

KVANT Juni 2025 2

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 36. årgang

- KVANTEMEKANISK SOCIALVIDENSKAB
- MINDEORD FOR JENS HØJGAARD JENSEN
- STOR-SKALA ELEKTROLYSETEKNOLOGIER
- HURTIGERE END LYSET • HEVESY OG NUKLEARMEDICINEN
- HYPERSONISKE MISSILER • MARS' FORTID GENNEM 3D-MINERALKORTLÆGNING

Løssalgpris: 60 kr.

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : www.kvant.dk

E-mail : kvant@kvant.dk

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

ISSN (trykt) : 0905-8893

ISSN (web) : 2245-4942

Udgives af

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

Redaktion

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

Abonnementspris : 190 kr./år.

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

Abonnement tegnes på www.kvant.dk.

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

Annoncepriser

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

1/4 side: 1600 kr.

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

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.
Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 3-2025 udkommer ca. 15. september

Nr. 4-2025 udkommer ca. 15. december

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

Indhold:

Hurtigere end lyset?

Helge Kragh 3

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Cecilie Pedersen 6

Kvantemekanisk socialvidenskab

Rasmus Jakobsen 8

Hevesy og nuklearmedicinen

Liselotte Højgaard 12

KIF-Prisen 2025 går til Carolina von Essen

Maren Mallings 19

Skalering af fastoxid-elektrolyse- og brændselscelle-systemer til stor-
skala elektrolyseteknologier

Anne Lyck Smitschuysen 20

Hypersoniske missiler – En ny udfordring for radarer

Peter Lysdahl Bæk 23

Nyt fra Astronomisk Selskab 24

Gnidningsvarme fra rotation – breddeopgave 115 med didaktisk kom-
mentar

Jens Højgaard Jensen 25

Black Beauty – Et blik ind i Mars' fortid gennem 3D-mineralkort-
lægning

Martin Sæbye Carøe 27

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson 28

Atomtid er nu indført

Leif Kahl Kristensen 31

Kommende foredrag 32

Inge Lehmann som tegneserie

Michael Cramer Andersen 33

Livets gåde

Finn Berg Rasmussen 34

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Maren Mallings 35

Mindeord for Jens Højgaard Jensen

Kristine Niss og Jeppe Dyre Bagsiden



Forsidebilledet er taget af James Webb-
rumteleskopet, og viser en interstellar jet,
der bliver udslynget af et stjernesystem,
der netop er ved at dannes, og er kata-
logiseret som Herbig-Haro 49 (HH 49).
Stjernesystemet er ikke synligt, men lig-
ger uden for billedet nederst til højre. De
hurtige jetpartikler rammer det omgIVEN-
de interstellare gas og danner chokbølger,
som lyser kraftigt i infrarødt lys – her vist
som rødbrune bånd. For enden af HH 49
ligger en spiralgalakse.

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

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

Hurtigere end lyset?

Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Som først vist af en ukendt ukrainsk fysiker i 1923, er overlyshastighed ikke uforenelig med relativitetsteorien. Hvem var denne fysiker og hvorfor blev han udrenset af historien for først langt senere at dukke op til overfladen?

Lysets hastighed i vakuum c hører til den eksklusive kreds af fysikkens fundamentale naturkonstanter. Traditionelt var der tale om en målelig størrelse, men siden 1983 har den været konventionel, nemlig *defineret* som præcist $c = 299\,792,458$ km/s. Ikke blot er lysets hastighed uafhængig af lysgiverens bevægelsestilstand, den udtrykker også den maksimale hastighed for ethvert legeme eller fysisk signal af nogen art. Før relativitetsteorien kunne man forestille sig, at fx tyngdekraften udbredte sig langt hurtigere end lyset, sådan som Pierre-Simon Laplace hævdede i slutningen af 1700-tallet. Hundrede år senere arbejdede Arnold Sommerfeld i Tyskland seriøst med modeller af elektronen der tillod "superluminale" hastigheder – på tysk *Überlichtgeschwindigkeit*. Men med accepten af Einsteins specielle relativitetsteori omkring 1910 blev den slags objekter henvist til fantasiens verden.

Først i 1960'erne viste en gruppe af fysikere, at relativitetsteorien faktisk ikke udelukker partikler med overlyshastighed (tachyoner) som teoretiske og muligvis endda virkelige objekter. Omtrent samme erkendelse var dog blevet gjort langt tidligere, nemlig af den russisk-ukrainske fysiker Lev Strum (eller Shtrum) i en artikel fra 1923. Strum har en ejendommelig position i fysikhistorien, idet han og hans arbejder indtil for nylig ikke blot er blevet oversat men helt og aldeles glemte. Jeg var måske den første til at henvise til ham i vestlig videnskabshistorie, og det var først i en bog fra 2011 [1, s. 298].

Når Strum blev udrenset af historien skyldtes det de særlige politiske omstændigheder, han som borger i Sovjetunionen levede i. Han blev nemlig henrettet under Stalintidens terrorregime og dermed erklæret ikke-eksisterende. Når han i dag trods alt er genopstået fra de dødes rige, skyldes det hovedsageligt, at han inkognito optræder i en berømt roman skrevet af en russisk forfatter. På denne måde er en episode i relativitetsteoriens historie vævet sammen med både den moderne litteraturhistorie og fortidens politiske historie.

Einsteins umulighed

I sin skelsættende artikel i *Annalen der Physik* fra 1905 viste Einstein, at massen af et legeme vokser med dets hastighed som

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1)$$

hvor m_0 er hvilemassen. For $v > c$ bliver massen formelt imaginær ($m^2 < 0$) og dermed ufysisk. Det var et

stærkt argument imod overlyshastighed men begrænset til massive legemer. Et andet og noget stærkere argument var den lov om sammensætning af hastigheder, Einstein også udledte i 1905. For to hastigheder v_1 og v_2 bliver summen ikke den newtonske $w = v_1 + v_2$, men

$$w = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2 / c^2} \quad (2)$$

Selv for en foton udsendt fra en foton ($v_1 = v_2 = c$) bliver resultatet $w = c$ og ikke $w > c$. Einstein dømte altså den "meningsløse" overlyshastighed ude og to år senere supplerede han med et tankeeksperiment. Som han viste, så vil et signal sendt med overlyshastighed muliggøre, at virkningen af en årsag kommer før årsagen selv! Altså et brud på den fundamentale årsagssætning eller, anderledes udtrykt, en omvendning af tidens retning. Dette var nok logisk muligt, mente Einstein, "men det er i så fuldstændig modstrid med al erfaring, at det er et tilstrækkeligt bevis for umuligheden af denne antagelse [om overlyshastighed]" [2].

I den senere litteratur bliver Einsteins tankeeksperiment fra 1907 ofte omtalt som "Tolmans paradoks", der henviser til den amerikanske fysiker og kemiker Richard Tolman som i 1917 gav en mere udførlig fremsstilling af det sære forhold mellem overlyshastighed, årsagssætning og tidens retning. Nogle få år senere blev forholdet så illustreret poetisk af den canadiske botaniker Arthur Buller i en velkendt limerick. Som verset lyder i den original version fra 1923:

There was a young lady named Bright
Whose speed was far faster than light.
She set out one day
In a relative way
And returned home the previous night.

Fysikerne blev hurtigt enige om, at signaler med overlyshastighed ikke hører til virkelighedens verden og derfor kunne ignoreres. Som det fremgår af næsten alle senere lærebøger om relativitetsteori blev det opfattet som et ubetvivleligt faktum. Som et eksempel blandt mange kan nævnes Christian Møllers autoritative lærebog fra 1952, hvori der konkluderes: "Det er indlysende, at der i naturen ikke findes signaler som bevæger sig med en hastighed større end lysets" [3, s. 53]. Møller fremhævede Tolmans paradoks som det endegyldige bevis.

Teorien om tachyoner

Først i midten af 1960'erne blev der sat alvorligt spørgsmålstegn ved den dogmatiske udelukkelse af partikler eller signaler med større hastighed end lyset. Sådanne hypotetiske partikler blev oprindeligt kaldt "metapartikler", men blev snart kendte som *tachyoner*, et navn foreslået i 1967 af den amerikanske fysiker Gerald Feinberg. Navnet er afledt af det græske $\tau α χ ύ ς$ (tachys) for hurtig. Først fra samme tid blev det latinsk inspirerede adjektiv *superluminal* en del af det engelske sprog.

Som Feinberg og andre fysikere viste, var tachyoner mulige objekter såfremt de altid bevæger sig superluminalt, altså med $v > c$. Lige så lidt som en almindelig partikel kan accelereres gennem lysmuren $v = c$, kan en tachyon decelereres gennem denne mur eller grænse. Det afgørende er, at hypotesen om tachyoner er konsistent med den specielle relativitetsteori, modsat af hvad Einstein og hans samtidige mente. Det stod dog hurtigt klart, at hvis tachyoner er andet end hjernespind, må de have højst ejendommelige egenskaber. Mens en almindelig partikel bevæger sig langsomt, når dens energi formindskes, er det lige omvendt med tachyoner: De bevæger sig hurtigere, des mindre energien er. Som det kræver uendelig megen energi til at accelerere en partikel til $v = c$, således kræver det uendelig energi for at nedbringe en tachyons hastighed til samme værdi.

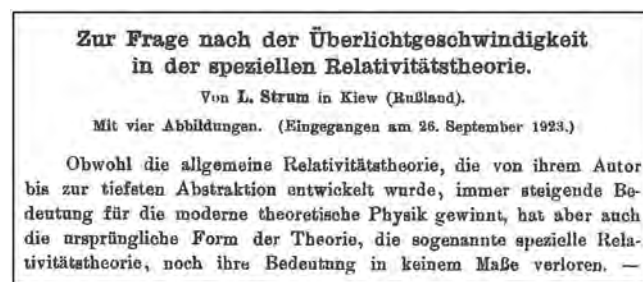
Hvad mere er, tachyoners masse er imaginær og derfor ikke direkte målelig, hvilket dog ikke udelukker, at de indirekte kan påvises via den såkaldte Cherenkov-stråling. Desuden er der problemet med Tolmans paradoks, hvor en tachyon med negativ energi rejser tilbage i tiden og hvor et tachyonisk signal modtages, før det bliver afsendt. Dette problem mente man at kunne afmontere ved at fortolke hændelsen i forlænstid som absorption af en tachyon med positiv energi. Ved at bytte om på begreberne emission og absorption ombyttes den kausale orden. Fysikere og filosoffer taler om et "reinterpreationsprincip".

I den 20-årig periode fra 1962 til 1981 tiltrak tachyoner sig stor interesse med adskillige forsøg på at detektere de mærkelige partikler. Der blev skrevet omkring 600 videnskabelige artikler inden for området. Men alle forsøg på at påvise tachyoner mislykkedes og da det tilmed viste sig umuligt at beskrive dem inden for kvantemekanikkens rammer, kølnedes interessen. Man kan stadig finde artikler om tachyoner, men i dag bliver partikler med overlyshastighed ikke længere taget alvorligt. Så Einstein havde alligevel ret, i det mindste i en vis forstand.

Et glemt bidrag fra 1923

Ingen af de fysikere, der i 1960'erne og 1970'erne beskæftigede sig med tachyoner, var opmærksomme på en artikel fra 1923 i det anerkendte tidsskrift *Zeitschrift für Physik*, der på væsentlige områder foregreb den senere tachyonfysik [4] (figur 1). Den obskure forfatter var en vis L. Strum fra Kyiv (Kiev) i Ukraine, der dengang var en del af Sovjetunionen. Hans fulde navn var Lev Yakovlevich Strum og han var dengang en 33-årig fysiker ved det polytekniske institut i Ukraines

hovedstad.



Figur 1. Indledningen til Strums 1923-artikel om overlyshastighed.

Efter en kritisk analyse af de velkendte argumenter imod overlyshastighed sluttede Strum, at signaler med $v > c$ hverken stred imod den specielle relativitetsteori eller årsagsloven. Det var muligt, viste han, at fortolke negativ tid og energi som positive størrelser inden for relativitetsteoriens rammer. Strum illustrerede sine pointer ud fra et Minkowski-rum-tids-diagram, hvor han placerede de superluminal signalere uden for lyskeglen givet ved $v = c$. Dette område "svarer til hastigheder større end lysets og for sådanne hastigheder kan tidens retning under visse omstændigheder være modsat den normale tidsretning." Uden at gå nærmere ind på Strums analyse, så indeholdt den mange af de indsigter, som Feinberg og andre fysikere nåede frem til mere end 40 år senere.

Alligevel er det en overdrivelse, når det hævdes, at han indførte begrebet om tachyoner *avant le mot* [5]. Strum begrænsede nemlig sin analyse til superluminal signalere, mens han ikke tog muligheden af massive hypotetiske partikler med overlyshastighed i betragtning. Hans ærinde med artiklen var alene at korrigere en misforståelse omkring den specielle relativitetsteoris forhold til signaler med overlyshastighed. Hvorvidt sådanne signaler hørte til den fysiske virkelighed, tog han ikke stilling til. Som han anførte i en fodnote, så handlede hans analyse "ikke om den virkelige eksistens af sådanne hastigheder [$v > c$] men kun om, at de er teoretisk mulige."

Man kunne tro, at Strums korrektion af Einsteins forståelse af den specielle relativitetsteori vakte opmærksomhed i datiden, men det var på ingen måde tilfældet. Hvis antallet af citationer er et mål for synlighed (og det er det vel), så var hans artikel fra 1923 nærmest usynlig. Jeg har kun fundet en enkelt reference til artiklen og den stammer fra Strum selv. Det er ikke helt klart, hvorfor hans bidrag blev ignoreret, men en væsentlig årsag er nok, at i 1920'erne var al interesse om relativitetsteorien fokuseret på Einsteins generelle gravitationsteori. Den specielle teori var forlængst accepteret og ikke længere et anerkendt forskningsområde.

I øvrigt var Strum ikke den eneste, der rejste tvivl om den einsteinske umulighed. Det samme gjorde en østrigsk fysiker ved navn Robert Bass, der i 1926 i al væsentlighed gentog Strums argument for overlyshastighed inden for relativitetsteoriens rammer. Bass var lige så klar i spyttet som hans ukrainske kollega: "Der er ingen fysiske grunde til at antage, at lysets hastighed

er en øvre grænse for udbredelsen af signaler ... Indtil videre kan muligheden af superluminale signaler ikke klart tilbagevises" [6].

Lev Strum, et offer for Stalins terror

Strum, der i 1932 avancerede til et professorat i teoretisk fysik ved universitetet i Kyiv, var en respekteret og end noget perifer skikkelse i det russiske fysikermiljø (figur 2). I 1929 deltog han i en vigtig konference i Kharkiv sammen med bedre kendte fysikere som George Gamow, Lev Landau og Yakov Frenkel. Fra Tyskland deltog kvantefysikerne Pascual Jordan og Walter Heitler. Fem år senere mødte han Niels Bohr, der var inviteret til en konference også i Kharkiv og hvor Strum talte om atomkernens opbygning. Efter alt at dømme fik han aldrig tilladelse til at rejse uden for Sovjetunionens grænser, men han publicerede flere af sine afhandlinger i vestlige tidsskrifter som det tyske *Zeitschrift für Physik* og det engelske *Nature*. Disse forskningsbidrag dækkede kvanteteori, statistisk mekanik, relativitetsteori og kernefysik. Selv om de ikke var specielt vigtige, vidner de om en kompetent fysiker af internationalt format.



Figur 2. Lev Ya. Strum, 1890-1936.

I 1936 iværksatte Stalin den systematiske og grusomme udrensning, der er gået over i historien som den "store terror". Millioner af sovjetborgere blev arresteret og titusinder af dem vilkårligt henrettet som fjender af den kommunistiske stat. En stor del af dem var russiske jøder. Blandt ofrene var Strum, der i marts 1936 blev arresteret af det hemmelige politi NKVD og efter tortur indrømmede sig skyldig i alle anklager. Et halvt år senere blev han henrettet ved skydning sammen med 36 andre ukrainske forskere og intellektuelle. Mange andre sovjetiske fysikere led samme skæbne, i flæng kan nævnes fx Matvei Bronstein, Boris Hessen, Lev Shubnikov og Lev Rosenkevich. Andre igen, som Landau, blev fængslet men slap med livet i behold.

Ikke blot blev Lev Strum frataget livet, han blev også frataget sin eksistens som person – som om han aldrig

havde levet. De sovjetiske myndigheder fjernede systematisk ethvert minde om ham, herunder de videnskabelige arbejder han havde forfattet. Strum blev effektivt gjort til en "ikke-person" uden navn, historie og familie og denne status varede mere end 70 år. Ganske vist fik han officielt oprejsning under Khrusjtjov-perioden efter Stalins død, hvor de sovjetiske myndigheder beklagede henrettelsen, men i realiteten fortsatte Strum med at være en "ikke-person" også efter Sovjetimperiets sammenbrud og Ukraines selvstændighed i 1991.



Figur 2. Mindeplade for L. Strum, Malopidvalnaya 12, Kyiv.

