P(b_1 = c_2) \leq 2. \quad (8)$$

Den udtaler sig om hvad der sker i tre forskellige situationer. I det første tilfælde måler vi proton 1 langs  $\vec{a}$  og proton 2 langs  $\vec{b}$ . I det andet tilfælde måler vi proton 1 langs  $\vec{a}$  og proton 2 langs  $\vec{c}$ . I tredje tilfælde måler vi proton 1 langs  $\vec{b}$  og proton 2 langs  $\vec{c}$ . Det er vigtigt at understrege, at vi taler om tre forskellige eksperimenter, som ikke kan udføres samtidigt. Vi må først udføre det ene eksperimentet, fx tusinde gange, derefter det andet og så det tredje.

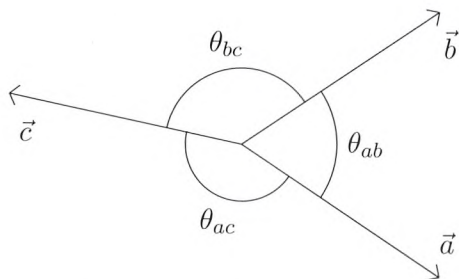
Beviset for uligheden er enkelt. Det er bare at opskrive alle de otte muligheder for de skjulte variable  $abc$  for de to protoner. Vi ser af tabellen nedenfor, at summen på venstre side i ligning (8) aldrig bliver større end 2, uanset hvor ofte eller sjældent hver af de otte muligheder optræder.

### Eksempel og modeksempel

Belluligheden (8) må være opfyldt i den enkle lokal-realistiske teori, vi har konstrueret, hvor sandsynlighederne er givet ved ligning (3). I dette tilfælde er betingelsen, at

$$\theta_{ab} + \theta_{ac} + \theta_{bc} \leq 2\pi, \quad (9)$$

og den er ganske rigtig altid opfyldt. Såfremt de tre enhedsvektorer  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  og  $\vec{c}$  ligger i samme plan som på figur 1, så er denne ulighed faktisk opfyldt som en lighed. Men denne teori var ikke ment som andet end et illustrationseksempel, og vi ved, at den ikke stemmer med eksperimentet.



Figur 2. Tre enhedsvektorer i et plan.

Det interessante er nu at konfrontere uligheden (8) med kvantemekanikken, og til syvende og sidst med

| Proton 1 | Proton 2 | $P(a_1 = b_2)$ | $P(a_1 = c_2)$ | $P(b_1 = c_2)$ | Sum |
|----------|----------|----------------|----------------|----------------|-----|
| +++      | ---      | 0              | 0              | 0              | 0   |
| ++-      | --+      | 0              | 1              | 1              | 2   |
| + - +    | - + -    | 1              | 0              | 1              | 2   |
| + - -    | - + +    | 1              | 1              | 0              | 2   |
| - ++     | + --     | 1              | 1              | 0              | 2   |
| - + -    | + - +    | 1              | 0              | 1              | 2   |
| - - +    | + + -    | 0              | 1              | 1              | 2   |
| - - -    | + + +    | 0              | 0              | 0              | 0   |

eksperimentet. Det er muligt, fordi hver af de tre sandsynligheder er direkte målbare. Den teoretiske formel i ligning (7) indsat i (8) giver uligheden

$$\sin^2\left(\frac{\theta_{ab}}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\theta_{ac}}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\theta_{bc}}{2}\right) \leq 2. \quad (10)$$

Når vi bruger den trigonometriske identitet

$$2 \sin^2\left(\frac{\theta_{ab}}{2}\right) = 1 - \cos \theta_{ab} = 1 - \vec{a} \cdot \vec{b}, \quad (11)$$

kan vi skrive den samme ulighed således:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} + \vec{a} \cdot \vec{c} + \vec{b} \cdot \vec{c} \geq -1. \quad (12)$$

Eftersom

$$(\vec{a} + \vec{b} + \vec{c})^2 = 3 + 2(\vec{a} \cdot \vec{b} + \vec{a} \cdot \vec{c} + \vec{b} \cdot \vec{c}), \quad (13)$$

kan vi også skrive den således:

$$(\vec{a} + \vec{b} + \vec{c})^2 \geq 1. \quad (14)$$

Uligheden (14) er ækvivalent med uligheden (10). De afhænger af, hvordan vi vælger enhedsvektorerne  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  og  $\vec{c}$ , og der er mange valg, som opfylder ulighederne. Hvis vi fx vælger  $\vec{a} = \vec{b} = \vec{c}$ , hvilket vil sige at  $\theta_{ab} = \theta_{ac} = \theta_{bc} = 0$ , så er

$$(\vec{a} + \vec{b} + \vec{c})^2 = (3\vec{a})^2 = 9, \quad (15)$$

og som bekendt er  $9 \geq 1$ . Videre ser vi, at uligheden er opfyldt som en lighed,

$$(\vec{a} + \vec{b} + \vec{c})^2 = 1, \quad (16)$$

såfremt enten  $\vec{a} + \vec{b} = 0$ ,  $\vec{a} + \vec{c} = 0$  eller  $\vec{b} + \vec{c} = 0$ . Altså såfremt vi vælger to af de tre akser til at have modsatte retninger.

Det maksimale brud på Belluligheden får vi, når  $\vec{a} + \vec{b} + \vec{c} = 0$ , hvilket betyder, at de tre enhedsvektorer  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  ligger i et plan, som på figur 2, med tre lige store vinkler,

$$\theta_{ab} = \theta_{ac} = \theta_{bc} = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ. \quad (17)$$

Beviset for Belluligheden (8). Alle otte mulige sæt af værdier for de skjulte variable  $abc$  for begge protoner.



Ulighederne (14) og (10) opstiller således de to umulige krav, at  $0 \geq 1$  og at

$$\frac{9}{4} \leq 2. \quad (18)$$

### Kvantemekanisk sammenfiltrering – hvad gik galt?

Når Belluligheden så tydeligt er i konflikt med eksperimentet, må vi spørge hvor det gik galt i udledningen af den?

#### Lokalitet

Vi gjorde to helt centrale antagelser. Den ene antagelse var, at fysikken skal være lokal. Den er nødvendig, for hvis vi tillader os at lave ikke-lokale teorier, er alt tilladt. Princippet om lokalitet er en del af fundamentet for alle accepterede fysiske teorier. Forkaster vi det, har vi behov for at erstatte det med noget andet, og vi ved ikke rigtig hvad.

Det stærkeste argument for at fastholde antagelsen om lokalitet må være, at vi ikke kender nogen metode til at sende signaler med overlyshastigheder. I en ikke-lokal teori er der ingen særlig grund til, at et signal ikke kan transmitteres øjeblikkeligt med uendelig hastighed. I en lokal teori derimod skal et signal fra et sted A til et andet sted B forplante sig kontinuerligt langs en sammenhængende række af steder hele vejen fra A til B. Når vi tænder en kontakt, og får lys i en pære, så overføres energien gennem et kabel fra kraftværket til elpæren. Ved hvert punkt, hvor signalet passerer, kan det maksimalt bevæge sig med lyshastigheden, og dermed kan gennemsnitshastigheden fra A til B ikke være større end lyshastigheden.

#### Realisme

Den anden centrale antagelse vedrører det store spørgsmål, som Einstein og Bohr diskuterede, om det giver mening at tale om værdien af en fysisk observabel, som vi ikke allerede har målt. Ifølge kvantemekanikken kan vi ikke måle mere end én spinkomponent af en proton, hver gang vi forbereder en proton i en spintilstand. Når vi har udført målingen, har vi ødelagt spintilstanden, og vi kan ikke længere måle på den oprindelige tilstand.

For proton 1 kan vi måle en af spinkomponenterne  $a_1$ ,  $b_1$  eller  $c_1$ , men heller ikke mere end én. Og tilsvarende for proton 2. Vi foretager derfor den tvivlsomme antagelse, at alle tre variable  $a_1$ ,  $b_1$  og  $c_1$  har veldefinerede værdier på samme tid, selvom vi faktisk kun kan måle en af de tre værdier. På samme måde antager vi, at  $a_2$ ,  $b_2$  og  $c_2$  alle har veldefinerede værdier på samme tid.

Hvis vi måler værdien af  $a_1$ , så er det et faktisk måleresultat. Men så antager vi, at der samtidig er veldefinerede værdier for  $b_1$  og  $c_1$ , som ikke er egentlige måleresultater, men som er de værdier, vi ville have målt, hvis vi havde målt dem i stedet for  $a_1$ . Vi antager, at alle værdierne af  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  er bestemt før vi måler og ikke ændrer sig afhængigt af hvilke spinkomponenter af de to protoner vi faktisk vælger at måle.