Litterær genopstandelse

Da Lev Strum endelig blev kaldt til live igen, var det ejendommeligt nok som en ikke umiddelbart genkendelig romanfigur. Den russisk-ukrainske forfatter Vasily Grossman (1905-1964) er i dag højt estimeret i litterære kredse, hvor han nævnes som en ny Leo Tolstoy. Hans berømmelse hviler især på murstensromanen *Life and Fate* (dansk udgave som *Liv og Skæbne* fra 2015), der efter mange problemer med den sovjetiske censur udkom på engelsk i 1985. Bogens hovedperson er en højt begavet fysiker ved navn Viktor Pavlovich Strum, hvis liv og virke beskrives i fascinerende detaljer. Navneligheden med den glemte Lev Strum er ikke tilfældig, for Grossman kendte sidstnævnte og modellerede sin litterære figur efter ham. En væsentlig del af *Life and Fate* handler faktisk om fysik og anden videnskab, noget af det fiktivt og andet autentisk. Blandt de fysikere, der optræder i romanen er Planck, Rutherford, Bohr, Heisenberg og Einstein – sidstnævnte hele 22 gange.

De anmeldere og litteraturkritikere, der skrev om Grossmans bog, beskæftigede sig i lang tid med Viktor Strum uden at have nogen anelse om den virkelige fysiker Lev Strum og hans grumme skæbne. Først omkring 2010 blev forbindelsen dokumenteret og først da blev Lev Strum, den jødiske fysiker fra Kiev, så småt genskabt som menneske og forsker [7]. I februar 2018 blev der opsat en mindeplade for ham på det hus i Kyiv, hvor han levede med sin familie (figur 3). Alligevel er Lev Strum stadig i dag mere synlig i litteraturhistorien – via forbindelsen til Viktor Strum – end i videnskabshistorien. Og hvis han overhovedet fremhæves, er det som en ukrainsk-jødisk fysiker, ikke som en russisk fysiker.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2011) "Higher Speculations", Oxford University Press.
- [2] A. Einstein (1907) "Die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie", *Annalen der Physik*, bind 17, side 371–384.
- [3] C. Møller (1952) "The Theory of Relativity", Clarendon Press.
- [4] L. Strum (1923) "Zur Frage nach der Überlichtgeschwindigkeit in der speziellen Relativitätstheorie", *Zeitschrift für Physik*, bind 20, side 36–44.
- [5] G. Malykin og E. Romanets (2012) "Superluminal motions", *Opticks and Spectroscopy*, bind 112, side 920–934.
- [6] R. Bass (1926) "Über das spezielle Relativitätsprinzip und die Grenzgeschwindigkeit", *Physikalische Zeitschrift*, bind 27, side 74–79.
- [7] G. Malykin, V. Savchuk og E. Romanets (2012) "Lev Yakovlevich Strum and the hypothesis of the existence of tachyons", *Physics—Uspekhi*, bind 55, side 1134–1139.



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

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Cecilie Pedersen

Det har været et travlt senforår i SNU, hvor udstillingen "Fra forsker til folk" lukkede ned i Viborg den 10. april. En del flyttede videre til Alsion i Sønderborg, hvor den er fra 14. april til 14. juni. Resten af udstillingen blev sendt til opmagasinering på Energimuseet i Bjerringbro, som den 28. juni åbner for næste version af "Fra forsker til folk".

Den 28. april var der generalforsamling. SNU's præsident Anja C. Andersen kunne her berette om stadigt stigende medlemstal, og at de mange vellykkede initiativer i jubilæumsåret 2024 havde givet et væsentligt mindre underskud end forventet. Til gengæld var en del af de forventede udgifter rykket til 2025. I 2026 forventes regnskabet igen at være i balance. Disse "skvulp" i økonomien hænger sammen med, at der i årene forud for jubilæet indgik en del fondsmidler til senere brug, der gav overskud i de pågældende år. Til gengæld er der også nogle fonde, der først betaler når aktiviteterne er endeligt afsluttet, og hvor SNU har lagt ud – og da blandt andet udstillingen "Fra forsker til folk" først slutter i 2026, vil de sidste beløb først komme til udbetaling der.

SNU tog på generalforsamlingen afsked med både Dorte Olesen og Jens Olaf Pepke Pedersen i SNU's direktion, og bød velkommen til Sophie Beeren og Kirsten Marie Ørnshjerg Jensen.

Medaljeuddelinger i maj – og flere børn og unge til SNU's arrangementer

Helt usædvanligt uddelte SNU i maj måned hele tre H.C. Ørstedmedaljer – fordelt på et særarrangement den 9. maj og sæsonafslutningen den 19. maj.

Den 9. maj fik den første dansker i rummet, ESA-astronaut Andreas Mogensen, overrakt en sølvmedalje og SNU's mangeårige præsident Dorte Olesen fik over-

rakt en bronzemedalje ved et særligt arrangement i Lundbeckfond Auditoriet på Københavns Universitet.



Figur 1. Fra venstre ses Rasmus Larsen, Dorte Olesen, Andreas Mogensen, Simon Barchard og Anja C. Andersen
Foto: Rochelle Coote Photography.

Andreas Mogensen fik medaljen for sin fremragende naturvidenskabsformidling til alle aldersklasser. Han kvitterede med et foredrag om sin forskning under opholdet på den internationale rumstation ISS, som begejstrede de mange tilhørere, der denne dag også omfattede ganske mange store børn og unge – flere medlemmer havde taget elever eller familien med.

Oprindeligt skulle Andreas Mogensen have haft medaljen overrakt i november 2024, men grundet sygdom måtte overrækkelsen udskydes – nu kom der så et særarrangement, der også blev benyttet til at overrække en bronzemedalje til SNU's mangeårige præsident, dr.scient. Dorte Olesen, som i april trådte ud af SNU's direktion efter at have været medlem af denne i 39 år. Dorte Olesen fik medaljen for sit utrættelige virke

for at formidle naturvidenskab gennem SNU, både gennem SNU's løbende foredrag og gennem to store vandrestillinger i de senere år.

Sølvmedaljen var sponsoreret af firmaet TICRA, hvis CEO, Simon Barchard, også deltog på denne festlige dag sammen med sin familie.



Figur 2. Ole Grevald sammen med Anja C. Andersen.

Den tredje medalje blev den 19. maj givet til grundskolelærer Ole Grevald fra Klostermarksskolen i Roskilde, som var blevet indstillet som en usædvanligt inspirerende lærer af både sin skoleleder Kasper Broeng, der understreger, at Ole Grevald på få år har transformeret skolens naturfaglige profil, og af en gruppe tidligere elever, der selv tog initiativ til at indstille ham til prisen og hurtigt fik opbakning fra andre, der alle fremhæver hans unikke evne til at motivere og skabe interesse for naturfagene. Medaljen til Ole Grevald blev motiveret af Stefan Holm fra Danmarks Naturfagslærereforening og Ole Stahl fra firmaet Topsoe, der sponsorerer medaljen til en inspirerende grundskolelærer.

Sigurds rumrejse

Maj har i det hele taget været en meget travl måned i SNU – lørdag den 10. maj var der et helt specielt arrangement, primært for medlemmer med børn og børnebørn, hvor Sigurd Barrett optrådte med sin forestilling "Sigurds rumrejse". Det faldt meget apropos dagen efter Andreas Mogensen-arrangementet, men appellerede så til et endnu yngre publikum – og deres forældre eller bedsteforældre. Familierne nød eftermiddagen i William Demantsalen på DTU, hvor der blev budt velkommen af KVANTs redaktør Jens Olaf Pepke Pedersen.



Figur 3. Sigurd Barrett og Eskild Dohm (t.h.) optrådte på DTU med forestillingen "Sigurds rumrejse". Foto: Jens Olaf Pepke Pedersen.

Rasmus Larsen overtager H.C. Ørstedts kappe som præsident for SNU

Professor Rasmus Larsen fra Institut for Matematik og Computer Science på Danmarks Tekniske Universitet er valgt som den 15. præsident for Selskabet for Naturlærens Udbredelse. Rasmus Larsen har som prorektor på DTU stået i spidsen for to store nationale formidlingsprogrammer. Først HCØ2020, der fejrede 200-året for Ørstedts opdagelse af sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme i et konsortium bestående af Danske Universiteter, Astra (det nationale naturfagscenter), Experimentarium og Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. SNU havde et stort bidrag med foredragsrække og en stor udstilling i Rundetaarn, på SDU og Stenomuseet. Dernæst Rumrejsen 2023, der fejrede Astronaut Andreas Mogensens anden rumrejse i et konsortium med ESA, Danske Universiteter, Uddannelses- og Forskningsministeriet, Naturvidenskabernes hus, Astra, Experimentarium, Dansk Industri og Teknisk Museum.

Anja C. Andersen træder således tilbage som præsident, men fortsætter som SNU's vicepræsident. Hun har i sin præsidentperiode stået i spidsen for fejringen af Selskabets 200-års jubilæum, som blev fejret med en jubilæumsbog "Naturvidenskabens Ildsjæle", en udstilling i Rundetaarn med titlen "Fra forsker til folk", et foredragsprogram afholdt i Rundetaarn ifm. udstillingen med syv foredrag, samt uddeling af H.C. Ørstedmedaljer til en række fremragende forskere og fremragende formidlere af den eksakte naturvidenskab.

Anja Andersen siger: "Det har været et stort privilegium de seneste tre år at stå i spidsen for SNU og ikke mindst den store fejring af Selskabets 200-års jubilæum. For mig har det været en stor glæde at mærke vores medlemmers store opbakning til H.C. Ørstedts målsætning om formidling af naturvidenskab til bredere kredse og de arrangementer Selskabet afholder. Jeg er glad for at give stafetten videre til Rasmus Larsen, der som jeg brænder for den naturvidenskabelige formidling og som nu vil sætte sit organisationstalant i spil til gavn for SNU."

Kvantemekanisk socialvidenskab

Rasmus Jakslund, Department of Philosophy, Princeton University

Moderne fysik har radikalt ændret vores forståelse af virkeligheden, blandt andet gennem relativitetsteoriens og kvantemekanikkens begreber om relativitet og sammenfiltring. Denne artikel undersøger, hvordan sådanne kvantemekaniske fænomener muligvis også har relevans for socialvidenskaberne. Især diskuteres det, om superposition og entanglement kan forklare ellers uforklarlige sociale og psykologiske fænomener. Artiklen gennemgår både fortalere og kritikere af denne såkaldte kvantemekaniske socialvidenskab. Afslutningsvis stilles spørgsmålet, om metafysiske implikationer af kvantemekanikken bør have betydning for social teori – selv når effekterne ikke direkte kan observeres.

Moderne fysik har lært os, at virkeligheden grundlæggende er noget anderledes, end vi troede. I relativitetsteori er dette godt illustreret af, hvordan afstande, tidsrum og samtidighed ikke er absolutte men relative til en observatør. I kvantemekanik kommer det blandt andet til udtryk gennem superposition og kvantemekanisk sammenfiltring (entanglement).

Et kvantemekanisk objekt (kald det **A**) kan eksempelvis være i en tilstand, hvor amplituden i den kvantemekaniske bølgebeskrivelse af objektet er forskellig fra nul to forskellige steder (kald disse steder **1** og **2**). Hvis vi tog dette som en bogstavelig beskrivelse af virkeligheden, så lader det til, at **A** er to steder på samme tid. Når vi måler, hvor eksempelvis en elektron er, så finder vi den imidlertid altid et bestemt sted, men sandsynligheden for at finde den et bestemt sted er en funktion af bølgebeskrivelsen. I eksemplet er der altså en sandsynlighed for at finde **A**, både når vi måler efter den ved **1** og ved **2**. I den bogstavelige forståelse af bølgebeskrivelsen er det først, når vi måler, hvor objekt **A** er, at det bestemmer sig for, om det er ved **1** eller **2**.

Objekt **B** er ligesom **A** i en superposition af **1** og **2**. Der er altså en sandsynlighed for at finde **B** ved **1** og en sandsynlighed for at finde **B** ved **2**, men ikke nogen andre steder. I nogle tilfælde kan **A** og **B** være i en speciel tilstand, hvor det yderligere er sådan, at vi altid vil finde **B** det modsatte sted af **A**. Når vi finder **A** ved sted **1**, så finder vi altid **B** ved **2** og omvendt. Denne type korrelation kaldes for sammenfiltring, og den kan ikke indfanges ved at beskrive **A** og **B** hver for sig. Der er selvfølgelig klassiske måder hvorpå sådan sammenfiltring kan opstå. Havde **A** og **B** været personer, ville vi ikke være blevet overraskede over, at vi aldrig finder dem det samme sted. Måske kan de ikke lide hinanden, og de undgår derfor hinanden. Nobelprisen i fysik blev i 2023 givet for eksperimentelle resultater, som viser, at det er (næsten) umuligt, at sammenfiltring i kvantemekanik kan skyldes, at objekterne "koordinerer" deres opførsel på denne måde, blandt andet ved at vise at denne type korrelation forekommer, selv når der er enorme afstande mellem **1** og **2**. Kvantemekanisk sammenfiltring kan ikke gives en klassisk forklaring. I kvantemekanikken lader det til, at en måling af **A**s position øjeblikkeligt tvinger **B** til at være det modsatte sted, uanset hvor stor afstanden er. Det er som om, at **A**

og **B** udgør én forbundet enhed og kun kan beskrives som sådan.

Sammenfiltring opstår hver gang kvantemekaniske systemer interagerer. Det vil sige hele tiden og overalt. Hvis alting er sammenfiltret på en måde, der ikke er kompatibel med klassisk fysik, så er det naturligt at spørge, om ikke dette bør have konsekvenser i andre undersøgelser af verden, hvor vi eksempelvis tager for givet, at elementerne, som studeres, ikke påvirker hinanden øjeblikkeligt over store afstande. Det er præcis den type spørgsmål, som fortalere for kvantemekanisk socialvidenskab stiller.

Dette er i udgangspunktet fornuftige spørgsmål at stille. "Så vidt vi ved, er universet ikke brudt op i to separate domæner," som Karen Barad [1, s. 85] skriver. Barad er nok den mest indflydelsesrige fortaler for kvantemekanisk socialvidenskab, og Barads grundlæggende pointe er, at den fundamentale fysiske virkelighed og så den virkelighed, som vi møder i vores hverdagsliv, er en og samme virkelighed. Når vi lærer noget om denne ene virkelighed gennem undersøgelser i et forskningsfelt, så skal dette kunne forenes, med det vi ved om denne samme virkelighed fra andre forskningsfelter. Skulle antropologiske studier af rumvæsner etablere ud over enhver tvivl, at disse rumvæsner har telepatiske evner, så kunne vi ikke ignorere dette i fysik med henvisning til, at antropologiske studier af rumvæsners kommunikation ikke har noget med fysik at gøre. I stedet ville det være nødvendigt at finde en forklaring på disse telepatiske evner, måske endda ved at ændre nogle af vores etablerede fysiske teorier. Fortalere for kvantemekanisk socialvidenskab hævder, at socialvidenskaberne aldrig har forholdt sig til, at klassisk fysik er blevet erstattet med kvantemekanik, og de mener, at dette er et problem.

Kvantemekaniske effekter i socialvidenskaber

Den mest konkrete form for kvantemekanisk socialvidenskab argumenterer for, at kvantemekaniske effekter spiller en rolle i socialvidenskabernes genstandsfelt, dvs. for mennesker, deres valg, interaktioner, institutioner osv. I en forstand er dette utvivlsomt rigtigt. Vi ved eksempelvis, at vi består af elementarpartikler, som danner atomer, som igen danner molekyler osv., indtil dette til sammen bliver til mennesker og alt andet.

Disse elementarpartikler – og atomerne og molekylerne for den sags skyld – beskrives af kvantemekanikken. At mennesker overhovedet findes er i den forstand forklaret af kvantemekanikken.

Den almindelige opfattelse er imidlertid, at kvantemekanikkens mærkværdigheder, såsom konsekvenserne af kvantemekanisk sammenfiltring og superposition, forsvinder i makroskopiske objekter, dvs. i objekter som består af millionvis af elementarpartikler. Det er derfor, at det er så svært at bygge en kvantecomputer. En version af kvantemekanisk socialvidenskab foreslår imidlertid, at hjernen på mennesker, og måske også på (nogle) dyr, kan opretholde de kvantemekaniske effekter, sådan at vores tanker kan være i superpositionstilstande og tilmed være kvantemekanisk sammenfiltrede, noget som gør, at mennesker også kan blive sammenfiltrede med hinanden på trods af deres makroskopiske størrelse.

Alexander Wendt [2], der er den primære fortaler for dette synspunkt, peger på, at der er flere fænomener, som socialvidenskaben har svært ved at forklare (se også O'Brien [3]). Wendt sammenligner den nuværende situationen i socialvidenskaben med fysikken i slutningen af det 19. århundrede, hvor flere og flere observationer ikke kunne forklares af datidens fysiske teorier. Meget præcise målinger viste fx, at Merkurs bane ikke passede helt med det, Newtons gravitationslov forudsagde. Måske havde man målt forkert? Måske var der en hidtil ukendt planet, som påvirkede Merkurs bane? Svaret var imidlertid, at Newtons gravitationslov er forkert. Først da Einstein udviklede den generelle relativitetsteori, fik man den rigtige forudsigelse af Merkurs bane. Dette havde ikke bare konsekvenser for forudsigelserne om Merkurs bane, men også for hvordan vi grundlæggende forstår rum og tid. På samme måde mener Wendt, at de uforklarlige fænomener i socialvidenskab skal forklares med en helt ny socialvidenskabelig teori, kvantemekanisk socialvidenskab, som vil have konsekvenser for vores forståelse af det sociale langt ud over de enkelte uforklarlige fænomener.

Wendt giver en del eksempler på sådanne uforklarlige fænomener, men de mest konkrete er psykologiske eksperimenter, der blandet andet viser at folk handler på måder, der er irrationelle ifølge klassisk beslutnings- og spilteori. Et eksempel er fangernes dilemma. Her skal to spillere vælge, om de vil samarbejde eller forråde hinanden. Samarbejder de, får de en høj belønning, men belønningen er endnu højere for at forråde modspilleren, når modspilleren har valgt at samarbejde. Den, der bliver forrådt, får så til gengæld ingen belønning. Hvis begge forråder hinanden, får de kun en lille belønning. Hvad skal man gøre? Klassisk beslutningsteori foreslår, at man kan tænke på denne måde: Hvis modparten samarbejder, skal jeg forråde dem, for så får jeg den højeste belønning. Hvis modparten forråder mig, så skal jeg også forråde dem, for så får jeg i det mindste en lille belønning. Derfor skal jeg også forråde modparten, selv når jeg ikke ved, hvad de gør.

Psykologiske eksperimenter, der undersøger, hvad folk faktisk gør i sådan en situation, viser at nogle alligevel vælger at samarbejde. Wendt foreslår, at

forklaringen på denne tilbøjelighed til at samarbejde og andre eksempler på "irrationel" opførsel i sådanne psykologiske eksperimenter skal findes i kvantemekanikken. Måske kan kvantemekanisk sammenfiltring eksempelvis forklare tilbøjeligheden til at samarbejde. Ligesom at kvantemekanisk sammenfiltring kan gøre, at **A** altid er det modsatte sted af **B**, så kunne sådan sammenfiltring måske øge sandsynligheden for, at også modspilleren samarbejder, når man selv gør det, hvilket kunne gøre denne strategi mindre risikabel end den forekommer at være, hvis man ignorerer sammenfiltringen (se eksempelvis Wendt [2, s. 172], [4, s. 125–26]). Wendt baserer sig her på en stor og matematisk stringent litteratur om kvantemekanisk beslutnings- og spilteori [5, 6]. Og mens denne meget simple forklaring baseret på sammenfiltring viser sig at have sine problemer, så finder man i denne litteratur mere komplekse modeller, der kan genskabe resultaterne af mange af disse psykologiske eksperimenter, når man tillader brugen af superposition og sammenfiltring i beskrivelsen af testpersonernes ønsker, intentioner og handlinger.

"[H]vis vi virkelig er klassiske væsner, hvorfor er det så, at vi systematisk udviser kvanteopførsel?" Sådan spørger Wendt [4, s. 16] retorisk med henvisning til disse psykologiske eksperimenter og den kvantemekaniske beskrivelse af resultaterne. Flere har dog afvist, at svaret på Wendts spørgsmål kan være, at vi alligevel ikke er klassiske væsner. De peger på, at det, der kaldes dekohærens, medfører, at kvantemekaniske effekter bliver skjult for lokale observatører. Ironisk nok er kvantemekanisk sammenfiltring årsagen til dette. Tænk igen på **A** og **B**, men denne gang er **B** i en superposition af at være to steder, som vi skal kalde **3** og **4**. Når **A** er ved **1**, er **B** ved **3**, og når **A** er ved **2**, er **B** ved **4**. De er altså stadig kvantemekanisk sammenfiltrede. Lad os forestille os, at **3** og **4** ligger meget langt væk fra **1** og **2**. Dette er ikke noget problem, da kvantemekanisk sammenfiltring kan forekomme over store afstande (i et eksperiment var de to objekter 1200 km fra hinanden [7]). En person der kun gør målinger ved **1** og **2** ville aldrig opdage, at **A** var kvantemekanisk sammenfiltret. Faktisk gør sammenfiltringen, at man ikke engang ville opdage, at **A** er i en superpositionstilstand. Hvis **B** ikke eksisterede, og **A** bare var i en kvantemekanisk superposition af at være ved **1** og **2**, så ville snedige eksperimenter (såsom et dobbeltspalteeksperiment) kunne afsløre, at det ikke bare er usikkert, hvor **A** er, men kvantemekanisk ubestemt. Når **A** er sammenfiltret med **B**, forsvinder også denne forskel, og **A** vil, for en observatør der kun ser på **1** og **2**, se ud til at være et klassisk objekt med en usikker position. Fordi kvantemekanisk sammenfiltring opstår, så snart objekter interagerer, så må man skærme systemer fra deres omgivelse, hvis man vil undgå, at den sammenfiltring, der ellers ville opstå med omgivelserne, skal skjule systemets kvantemekaniske effekter. Wendts kritikere argumenterer for, at menneskers hjerne umuligt kan være isoleret på denne måde, og derfor umuligt kan undgå dekohærens (se [8–10] for en mere dybdegående diskussion af dette).

Som modsvar peger Wendt på forskning, der indikerer, at fugles navigation udnytter kvanteeffekter, hvilket viser, at kvantemekanikken har betydning for biologiske processer [11, s. 14-15]. Det er dog spørgsmålet, hvor godt dette argument er, da de kvantemekaniske effekter her kun inkluderer meget få partikler, som så sender et signal om magnetfeltet til hjernen [9, 172]. Det er altså ikke hele hjernen, der er dekohærens-fri, men kun en mikroskopisk lomme inde i hjernen. Dette virker til at være utilstrækkeligt, hvis det er hele vores tanke- og beslutningsproces, der er kvantemekanisk.

Flere har også påpeget, at de fleste af dem, der har været med til at udvikle kvantemekanisk beslutnings- og spilteori, beskriver effekterne som "kvante-lignende" ([12, s. 127-28]; se også [8, afsnit IV]). Wendt selv mener, at dette mest skal ses som et udtryk for, at disse forskere ikke ønsker at tage stilling til, hvad man bør konkludere fra anvendeligheden af kvantemekanisk beslutnings- og spilteori [4, 125-26]. Dette er muligvis rigtigt, men problemet er, at der er en grund til, at effekterne beskrives som kvantelignende. For at forklare resultaterne af nogle af de psykologiske eksperimenter er det nødvendigt at afvige fra visse af antagelserne i kvantemekanikken [13], [14, kap. 8]. I forklaringen af forsøget med fangernes dilemma benytter Andrei Khrennikov eksempelvis hyperbolske i stedet for komplekse Hilbertrum, som får ham til at konkludere at testpersonerne er "endnu mere ikke-klassiske end elektroner og fotoner" [15, s. 107]. Forklaringen på disse resultater kan med andre ord ikke være, at hjernen er et makroskopisk kvantemekanisk system, som Wendt foreslår, for selv et kvantemekanisk system ville ikke kunne give disse resultater.

I den forbindelse er det også værd at bemærke, at klassiske systemer kan efterligne kvantemekaniske effekter, heriblandt se ud til at bryde Bells uligheder, hvis man overser relevante frihedsgrader [16, s. 9-10]. Det er ikke altid sådan, at hvis noget ligner et X , så er det et X , sådan som Wendts retoriske spørgsmål insinuerer. Dette gælder også her. Faktisk er dette ekstra vigtigt i denne sammenhæng, da den klassiske teori, og mere præcist klassisk sandsynlighedsteori, er et specialtilfælde af kvanteteorien. Kvantemekanikken er med andre ord mere fleksibel og mindre restriktiv [17, s. 137-38]. En af videnskabsfilosoffen Karl Poppers [18] centrale pointer er, at bekræftelserne af en meget fleksibel teori ikke skal tillægges samme vægt, som bekræftelserne af en mere restriktiv teori. Vi kan sammenligne det med en situation, hvor vi tidligere har beskrevet en række fænomener med et andengradspolynomium. Hvis disse fænomener viser sig at være bedre indfanget af et andet andengradspolynomium, så er det en grund til at skifte til den teori. Hvis teorien, der beskriver fænomenerne bedre, i stedet er et fjerdegradspolynomium, så er valget mindre klart, da vi må overveje, om den øgede præcision bare skyldes, at fjerdegradspolynomiet er mere fleksibelt.

Kvantemetafysik i socialvidenskaberne

I diskussionerne af kvantemekanisk socialvidenskab gør flere også opmærksom på, at det er meget om-diskuteret, hvordan kvantemekanikken skal fortolkes [8, 12, 19]. Et eksempel er, hvorvidt vi skal forstå A s superposition af at være ved 1 og 2 som et udtryk for, at A er to steder på samme tid, eller bare at det er usikkert, hvor A er. Et andet eksempel er, hvordan vi skal forstå de sammenfildrede objekter A og B . Hvis vi kun beskriver hvad A gør, og hvad B gør hver for sig, så vil beskrivelsen bare få frem, at det for dem begge gælder, at de nogle gange er ved 1 og nogle gange er ved 2. At de aldrig er det samme sted kommer kun frem, når A og B beskrives sammen med én kvantetilstand. Dette får nogle til at argumentere for, at A og B ikke kan forstås som to objekter, men i stedet udgør ét hele. Fordi kvantemekanisk sammenfiltring opstår, hver gang ting interagerer, så er der grunde til at formode, at hele universet skal tilskrives én sammenfildret tilstand. Betyder det, at universet ikke egentlig har nogle dele men i stedet er et udeleligt hele? Disse spørgsmål om superposition og kvantemekanisk sammenfiltring er blandt de mange spørgsmål, om hvordan verden grundlæggende er, som kvantemekanikken rejser. De forskellige fortolkninger af kvantemekanikken består af pakker af svar på disse spørgsmål.

At der findes mange sådanne fortolkninger er imidlertid ikke et problem for den version af kvantemekanisk socialvidenskab, som påstår, at kvantemekaniske effekter har en observerbar konsekvens i socialvidenskabernes genstandsfelt, såsom hvis det er kvantemekanikken, der forklarer afvigelserne i psykologiske eksperimenter fra klassisk beslutningsteori. Fortolkningerne er i udgangspunktet alle enige om kvantemekanikkens observerbare effekter [11, 404]. Fortolkninger er i stedet uenige om, hvad disse observerbare effekter fortæller os om virkelighedens indhold og indretning. Det der også kaldes den bagvedliggende metafysik.

Der er imidlertid nogle fortalere for kvantemekanisk socialvidenskab, som ikke hævder at kvantemekaniske effekter har observerbare konsekvenser i socialvidenskabernes genstandsfelt. Førmtalte Barad er den mest prominente fortaler for denne version af kvantemekanisk socialvidenskab. Barad anerkender, at dekohærens i praksis skjuler effekterne af kvantemekanikken for lokale observatører af makroskopiske systemer. Det væsentlige ifølge Barad [1, s. 110] er imidlertid ikke, hvor store de kvantemekaniske effekter er, men at de overhovedet er der. "[A]t klassisk mekanik i mange tilfælde er en god approksimation af de kvantemekaniske løsninger i mange makroskopiske situationer er ikke et bevis mod den nye epistemologi og ontologi" [1, s. 416], hvor Barad med "den nye epistemologi og ontologi" mener sin form for kvantemekanisk socialvidenskab [10]. Barads pointe lader til at være, at det netop er kvantemekanisk sammenfiltring med omgivelserne, som sikrer, at den klassiske beskrivelse er en god approksimation for en lokal observatør. Sammenfiltringen er der stadigvæk selvom den skjuler sig. Metafysisk set er alt stadig kvantemekanisk.

Barad fortolker sammenfildrede objekter sådan, at de

ikke faktisk er separate individer, men at de i stedet må betragtes som ét hele. Fordi sammenfiltreringen stadig er der, selv når dekohærens skjuler den, så argumenterer Barad for, at dette eksempelvis kræver, at vi i social teori ikke kan starte med en antagelse om, at en institution eller et fællesskab består af en række individer. Hvorfor vi ikke kan det, når Barad selv anerkender, at den klassiske beskrivelse, som antager individer, i praksis er god, har jeg forsøgt at forklare andre steder, og grundene er filosofisk ret indviklede [16,20]. Jeg vil derfor ikke forsøge gentage dem her. Hvordan Barads kvantemekaniske socialvidenskab ændrer social teori er eksemplarisk illustreret i Malou Juelskjærs bog *At Tænke med Agential Realisme*.

Her skal vi nøjes med at vende tilbage til de mange fortolkninger af kvantemekanikken. Fordi det for Barad ikke handler om, hvor store og synlige de kvantemekaniske effekter er, men i stedet handler om, at den bagvedliggende virkelighed, altså metafysikken, er kvantemekanisk, så er det et problem, at der findes mange forskellige fortolkninger af kvantemekanikken. For hvilken fortolkning skal lægges til grund, når vi skal informere social teori? Barad har sin foretrukne fortolkning af kvantemekanikken, men den kan ikke engang anses som en af de førende fortolkninger. Og konsekvenserne for social teori vil være helt anderledes, hvis en af disse andre fortolkninger bliver lagt til grund [20, s. 378–79]. Hvad angår spørgsmålet om, hvordan kvantemekanikken skal fortolkes, så er situationen i dag, at der ikke er afgørende grunde til at foretrække en fortolkning frem for en anden. Dette er det centrale problem for den version af kvantemekanisk socialvidenskab, som ikke baserer sig på, at kvantemekaniske effekter har observerbare konsekvenser i socialvidenskabens genstandsfelt. Det er underbestemt, hvad den “den nye epistemologi og ontologi” skal være.

Dette problem undgår de, der påstår, at kvantemekaniske effekter har observerbare konsekvenser i socialvidenskabens genstandsfelt. Men de har til gengæld til gode at give overbevisende eksempler på, at dette faktisk er tilfældet.

Litteratur

- [1] Karen Barad. *Meeting the Universe Halfway*. Duke University Press, Durham, 2007.
- [2] Alexander Wendt. *Quantum Mind and Social Science: Unifying Physical and Social Ontology*. Cambridge University Press, Cambridge, 2015.
- [3] Karen O'Brien. *You Matter More than You Think*. CHANGE Press, 2021.
- [4] Alexander Wendt. Why IR scholars should care about quantum theory, part i: Burdens of proof and uncomfortable facts. *International Theory*, 14(1):119–129, 2022.
- [5] Adrian P. Flitney and Derek Abbott. Advantage of a quantum player over a classical one in 2×2 quantum games. *Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2038):2463–2474, 2003.
- [6] Jerome R. Busemeyer, Masanari Asano, and Meijuan Lu. Explaining interference effects in prisoner dilemma games. *Experimental Economics*, 27(4):743–765, 2024.
- [7] Juan Yin, Yuan Cao, Yu-Huai Li, Sheng-Kai Liao, Liang Zhang, Ji-Gang Ren, Wen-Qi Cai, and et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers. *Science*, 356(6343):1140–1144, 2017.
- [8] David Waldner. Schrödinger's cat and the dog that didn't bark: Why quantum mechanics is (probably) irrelevant to the social sciences. *Critical Review*, 29(2):199–233, 2017.
- [9] Daniel Little. Entangling the social: Comments on alexander wendt, quantum mind and social science. *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 48(2):167–176, 2018.
- [10] Rasmus Jaksland. Decoherence, appearance, and reality in agential realism. *European Journal for Philosophy of Science*, 13(2):24, 2023.
- [11] James Der Derian and Alexander Wendt. 'quantizing international relations': The case for quantum approaches to international theory and security practice. *Security Dialogue*, 51(5):399–413, 2020.
- [12] Stephen J. DeCanio. What is it like to be a social scientist? *Critical Review*, 29(2):121–140, 2017.
- [13] Harald Atmanspacher, Hartmann Römer, and Harald Walach. Weak quantum theory: Complementarity and entanglement in physics and beyond. *Foundations of Physics*, 32(3):379–406, 2002.
- [14] Jerome R. Busemeyer and Peter D. Bruza. *Quantum Models of Cognition and Decision*. Cambridge University Press, Cambridge, 2012.
- [15] Andrei Khrennikov. *Ubiquitous Quantum Structure: From Psychology to Finance*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [16] Rasmus Jaksland. Distinguishing two (unsound) arguments for quantum social science. *European Journal for Philosophy of Science*, 13(3):34, 2023.
- [17] Andrew H. Kydd. Our place in the universe: Alexander Wendt and quantum mechanics. *International Theory*, 14(1):130–145, 2022.
- [18] Karl R. Popper. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. Routledge, 1962.
- [19] Matthew J. Donald. We Are Not Walking Wave Functions. A Response to 'Quantum Mind and Social Science' by Alexander Wendt. *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 48(2):157–161, 2018.
- [20] Rasmus Jaksland. Naturalized, fundamental, and feminist metaphysics all at once: The case of Barad's agential realism. *Hypatia*, 39(2):363–384, 2024.



Rasmus Jaksland er postdoc i filosofi på Princeton University. Han er ph.d. i filosofi og kandidatgrader i både fysik og filosofi. Hans primære forskningsfelt er filosofiske spørgsmål relateret til kvantemekanisk sammenfiltrering. Dette inkluderer kvantemekanisk socialvidenskab, men også den rolle sammenfiltrering har i strengteori og andre kvantegravitations-teorier.

Hevesy og nuklearmedicinen

Liselotte Højgaard, Rigshospitalet, KU SUND og DTU

Den første anvendelse af radioaktive indikatorer i biologien var da den ungarske kemiker og senere Nobelprismodtager George de Hevesy forskede hos Niels Bohr i København for godt 100 år siden. Hevesy lagde grunden til nuklearmedicinen, der nu yder billed- og funktionsdiagnostik til millioner af patienter verden over. Hevesy og forskerkolleger kom langt med simple metoder, og forløbet er et stærkt eksempel på den praktiske anvendelse af de eksakte naturvidenskaber.



Figur 1. George de Hevesy i Manchester ca. 1912. (Niels Bohr Arkivet).