Dermed tager vi et langt skridt over den grænse, som Bohr og Heisenberg vil forbyde os at krydse. Når vi

kombinerer de to antagelser om lokalitet og realisme, så er Bells ulighed en logisk konsekvens, som modbevises af eksperimentet. Så hvad kan vi lære af det?

### Et kort resume

Hvis vi følger Einstein, Podolsky og Rosen, som argumenterede for en realistisk teori, så kan den ikke være lokal. På den anden side, hvis vi udelukker lokal realisme, altså teorier med lokale skjulte variable, så har vi et problem med at forklare de observerede antikorrelationer uden at postulere en kommunikationsform, der i mange tilfælde nødvendigvis må foregå ved overlyshastigheder. En spøgelsesagtig fjerneffekt med Einsteins ord.

Dermed kommer vi ikke uden om erkendelsen af, at kvantemekanikken faktisk er ikke-lokal på en eller anden måde. Men præcis hvordan? Til dato har ingen opfundet nogen eksperimentel procedure, der udnytter de kvantemekaniske korrelationer til at transmittere information ved overlyshastigheder. Det ser ud til, at kvantemekanikken er lidt ikke-lokal, men ikke så meget, at den giver os mulighed for at sende signaler med overlyshastigheder.

I Bells eksperiment med de to kolliderende protoner ved vi, at bølgefunktionen opfylder Schrödinger-ligningen, som er en differentiaalligning og dermed lokal. Det gælder derfor også for tidsudviklingen af bølgefunktionen fra det tidspunkt, hvor protonerne kolliderer, til de observeres i de to detektorer. Det er altså ikke her, at vi finder oprindelsen til ikke-lokalitet.

Schrödinger-ligningen er imidlertid ikke den eneste form for tidsudvikling af bølgefunktionen ifølge standard kvantemekanik. Når vi måler position og spin af de to protoner, ændrer det deres tilstand. Efter målingen kender vi både position og spin af begge protoner, og så skal vi beskrive tilstanden med en helt ny bølgefunktion. Vi siger, at bølgefunktionen kollapser, når vi måler, og kollapset er en øjeblikkelig og ikke-lokal proces.

Spørgsmålet er så, om et kollaps af bølgefunktionen ændrer selve tilstanden, eller om det blot ændrer vores viden om tilstanden. Hvis tilstanden ændrer sig som følge af målingen, ikke kun ét sted, men flere steder på én gang, så siger sund fornuft, at der er behov for transmission af et signal. Men hvis det eneste, der ændrer sig, er viden om tilstanden hos den person, der foretager målingen, er der ingen signaloverførsel nødvendig.

Det sidste er den situation, der altid gør sig gældende i klassisk fysik. I kvantemekanikken er situationen mere kompliceret, fordi to delsystemer kan korreleres på så mange forskellige måder. Vi observerer forskellige sammenhænge alt efter hvilke målinger, vi foretager. Problemet er, at forskellige observable kan være uforenelige, så en måling af den ene ødelægger målingen af den anden. For eksempel er spinkomponenter for en partikel langs forskellige akser inkompatible observable. Og alligevel er spinkomponenterne af de to protoner i Bells eksperiment, målt langs den samme akse, altid antikorrelerede uafhængigt af akserne.



## Sammenfiltrering

Erwin Schrödinger navngav fænomenet i 1935 i en berømt artikel [4]. Han kaldte det på tysk Verschränkung, som er oversat til entanglement på engelsk og sammenfiltrering på dansk.

Information måles i *bit*, og en bit i en computer kan tage to værdier, 0 eller 1. Den kvantemekaniske version af en bit kaldes en *qubit*. En qubit kan have en værdi på 0 eller 1, men den kan også være i en tilstand, der er en superposition på 0 og 1. En klassisk bit er en diskret variabel, mens tilstanden af en qubit kan variere kontinuerligt.

Spinnet af en partikel med spin  $1/2$ , såsom en proton, er en fysisk repræsentation af en qubit, da spin målt langs en vilkårlig akse kan have to forskellige værdier. En vilkårlig spintilstand for en proton er sådan, at spinnet peger langs en specifik enhedsvektor  $\vec{n}$  i det tredimensionelle rum. Vektoren  $\vec{n}$  er en kontinuert variabel, der entydigt definerer spintilstanden, idet vi i denne tilstand altid finder værdien  $+\hbar/2$ , når vi måler spinkomponenten langs  $\vec{n}$ .

Sammenfiltrering kan også måles og klassificeres i forskellige typer. Spintilstanden af de to protoner i Bells eksperiment, som vi har diskuteret her, er et eksempel på en maksimal sammenfiltret tilstand på to qubits. Der er mange modes af to maksimalt sammenfildrede qubits, og de kaldes generelt for *Bell modes*. Med to qubits er der kun én type sammenfiltrering. Med tre eller flere qubits bliver situationen hurtigt meget mere kompliceret [8, 9].

Uligheder af Bells type involverer altid et sandsynlighedselement, hvilket kan gøre eksperimenterne lidt mindre overbevisende. Det kan altid indvendes, at vi har held eller uheld, hvis Bells uligheder er opfyldte eller ikke opfyldte. Med tre qubits er det muligt at lave et mere overbevisende eksperiment, hvor sandsynligheden er enten 0 eller 100%, så vi ikke længere kan skyde skylden på held eller uheld [10].

En anden generalisering er, at vi kan studere sammenfiltrering mellem to eller flere systemer med mere end to niveauer. En anden komplikation er, at en kvantetilstand studeret i et laboratorium ofte ikke er en ren tilstand, som er den eneste type, vi lærer om i de fleste lærebøger, men det kan være en statistisk fordeling af rene tilstande. I sådan en blandet tilstand blandes klassisk og kvantemekanisk sandsynlighed sammen på en ikke-triviell måde. Det generelle matematiske problem med at bestemme, om en blandet tilstand er sammenfiltret eller ej, har vist sig at være yderst ikke-triviell [11].

Efterhånden har fysikerne lært at se kvantemekanisk sammenfiltrering som mere end et kuriosum. Det er en fysisk ressource, ligesom energi og entropi er ressourcer. Hvis vi har en sammenfiltret kvantemekanisk tilstand, kan vi bruge den til at løse problemer, som vi absolut ikke kan løse ved hjælp af klassisk fysik eller med kvantemekanik uden sammenfiltrering.

For eksempel kan vi bruge sammenfiltrering til at overføre information på måder, der er umulige i klassisk fysik. Et eksempel er, når to personer sidder med deres egen qubit af et par, der er sammenfiltret i en Belltilstand. Så kan den ene overføre to bits information

til den anden kodet ind i sin qubit [12]. Denne metode kaldes tæt kodning. Bemærk at modtageren har brug for begge qubits for at kunne afkode to bits information, og det lyder måske ret normalt. Det specielle er dog, at de to parter kan udveksle den ene qubit, før nogen af dem kender indholdet i den besked, der skal transmitteres. De kan også modtage hver deres qubit fra en tredjepart, som heller ikke kender indholdet i beskeden.

I denne kommunikationsprotokol er det stadig fysiske objekter, såsom fotoner, der fører informationen med sig, og det sikrer, at lysets hastighed er en øvre grænse for signalets hastighed.

## Eksperiment

I sidste ende er det et eksperimentelt spørgsmål om den teoretiske formel (7), som i nogle tilfælde bryder med Belluligheden (8), er korrekt. Det er værd at huske på, at den kvantemekaniske teori, der bruges til at udlede denne formel, er den samme som den, der er verificeret i utallige andre eksperimenter, der ikke adskiller sig fra dette eksperiment på nogen principiel måde.

Hvis de eksperimentelt målte korrelationer skulle vise sig at afvige så meget fra formlen (7), at Bells uligheder er opfyldt, så ville hele konstruktionen af fysiske teorier kollapse, så vi måtte starte forfra. Det er ikke sket, hvis ellers nogen havde frygtet eller håbet, at det ville ske. Eksperimenterne har således ikke rystet kvantemekanikken, og det kommer næppe bag på nogen.

De første eksperimenter blev sammenfattet i 1978 af Clauser og Shimony [13]. De fleste eksperimenter udføres med fotoner i stedet for protoner, fordi måling af en fotons spin er det samme som at måle polarisationen, og det er meget nemmere end at måle en protons spin. De mest berømte eksperimenter blev udført af Alain Aspect og hans samarbejdspartnere i 1982 [14]. De brugte polarisatorer, der skiftede tilfældigt mellem polarisationsretningerne og så hurtigt, at hypotetiske signaler udvekslet mellem de to polarisatorer skulle transmitteres med overlyshastigheder. Reference [15] er et nyere eksperiment fra 2015, som bruger elektronspin.