Det begyndte i Manchester

George de Hevesy blev født i en rig adelig familie i Ungarn i 1885, samme år Niels Bohr blev født i København. Hevesy var særdeles godt begavet, og han blev den første forsker i familien. Efter disputats ved Universitetet i Freiburg i 1908 og studier ved universiteterne i Berlin, Zürich og Wien, tog Hevesy i 1912 til Manchester på forskningsophold hos Lord Rutherford, radiokemiens far med Nobelpris fra 1908. Hevesy fik der til opgave at separere Pb-210 i en stor bunke jord af begblende fra Joachimsthal i Bøhmen. *“My boy, if you are worth your salt, you will separate all this nuisance of lead”*, lød instruksen fra Lord Rutherford. Det var en bemærkning, som Hevesy citerede mange gange senere, inklusive i sin Nobelforelæsning i 1944. Efter to års indsats med den uløselige opgave, fik Hevesy den geniale idé at bruge en lille mængde radioaktivt

bly som indikator for bly, for at spore grundstoffets vej i kemiske processer. Hevesy kommenterede det 30 år efter i Nobelforelæsningen: *“To make the best of this depressing situation, I thought to avail myself of the fact that Ra D is inseparable from lead, and to label small amounts of lead by addition of Ra D obtained from tubes in which radium emanation decayed”*¹.

Niels Bohr var også på forskningsophold hos Rutherford i Manchester i 1912–1913, hvor han mødte George de Hevesy, og de etablerede et varmt venskab, der holdt livet ud. Niels Bohr publicerede sine berømte tre artikler om atommodellen i 1913; den opdagelse, der medførte Bohrs Nobelpris i fysik i 1922. Også i Manchester opdagede Hevesy på samme tidspunkt princippet med anvendelsen af de radioaktive indikatorer, som han fik Nobelprisen i kemi for i 1944, for året 1943.

At anvende en uhyre lille mængde radioaktive isotoper som sporstof eller indikator for det ikke-radioaktive stofs skæbne i kemiske processer eller i biologi var helt nyt, og Hevesy udviklede senere princippet i kemi sammen med Fritz Paneth fra Wien. Ud over talrige artikler om radioaktive indikatorer i kemiske processer skrev de to også en berømt lærebog på både tysk og engelsk om radioaktivitet.

Den første anvendelse af radioaktive indikatorer i biologien var lidt utraditionel. Hevesy var godt vant på det kulinariske område fra familiens slotte i det Østrig-Ungarske kejserrige. I Manchester 1912 boede Hevesy på pensionat, og han var utilfreds med kosten, der ud over at være ringe også bød på opvarmet restemad. Det klagede Hevesy over gentagne gange til pensionatsværtinden, og for at bevise sin påstand tog Hevesy lidt radioaktivt Pb-210 med hjem fra laboratoriet, og så “mærkede” han en kødrest på sin tallerken ved søndagsmiddagen. Tallerkenen gik retur til køkkenet, og med et elektroskop kunne Hevesy så genfinde radioaktiviteten om onsdagen i den sammenkogte ret, som pensionatsværtinden serverede. Hevesy havde ret, der blev serveret genopvarmet restemad. Pensionatsværtinden havde imidlertid magten, og Hevesy blev smidt på porten, og måtte finde sig et andet logi. I dag ville Hevesys eksperiment være helt og aldeles utænkeligt, ulovligt og uhørt. Hevesy beskrev episoden mange år senere i sine erindringer, og den er også omtalt i flere nuklearmedicinske artikler.

¹Radium D var betegnelsen dengang for bly Pb-210.

Krigen satte forskningen på pause

Under 1. verdenskrig fra 1914 til 1918 var Hevesy tilbage i Ungarn, hvor han blev indkaldt til militærtjeneste. Han var spinkel og kunne ikke klare det fysisk, faldt om på den første march, og var indlagt på et militærhospital i lang tid. Hevesy blev flyttet til anden tjeneste ved den nye røntgenafdeling på Klinik Rokus i Budapest, det nuværende Semmelweis Universitetshospital. De sidste år af krigen var han bestyrer af flere kobbermelterier, hvor kirkeklokker blev smeltet om til brug for våbenproduktionen. En sørgelig periode i hans liv. Sammenlignet med det øvrige samfund kom Hevesy relativt godt igennem krigen, selv om han ifølge breve til vennen Fritz Paneth var syg, sultede, frøs og kedede sig det meste af tiden. Efter krigen brød den gamle verden sammen, det Østrig-Ungarske kejserrige faldt, og Ungarn blev en selvstændig republik. Hevesy var ikke længere økonomisk uafhængig, og han indløste den stående invitation fra Niels Bohr, og tog til København i 1920 for at forske og skaffe sig en indtægt.



Figur 2. George de Hevesy og Niels Bohr (stående), 1920'erne. (Niels Bohr Arkivet).

Hevesy i København 1920–1926

Hevesy kom til København i 1920, hvor Niels Bohr til at begynde med havde fundet en plads til ham hos Professor J.N. Brønsted på Polyteknisk Lærestanstalt med stipendium fra Rask-Ørsted Fonden. Hevesy og Brønsted udviklede sammen en original metode til at separere isotoper af kviksølv. Hevesy var ifølge flere kilder en elendig eksperimentalist – men klog, det var han heldigvis.

Da Niels Bohrs nye institut på Blegdamsvej åbnede i 1921, blev Hevesy tilknyttet som en af første forskere på stedet. Hevesys næste originale opdagelse – efter de radioaktive indikatorer og separationen af kviksølvisotoperne – var fundet af det manglende grundstof nr. 72 i Det Periodiske System. Indtil da havde der bare været en tom hvid plads på nr. 72. Sagen var vigtig for at understøtte Niels Bohrs arbejde med atommodellen. Hevesy og den hollandske fysiker Dirk Coster påviste hafnium, det ukendte grundstof nr.

72, via røntgenspektroskopi, og det skete i en rasende fart. Udviklingen af hypotese, bygning af nyt apparatur, etablering af metode og fundet af selve resultatet tog under et halvt år – fra sommeren 1922 til december måned samme år. Det gik hurtigt dengang fra idé til publikation.

Coster og Hevesy gav besked om deres opdagelse af det nye grundstof til Niels Bohr, der på det tidspunkt i december 1922 var med familien i Stockholm for at modtage Nobelprisen i fysik. Coster og Hevesy kaldte det nye grundstof hafnium – opkaldt efter det gamle latinske navn for København, Hafnia, og så opstod der en bitter prioritetsstrid. Særligt den franske kemiker George Urbain mente, at det var hans opdagelse. Hevesy og Coster måtte kæmpe for deres videnskabelige synspunkter og ophavsret i flere år, men efterhånden fik de overbevist forskersamfundet om, at de havde ret og sådan blev det. Dengang fik man ofte tildelt Nobelprisen, når man påviste et nyt grundstof, og i alle årene efter indtil Hevesy døde i 1965 var han skuffet over, at han ikke havde fået Nobelprisen for opdagelsen af hafnium. Hevesy beklagede det igen i det sidste brev han sendte til Niels Bohr i 1962, 40 år efter opdagelsen af hafnium.



Figur 3. Hevesy i jakkesæt i laboratoriet. Han var ikke nogen god eksperimentel kemiker, og var ofte patient på skadestuen på Rigshospitalet.

Hevesy arbejdede med hafnium, geokemi, og sjældne jordarter, men i 1923 kastede han sig også over det, der senere skulle blive hans vigtigste videnskabelige område – arbejdet med de radioaktive indikatorer. Hevesy udførte forsøg på Landbohøjskolen om optagelsen af radioaktivt bly i planter, nærmere bestemt favabønner eller på dansk, hestebønner. Det var verdens første publicerede forsøg med anvendelse af radioaktive indikatorer indenfor biologi. Hevesy havde siden opdagelsen i 1913 anvendt indikatorerne til studier af kemiske processer, men han havde allerede dengang i tiden hos Rutherford udtalt over en kop te, at det kunne være interessant at følge teens vej rundt i kroppen med indikatorer. Hans idérigdom og nysgerrighed var legendarisk.

I 1924 udførte han studiet om radioaktive indikatorer undersøgt i kaniner, udført sammen med lægen Svend Lomholt, der var specialist i hud- og kønssygdomme, fra Finsen Institutet. Desuden kemikeren J.A. Christensen fra universitetet. Ved forsøget undersøgte de fordelingen af bismuth-210, med halveringstid 5 dage, og fremstillet ud fra 2-4 Curie² radium blandet med kold bismut. Som indikator for bly anvendte de bly Pb-210, med halveringstid 22,2 år. Formålet med forsøgene var at undersøge omsætningen af bly, bismut og kviksølv, stoffer der trods alvorlige bivirkninger blev anvendt til behandling af Lomholts patienter med syfilis. Der var ingen effektiv behandling af syfilis dengang; penicillin blev først fundet og udviklet til lægemiddel 20 år senere. De indikatorer, som blev benyttet til forsøgene, var naturligt forekommende radioaktive isotoper, og de var ikke ideelle til indikatorstudier. Blandt andet derfor blev det kun til disse to studier om de radioaktive indikatorer i Hevesys første periode i København.

Hevesy blev gift med en dansk kvinde, Pia Riis, i 1924, og de flyttede til Freiburg i 1926, hvor Hevesy blev professor ved universitetet i den dejlige sydtyske by med det milde klima og den smukke natur. To ting Hevesy satte meget stor pris på. Her havde familien deres gyldne lykkehår indtil 1934.

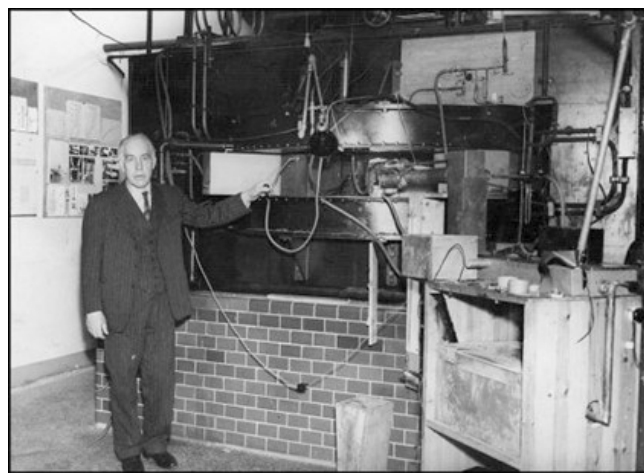
Hevesy udviklede tracerteknikken i København 1934–1943

I 1934 måtte Hevesy flytte grundet nazisternes overtagelse af Tyskland. Hevesy var af jødisk familie, og selv om han var katolik, var han med sin afstamning uønsket, fordi det efter nazisternes dekret fra 1934 ikke længere var tilladt for jøder at være ansat som professorer ved tyske universiteter. Hevesy tog tilbage til København, og i perioden 1934-1943 forskede han igen hos Niels Bohr og udviklede traceteknikken indenfor biologi og medicin.

I 1930'erne var de kunstige radioaktive isotoper blevet opdaget og udviklet af Enrico Fermi i Italien og hos Irene og Frederic Joliot Curie i Paris. Fermi fik Nobelprisen i fysik i 1938, og ægteparret Irene og Frederic Joliot Curie tildeltes sammen Nobelprisen i kemi i 1935 for udvikling af den inducerede radioaktivitet – de kunstigt fremstillede isotoper. Irene var datter af Marie Sklodowska-Curie, der fik Nobelprisen i fysik i 1903 sammen med ægtefællen Pierre Curie og Henri Becquerel for deres opdagelse og udvikling af teorierne om radioaktivitet. Marie Curie fik også Nobelprisen i kemi i 1911 for opdagelsen af grundstofferne polonium og radium. Det var også i 1903, at den første dansker fik Nobelprisen, nemlig lægen og forskeren Niels Finsen der opdagede lysets gavnlige effekt til behandling af hudtuberkulose. Finsen grundlagde lysbehandlingen i Danmark, der blev til Finsen Institutet, hvor Hevesy arbejdede som hospitalsfysiker, og hvor han lavede forskning med lægerne Lomholt og Chievitz. Man kunne fremstille kunstige radioaktive isotoper relativt nemt, efter at fysikeren Ernst Lawrence på Berkeley i USA havde udviklet cyklotronen, en partikelaccelerator til

fremstilling af radioaktive isotoper. Lawrence fik Nobelprisen i fysik i 1939 for opfindelsen af cyklotronen. Nye Geiger-Müller-tællere kunne måle radioaktivitet med god nøjagtighed, så nu var de nødvendige naturvidenskabelige redskaber på plads og klar til et nyt forskningsfelt med radioaktive indikatorer i biologien.

Finn Aaserud, mangeårig leder af Niels Bohr Arkivet, skrev bogen: "Redirecting Science", der udkom i 1990 om Rockefeller Foundations nye interdisciplinære program til biologi og naturvidenskab initieret af fondens direktør Warren Weaver i 1930'erne. Bogen beskriver, hvordan fondens nye strategi påvirkede forskningen på Niels Bohrs institut i København. Direktør Warren Weaver havde forespurgt en række Nobelprismodtagere, om det var en god idé med en ny strategi, der havde til formål at gøre biologi til en mere kvantitativ videnskab ved at kombinere biologien interdisciplinært med fysik, kemi og matematik. Det havde alle, inklusive den danske zoofysiolog og Nobelprismodtager August Krogh, støttet varmt.



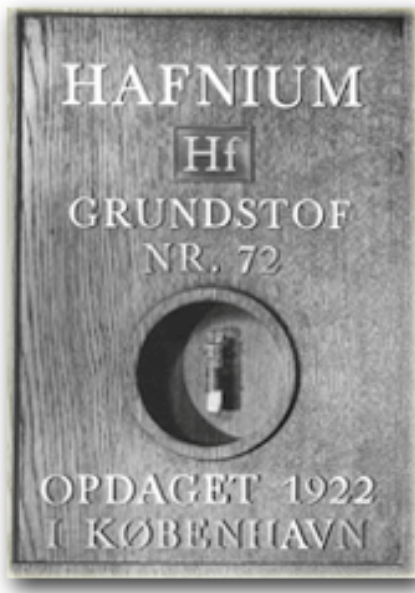
Figur 4. Niels Bohr ved siden af cyklotronen, der blev doneret af Rockefeller Foundation 1935. (Niels Bohr Arkivet).

I 1935 ansøgte Niels Bohr, hjulpet af George de Hevesy, August Krogh og Ole Chievitz om fondsmidler til en cyklotron under den nye strategi fra Rockefeller Foundation - til arbejde med radioaktive indikatorer i biologien, hvor den ønskede cyklotron til Niels Bohrs Institut for Teoretisk Fysik skulle benyttes til at producere kunstige isotoper til biologi som anvendt forskning – og så naturligvis til fysikforskning.

Bohr og Hevesy tog i februar 1935 på skiferie i Tyrol, hvor de sammen skrev ansøgningen til Rockefeller Foundation, som Bohr signerede alene, hvorefter Hevesy rejste til Paris og afleverede kuerten til fondens europæiske kontor. De næste måneder blev udfordrende med udveksling af breve og telegrammer mellem Paris, København og fondens hovedkontor i New York. August Krogh skrev til fonden, at han gerne ville frikøbes fra undervisningen, og det skabte forvirring. Fonden blev desuden bekymret for, om Krogh overhovedet var involveret i den planlagte forskning. Det er en lang historie med forviklinger, der endte med, at den ledende kirurg på Finsen Institutet, professor, overlæge dr.med.

²Curie er en ældre enhed for radioaktivitet og måler aktivitet i antal atomkerner, der henfalder pr. sekund. 1 Curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ henfald pr. sekund = 37 gigabecquerel (GBq).

Ole Chievitz, Niels Bohrs gode ven, måtte intervenere og skrive et særligt brev til fonden, hvori han forsikrede, at de biologiske og medicinske forsøg i København skam var reelle og planlagte. Rockefeller Foundation sagde ja til at give en stor fondsdonation i april 1935. og det samme gjorde Carlsberg Fondet og Thriges fond. I alt modtog Niels Bohr donationer for over 100 mio.kr. i vore dages penge til cyklotronen plus et højvoltsanlæg. Cyklotronen blev bygget med hjælp fra Ernst Lawrence på Berkeley, og den fungerede og havde "beam på" i 1938, som en af de første i Europa.



Figur 5. Plaketten på Niels Bohr Institutet, der viser at her blev grundstof nr. 72 hafnium fundet.

Hevesy arrangerede samme år "Radiumgaven" til Niels Bohrs 50-årsfødselsdag den 7. oktober 1935 med penge indsamlet fra 16 danske firmaer og fonde til 600 milligram radium til brug for forsøg. Hevesy fik desuden tilsendt P-32 i luftpostbreve fra Berkeley-cyklotronen med leverance af millicurie doser - uden at nogen løftede et øjenbryn over strålebeskyttelsen eller manglen på samme. Nu kunne Hevesy selv fremstille en lang række kunstige isotoper og anvende dem til biologiske og medicinske forsøg, og han fik de ekstra forsyninger via brevene fra USA. Mulighederne for forskningsprojekter til afdækning af fysiologiske principper og mekanismer var pludselig åbne for et nyt forskningsfelt med anvendelse af Hevesys indikator-metode og de nye kunstige radioaktive indikatorer.

Hevesy anvendte en lang række isotoper, bl.a. Pb-210, Bi-210, Po 210, tungt vand D₂O, P-32, Zn-65, Na-24, K-42, Cl-36, og Br-85. Der blev udført talrige forsøg med planter og dyr om metabolisme og knogledannelse, vækst af kyllinger, æg og embryoer og kinetik af ATP-molekyler og nukleinsyrer. En række fysiologiske og biokemiske principper blev beskrevet og afdækket for første gang. Forskerne mærkede erythrocytter (røde blodlegemer), og de udviklede en ny metode til måling af blodvolumen, der stadig bruges til patientundersøgelser.

³I KVANT nr. 1 (2025) findes en artikel om Hilde Levi og isotoperne af denne artikels forfatter. Hilde Levi var fysisk kemiker, og af stor betydning for udvikling af arbejdet med de radioaktive indikatorer i biologien.

Sammen med August Krogh undersøgte Hevesy membranpermeabilitet, og indikatorprincippet blev udviklet videre af Krogs elev, senere professor Hans Henrik Ussing, der ifølge Hevesy selv blev den mest elegante eksperimentalist med radioaktive indikatorer. Med August Krogh, datteren Bodil Smith-Nielsen og tandlægeprofessor Johannes Juul Holst undersøgte de vækst af tænder hos rotter, og hos et enkelt barn, der skulle have trukket en tand ud.

Med Nobelprisvinderen professor Hans von Euler Chelpin i Stockholm initierede Hevesy studier af dyremodeller med såkaldte "Jensen Sarkomer" for at undersøge mekanismerne bag celleskaden induceret af strålebehandling. Det blev til godt 70 videnskabelige artikler fra Hevesy sammen med en bred kreds af forskere fra mange institutioner i København plus Stockholm. Udgangspunktet var Niels Bohrs institut, med cyklotronen, højvoltsanlægget, tællerne og Hevesys laboratorium og medarbejdere, og med Hilde Levi som forskningsassistent og den omhyggelige og kompetente leder af laboratoriet.³

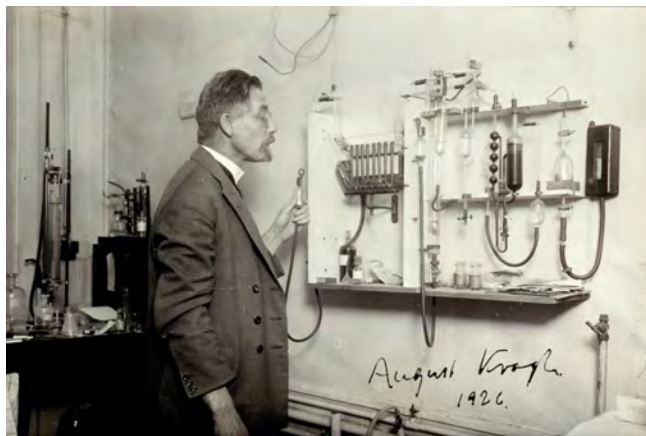
Artiklen om det aktive skelet

Hevesy og Chievitz havde i ansøgningen til Rockefeller Foundation lovet at udføre studier med radioaktive indikatorer i biologien, og Chievitz var en mand, der holdt sit ord. Hevesy og Chievitz initierede de første forsøg med P-32-omsætningen i knogler hos rotter i løbet af sommeren 1935. Resultaterne blev publiceret i det fornemme tidsskrift Nature allerede om efteråret samme år. Artiklen om optagelse og udskillelse af P-32 fra knoglerne i skelettet hos rotter er særlig. Forfatterne rapporterede på baggrund af deres eksperimenter med undersøgelser af optagelse og udskillelse af P-32 fra knoglerne hos rotter, at knoglerne er et aktivt metabolisk organ. Det var dengang i 1935 et højst usædvanligt udsagn, fordi man mente, at skelettet var en inaktiv "stige" i kroppen. Mr. Gregory, den magtfulde redaktør for Nature, som Hevesy kendte fra en rejse til Sydafrika i 1920'erne, skrev i samme nummer af Nature en reserveret redaktionel kommentar, hvori han lagde afstand til deres dristige udsagn. Hevesy og Chievitz viste sig at have ret, og deres artikel danner grundlaget for vore dages knoglescintigrafi, en nuklearmedicinsk billeddiagnostisk undersøgelse, der anvendes til at diagnosticere kræft og anden knoglesygdom hos patienter.

Deres resultater var de første, der påviste den aktive knoglemetabolisme, der er så vigtig for den biokemiske og fysiologiske forståelse, inklusive knogleheling og osteoporose.

Overkirurg og professor Ole Chievitz på Finsen Institutet var Hevesys medforfatter på artiklen, endda førsteforfatter. Chievitz var krigskirurg under både 1. verdenskrig, den finske borgerkrig, den finske vinterkrig, og under 2. verdenskrig var han medlem af modstandsbevægelsen og Danmarks Frihedsråd. Niels Bohr og Ole Chievitz havde kendt hinanden fra barnsben, og havde gået i skole sammen fra første klasse til studentereksamen, og var bedste venner.

August Krogh, den verdensberømte zoofysiolog, og modtager af Nobelprisen i 1920 i fysiologi eller medicin for “den kapillær-motoriske regulation” var Hevesys læremester i fysiologi. Hevesy var kemiker, og initialt helt uden fysiologisk forståelse. Siegfried Niese skrev en stor biografi om Hevesy på tysk, der udkom i 2009. Heri konkluderede Niese om relationen mellem Krogh, Bohr og Hevesy: “Hevesy kunne betragtes som brobyggeren mellem Krogh og Bohr”. Helt bogstaveligt kom Hevesy med isotoperne på cykel fra Niels Bohrs institut på Blegdamsvej over til August Krogh rundt om hjørnet til Rockefeller Komplekset på Juliane Maries Vej. Der er ca. 400 m i fugleflugtslinje.



Figur 6. August Krogh (1874–1949) i laboratoriet, 1926.

Hevesys første studie med radioaktive indikatorer til patienter blev lavet sammen med læger fra Rigshospitalet og Bispebjerg Hospital, hvor den unge kirurg Karl Henrik Køster var ved at skrive disputats om mavesår. Professor Erik Warburg på Rigshospitalet var hans mentor. Warburg havde skrevet disputats på Finsen Institutet om blodets kemi 1922, og kendte Lomholt, Chievitz og Hevesy. Warburg var leder af kardiologien på Rigshospitalet og blev senere rektor på Københavns Universitet. I forskningsprojektet med patienter tog forskerne en blodprøve, isolerede og mærkede erythrocytterne (de røde blodlegemer) med P-32, sprøjtede blodprøven ind igen, ventede på fordeling i blodet i 10 min og tog så en ny blodprøve, og talte på en standard og på blodprøven. Herefter beregnede de blodvolumen – og sådan gør man stort set også i dag til patienter i forlængelse af dette første studie.

Hevesy i Stockholm

I oktober 1943 besluttede nazisterne i Berlin, at de danske jøder skulle fængsles og sendes i koncentrationslejr i Tyskland. Hevesy tog flugten med en illegal fiskerbåd over Øresund, og efter ankomsten rejste han med toget til Stockholm. Næste morgen mødte han op hos forskerkollega professor Hans von Euler Chelpin i laboratoriet på Stockholm Højskole, nu Stockholms Universitet, hvor han uden kommentarer fik kontor og startede forskning med det samme. Sammen fortsatte Hevesy og von Euler undersøgelserne af nukleinsyrer og celle- og tumurvækst under strålebehandling i deres Jensen sarkom-model hos rotter, med den teknik de havde initieret nogle år tidligere. Resultaterne af deres

studier anses stadig for vigtige pionerarbejder indenfor strålebiologi- og behandling.

Hevesy modtog Nobelprisen i kemi for princippet med de radioaktive indikatorer for året 1943, og uddelt i 1944. Efter 2. verdenskrigs afslutning besluttede George de Hevesy at blive i Stockholm med familien. Nobelprisen betød dengang, og sådan er det fortsat, at modtageren bliver tilbudt svensk statsborgerskab. Den mulighed indløste Hevesy, og i erindringerne skriver han udførligt om overvejelserne, hvor det i sidste ende var hensynet til familien og børnene, der gjorde udslaget for ikke at tage retur til København. Måske spillede det også en rolle, at al den biologiske isotopforskning ved Københavns Universitet blev overflyttet fra Niels Bohrs institut på Blegdamsvej til August Kroghs Zoofysiologiske laboratorium A rundt om hjørnet på Juliane Maries vej. Vist nok på August Kroghs initiativ.

I årene fra 1945 til Hevesys død i 1965 forskede han først med Hans von Euler og forskningsassistent Lucie Ahlström, som han omtalte meget rosende i flere sammenhænge. Ahlström var medforfatter på fælles arbejder. Senere tog Hevesy tråden op om den kliniske nuklearmedicin til patienter med bl.a. Gustav Nyelin og hæmatolog overlæge Dieter Lockner på Karolinska Institutet. Sammen udviklede de undersøgelser til måling af blodvolumen, i forlængelse af arbejdet med Køster og Warburg, og de bestemte erythrocytternes (de røde blodlegemers) middellevetid til 120 dage, der også i dag er fysiologisk basalviden, der nævnes i de store lærebøger. Det var deres originale fund.

Hevesy blev som Nobelprismodtager inviteret til utallige internationale møder, og var på mange rejser og konferencer, selv om han ikke kunne fordrage at flyve, særligt ikke på lange strækninger. Han blev behørigt feteret og fejret af det internationale samfund indenfor kemi, fysik, biologi og medicin. Hevesy skrev oversigtsartikler og lærebøger, og hvori han forudsagde, at udviklingen af nuklearmedicin til patienter ville tage fart fremover. Særligt udviklingen i USA efter krigen imponerede ham.

Hevesy blev medlem af “The Pontific Academy of Sciences”, Pavens forskningsråd, der stadig eksisterer med flere Nobelprismodtagere som medlemmer. Hevesy var konverteret til katolicismen som 18-årig efter studentereksamen hos de katolske Piarister i Budapest, der har samme fokus på viden og videnskab som jesuitterne.

Hevesys sidste videnskabelige foredrag var for The Pontific Academy of Sciences få uger før han døde af lungekræft 5. juli 1965. Det fortælles, at han var ledsaget af læge, der havde medbragt en iltbombe, der dog ikke blev benyttet. Hevesy havde aldrig været tobaksryger.

Hans sidste tid var på universitetshospitalet i Freiburg, hvor han efter eget ønske var taget ned på hvad man i dag ville kalde et hospiceophold, og han fik indrettet afslutningen, som han ønskede sig. Hevesy havde været universitetsprofessor i Freiburg, og det var også stedet for hans disputats.

I Siegfried Nieses store tyske biografi benævnes Hevesy “Wissenschaftler ohne Grenzen”, altså viden-

skabsmand uden grænser, hvilket vel kan tolkes overfor både forskningsemner, der dækkede mange områder interdisciplinært i grænselandet mellem kemi, fysik, geologi, biologi og medicin, men det grænseløse kunne også gå på Hevesys geografiske tilhørsforhold. Hevesy var oprindeligt ungare og var uddannet ved mange universiteter i Europa, og han havde rejst i USA og Japan. Han boede i længere perioder i København, Freiburg, København og Stockholm.

Hevesy blev begravet i Freiburg, men blev genbegravet med familiens deltagelse i Budapest i Ungarn, hans fædreland, i 2001 på initiativ af det ungarske videnskabsakademi. Både i Ungarn og i Freiburg er mange mindesmærker og universitetsafdelinger opkaldt efter George de Hevesy.

Hilde Levi, hans mangeårige forskningsassistent, samlede hans arkiv efter hun blev pensioneret i 1979 og tilknyttet Niels Bohr Arkivet. Hilde Levi udgav en biografi om ham på engelsk i 1985.

Som en af få fastholdt Hevesy, at han ikke var specielt glad for Nobelprisen. Hans livslange skuffelse over ikke at have fået den tildelt for Hafnium-opdagelsen i 1922 kunne ikke opvejes af glæden i 1944.

Hevesy var en genial videnskabsmand, aristokrat til benet og uhyre produktiv med næsten 400 videnskabelige artikler på publikationslisten. Hans originale forskningsbidrag var mange, opdagelsen af de radioaktive indikatorer var bare en blandt flere transformative og originale opdagelser.

Udvikling af nuklearmedicin

Efter 2. verdenskrig udvikledes nuklearmedicinen først i USA på Berkeley hos brødrene Lawrence, så i London på Hammersmith, og dernæst bredt internationalt. Der kom nye tracere, altså radioaktive isotoper kemisk bundet til molekyler med særlige egenskaber, hvor skæbnen i organismen afspejler kroppens og organernes funktion og sygdomme. Der blev udviklet tællere, kameraer og computere, og interdisciplinære grupper af forskere med læger, fysikere, ingeniører og kemikere udviklede nye undersøgelser, designet via deres fælles dybe forståelse af både teknologiens formåen og kroppens funktioner og sygdommenes natur.

Isotoperne kunne fremstilles i reaktorer, der opstod som udløbere af forskningen ved Manhattanprojektet, eller (for PET-isotoper) i cyklotroner, med nye og bedre udgaver af Ernst Lawrence-opfindelsen på Berkeley. Der blev udviklet tælleudstyr, der i simple opstillinger kunne undersøge tracernes fordeling i kroppen, og dernæst fulgte egentlig billedfremstilling med nye skannere, og senere gammakameraer, der udvikledes til at kunne optage i 3D og 4D, hvor kameraet optager i positioner cirkulerende rundt om patienten, såkaldt SPECT, Single Photon Emission Computerized Tomography.

PET-skanning (positronemissionstomografi) benytter tracere med isotoper, der henfalder med positroner, elektronens antipartikel. Positronen henfalder ved at annihilere med en elektron, så der dannes to modsatrettede gamma-kvanter, der tælles i koincidens ved samtidig ankomst af de to gammakvanter til to detektorer i PET-

skanneren.

Rent praktisk får patienten en PET-tracer givet i steril vandopløsning indsprøjet i en blodåre. Til diagnostik af kræftsygdom anvendes særligt traceren FDG, (F-18 FDG, fluor-18 fluor-deoxy-glucose). F-18 henfalder med positroner med en halveringstid på 110 min. FDG optages særligt i kræftceller og metaboliseres ikke som vanlig glucose, og særlig høj optagelse af FDG er derfor en markør for kræftsygdom.

Til PET-undersøgelser af patienter blev de første tællere udviklet allerede i 1950'erne i Boston på Massachusetts General Hospital, Harvard Medical School, og kameraer blev udviklet i 1980'erne flere steder. Bedre kameraer i kombinationen med CT blev til PET/CT-skannere, der kom til omkring år 2000.

Nutidens nuklearmedicin

Nuklearmedicin anvender fortsat Hevesys princip med radioaktive indikatorer, der henfalder med gammakvanter og som benyttes til SPECT- kamera-undersøgelser og gammakamera-undersøgelser af patienter. Og PET-tracere anvendes til undersøgelser i PET/CT- og PET/MR-skannere. Der er også et stort område om funktionsundersøgelser og forskning.

Når traceren, indikatoren eller sporstoffer, er givet i en meget lille dosis til patienten, kan man påvise fordelingen i kroppen med PET-skanneren og fremstille billeder i 3D og 4D og 5D (længde, bredde, højde, tid, og aktivitetsintensitet). Med PET/CT-skanneren kan patienten på samme tid og i samme apparatur få foretaget både PET og CT, der er en røntgenbaseret tomografi, som viser anatomi med høj opløselighed. Den første PET/CT-skanner i Danmark kom på Rigshospitalet i år 2001. Teknikken fik anvendelsen af PET til at eksplodere, fordi den diagnostiske værdi af disse skanninger er så overbevisende. Man kan påvise kræftsygdom med meget høj sikkerhed, hvilket er afgørende for den rigtige behandling til patienten.

De nyeste PET/CT-skannere her i 2025 kan skanne patienten på få minutter med meget lav stråledosis og en uhyre høj diagnostisk præcision. PET/CT-skanning anvendes til forskning og til diagnostik af patienter med kræftsygdomme, hjernesygdomme, hjertesygdomme, ved infektioner- og inflammationer og til afklaring af bevægeapparatets sygdomme etc. Særligt til børn anvendes PET/CT i dag med de nye skannere med lav stråledosis. Undersøgelserne er uden ubehag for patienterne, og man kan i dag skanne også små børn uden bedøvelse, fordi skanningen kan foretages så hurtigt. Da teknikken med PET/CT kom, blev den initialt brugt særligt til kræftdiagnostik, og den blev benævnt: "the fastest growing medical technology ever". Det er nok at tage munden for fuld, men hurtigt gik det, og aktuelt udføres mange millioner skanninger verden over hvert år. Der er efterhånden kommet cyklotroner på mange hospitaler, og i Danmark er der cyklotroner på hospitalerne i Herlev, Odense, Aarhus, på Rigshospitalet og Hevesy-laboratoriet, Risø, DTU.

Teknikken er kostbar og kompleks, og den fordrer både cyklotron, radiokemi, PET/CT-skannere og et kompetent og veluddannet personale til hvert trin – fra

produktionen af isotoper i cyklotronerne med fysikere, ingeniører og teknikere, og fremstilling af tracere i radiokemilaboratorier ved radiokemikere, bioanalytikere og farmaceuter plus læger, sygeplejersker, bioanalytikere og radiografer til PET/CT-skanningerne. Særligt kyn-dige speciallæger vurderer indikationen for patientens henvisning, tilrettelægger undersøgelserne, beskriver skanningsresultater og billeder, og vurderer og konfererer undersøgelsessvaret ved de såkaldte "multidisciplinære kræftkonferencer". Den høje diagnostiske værdi for patienterne betyder, at den rigtige diagnose kan stilles og benyttes som grundlag for valg af den optimale behandling til hver individuel patient. Den komplekse og kostbare teknik har fået stor udbredelse – fordi den er såkaldt "kost-effektiv". Det kan betale sig at gøre det rigtige første gang.