## Litteratur

- [1] J. Myrheim (2021) Kvantemekanisk sammenfiltrering - baggrund, *Kvant*, bind **32**, nr. 3, side 23.
- [2] J.S. Bell (1964) On the Einstein Podolsky Rosen Paradox, *Physics*, bind **1**, side 195.
- [3] J.S. Bell (1981) Bertlmann's Socks and the Nature of Reality, *Journal de Physique Colloques*, bind **42** (C2), side C2-41–C2-62.
- [4] E. Schrödinger (1935) Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Die Naturwissenschaften*, bind **23**, side 807, 823 og 844. Engelsk oversættelse (1980): *Proceedings of the American Philosophical Society*, bind **124**, side 323.
- [5] J. Myrheim (2019) Kvantemekanisk sammenfiltrering: Del II Bells ulikheder, *Fra Fysikkens Verden*, bind **81**, nr. 2, side 38.
- [6] J.M. Leinaas (1989) EPR-paradokset, Bells teorem og Aspects forsøk, *Fra Fysikkens Verden*, bind **51**, nr. 2, side 36.
- [7] A.I. Vistnes (2008) Sammenfildrede fotoner og erkjennelsesmessige konsekvenser, *Fra Fysikkens Verden*, bind **70**, nr. 3, side 75.



- [8] W. Dür, G. Vidal og J.I. Cirac (2000) Three qubits can be entangled in two inequivalent ways, *Physical Review A*, bind **62**, side 062314.
- [9] F. Verstraete, J. Dehaene, B. De Moor og H. Verschelde (2002) Four qubits can be entangled in nine different ways, *Physical Review A*, bind **65**, side 052112 (2002).
- [10] N.D. Mermin (1990) Quantum mysteries revisited, *American Journal of Physics*, bind **58**, side 731, samt N.D. Mermin (1990) What's wrong with these elements of reality?, *Physics Today*, bind **43**, side 9 (juni 1990).
- [11] L. Gurvits (2004) Classical complexity and quantum entanglement, *Journal of Computer and System Sciences*, bind **69**, side 448.
- [12] C.H. Bennett og S.J. Wiesner (1992) Communication via one- and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states, *Physical Review Letters*, bind **69**, side 2881.
- [13] J.F. Clauser og A. Shimony (1978) Bell's theorem: experimental tests and implications, *Reports on Progress in Physics*, bind **41**, side 1881.
- [14] A. Aspect, J. Dalibard og G. Roger (1982) Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers, *Physical Review Letters*, bind **49**, side 1804.
- [15] B. Hensen m.fl. (2015) Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres, *Nature*, bind **526**, side 682.



Jan Myrheim er professor i fysik ved Norges Teknisk-Naturvidenskabelige Universitet (NTNU) i Trondheim. Han har været ansat ved Universitetet i Oslo og har været stipendiat ved Niels Bohr Institutet (1978–1981) og NORDITA (1981–1983). Siden 1985 har han arbejdet på NTNU.

## Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, *Kvant*

### Nobelprisen i fysik 2021

**KOMPLEKSE SYSTEMER.** Nobelprisen deles igen i år mellem tre forskere, som har forsket i komplekse systemer. Syukuro Manabe fra Princeton Universitetet i USA og Klaus Hasselmann fra Max Planck-Institutet for Meteorologi i Tyskland deler halvdelen, mens Giorgio Parisi fra Roms Sapienza Universitet modtager den anden halvdel.

Nobelprismodtagerne har beskrevet kaotiske systemer, karakteriseret af tilfældigheder og uorden, og forudsagt deres langtidsadfærd. Manabe og Hasselmann har grundlagt vores nuværende viden om Jordens klima og hvordan mennesker påvirker det. Manabe modtager prisen for hans bidrag til vores forståelse af komplekse fysiske systemer og Hasselmann for hans fysiske modellering af Jordens klima og for at forudsige global opvarmning. Parisi modtager prisen for opdagelsen af sammenspillet mellem uorden og fluktuationer i komplekse fysiske systemer, en model der kan bruges fra atomar til planetar skala.

Manabe udviklede i 1960'erne modeller for Jordens klima og han var den første, der udarbejdede en model for energistrømmene gennem atmosfæren, som inkluderede luftmassernes opadgående bevægelser og vandets kredsløb. Manabe demonstrerede desuden, hvordan en fordobling af mængden af CO<sub>2</sub> i atmosfæren fører til en temperaturstigning på 2 grader på Jordens overflade. Gennemsnitstemperaturens reaktion på udledning af CO<sub>2</sub> introducerede Manabe som klimasensitiviteten. Manabe viste, at man kan beregne klimasensitiviteten ved at simulere fortidens klima og se på, hvordan det har ændret sig. Senere forbedrede han modellen ved at inddrage flere faktorer, hvilket ændre-

de klimasensitiviteten til 3 grader. Manabes forskning grundlagde de klimamodeller, som vi bruger i dag.

Omkring 10 år efter udviklede Hasselmann en model, som forbinder vejr og klima, og forklarer, hvorfor klimamodeller kan være troværdige, mens vejret kan virke kaotisk og uforudsigeligt. Vejret er bl.a. påvirket af solstrålingen, som er ujævnt fordelt over Jorden både geografisk og tidsmæssigt. Desuden er Jorden rund og drejer om en tiltet akse, hvilket komplicerer vejrforudsigelser. Vejret er beskrevet af kaosteori (tænk bare på sommerfugleeffekten). Hasselmanns metode gjorde det muligt at forudsige langtidstendenser for klimaet ved at behandle fluktuationer i det daglige, kaotiske vejr som støj. Hasselmann udviklede desuden metoder til at identificere særlige aftryk som både nogle naturlige (fx solstråling og vulkanudbrud) og menneskeskabte fænomener (fx drivhusgasser) sætter på klimaet. Hans metoder er brugt til at bevise at de øgede temperaturer i atmosfæren bl.a. er pga. menneskets udledning af CO<sub>2</sub>.

Omkring år 1980 opdagede Parisi gemte mønstre i uordnede komplekse materialer. Parisi udviklede en model, der kunne forklare hvordan atomer i en type materialer, kaldet spinglasser, orienterer deres spin. I en spinglas er atomer med spin tilfældigt blandet i et gitter af andre atomer. Hvert atom er en magnet med et spin, men atomerne er påvirket af alle magneterne omkring dem og ved ikke hvilken retning, de skal befinde sig i. I en normal magnet peger alle spin i samme retning, men i en spinglas er de frustrerede, og de peger i forskellige retninger.

Parisi demonstrerede, hvordan han med et matematisk trick kunne løse spinglas-problemet. Parisi udviklede fra studierne af spinglasser en teori for uordnede og

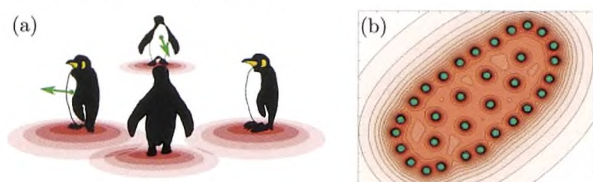


tilfældige fænomener, som kan bruges i mange andre komplekse systemer. Paris' opdagelser er blandt de vigtigste bidrag til teorien om komplekse systemer. De gør det muligt at forstå og beskrive mange forskellige og tilsyneladende helt tilfældige materialer og fænomener ikke kun i fysik men også i andre områder som biologi, matematik, machine learning og neuroscience.

Kilde: Press release: The Nobel Prize in Physics 2021 - NobelPrize.org .

## Kollektiv selvoptimeringsproces hos egoistiske pingviner

**GRUPPEDYNAMIK.** Pingviner i Antarktis ses ofte stående i store grupper for at holde hinanden varme i de ekstremt kolde temperaturer. Dette har forskere fra Heinrich Heine Universitetet i Düsseldorf og TU Darmstadt vist er et optimeringsproblem, da pingvinerne – hvis de står for tæt på hinanden – overopheder, mens de fryser, hvis de står for langt fra hinanden. Hver pingvin prøver derfor at finde sin idealtemperatur, hvor de har en lille afstand til hinanden, men ikke alt for lille, samtidig med at de prøver at optimere den kollektive tilstand, hvor alle pingviner er varme nok, hvilket de gør ved at bevæge sig i retningen af den største temperaturændring.