Man kan også bruge nuklearmedicin til behandling. Først finder man kræftsvulsten med en tracer, hvor f.eks. et antistof "sætter sig" på kræftcellerne og "lyser op" på en skanning. Trin to er at give samme målsøgende molekyle, men nu hæftet sammen med en radioaktiv isotop, der dræber cellerne ved at ødelægge cellekernen, DNA'et. Enten benyttes en isotop til behandling, der henfalder med betastråling, altså en elektron, eller en isotop, der henfalder med alfapartikler, heliumkerner. Princippet kaldes teranostik – terapi på baggrund af diagnostik.

Nuklearmedicin er i dag en teamindsats rundt om patienten med læger, bioanalytikere, radiografer og sygeplejersker, fysikere, ingeniører og radiokemikere m.fl. Udviklingen er forskningsbaseret, interdisciplinær og international, ligesom for 100 år siden. Teknikken er skabt på grundlag af George de Hevesys indikatorprincip.

Da planeterne stod på række

Det var en ganske særlig konstellation dengang i 1930'ernes København, hvor George de Hevesy sammen med Niels Bohr, August Krogh og lægerne Svend Lomholt og Ole Chievitz, og ikke mindst Hilde Levi, forskede sammen og udviklede en gejser af ny viden om radioaktive indikatorers anvendelse i biologi og medicin. De var kernegruppen i et stort team med mange involverede forskere og teknikere fra forskellige videnskabelige discipliner. De arbejdede interdisciplinært, og var forskellige personligheder, men drevet af en ægte forskningsinteresse med nysgerrighed og originalitet. De kendte hinanden og var venner på kryds og tværs i den lille by København, og man fornemmer, at de samarbejdede uden større problemer. Det var usædvanligt med så høj en koncentration af dedikerede og særlige begavelser. Som de sjældne tilfælde, hvor planeter står på række.

De var dygtige til at opnå fondsmidler fra Rockefeller Foundation i USA, datidens største amerikanske og internationale fond med støtte til forskning. Både Niels Bohr og August Krogh havde gennem en lang årrække opnået endog meget betydelige donationer, og de danske fonde var også af stor betydning, særligt Carlsbergfonden og Rask-Ørstedfonden. De var i tæt kontakt med det internationale forskersamfund, og de

rejste meget og havde internationale gæster.

Forskere fra Københavns Universitet, særligt fysiologerne Einar Lundsgaard og senere Poul Brandt Rehberg og Carlsberg Laboratoriets Kai Linderstrøm-Lang var vigtige for de biologiske forsøg, og August Krogh spillede en afgørende rolle som mentor for Hevesy. Forsøgene foregik spredt over hele byen, på Den Kongelige Veterinær- og Landbohøjskole, Polyteknisk Læreanstalt og selvfølgelig Finsen Institutet hos lægerne Lomholt og Chievitz med den tilknyttede Radium Station, hvor Niels Bohr også var med. De var vævet ind i Modstandsbevægelsen fra tidligt efter nazisternes magtovertagelse i Tyskland, og havde man været foruden den ulykkelige 2. verdenskrig, så kunne København måske være blevet arnestedet for den internationale nuklearmedicinske udvikling, som særligt tog fart i USA efter krigens ophør.



Figur 7. George de Hevesy (1885–1966). (Niels Bohr Arkivet).

Efter 2. verdenskrig blev professor Niels Lassen på Bispebjerg Hospital en vigtig pioner også internationalt med udvikling af hjerneforskning med den nuklearmedicinske tracerteknik. Specialet nuklearmedicin i Danmark er i dag på højde med den internationale udvikling både hvad angår patientundersøgelser og forskning. Verdens første ultra-lavdosis PET/CT-skanner er lige blevet bevilget fra A.P. Møller Fonden til afdelingen på Rigshospitalet, så patienterne i fremtiden kan skannes på få minutter stort set uden stråledosis. Udviklingen af nuklearmedicinen fra George de Hevesys opdagelse af de radioaktive indikatorer til dagens nyeste teknologiske landvindinger har været en lang perlerække af eksempler på praktisk samfundsmæssig anvendelse af de eksakte naturvidenskaber.

Litteratur

- [1] J.D. Cockcroft (1967) "George De Hevesy 1885–1966", *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, bind 13, side 125–166.
- [2] G. de Hevesy (1944) "Some applications of isotopic indicators", Nobel lecture.
- [3] H. Levi (1985) "George de Hevesy", Rhodos Forlag.
- [4] S. Niese (2009) "Georg von Hevesy. Wissenschaftler ohne Grenzen", Prinzipal Verlag. 2009.
- [5] B. Schmidt-Nielsen (1997) "August og Marie Krogh. Et fælles liv for videnskaben", Gyldendal.
- [6] F. Aaserud (1990) "Redirecting science. Niels Bohr, philanthropy and the rise of nuclear physics", Cambridge University Press, Cambridge.



Liselotte Højgaard er speciallæge i klinisk fysiologi og nuklearmedicin, og var chef-læge på Rigshospitalet 2000–2023. Hun er professor ved Københavns Universitet, KU Sund, Institut for Klinisk medicin og adjungeret professor på DTU. Hun har været bestyrelsesformand for Danmarks Grundforskningsfond, og har grundlagt uddannelsen civilingeniør i medicin og teknologi, som er fælles for DTU, KU og Rigshospitalet.

KIF-Prisen 2025 går til Carolina von Essen

Maren Mallong

Kvinder i Fysiks hæderspris for 2025 er tildelt Carolina von Essen, senior data scientist hos Grundfos og postdoc ved DTU Space. Med prisen ønsker Kvinder i Fysik at anerkende Carolinas enestående faglige indsats inden for astrofysik og datavidenskab, samt hendes mangeårige og modige engagement i ligestilling og inklusion i forskningsverdenen og samfundet.

Carolina har en bemærkelsesværdig international karriere bag sig. Hun er uddannet astrofysiker fra Argentina og har forsket i både Tyskland og Danmark. Allerede tidligt i sin karriere tog hun initiativ til at oprette og lede det internationale samarbejde KOINet – Kepler Object of Interest Network – der samler forskere og teleskoper fra hele verden til opfølgende observationer af exoplaneter opdaget med Kepler-teleskopet. Hendes arbejde med avanceret dataanalyse og modellering har bidraget væsentligt til forståelsen af exoplanetære systemer og har haft stor betydning for internationale samarbejder på området.

Efter en periode som adjunkt ved Aarhus Universitet skiftede Carolina spor og arbejder i dag som senior data scientist i industrien (hos Grundfos) samtidig med, at hun fortsat er aktiv forsker med en 20%-stilling som postdoc på DTU Space. Hendes karriereforløb viser, hvordan fysikere kan bygge bro mellem universitet og industri, og hvordan man kan fortsætte med at forske og bidrage til videnskaben også udenfor de traditionelle rammer.

Ved siden af sit forskningsarbejde har Carolina i årevis været en engageret fortaler for ligestilling og retfærdighed i både akademiske og industrielle sammenhænge. Hun har blandt andet siddet i ligestillingsudvalg på Aarhus Universitet og været aktiv i Kvinder i Fysik. Hun har offentligt delt sine erfaringer med strukturelle udfordringer i forskningsverdenen og været med til at sætte ligestilling på dagsordenen – også i møder med universitetsledelsen.

Som underviser og vejleder er Carolina kendt for sit stærke fokus på at skabe inkluderende læringsmiljøer med fokus på de studerende. Hun har målrettet arbejdet for at støtte studerende, som ellers kunne risikere at føle sig marginaliseret i akademiske sammenhænge.



Figur 1. KIF-prisvinder Carolina Von Essen (i midten) med evalueringskomiteens repræsentant Mette Bybjerg Brock-Hansen (t.v.) og KIF-formand Maren Mallong (t.h.).

Hendes engagement stopper ikke ved universitetsverdenen. Carolina har taget initiativ til konkrete ligestillingsprojekter i industrien og arbejder også for at støtte minoritetsgrupper i det danske samfund. Hun er en tydelig stemme for forandring – både fagligt og socialt – og hendes virke viser, hvordan man kan kombinere faglig dybde med social ansvarlighed og medmenneskelighed.

KIF-Prisen blev overrakt ved DFS's Årsmøde den 15. maj på DTU, og hele interviewet med Carolina kan læses på KIF's hjemmeside kvinderifysik.dk

Skalering af fastoxid-elektrolyse- og brændselscellesystemer til stor-skala elektrolyseteknologier

Anne Lyck Smitshuysen, Dynelectro ApS og DTU Energy

Grøn brint kan fremstilles gennem brug af grøn strøm og elektrolyse af vand. Elektrolyse ses derfor som en byggesten i den grønne omstilling, hvor brinten skal bruges til de sektorer, som ikke kan elektrificeres. For at gøre elektrolyse konkurrencedygtigt er der flere ting, der skal optimeres. En af dem, er komponent-størrelsen af fastoxid-elektrolysecellerne, som skal skaleres fra en størrelse svarende til en skive toastbrød og til en størrelse svarende til en computerskærm. Ved at kombinere computersimuleringer og eksperimenter er der fundet en måde, som muliggør denne opskalering og derved lægger de første trædesten til vejen til stor-skala elektrolyseteknologier til fremtidens CO₂-neturale samfund.

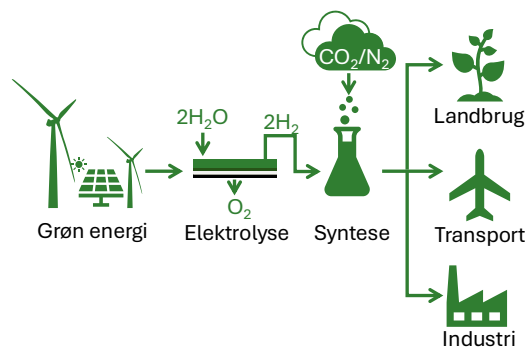
Energi lavet ved brug af fossile brændstoffer er en stor del af vores alles hverdag. Med en stigende global gennemsnitstemperatur og et stigende antal årlige naturkatastrofer er der forskere verden over, der arbejder på at opfinde og forbedre alternativer til de fossile brændsler. Elbilen har gjort sit indtog på vejene og forbedringer i forhold til rækkevidde og opladningstid bliver løbende annonceret. Vindmøllerne bliver større og solpanelerne bliver både billigere og mere effektive. Der er dog en andel af vores energiforbrug, der ikke direkte kan erstattes af grøn strøm. Batterier i både flyvemaskiner og containerskibe ses ikke som en reel løsning, da batterierne både fylder og vejer for meget i forhold til transportformens formål. Desuden er der industrier, der ikke bruger de fossile brændsler for energien alene, men også for deres andre egenskaber. Fx kunstgødning-fremstillingen som bruger brinten (H₂) i naturgassen for at reagere den med kvælstof (N₂) og derved syntesere kunstgødning (NH₃). Ligeledes står det til med stålindustrien, som står for 7% af verdens udledning af drivhusgasser [1]. Her er det brandværdien af de fossile brændsler, der skal bruges for at nå de høje temperaturer, der er brug for i produktionen. Disse sektorer kan altså ikke elektrificeres, hvilket gør den grønne omstilling af dem mere komplicerede.

Power-to-X

Begrebet Power-to-X dækker over idéen om at bruge overskydende grøn strøm til at lave alternative løsninger til de sektorer, der ikke kan elektrificeres. Figur 1 illustrerer, hvordan Power-to-X kan se ud. Første skridt i Power-to-X-kæden, efter den grønne strøm er blevet lavet, er elektrolyse, hvor strøm bliver brugt til at splitte vand til ilt (O₂) og brint (H₂), uden nogle biprodukter. Brinten kan derefter enten bruges i fx stålproduktion eller den kan kombineres med kulilte (CO₂) eller kvælstof (N₂) for at lave alternative brændstoffer eller kunstgødning. Elektrolyseteknologien er derfor en vigtig faktor i den grønne omstilling, da den muliggør en bæredygtig fremtid for de sektorer, der ikke kan køres udelukkende på strøm.

Årsagen til at teknologien ikke allerede har overtaget for de fossile brændstoffer er, at brinten, der fremstilles

på denne måde, er 2–3 gange dyrere end brint fremstillet på den gammeldags facon. Desuden er flere af teknologierne stadig på en for lille skala i forhold til vores enorme behov. Der bliver derfor forsket i at gøre elektrolyseteknologierne bedre, billigere og større.



Figur 1. Power-to-X kæden, hvor grøn strøm bruges til at lave grønbrint, som så kan kombineres med CO₂ eller N₂ for at danne syntetiske brændstoffer, kunstgødning eller blot levere ren brint til industrien.

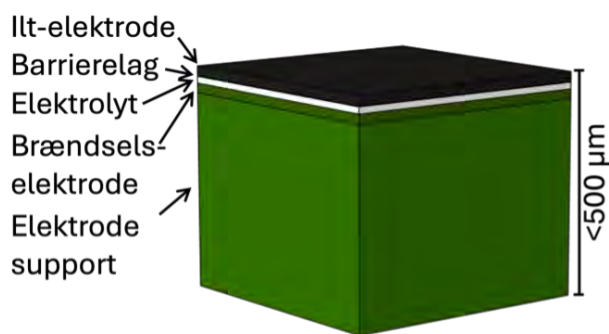
En elektrolyseteknologi, der bliver spået til at kunne gøre grøn brint mere attraktiv er fastoxid-elektrolysecellerne. I modsætning til de andre teknologier (Proton Exchange Membrane, PEM, elektrolyseceller og alkaliske elektrolyseceller) opererer fastoxid-cellerne med vanddamp. Operationstemperaturen ligger typisk over 650 °C, hvilket giver dem en termodynamisk fordel og derved en højere virkningsgrad. Teoretisk set kan fastoxid-cellerne have en virkningsgrad på 100%, hvilket betyder, at al energien, der tilføjes systemet, bliver brugt til at producere brint. I virkeligheden ligger effektiviteten af et fastoxid-elektrolysesystem på ca. 80%, hvilket stadig gør det mere effektivt end de andre teknologier [2].

Levetiden af fastoxid-cellerne er begrænset, da mikrostrukturen ændrer sig på grund af den elektriske polarisering af cellerne. Det ses ved at nogle af partiklerne rykker sig rundt inde i cellen og resulterer i, at modstanden stiger. Systemer ved fastoxid-celler skal derfor have skiftet cellerne ud hvert 2–3 år, hvilket gør teknologien dyr og den grønne brint ligeså. Dynelectro ApS har fundet en måde, som modvirker disse mekanismer, forlænger cellernes levetid til 10 år, og derved

mindsker omkostningerne for at lave den grønne brint [3,4]. Levetiden er dog ikke det eneste, der begrænser brugen af fastoxid-elektrolyse. Størrelsen af de enkelte celler er typisk ikke større end $12 \times 12 \text{ cm}^2$, hvilket kan trække i omegnen af 50 W. Ved opbygningen af elektrolysesystemer, bygges derfor såkaldte stakke, hvor de enkelte celler bliver forbundet i serie for at forøge effekten af systemet. En 5 kW stak vil derfor indeholde omtrent 100 celler, og hvis et system fx skal levere 150 kW, vil der skulle bruges 30 af sådanne stakke. Ved opbygningen af et elektrolyse-system, udgør stakkene cirka 20% af omkostningerne. De resterende 80% ligger i det omkringliggende udstyr, styring og ventilation af systemet. Ved produktion af større celler, vil opbygningen af MW-systemer blive forsimplet og omkostningerne herfor vil reduceres, des større cellerne bliver.

Keramisk processing

Problematikken med at opskalere cellerne findes i materialerne. Fastoxid-cellerne er lavet af forskellige lag af keramiske og metalliske materialer. Et eksempel på, hvordan en af de mest anvendte elektrolyseceller ser ud, ses i figur 2.



Figur 2. Eksempel på opbygning af de 5 lag, der udgør de fastoxid-celler, der anvendes til fastoxid-elektrolyse.

Cellen er opbygget af:

1. Elektrodesupporten, som er det tykkeste lag i cellen og hvis primære formål er at give mekanisk stabilitet. Supportlaget er en grovkornet version af brændselselektroden, og kan derfor også benyttes til at splitte vand. Elektrodesupporten er ofte 300–400 μm tyk.

2. Brændselselektroden, hvor vandet splittes til ilt-ioner og brint. Reaktionen kan kun finde sted ved såkaldte tre-fase-grænser, hvor gasfasen mødes med både den ionledende fase og den elektrisk ledende fase, som illustreret i Figur 3. Brændselselektrodens mikrostruktur er derfor meget finkornet for at have så mange tre-fase-grænser som muligt. Brændselselektroden er oftest 15–20 μm .

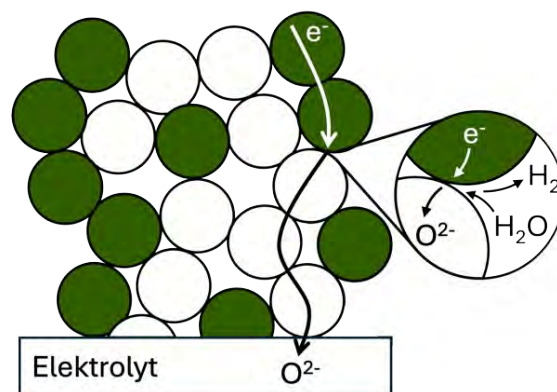
3. Elektrolytten, som er et gas-tæt lag. Elektrolyttens formål er at lede ilt-ioner over til ilt-elektroden og et eventuelt læk af gas fra den ene til den anden side vil kortslutte cellen. Sammensætningen af elektrolyttens materialer er designet således, at der på atomart niveau er ilt-huller. Disse huller giver ilt-ionerne mulighed for

at bevæge sig gennem elektrolytten, når elektrolysecellen kører. Elektrolytten er oftest i omegnen af 10 μm eller mindre.