**Figur 1.** Et eksempel på kollektiv selvoptimering: (a) Pingvinerne er varmekilder, der bevæger sig i retningen af deres idealtemperatur (grøn pil). (b) En næsten opnået kollektiv idealtilstand af 32 pingviner (grønne cirkler), de sorte linjer er isotermer, som viser, at næsten alle pingviner har opnået idealtemperatur.

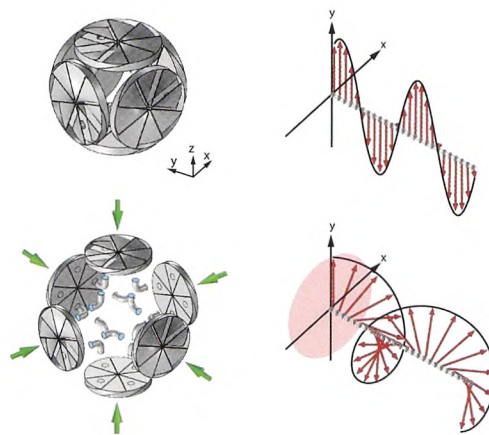
Forskerne har studeret gruppedynamikken af såkaldte “kommunikerende aktive partikler”, som konstant fokuserer på selvoptimering. Forskerne har fundet ud af, at det er den individuelle selvoptimering som skaber en idealtilstand for hele gruppen, hvor alle pingviner har en idealtemperatur. Det vil sige, at pingvinerne ved hele tiden at stræbe efter selv at opnå deres idealtemperatur også hjælper de andre gruppemedlemmer. Forskerne brugte en ny model for aktive kommunikerende partikler, som selv kan ændre retningen af deres bevægelse. Partiklerne kommunikerer med hinanden ved at sanse et skalarfelt, som for pingvinerne for eksempel er et temperaturfelt. Feltet gør at partiklerne bevæger sig i den retning, der er mest favorable for dem for at opnå deres idealtilstand. Forskerne opdagede at vekselvirkningen med feltet førte til “tre-legeme-kræfter” mellem partiklerne. Netop tre-legeme-kræfterne er nøglen til at forstå den kollektive dynamik mellem de kommunikerende aktive partikler. Det interessante ved studiet er, at det ikke er et minimerings problem (hvilket sådanne situationer ofte er) men er et optimeringsproblem. Resultatet er en tilstand, hvori pingviner med få naboer står tættere på hinanden end dem med mange naboer, sådan at alle holdes varme. Konklusionen er derfor at selvom pingvinerne er drevet af deres egen interesse i

selv at opnå en idealtemperatur, opnår hele gruppen en tilstand, der holder alle pingviner varme.

Kilde: Three-body interactions bring egoists into the collective comfort zone – even penguins (phys.org). Collective self-optimization of communicating active particles, PNAS, doi.org/10.1073/pnas.2111142118.

## Transversale lydbølger

**FYSIK.** Fra fysikundervisningen har vi lært, at mens lysbølger er transversale, dvs. at oscillationerne er vinkelret på udbredelsesretningen, så er lydbølger longitudinale dvs. at oscillationerne er parallelle med udbredelsesretningen. Det kan måske være svært at forestille sig at en lydbølge der udbreder sig i et medium, skulle kunne gøre dette som en lysbølge, da der i luft ikke er en forskydningskraft, men det er netop lykkedes forskere fra City University i Hong Kong at vise, at de kan skabe en transversal lydbølge.



**Figur 2.** Figuren illustrerer “meta-atomet” og de transversale lydbølger.

Det er første gang, at en transversal lydbølge er blevet demonstreret. Lydbølgen, som vibrerer vinkelret på udbredelsesretningen, har både spin og orbitalt angulært moment ligesom lysbølger har. Spin-orbit vekselvirkningen eksisterer kun i transversale bølger, da longitudinale bølger ikke har spin.

For at danne en transversal lydbølge kræves som nævnt en forskydningskraft, som er resultatet af modsatte kræfter i et materiale og kun dannes i faste stoffer, og ikke i almindelig luft. Forskerne har skabt syntetiske forskydningskræfter ved at fordele luft i små mængder i resonatorer med snoede indvendige klinger, såkaldte “meta-atomer” (figur 2). Resonatorerne er så små, at deres størrelse er mindre end bølgelængden af lydbølgen. Det er den kollektive bevægelse af meta-atomerne, der skaber en forskydningskraft, som gør det muligt for den transversale lydbølge at bevæge sig inde i metamaterialet. Det er netop forskydningskraften der viser, at metamaterialet opfører sig som et elastisk medie, og derfor understøtter udbredelsen af en transversal lydbølge med spin-orbit vekselvirkning.

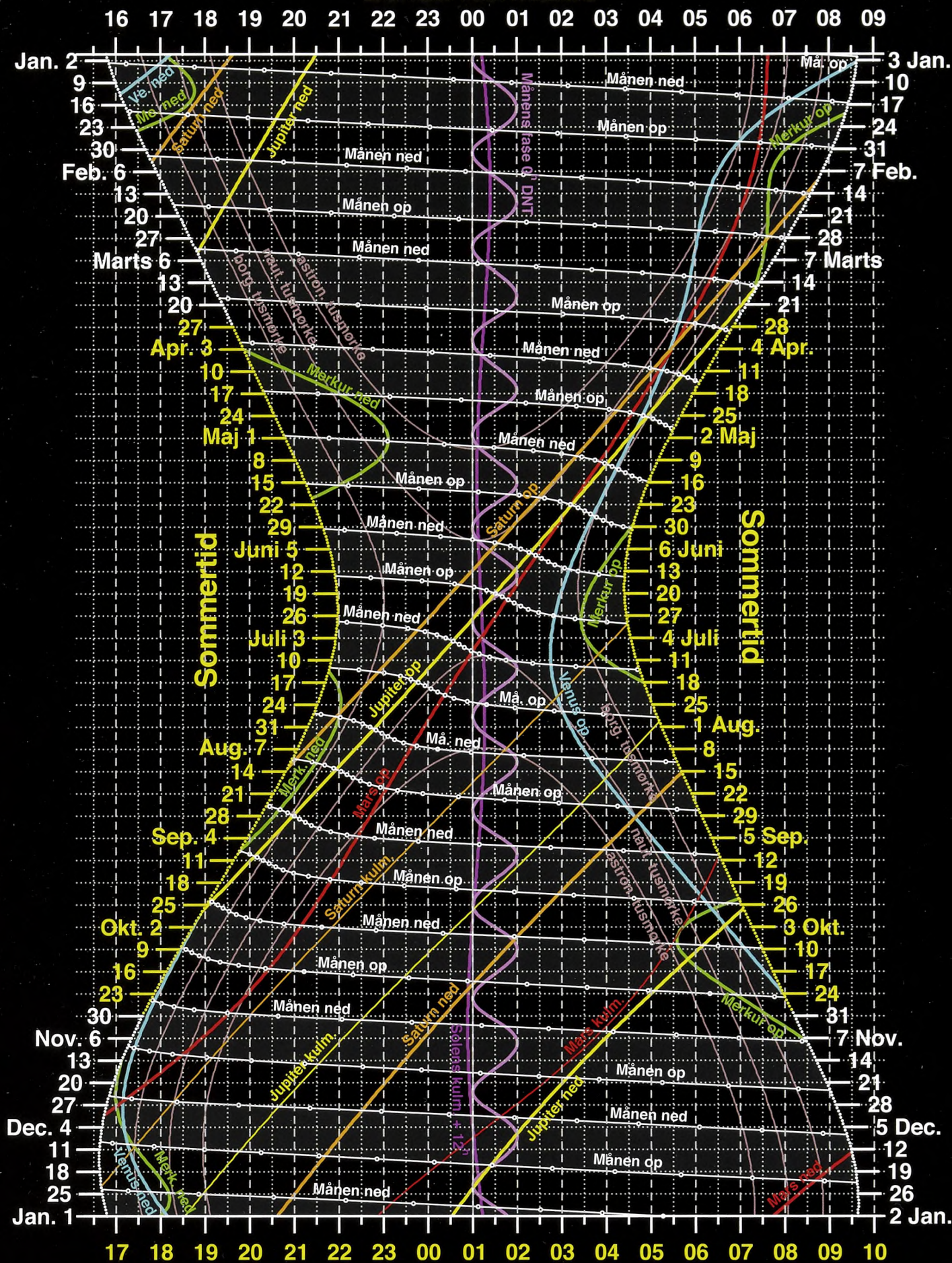
Forskerne forventer, at opdagelsen af transversale lydbølger vil kunne bruges til udvikling af nye anvendelser i akustisk kommunikation og i akustisk billeddannelse.

Kilde: Shubo Wang et al, Spin-orbit interactions of transverse sound, Nature Communications (2021). DOI: 10.1038/s41467-021-26375-9



# Planetkalender for København 2022

## Dansk Normaltid





# Brandslange

## - breddeopgave 94 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC

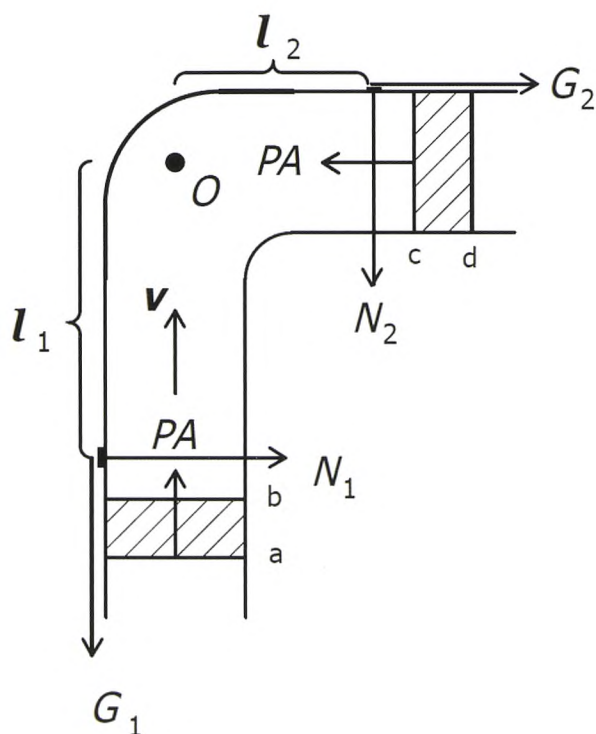
Mit formål med artikelserien om breddeopgaver er – udover at gøre opmærksom på RUCs fysikuddannelse – dobbelt: Dels udvælger jeg opgaverne, så de kan have interesse som fysikproblemer i egen ret. Dels udvælger jeg dem med henblik på at kunne knytte didaktiske overvejelser til dem af interesse for fysikundervisere.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

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 94 i rækken her i Kvant):

### Breddeopgave 94. Brandslange

En brandslange er ført om et hushjørne. Der står en brandmand på hver side af hjørnet. Når vandet strømmer i slangen, skal brandmændene bruge kræfter for at undgå, at den retter sig ud. Hvor mange kræfter skal de bruge? Begrund svaret.

### Løsning



Figur 1. Brandslange om hushjørne set fra oven.

Hvis de to brandmænd står lige langt fra hjørnet kan slangen holdes på plads alene af figurens to normalkræfter  $N_1$  og  $N_2$ . Vi vil anvende mekanikkens bevægelseslove på det afgrænsede system, der består af den markerede vandmængde, der på et tidspunkt befinder sig mellem a og c på figuren, og brandslangen, som antages fri, bortset fra brandmændenes greb i den. Tidsrummet  $dt$  senere befinder den markerede

vandmængde sig mellem b og d, hvorimod slangen ikke har flyttet sig. Kaldes vands massefylde  $\rho$ , tværsnittet af brandslangen  $A$  og vandets strømningshastighed i slangen  $v$ , mindskes volumen af venstre del af den markerede vandmængde på figuren i tidsrummet  $dt$  med  $A v dt$ . I samme tidsrum øges volumen af den øvre del af den markerede vandmængde på figuren med  $A v dt$ . Den tilsvarende masseforskydning er  $\rho A v dt$ . Vores afgrænsede vandmængde henholdsvis mister og øger derfor impulsen  $\rho A v^2$  per tid i de to retninger. Ud over kræfterne fra de to brandmænd leverer trykket  $P$  fra det omgivende vand kraften  $PA$  på vores afgrænsede system i de to retninger, som vist på figuren. Projektionerne i figurens to retninger af Newtons anden lov anvendt på systemet, giver da alt i alt

$$N_1 = \rho A v^2 + PA \quad (1)$$

$$N_2 = \rho A v^2 + PA \quad (2)$$

som svar på opgaven.

At de to brandmænd skal bruge lige mange kræfter, betyder, når de står lige langt fra hjørnet, at det kraftmoment om punktet  $O$  på figuren, de tilsammen leverer på vores afgrænsede vandmængde, er nul. Da trykkræfterne fra det omgivende vand heller ikke leverer noget kraftmoment om  $O$ , er det i overensstemmelse med, at den afgrænsede vandmængdes impulsmoment om  $O$  er konstant nul.

### Kommentar

Brandslange-opgaven er en af de 68 træningsopgaver fra opstarten af "Breddekurset" i 1975 forud for den første eksamen i det i 1976. Jeg tænker, at det var specialtilfældet med en glat brandslange og de to brandmænd placeret i samme afstand fra hjørnet, svarende til ovenstående "løsning", som vi i skydningen har haft i tankerne. Men brandmænd er dårligt stillede ved kun at få anvist denne særlige måde at bruge kræfterne på.

En normal brandslange vil være ru, så brandmændene ud over normalkræfterne  $N_1$  og  $N_2$  også kan påvirke brandslangen med de viste statiske gnidningskræfter  $G_1$  og  $G_2$  på figuren. Så er de mulige størrelser af de involverede kræfter ifølge den klassiske mekanik, jf figuren, generelt båndlagt af ligningerne:

$$N_1 + G_2 = \rho A v^2 + PA \quad (3)$$



$$N_2 + G_1 = \rho A v^2 + P A \quad (4)$$

$$l_1 N_1 = l_2 N_2 \quad (5)$$

Generelt båndlægger den klassiske mekanik altså brandmændenes muligheder for at undgå, at slangen retter sig ud, til at være løsninger for de fire ubekendte  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $G_1$  og  $G_2$  til de tre ligninger (3), (4) og (5).

Antages, som i ovenstående løsning af opgaven,  $l_1 = l_2$ , så er, jf. ligning (5),  $N_1 = N_2$ , og følgelig, jf. (3) og (4),  $G_1 = G_2$ . Ligningerne kan så sammenfattes til den ene:  $N + G = \rho A v^2 + P A$ , med de to ubekendte  $N$  og  $G$ . Det viser, at brandmændene, hvis den statiske gnidningskoefficient er tilstrækkelig stor, lige så vel kan holde slangen på plads med  $N = 0$ , som med  $G = 0$ . Eller en vilkårlig, men ens for de to brandmænd, kombination af  $N$  og  $G$  med værdien  $\rho A v^2 + P A$  sammenlagt.

Antages slangen at være olieret og glat, hvor den ene brandmand griber fat, således at fx  $G_1 = 0$ , har ligningssystemet for vilkårlige værdier af  $l_1$  og  $l_2$  den entydige løsning

$$N_2 = \rho A v^2 + P A \quad (6)$$

$$N_1 = (l_2/l_1)(\rho A v^2 + P A) \quad (7)$$

$$G_2 = (1 - l_2/l_1)(\rho A v^2 + P A). \quad (8)$$

Antages  $G_1 = G_2 = 0$ , fås  $N_1 = N_2$  ifølge (3) og (4) og  $N_1 = (l_2/l_1)N_2$  ifølge (5). Altså en modstrid, medmindre  $l_2 = l_1$ . Da en sådan betingelse kan være svær at opfylde i farten, må der således advares imod for glatte brandslanger.

I almindelighed vil måden, de fire kræfter  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $G_1$  og  $G_2$  opfylder ligningerne (3), (4) og (5) på, være bestemt af, hvordan brandmændene greb fat om brandslangen til en start. I kommentaren til breddeopgave 63, "Bræt imod væg" (Kvant 2015, nr. 1), diskuterede jeg tilfældet, hvor væggen, som brættet er stillet skråt opad, ikke er glat. I modsætning til det ofte forekommende regnestykke i lærebøgerne i fysik, hvor væggen antages glat. Problemet, at finde de virkende kræfter på brættet, når væggen ikke er glat, men ru, er, ligesom her i brandslangetilfældet, underbestemt, klassisk mekanisk set. Hvorimod den noget søgte antagelse om glatte vægge i lærebøgerne giver et entydigt svar. Og det er jo nok grunden til antagelsen.