4. Barrierelaget, hvis primære formål er at forhindre reaktioner mellem materialerne i elektrolytten og ilt-elektroden. De hyppigst brugte materialer i disse lag kan reagere og forme isolerende lag, som betyder, at cellen ikke virker mere. Barrierelaget kan laves så tyndt som 1 μm .

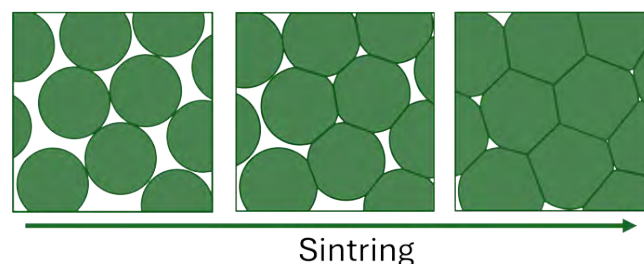
5. Ilt-elektroden, som ofte er lavet af en blandet ionisk-elektronisk leder. Her reagerer ilt-ionerne med hinanden og bliver til ren ilt, som kan ledes ud af systemet. Tykkelsen af ilt-elektroden er oftest i omegnen af 15 μm .

Samlet set er en fastoxid-elektrolysecelle derfor oftest under 0,5 mm tyk.



Figur 3. Tre-fase-grænsen i brændselselektroden, hvor vand bliver splittet til brint og ilt-ioner. Grøn indikerer den elektronledende fase, de hvide cirkler den ilt-ion-ledende fase og det omkringliggende er gasfasen, hvor brint og vand findes på gasform.

Når cellerne produceres, brændes de i en ovn ved temperaturer over 1000 °C. Ved disse temperaturer påbegynder sintringen af materialerne, hvor de keramiske partikler binder sig sammen og danner et sammenhængende netværk. Princippet er vist i figur 4. Lufthullerne i materialet gør, at cellerne kryber ved sintringen. Ved fastoxid-cellerne medfører sintringen et kryb på 20–30%. Hvis der er store defekter i de keramiske emner, eller de klæber sig fast til underlaget i løbet af brændingen er der stor risiko for at de bukker eller revner og derved er ubrugelige i opbygningen af stakkene.

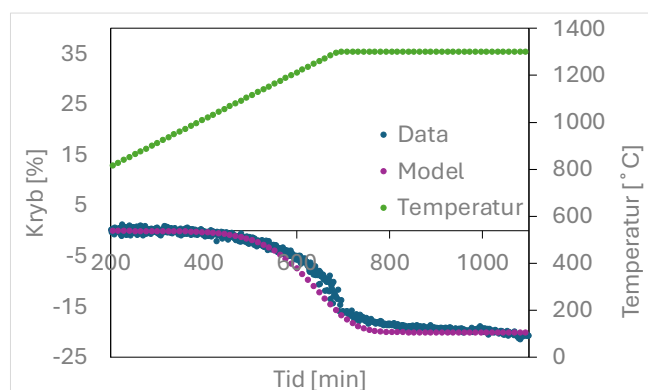


Figur 4. Sintring af keramiske partikler starter ved temperaturer over 1000 °C og resulterer i, at partiklerne vokser sammen og laver et sammenhængende netværk.

En vej til stor-skala elektrolyseceller

Idéen bag vores forskning kom ud af idéen om at udnytte cellernes kryb i stedet for at prøve at arbejde imod det. Dette gøres ved at forme cellerne inden brændingen. Her skal krybet så bruges til at trække strukturen flad i stedet for at cellen skal trække sig horisontalt hen over underlaget, den ligger på.

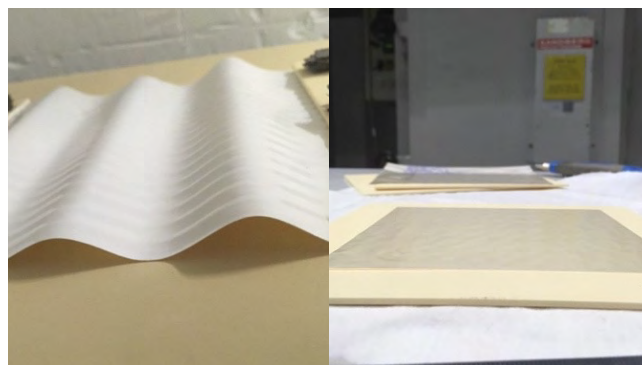
Tilgangen er en blanding af computersimuleringer og eksperimentelt arbejde. Som input til simuleringerne er der lavet en del forsøg for at få beskrevet materialernes sintringsadfærd. Dette gøres ved at lægge små prøver i en ovn, hvor der er et vindue ind til prøverne. Et optisk kamera tager så billeder i løbet af opvarmningen, og sintringen og billedanalyse bruges til at lave kurver for, hvordan materialet opfører sig. Ved hjælp af disse kurver og de matematiske modeller, der beskriver krybet af materialerne, er det muligt at udlede fysiske parametre, som påvirker sintrings-processen. Ved at kalibrere simuleringerne med de målte parametre, opnås en overensstemmelse mellem data og modellen, som kan benyttes til videre studier. Et eksempel på, hvordan resultatet af en kalibreret model kan se ud, er givet i figur 5, hvor kurverne for krybet følges ad for det meste af temperaturprofilen og ender ud på det samme totale kryb. Herefter kan simuleringerne bruges til at udføre en række parameterstudier for at forudsige nogle forme, som potentielt vil kunne bruges til at lave store, flade celler.



Figur 5. Resultat af optimering af computermodellen, så data og model stemmer tilnærmelsesvis overens ved de forskellige temperaturer i løbet af sintringen.

For at eftervise modellen, skal konceptet demonstreres eksperimentelt. De første lag af cellen produceres ved at lave en suspension af de keramiske og metalliske materialer, som støbes og brændes før resten af lagene lægges på. Formningen af de celler sker i dette skridt inden sintringen, hvor de støbte emner stadig er formbare. Figur 6 viser en formet elektrolyt før og efter sintring, hvor det ses, at elektrolytten er fladet ud under sintringen, hvilket computer modellen også forudså. Flere studier forløber på forskellige

materialer, tykkelser og former for at opnå det bedste resultat, hvilket i dette tilfælde vil være det fladeste og mest reproducerbare resultat. På nuværende tidspunkt viser studierne, at processen gør det muligt at forøge størrelsen af cellerne med 600%. En sådan forøgelse vil gøre større produktionsskala muligt for fastoxid-elektrolysecellerne og potentielt være med til at drive priserne på grøn brint ned, så de grønne, alternative brændstoffer bliver mere rentable, end de er på nuværende tidspunkt.



Figur 6. Resultat af optimering af computermodellen, så data og model stemmer tilnærmelsesvis overens ved de forskellige temperaturer i løbet af sintringen.

Litteratur

- [1] Vattenfall, fossilfrit-stål, group.vattenfall.com/dk/vores-forretning/fossilfrie-fremskridt/fossilfrit-stal
- [2] D. Ferrero m.fl. (2013) "A comparative assessment on hydrogen production from low- and high-temperature electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, bind 38, side 3523–3536. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.065,
- [3] <https://dynelectro.dk/>
- [4] T.L. Skaftø m.fl. (2022) "Electrothermally balanced operation of solid oxide electrolysis cells", *Journal of Power Sources*, bind 523, side 231040. doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231040,



Anne Lyck Smits huysen er brændselscelle-specialist ved Dynelectro ApS og erhvervs-ph.d. i samarbejde med Danmarks Tekniske Universitet.

Hypersoniske missiler - En ny udfordring for radarer

Peter Lysdahl Bæk, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Hypersoniske missiler og radarproblemet

Raketter bevæger sig med hastigheder, der placerer dem i det hypersoniske regime – altså mere end fem gange lydens hastighed. Et kendt fænomen ved disse hastigheder er dannelsen af et plasma omkring objektet, når det bevæger sig gennem atmosfæren. Dette plasma kan absorbere elektromagnetiske bølger, herunder radarsignaler, og derved skabe kommunikationsudfald eller vanskeligheder med at spore objektet. Problemet har været kendt og undersøgt siden 1950'erne, og interaktionen mellem radarbølger og plasma er i dag velbeskrevet i litteraturen.

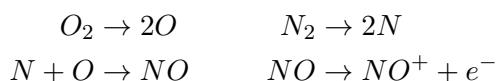
I de senere år er der imidlertid opstået en ny udfordring. Den moderne våbenindustri har udviklet såkaldte hypersoniske missiler, som – ud over at bevæge sig med ekstreme hastigheder – opererer i de lavere lag af atmosfæren i størstedelen af deres bane [1]. Disse missiler danner, ligesom tidligere raketter, et plasmalag omkring sig, men i modsætning til klassiske raketter følger de ikke en forudsigelig bane. De manøvrerer aktivt for at undgå at blive opdaget eller skudt ned.

Dette rejser et vigtigt spørgsmål: Hvis et hypersonisk missil er omgivet af et plasma, hvordan interagerer dette plasma da med radarbølger? Og i forlængelse heraf: Udgør plasmaet et problem for radarsignaturen af hypersoniske missiler?

Numeriske simuleringer af plasma og radarinteraktion

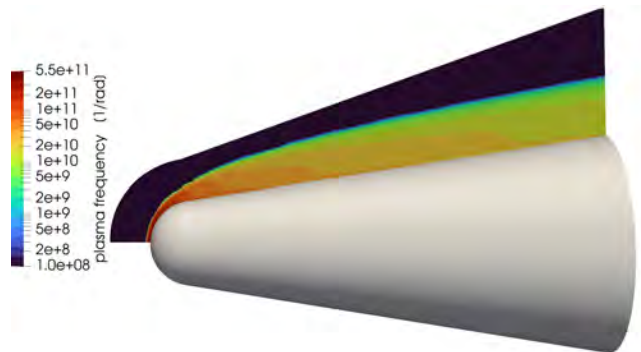
For at besvare dette spørgsmål har jeg i mit arbejde anvendt numeriske simuleringer baseret på væskedynamik ved brug af open-source programmet hy2Foam [2]. Disse simuleringer løser de klassiske Navier-Stokes-ligninger i en udvidet form – de såkaldte Navier-Stokes-Fourier-ligninger – som tillader en beskrivelse af væsker under ekstreme forhold med både kemisk og termisk ustabilitet. Under disse forhold er det nødvendigt at forlade den ideelle gasantagelse og i stedet benytte en såkaldt to-temperatur-model, hvor væsken beskrives af både en trans-rotationel og en elektro-vibrationel temperatur.

Ved at anvende denne mere avancerede termodynamiske beskrivelse kan man modellere de ekstreme forhold, der opstår omkring et hypersonisk missil, hvor temperaturer på flere tusinde grader og kemiske reaktioner som dissociation og ionisering bliver relevante. Et eksempel på sådanne reaktioner er:



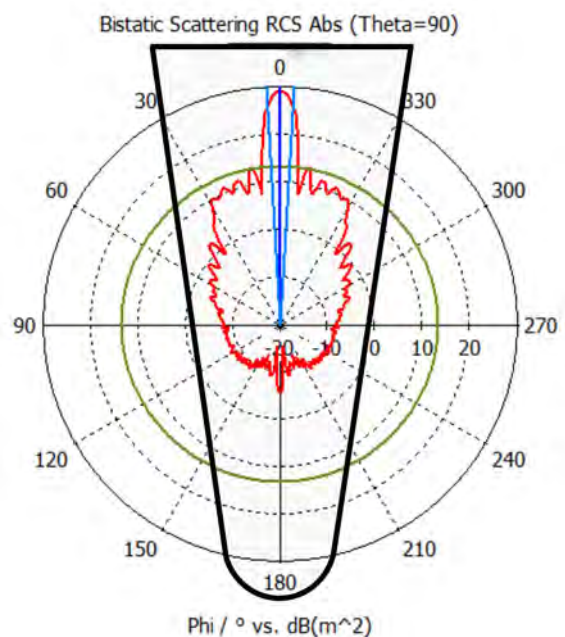
Sidstnævnte reaktion skaber frie elektroner, som sammen med ionerne udgør plasmaet omkring objektet.

Ved hjælp af disse simuleringer kan man opnå en detaljeret plasmaprofil, dvs. en fordeling af plasmaets tæthed og egenskaber omkring missilet. Denne profil kan efterfølgende anvendes i elektromagnetiske modeller, såsom Drude-modellen, der beskriver interaktionen mellem radarbølger og koldt plasma. Et eksempel på en sådan plasmaprofil ses på figur 1.



Figur 1. Plasmaprofilen for en keglestruktur som rejser gennem atmosfæren med Mach 23.6. Luften rammer fra venstre til højre.

Når plasmaprofilen er kendt, kan den anvendes som input til elektromagnetiske radarsimuleringer. Disse simuleringer beregner, hvordan radarbølger reflekteres eller dæmpes af det omgivende plasma, og hvordan dette påvirker missilets radarsignatur. I figur 2 ses et eksempel på resultatet af en sådan simulering, hvor det bistatiske radartværsnit er beregnet for forskellige vinkler. Resultaterne giver indsigt i, hvordan radarrefleksionen ændres under indflydelse af plasma og er derfor centrale i vurderingen af detektionsmulighederne.



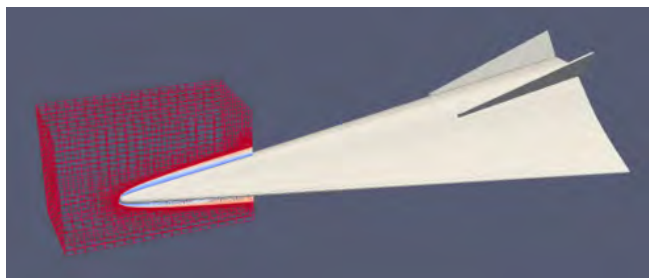
Figur 2. Resultater fra radarsignatur-simulering.

Begrænsninger ved computermødeller

Et centralt problem ved anvendelse af computermødeller til beregning af radarsignaturen i nærvær af omkringliggende plasma er, at de er ekstremt regnetunge. Udførelsen af simuleringer for et simpelt kegleeksempel, som det tidligere viste, er mulig, da objektets dimensioner er omkring $1\text{ m} \times 1.5\text{ m}$. Men når vi overfører modellen til realistiske missiler, vokser dimensionerne hurtigt til det tredobbelte eller mere. Dette medfører, at simuleringerne kræver milliarder af celler, hvilket er urealistisk at løse med den regnekraft, der er tilgængelig for kommercielle løsninger og almindelige virksomheder.

Et yderligere problem er, at selv avancerede simuleringer er meget tidskrævende. En enkelt simulering kan tage adskillige timer – og i nogle tilfælde dage – at gennemføre. Da en simulering kun dækker et begrænset tidsvindue, er det derfor ikke realistisk at udføre simuleringer for et helt missils flyvebane.

For at imødegå disse udfordringer har jeg udviklet en empirisk model, som estimerer den maksimale plasmadensitet uden behov for fulde CFD-simuleringer. Ved at benytte denne model er det muligt at identificere de sektioner af flyvebanen, hvor plasmaeffekter er væsentlige og hvor detaljerede simuleringer er nødvendige. Dermed reduceres både simulationsomfang og beregningstid væsentligt. Ved at benytte modellen på et praktisk scenarie, som det russiske Avangard-missil i figur 3, er det muligt ved brug af denne model at bestemme hvornår simuleringer er nødvendige, samt hvor store områder er nødvendige at simulere før plasmaet bliver for tyndt til at have indflydelse på radarsignaturen.



Figur 3. Simuleringsdomæne for Avangard-missil hvor kun fronten er blevet undersøgt pga. fortyndelsen af plasmaet.

Er plasmaet et problem?

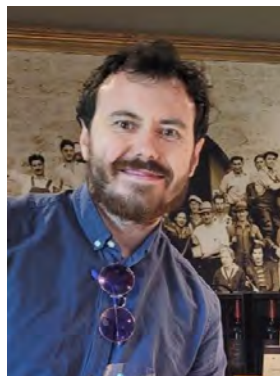
Som det er blevet beskrevet i de foregående afsnit, er der adskillige udfordringer, der skal løses, før det er muligt at udføre pålidelige simuleringer af hypersoniske missiler med tilhørende radarsignaturer. Ved at udvælge nøglepunkter på missilets flyvebane, baseret på den foreslåede model, og samtidig begrænse simulationsdomænet, er det muligt at estimere plasmaets effekt på radarsignaturen. Dette arbejde er i gang, og det forventes, at resultaterne vil blive offentliggjort inden for den nærmeste fremtid.

Ved hjælp af moderne simulationsværktøjer er det muligt at gennemføre disse beregninger. Dette skaber en mulighed for, at forsvaret kan udvikle og anskaffe de nødvendige radarer til at kunne detektere disse trusler i fremtidens konfliktscenarier.

Dermed kan vi vende tilbage til det oprindelige spørgsmål: Udgør plasmaet et problem for radarsignaturen af hypersoniske missiler? Det foreløbige resultat af studiet indikerer, at der forekommer en ændring i signaturen. Ændringen afhænger dog af den anvendte radars frekvens, og derfor kan der ikke gives et entydigt svar. Hvad der dog er sikkert, er, at plasmaet ikke udgør et problem langs hele flyvebanen. Den empiriske model gør det nu muligt at identificere netop de områder, hvor plasmaeffekten er signifikant, og hvor simuleringer er nødvendige. Dette reducerer kompleksiteten og gør analyser af hypersoniske missiler mere tilgængelige for industrien.