Videnskabsfilosoffen Kuhn mener, at teoretisk normalvidenskab opererer efter en devise, der med min spidsformulering kunne lyde: Svar haves. Spørgsmål søges. I modsætning til mere praktiske videnskaber: Spørgsmål haves. Svar søges. Hvor teoretisk normalvidenskab ligner manden, der leder efter den tabte gadedørsnøgle under gadelygten, fordi der her er lys, ikke fordi han tabte den der. Hvorimod praktisk orienteret videnskab mere følger sig frem i mørket, hvor nøglen blev tabt. Der er forskel på teoretisk normalvidenskabs teoretiske problemer og praktisk orienteret videnskabs praktiske problemer. Derfor skal der fx mere til at kunne udøve ingeniørvidenskab end fx at kunne anvende fysik. Men alligevel kan fysik, i kraft af teoretisk

overblik, undertiden være til praktisk nytte. Det er således tilfældet her, hvor "svaret" klassisk mekanik sætter fokus på spørgsmålet: Hvor ru skal brandslanger være, for at undgå, at de smutter fra brandmændene, når der lukkes op for vandet?

Som det fremgår, er det med tiden gået op for os, at brandslange-opgaven ville have været for krævende som eksamensopgave. Men vi bruger den i undervisningen.

### Breddeopgave 95. Rutherford spredning

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 2021, nr. 95 i rækken her i Kvant):

*En  $\alpha$ -partikel skydes, som vist på figuren, ind i nærheden af en tung atomkerne. Find ved en dimensionsanalyse den dimensionsløse størrelse, der bestemmer vinklen mellem retningerne, som  $\alpha$ -partiklen bevæger sig i, før og efter afbøjningen ved passagen af atomkernen.*



Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

**PFEIFFER VACUUM**

**Nyhed**

**Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m<sup>3</sup>/t)**  
**Ekstrem lyd- og vibrationssvag**  
**pumpe med kompakt design**



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



# Fremragende formidlere

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) har tildelt Ørstedmedaljer for fremragende formidling til lektor, dr.scient. Anja Skaar Jacobsen fra Københavns VUC, og til lektor, ph.d. Samel Arslanagić fra DTU Elektro.



Figur 1. Anja Skaar Jacobsen.

Anja Skaar Jacobsen har modtaget Ørstedmedaljen i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab. Hun har siden 2014 været ansat på Københavns Voksen Uddannelsescenter (KVUC), hvor hun underviser i fysik og kemi. Anja var tidligere ansat på Ordrup Gymnasium og før da bl.a. ekstern lektor ved Niels Bohr Institutet, hvor hun fortsat er tilknyttet Niels Bohr Arkivet. Anja er en enestående formidler af sine fag, og hun er med sin meget stærke faglighed kombineret med stor integritet og med et tydeligt fokus på de pædagogiske dyder en meget afholdt underviser.

Undervisningen på hold er præget af en tillidsfuld og rar atmosfære, hvor kursisterne føler sig trygge og engagerer sig i den rigt varierede undervisning. Hun inddrager eksperimenter og finder nye måder at lave forsøg på, hun er kreativ og opfindsom. Inden for online-undervisning har Anja Skaar Jacobsen således udviklet undervisningsforløb i læringsplatformen Edapatio.

Undervisningsmaterialet har et meget højt fagligt og pædagogisk niveau, hvilket i øvrigt er afspejlet i alt, hvad Anja foretager sig i undervisningsregi. Det skal også nævnes, at Anja var med til at udvikle de digitale laboratoriekurser i fysik under coronanedlukningerne. KVUC oplever det som et privilegium at have en lærer som Anja Skaar Jacobsen ansat. På et voksenuddannelsescenter kommer mange kursister fra en uddannelsesfremmed baggrund, og Anja bidrager i den grad til at anspore kursisterne til videre uddannelse og er med til at vække deres interesse for de naturvidenskabelige fag.

Anja Skaar Jacobsen havde før sin ansættelse på en ungdomsuddannelse en forskningskarriere inden for videnskabshistorie og er forfatter til adskillige faglitterære bøger. Anja er dermed en unik underviser, der kombinerer en stærk forskningsmæssig baggrund med ønsket om at formidle interessen og begejstringen for fagene til andre.

Uddelingen af bronzemedaljen er støttet af energiselskabet Ørsted, og der medfølger et rejselegat på 25.000 kr. samt 50.000 kr. til et projekt på KVUC.



Figur 2. Samel Arslanagić.

Samel Arslanagić har modtaget en Ørstedmedalje i sølv for hans fremragende formidling af naturvidenskab gennem forskning og undervisning, hans samarbejde med industrien gennem projekter og gæstforelæsnings, samt hans flittige forfatterskab.

Ole Mørk Lauridsen, der er medlem af bedømmelsesudvalget og direktionen for SNU, siger om begrundelsen for uddelingen;

“Samel Arslanagić er først og fremmest en passioneret og engageret underviser og formidler. Dernæst er han en fremragende forsker, hvilket sikrer, at hans undervisning altid er baseret på de nyeste erkendelser inden for elektromagnetismen.

Samel omfavner studerende, internationalt samarbejde og projektarbejde med dansk industri; alt sammen understøttet af en stor publikationsliste, hvorved han på fornemste vis formidler Ørstedes videnskab til gavn for hele samfundet.

Samel står i dag som et fyrtårn inden for formidlingen af den elektromagnetiske videnskab; han er derfor en værdig modtager af H.C. Ørsted sølvmedaljen 2021, helt i H.C. Ørstedes ånd om at udbrede og udnytte videnskaben ude i samfundet.”

Udover at være underviser og forsker er Samel Arslanagić også engageret i industrisamarbejde. Han er konstitueret leder af Sektion for Elektromagnetiske Systemer på DTU Elektro, som huser DTUs kommende Electromagnetic Test Centre (ETC), som åbner i 2022 og vil give blandt andet mobiltelefon- og radarindustrien signifikant bedre muligheder for karakterisering og optimering af antenne- og mikrobølgeforhold i deres produkter.

Uddelingen af sølvmedaljen er støttet af TICRA Fond, og der medfølger et legat på 20.000 kr.

Faste læsere af Kvant vil allerede have stiftet bekendtskab med Anjas og Samels formidlingsevner, da de begge har skrevet flere artikler til Kvant.



# Kommende foredrag

| Dato            | Tid    | Foredragstitel                                                                                                                                                                            | Foredragsholder                      | Forening  |
|-----------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------|
| <b>Jan 2022</b> |        |                                                                                                                                                                                           |                                      |           |
| 25/1            | 15.00  | Længe leve videnskaben                                                                                                                                                                    | Johan Gotthardt Olsen                | SNU       |
|                 | -17.00 | Arr. i Københavns Universitets Festsal                                                                                                                                                    |                                      |           |
| 31/1            | 19.45  | Den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling og rekombinationen                                                                                                                                | Michael Linden-Vørnle                | AS (Aarh) |
| <b>Feb 2022</b> |        |                                                                                                                                                                                           |                                      |           |
| 7/2             | 19.30  | Niels Bohr Institutet, en dynamo for dansk forskning ved CERN                                                                                                                             | John Renner Hansen                   | SNU       |
| 14/2            | 18.15  | Den kosmiske mikrobølgebaggrundstråling og rekombinationen                                                                                                                                | Michael Linden-Vørnle                | AS (Kbh)  |
| 21/2            | 18.15  | Hvad kvasarene fortæller os om stoffet mellem galakserne                                                                                                                                  | Johan Fynbo                          | AS (Kbh)  |
| 28/2            | 19.45  | Hvad kvasarene fortæller os om stoffet mellem galakserne                                                                                                                                  | Johan Fynbo                          | AS (Aarh) |
| 28/2            | 19.30  | Niels Bohr og Risø                                                                                                                                                                        | Jørgen Kjems                         | SNU       |
| <b>Mrs 2022</b> |        |                                                                                                                                                                                           |                                      |           |
| 14/3            | 18.15  | Hvad kvasarene fortæller os om stoffet inde i galakserne                                                                                                                                  | Lise Christensen                     | AS (Kbh)  |
| 21/3            | 19.45  | Hvad kvasarene fortæller os om stoffet inde i galakserne                                                                                                                                  | Lise Christensen                     | AS (Aarh) |
| 21/3            | 19.30  | Einsteins bidrag til kvantemekanikken                                                                                                                                                     | Per Hedegaard                        | SNU       |
| 28/3            | 18.15  | Hurtige radioglimt og hvordan de kan gøre det usynlige ingergalaktiske stof synligt                                                                                                       | Kasper Heintz                        | AS (Kbh)  |
| <b>Apr 2022</b> |        |                                                                                                                                                                                           |                                      |           |
| 2/4             |        | Generalforsamling i Astronomisk Selskab                                                                                                                                                   |                                      |           |
| 4/4             | 19.45  | Hurtige radioglimt og hvordan de kan gøre det usynlige ingergalaktiske stof synligt                                                                                                       | Kasper Heintz                        | AS (Aarh) |
| 4/4             | 19.30  | Sten og skrot fra rummet<br>Efter foredraget afholdes generalforsamling                                                                                                                   | Anja C. Andersen og<br>Henning Haack | SNU       |
| <b>Maj 2022</b> |        |                                                                                                                                                                                           |                                      |           |
| 2/5             | 18.15  | Molekyler i rummet mellem stjernerne                                                                                                                                                      | Liv Hornekær                         | AS (Kbh)  |
| 9/5             | 19.30  | The Copenhagen Spirit: A History of the Niels Bohr Institute (på engelsk)<br>Efter foredraget uddeles H.C. Ørsted-medaljen til en inspirerende grundskolelærer (sammen med Haldor Topsøe) | Christian Joas                       | SNU       |
| 16/5            | 19.45  | Molekyler i rummet mellem stjernerne                                                                                                                                                      | Liv Hornekær                         | AS (Aarh) |
| <b>Nov 2022</b> |        |                                                                                                                                                                                           |                                      |           |
| 15/11           |        | Årsmøde i Dansk Fysisk Selskab                                                                                                                                                            |                                      | DFS       |
| -16/11          |        | på Hotel Nyborg Strand                                                                                                                                                                    |                                      |           |

Vær opmærksom på at datoer og tidspunkter kan ændre sig, og corona-situationen bliver fulgt løbende. Hold øje med opdateringer på foreningernes hjemmeside (foredragene i AS kan også ses på Folkeuniversitetets hjemmeside).

**AS (Kbh):** Astronomisk Selskab, City Campus, 1353 København K ([astronomisk.dk](http://astronomisk.dk)).

**AS (Aarh):** Astronomisk Selskab, Aarhus Universitet, Ny Munkegade 118, 8000 Aarhus C (bygning 1530., lokale G122).

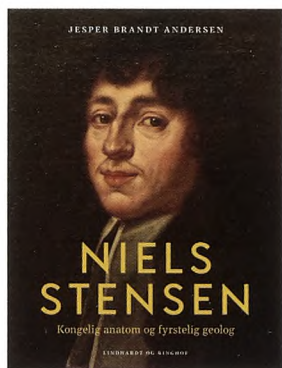
**DFS:** Dansk Fysisk Selskab ([dfs.nbi.dk](http://dfs.nbi.dk)).

**SNU:** Aud. 1, H.C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø ([naturlæren.dk](http://naturlæren.dk), [facebook.com/SNU1824](https://facebook.com/SNU1824)).



# Aktuelle bøger

Jens Olaf Pepke Pedersen, *Kvant*



*Jesper Brandt Andersen, "Niels Stensen. Kongelig anatom og fyrstelig geolog", 2021, Lindhardt og Ringhof, 808 sider, 600 kr.*

Det er en imponerende kraftpræstation, som læge Jesper Brandt Andersen har udført med sin omfattende biografi af Niels Stensen, der hører til blandt Danmarkshistoriens største videnskabsmænd. Med 808 sider, godt 1.800 noter og over 250 illustrationer af malerier, stik, kort og fotos, er der læsestof nok til en mindre ferie, men med en totalvægt på 3,34 kg er det ikke en bog, man lige tager med i håndbagagen på den næste flyrejse.

Det er også en bog, der kommer vidt omkring, hvilket gør den interessant på flere niveauer. De lange udredninger af dissektioner og beskrivelser af kirtler, muskler og menneskets anatomi hører måske ikke til de emner, som den typiske læser af *Kvant* vil finde mest interessante, men Stensen udførte også en så omfattende indsats indenfor geologien, han ligefrem betragtes som dens grundlægger. Bogens fortjeneste er derfor også, at den gør meget ud af at anbringe Stensen i sin samtid med bl.a. en lang introduktion til de videnskabsmænd, som banede vejen for ham, især Tycho Brahe, Thomas og Rasmus Bartholin samt Ole Borch. Der er også gode beskrivelser af datidens vilkår for forskere og universitetsprofessorer.

Bogen starter således med Brahes observation af den nye stjerne i november 1572, hvor Brandt Andersen refererer den britiske historiker David Wootton for at udpege Brahe til at være den moderne videnskabs opfinder, fordi hans opdagelse var startskuddet til den videnskabelige revolution. Brandt Andersen selv mener (måske ikke så overraskende), at andre grene af naturvidenskaben opfylder de samme kriterier, fx den anatomiske videnskab, hvor pioneren var den belgiske anatom og læge Andreas Vesalius.

På Københavns Universitet bliver Stensen vejledt og undervist af professor i medicin og anatomi Thomas Bartholin, der allerede var internationalt berømt for at have opdaget lymfekarrene, der var et helt nyt karsystem i mennesket. Bartholin er også et eksempel på den moderne naturvidenskabsmand, der brugte den empiriske metode og egne iagttagelser i stedet for at bygge på antikkens ofte spekulative teorier.

Professor i medicin og matematik, Rasmus Bartholin, underviste Stensen i filosofi og René Descartes' geometri, hvor Stensen blev indført i matematikkens

rolle som grundlag for al naturvidenskab, mens professor og polyhistoren Ole Borch, underviste ham i kemi og botanik og sørgede for, at Stensen fik læst mere end 100 naturvidenskabelige værker.

København var belejret af svenske tropper da det i begyndelsen af 1660 lykkedes den blot 22-årige Stensen at slippe ud af byen, hvorefter han rejste til Amsterdam og blev gæst hos den medicinske professor Gerard Blasius, der var igang med anatomiske dissektioner. Her gjorde Stensen sig straks bemærket, da han under en dissektion af et fårehoved, opdagede ørespytkirtlens hidtil ukendte udførselsgang i mundhulen. Desværre forsøgte Blasius selv at tage æren for opdagelsen, hvilket førte til en årelang strid, men i dag hedder kanalen, der siden også blev opdaget hos mennesket, *ductus Stenonianus*.

Opholdet i Amsterdam blev indledningen til en særdeles succesfuld videnskabelig karriere. Få år senere beviste Stensen ved at sammenligne menneskets skelet- og hjertemusculatur, at hjertet er en muskel, og at sjælen derfor ikke kunne sidde i hjertet. Han forklarede muskelfibrenes sammentrækning ved hjælp af en geometrisk muskellære, og han var den første, der forklarede, hvordan vi græder. Tidligere mente man, at spytt og tårer blev dannet i hjernen, men Stensen beskrev i 1662 spytkirtler, tårekirtlen og tårekanalen.

Under et senere ophold i Firenze, hvor Stensen fik lejlighed til at dissekere hovedet af en hvidhaj, blev han overbevist om, at de mærkelige tungesten (*glossopetrae*), som blev fundet i store mængder på bl.a. Malta, var forstenede tænder fra en fortidshaj. At de nu blev fundet på landjorden måtte skyldes, at Malta engang havde været dækket af hav, hvilket både stred mod opfattelsen af en uforanderlig jord, og førte Steno ind på geologisk forskning.

Ved feltstudier i Toscana opdagede han nu, at man ved at grave sig ned igennem jordlagene også graver sig tilbage i Jordens historie, idet han påviste, at de geologiske lag er dannet over tid og siden påvirket af naturens kræfter, således at de udgør et arkiv over, hvad der tidligere er sket på Jorden. Han fremsatte teorier for forsteningers og krystallers tilblivelse og vækst, og fremsatte den grundlæggende lov om, at alle krystallers modstående flader er indbyrdes parallelle.

I 1667 konverterede Stensen til katolicismen, og efterhånden optog teologien det meste af hans tid. Efter en præstevieelse i Firenze i 1675 forlod han helt naturvidenskaben.

Men på mindre end ti år gjorde Stensen et stort antal naturvidenskabelige opdagelser, og han har været usædvanligt geni, der var begunstiget med skarpe sanser og analytiske evner, samt drevet af nysgerrighed, flid og vedholdenhed. Ifølge Brandt Andersen var Stensen desuden den rette mand på det rette sted i den rette tid. Han fik imidlertid også god hjælp og økonomisk under-



støttelse via sit samarbejde med Thomas Bartholin, som var en særdeles flittig formidler af naturvidenskabelig forskning, der også promoverede Stensens opdagelser.

Brandt Andersen diskuterer også, hvorfor Stensen opgav videnskaben til fordel for et liv som katolsk præst. Stensen eget svar er, at han gradvist mistede tilliden til de selvgoede naturforskere og i stedet fandt sandheden hos Gud. Det undrer dog Brandt Andersen, for han mener ikke, at katolicismen lagde særlige forhindringer i vejen for naturvidenskaben, der nærmest var uadskillelig med den katolske tro. I stedet skal forklaringen nok findes i Niels Stensens konstante sjælelige uro og rastløshed. Han var slidt op af de krævende dissectioner og det omfattende feltarbejde. I den katolske tro fandt han den ro, han havde ledt efter.



## Vild med viden

Nina Bendixen, Simon Brix, Christian Cherry, Søren Valentin Jacobsen, Jonas Lundin, Morten Lynge og Louise Gade Sig, "Vejr og klima" - en serie i "Vild med Viden", 2021, Forlaget Epsilon, 8 hæfter á 16 sider, 25 kr./stk. Hele serien koster 160 kr.

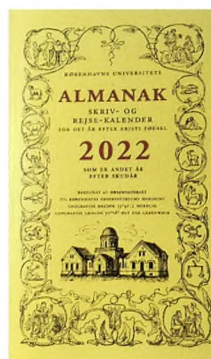
*Vild med viden* er en serie af små fagbøger, der på 16 sider fortæller om et emne. Bøgerne minder meget om Pixibøger og retter sig også mod de yngste læsere, der enten kan læse selv eller få bøgerne læst højt. Bøgerne har været en success, og der er nu udkommet 113 titler, som er solgt i over 200.000 eksemplarer.

Bøgerne er udkommet i serier som fx "Rummet", "Store danskere" og "Landbrugsmaskiner", og nu har forlaget udgivet en serie om "Vejr og klima", som er skrevet af klimajournalister eller vejrværter, der er kendt fra TV eller radio. Det beskedne sidetal og det lille format sætter naturligvis meget snævre grænser for, hvor langt forfatterne kan nå omkring deres emner, men det lykkes fint at få formidlet det vigtigste om emnerne og på en seriøs måde. Der er gode tegninger og billeder, og børn er heldigvis nysgerrige, så bøgernes værdi er især at vække børnenes interesse og som en indgang til fordybelse.

Mærkværdigvis er der ikke megen hjælp at hente til fordybelsen i hæfterne selv, der alle ender med en opfordring til børnene om at få mere viden ved søge på ordet "klima" på [experimentarium.dk](http://experimentarium.dk) og [okolariat.dk](http://okolariat.dk). Man kan godt mistænke forlaget for ikke selv at forsøgt, for Experimentariums hjemmeside har ganske vist flere artikler om klima, men der er ikke meget for børn,

og en søgning på Økolariatet giver en helt uoverskuelig og tilfældig samling artikler, hvoraf den første handler om Transport- og energiminister Flemming Hansens besøg i 2007. Bruger man Økolariets menu om klima er mulighederne til gengæld overskuelige, for her har børnenetre kun tre valgmuligheder, nemlig at søge viden enten i Vejle Kommunes klimaplan, en dokumentsamling om danske klimaindsatser eller et 42-siders resume på engelsk af FNs seneste klimarapport.

Bøgerne fungerer nok bedst i folkeskolen, hvor de kan indgå i et undervisningsforløb eller måske som frilæsning. Til nogle af de tidligere serier har forlaget udarbejdet omfattende lærervejledninger, og det har man valgt ikke at gøre denne gang. Der er til gengæld ingen mangel på lærervejledninger til undervisning i klima, så her er folkeskolen allerede dækket godt ind.



"Københavns Universitets Almanak Skriv- og Rejsekalender 2022", Forlaget Almanak, 164 sider, 190 kr.

## Vild med kalenderen

Lige siden oprettelsen i 1479 har det været pålagt Københavns Universitet eller nogle af professorerne at udgive en almanak, så Almanakken mener selv, at den er den ældste danske publikation, der stadig udgives hvert år. For faste læsere af almanakken er der gensyn med et væld af mere eller mindre nyttige oplysninger om farvandsafmærkninger og højvandstabellen for London Bridge (hvorfra man ved hjælp af højvandskonstanter kan beregne lokalt højvande i flere vesteuropæiske havne), stjernekort, mål og vægt samt datoer for årets dyrskuer og hestemarkeder. Almanakken har naturligvis også en detaljeret kalender med dagens navn, Solen og planeternes op- og nedgangstider samt deklination. Mine kolleger fra DTU Space har produceret magnetiske misvisningskort for hele kongeriget for 2022, og har endda fået med, at deres seneste magnetiske feltstation blev installeret i efteråret i den lille østgrønlandske by Kulusuk.

Finn Aaserud har skrevet to af årets tre artikler, hvor den ene handler om Niels Bohr og hans nobelpris i 1922, mens den anden handler om hans brevveksling med hans forlovede Margrethe Nørlund. Den sidste artikel vil være Kvants læsere bekendt, idet den blev bragt i Kvants temanummer om kvantemekanik i juni måned. Desuden er der en kort artikel om Ole Rømers Triduum, hvor han over blot tre døgn i oktober 1706 foretog 253 observationer af 88 stjerner samt Solen, Månen og planeterne. Det lyder måske ikke af meget, men lige netop Rømers omhyggelige og systematiske observationer kom til at spille en afgørende rolle for studierne af stjerners bevægelser og dermed for astronomiens historie.



# Kometernes og naturvidenskabens jul

Jens Olaf Pepke Pedersen, Kvant

TV2s familiejulekalender er i år produceret af Nordisk Film i samarbejde med Niels Bohr Institutet, og er et Science Fiction-eventyr med mange naturvidenskabelige indslag.

Historien begynder fredeligt, hvor de fire børn, Mie, Johannes, Noor og Elias, skal deltage i en to-ugers AstroCamp. Allerede den første dag på campen går det imidlertid galt under et introduktionsløb. Børnene forvilder sig ind i et laboratorium, der huser en gammel maskine, som Mie og Johannes går ind i, hvorefter de pludselig forsvinder.

Det viser sig, at de er blevet teleporteret til den fjerne Planet 9, hvor de er blevet syv år ældre og holdes fanget af planetens lådne beboere. Imens går den vilde jagt på at få dem tilbage i en nervepirrende kamp med tiden og den udspekulerede forretningsmand Viggo V (Kurt Ravn), der har udviklet den poulære FlyPhone, der aldrig løber tør for strøm.

Noor og Elias får hjælp fra den noget distræte fysiklærer Panda-Søren (Martin Greis-Rosenthal), der ikke har særlige pædagogiske evner, og den unge lidt verdensfjerne forsker Anna (Molly Egelind). Samtidig skal de forsøge at skjule, hvad der er sket for forældrene og AstroCampens leder (Søs Egelind), og forviklingerne bliver ikke mindre, da Tanja, som er en nysgerrig beboer fra Planet 9, kommer ned til Jorden, hvor hun må holdes skjult. Når dette læses er det forhåbentlig lykkedes at få alle hjem igen til deres rette planet.



En magisk portal er ikke ligefrem nyt i børnefortællinger, og der er også mange velkendte elementer i historien, hvor Tanja minder en del om ET, der også skal hjem igen, ligesom den kiksede fysiklærer Panda-Søren, også er set før.

Men det er en glimrende ide at kombinere naturvidenskab og underholdning, og ikke så

lidt af et scoop, at det er blevet et tema for en julekalender, som traditionelt bliver set af rigtig mange. Der er samtidig etableret et "Universet Udenom", hvor der parallelt med julekalenderen offentliggøres film, programmer og meget mere om naturvidenskaben i julekalenderen ([www.videnskabsår22.dk/universet-udenom](http://www.videnskabsår22.dk/universet-udenom)).

Bedre optakt til det nationale Videnskabsår22 kan man vist ikke ønske sig.



En pudsig detalje er, at TV2 for nylig afslørede, at Panda-Søren er inspireret af manuskriptforfatterens egen fysiklærer, Søren Hansen, der er lærer på Ribe Katedralskole. Han fik allerede sit tilnavn i 1980'erne på grund af sin karakteristiske pandasweater, som hans hustru nu har strikket seks stykker af i takt med, at de er blevet udtjente. Efter det oplyste er det dog kun sweateren og øgenavnet, der har inspireret til filmfiguren.

Vi kan også nu afsløre, at Nordisk Film inden optagelserne gik i gang bestilte de seneste tre årgange af Kvant, men om de er blevet læst af filmholdet eller brugt som rekvisitter, er endnu ikke opklaret. Men Kvant passer naturligvis altid ind sammen med en god naturvidenskabelig julehistorie.

"Kometernes Jul" har manuskript af Jenny Lund Madsen og er instrueret af Ask Hasselbalch. Medvirkende: Bertil Karlshøj Smith, Oscar Dietz, Alice Finn Caspersen, Shireen Rasool m.fl. Serien kan ses på TV2 Play.