Litteratur

- [1] AVT Specialist Team AVT-ST-008 (2021) "Science & Technology Annex to Specialist Team on Hypersonic Operational Threats", TR-AVT-ST-008-A, STO TECHNICAL REPORT
- [2] V. Casseau m.fl. (2016) "A Two-Temperature Open-Source CFD Model for Hypersonic Reacting Flows, Part Two: Multi-Dimensional Analysis", *Aerospace* bind 3, nr. 4, side 45.
doi.org/10.3390/aerospace3040045.



Peter Lysdahl Bæk er ph.d.-studerende ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet samt ved TERMA Group. Han arbejder med væskesimuleringer i Open-FOAM af hypersoniske objekter med fokus på deres radarsignatur efter skabelsen af et muligt plasmalag fra ionisering af luftmolekyler.

Nyt fra Astronomisk Selskab

Generalforsamling

Astronomisk Selskab har afholdt generalforsamling den 26. april 2025, hvor der både blev valgt nye bestyrelsesmedlemmer og ny formand. På generalforsamlingen blev Johan Fynbo valgt som ny formand, og derudover ser bestyrelsen sådan ud:

- Bertil Dorch (på valg i 2026)
- Johan Fynbo (på valg i 2026)
- Frank Missel (på valg i 2027)
- Morten Dalhoff (på valg i 2027)
- Maja Kornerup Johansen (på valg i 2028)
- Thomas Holst Sørensen (på valg i 2028)
- Førstesuppleant: Jens Hede
- Anden suppleant: Karsten Bo Rasmussen

Gnidningsvarme fra rotation – breddeopgave 115 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen¹, IMFUFA, INM, RUC

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 115 her i Kvant):

Breddeopgave 115. Gnidningsvarme fra rotation

To cylindre, den ene hul, den anden inden i den første, er ophængt, så de kan rotere gnidningsfrit om deres fælles midterakse. Den første cylinders indre radius er svagt større end den anden cylinders ydre radius. Den ydre cylinder sættes i rotation, medens den indre er i hvile. Ved et uheld opstår der imidlertid på et tidspunkt gnidningskontakt imellem cylindrene. De ender derfor med at rotere sammen. Hvor stor en del af startenergien bliver til varme? Begrund svaret.

Løsning

Til en start er energien af det samlede system, bestående af de to cylindre, den kinetiske rotationsenergi af den yderste cylinder, $E_{\text{start}} = \frac{1}{2}I_y\omega_{\text{start}}^2$, hvor I_y er den ydre cylinders inertimoment om midteraksen, og ω_{start} er vinkelfrekvensen af den ydre cylinder til at begynde med. Til slut, hvor cylindrene følges ad i rotationen, er systemets mekaniske energi, $E_{\text{slut}} = \frac{1}{2}(I_i + I_y)\omega_{\text{slut}}^2$, hvor I_i er den indre cylinders inertimoment om midteraksen, og ω_{slut} er den fælles vinkelfrekvens til slut. Som følge af energibevarelse er den udviklede gnidningsvarme Q , lig med forskellen i mekanisk energi fra start til slut:

$$Q = E_{\text{start}} - E_{\text{slut}}. \quad (1)$$

Da systemet bestående af de to cylindre ikke er påvirket af ydre kraftmomenter under nedbremsningen, er dets samlede impulsmoment bevaret:

$$I_y\omega_{\text{start}} = (I_i + I_y)\omega_{\text{slut}}. \quad (2)$$

Indsættes ω_{slut} fra ligning (2) i ligning (1) fås

$$\frac{Q}{E_{\text{start}}} = \frac{I_i}{I_y + I_i} \quad (3)$$

som svar på opgaven.

I grænsen $I_i \ll I_y$ er den fundne varmeudvikling forsvindende ifølge ligning (3). I grænsen $I_i \gg I_y$ bevæger vi os ifølge ligningen imod, at al den mekaniske energi omsættes til varme. Begge dele virker umiddelbart rimelige.

Kommentar

I en tidligere artikel i Kvant [1] havde jeg fokus på betydningen af forskellen mellem *nomologiske forklaringer*

og *kausale forklaringer* i fysikundervisning. Ved en nomologisk forklaring (ordet *nomos* er fra græsk og betyder regel eller lov) består forklaringen af et fænomen i at redegøre for, hvordan en overordnet lovmæssighed sætter sig igennem under de foreliggende omstændigheder. Ved en kausal forklaring (ordet kausal er fra latin og betyder årsagsbestemt) består forklaringen i at redegøre for, hvad der forårsager fænomenet i de foreliggende omstændigheder.

I løsningen her af gnidningsvarmeproblemet er svaret givet nomologisk. Ligning (3) er forklaret ud fra energibevarelse og impulsmomentbevarelse, anvendt på de to cylindre betragtet som et samlet system.

For den trænede fysiker er det ret lige til at besvare opgaven på denne måde. Men det er ikke så nemt for den utrænede, som vil fokusere på årsagen til varmeudviklingen, gnidningen mellem de to cylindre, og hvordan den henholdsvis bremser den ydre cylinder og øger omdrejningshastigheden af den indre, indtil de på et tidspunkt følges ad. Ved at forfølge et sådant kausalt spor kan man godt nå frem til ligning (3) som svar på opgaven. Men det er besværligere at løse bevægelsesligningerne end at benytte impulsmomentbevarelsen.

En senere artikel i Kvant [2] drejede sig om denne opgave:

En stor kælk med et lad står stille på en spejlglat tilfrosset sø. Kælken sættes i bevægelse, fordi en postsæk kastes ud på ladet, hvor den bremses ned i forhold til ladet på grund af gnidning. Hvor langt har kælken flyttet sig, når postpakken ligger stille i forhold til ladet? Begrund svaret.

For at besvare denne opgave er det nødvendigt at gå den kausale vej, hvor der kombineres løsninger til bevægelsesligningerne i forhold til isen for kælk og postpakke hver for sig, under indflydelse af deres indbyrdes gnidningskraft. Var der, i stedet for at spørge om, hvor langt kælken har flyttet sig, når postpakken ligger stille på ladet, blevet spurgt om, hvor stor en del af startenergien, der bliver til varme, ville nomologisk anvendelse af impulsbevarelse for det samlede system bestående af kælk plus postpakke være en hurtigere vej at gå end vejen via løsningen af bevægelsesligningerne.

Uanset om denne opgave besvares kausalt eller nomologisk fås resultatet:

$$\frac{Q}{E_{\text{start}}} = \frac{M_{\text{sl}}}{M_{\text{pakke}} + M_{\text{sl}}}, \quad (4)$$

hvor startenergien E_{start} er postpakkens translatoriske kinetiske energi før den lander på slædens lad, og M_{pakke} og M_{sl} er masserne af henholdsvis postpakke

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

og slæde.

Analogien mellem de to problemer, med henholdsvis ligning (3) og ligning (4) som svar på problemerne, ses tydeligt i svarene. Men for hvor mange studerende er analogien mellem de to problemer umiddelbart tydelig? Og hvor mange ser dem begge som eksempler på uelastiske stød på linje med f.eks. et ballistisk pendul?

På breddekurset på RUC har de studerende undertiden sat spørgsmålstejn ved, om de ikke-formaliserede breddeopgaver ikke også var typeopgaver ligesom mere rutineprægede standardopgaver? Mit svar har da været: Jo, det kan de godt have ret i. Fx mener den fysikuddannede videnskabsteoretiker Kuhn, at det blandt andet er en række såkaldte "eksemplarer", konkrete problemløsninger, som et fags udøvere via deres uddannelse er fælles om, der, via eksemplarernes repræsentativitet for større klasser af problemløsninger, er afgørende i uddannelsen til at blive medlem af fagets videnskabelige samfund [1]. Problemløsning vil altid involvere et element af mønstergenkendelse. Den pædagogiske forskel ligger i, om genkendelsen for problemløseren opleves som en indøvet rutine i kendt terræn, eller opleves som en mere udforskende proces i nyt terræn, hvor tidligere indlærte mønstre kombineres på nye måder. Den samme breddeopgave kan for den trænede opleves som en typeopgave, samtidigt med at den for den mindre trænede opleves som en hidtil ukendt slags udfordring. Udviklingen af både studeren-

de og læreres forståelser i et fag som fysik består i høj grad i, at færre og færre mønstereksempler, typer, eksemplarer, udvides til at dække over større og større klasser af fænomener og problemstillinger. Overgangen fra kausale forklaringer til nomologiske forklaringer er en vigtig del af udviklingen af overblik byggende på færre typer, hver for sig med større rækkevidde.

Breddeopgave 116. Pandekagevending

Inden næste nummer af Kvant udkommer kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen august 2022, nr. 116 i rækken her i Kvant):

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

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] J. H. Jensen (2005) "Opgavehjørnet – Vipning af flyvemaskine", *Kvant*, **16**, nr. 2, side 21–23.
- [2] J. H. Jensen (2019) "Gnidning, arbejde og varme", *Kvant*, **30**, nr. 3, side 27–28.
- [3] Se fx J. H. Jensen (2004) "Vandstandsstigning og husopvarmning", *Kvant*, **15** nr. 1, side 24–25.

Black Beauty – Et blik ind i Mars' fortid gennem 3D-mineralkortlægning

Martin Sæbye Carøe, DTU Compute

Observationer og modeller

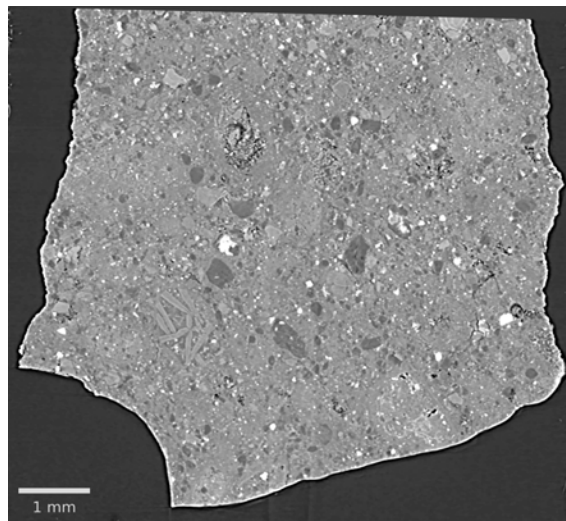
Færre end 400 meteoritter fra Mars er blevet fundet på jorden. Én af disse, som i litteraturen bliver refereret til som "Black Beauty", har særlig interesse for forskere. Det skyldes, at meteoritten indeholder vand samt zirkonkrystaller, hvor de ældste er blevet dateret til at være mellem 4,3 og 4,5 milliarder år gamle, hvilket gør Black Beauty meteoritten unik [1]. Zirkonkrystaller er tidskapsler, som bevarer information om Mars helt tilbage til dannelsen af Mars, såsom vulkanisme, meteornedslag og tilstedeværelse af vand. Der er også andre mineraler i meteoritten, som bevarer information om Mars. Standardmetoder til at undersøge meteoritter er ofte destruktive, eller måler kun overfladen. For prøver så unikke som Black Beauty-meteoritten, er det bedst at undersøge så meget som muligt med ikke-destruktive metoder, før vi undersøger den destruktivt. Vores mål er at kortlægge 3D-strukturen af mineralkrystallerne i prøven, for at få et bedre indblik i de tidligere forhold på Mars og i sidste ende om Mars på et tidspunkt har været beboelig.



Figur 1. Et foto af hele Black Beauty-meteoritten. Foto: NASA.

I fremtiden skal geologiske prøver hentes tilbage fra Mars via Mars Sample Return-missionen, iværksat af NASA og ESA [2]. Missionen vil drastisk øge antallet af nøje udvalgte prøver fra Mars, som er tilgængelige på jorden, og derfor er det vigtigt, at systematiske metoder til at undersøge prøverne bliver udviklet. I den sammenhæng spiller Black Beauty-meteoritten en

dobbelrolle. Først og fremmest som en prøve, der i sig selv er enormt interessant, men også som en test, for hvad der er muligt at måle i meteoritter, som i fremtiden bliver hentet til Jorden i Mars Sample Return-missionen.



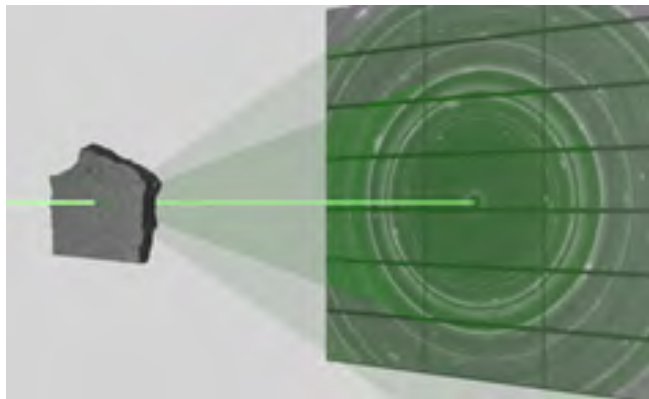
Figur 2. Et slice fra en 3D-rekonstruktion af meteorittens indre. Rekonstruktionen er lavet ved brug af data fra røntgen-CT, og er lavet fra et lille stykke af stenen i figur 1.

Én metode til at kortlægge 3D-strukturen af meteoritten, er ved at bruge røntgen-CT til at bestemme røntgenkontrasten i hvert punkt af stenen. Metoden foregår ved at tage røntgenbilleder af stenen fra forskellige retninger. Disse røntgenbilleder kan kombineres til et 3D-billede af stenens indre ved brug af en beregningsmetode kaldet tomografisk rekonstruktion. Denne metode har høj opløsning, og gør det muligt at detektere med stor præcision, hvor bestemte mineralkrystaller befinder sig. Dog har nogle mineraler omtrent samme røntgen-attenuering, og derfor har vi brug for andre metoder til at skelne mellem disse mineraler.

For at skelne mellem mineraler med ens røntgenkontrast, kan vi i stedet anvende neutron-CT, som måler neutron-attenueringen. Neutroner interagerer anderledes med atomkerner, og derfor er kontrasten mellem forskellige materialer helt anderledes. Især interagerer neutroner kraftigt med hydrogen, hvilket gør neutron-CT særligt velegnet til at detektere mineraler, der indeholder vand. Neutron-CT har dog lavere opløsning end røntgen-CT, og vi kan derfor ikke se mineralerne i lige så stor detaljegråd.

Røntgendiffraction er en metode, som kan identificere prøvens krystallinske struktur. Her måler vi spredningen af røntgenstråler, som passerer gennem prøven. Forskellige krystaller spreder røntgenstråler

på forskellig vis. Ligesom i røntgen- og neutron-CT kan vi også bruge tomografisk rekonstruktion, til at beregne røntgenspredningen inde i meteoritten. Røntgendiffraktion giver os langt flere informationer, der kan bruges til at identificere mineraltypen, men dog har denne metode endnu lavere opløsning og giver således ikke information om den fine struktur i meteoritten.



Figur 3. En 3D-rendering af forsøgsopstillingen til røntgendiffraktion.

Disse metoder har hver deres fordele, og ingen af dem giver det fulde billede af 3D-mineralstrukturen af stenen. Ved at kombinere metoderne, kan vi udnytte deres styrker og samtidig kompensere for deres individuelle begrænsninger. Til dette formål kan vi anvende værktøjer fra den matematiske disciplin optimering. Processen tager udgangspunkt i, at vi har en model, som kan forudsige hvordan måledata bør se ud, hvis meteoritten har en given røntgen- eller neutron-attenueringsprofil. Dernæst minimerer vi afstanden mellem de målte data, og de modellerede data i et såkaldt datafit-led.

Dette framework er fleksibelt, da vi blot kan tilføje flere datafit-led til optimeringsproblemet, således at vi inkorporerer information fra flere målemetoder. Det er også muligt at tilføje allerede kendt information om meteoritten i et såkaldt regulariseringsled. For eksempel ved vi at meteoritten består af omkring 15 forskellige

mineralfaser – denne information kan bruges til at begrænse antallet af mulige løsninger til optimeringsproblemet, således at vi hurtigere, og i større overensstemmelse med virkeligheden, kan kortlægge meteorittens 3D-struktur. Til at implementere dette framework har vi anvendt Core Imaging Library (CIL) – et open source Python-bibliotek udviklet til optimeringsbaseret tomografisk rekonstruktion [3].

Ny udvikling i form af mere præcise metoder til at måle meteoritten, samt øget beregningskraft i form af GPU'er, gør det muligt at komme et skridt tættere på et kunne se ind i meteoritter, og i sidste ende at kunne se tilbage i tiden til kort efter Mars blev dannet. For at løse denne udfordring har vi sammensat et team bestående af folk med kendskab til geologi, fysik og matematik. Kun ved at kombinere viden fra mange videnskabelige felter, kan vi løse mysteriet om liv på Mars.

Litteratur

- [1] A. Goodwin m.fl. (2022) “A Review of the ‘Black Beauty’ Martian Regolith Breccia and Its Martian Habitability Record”, *Astrobiology*, bind **22**, side 755–67.
- [2] “Mars Sample Return”, NASA Science, science.nasa.gov/mission/mars-sample-return. (Tilgået 14. maj 2025).
- [3] J.S. Jørgensen m.fl. (2021) “Core Imaging Library - Part I: A Versatile Python Framework for Tomographic Imaging,” *Philos. Trans. R. Soc. A.*, bind **379**, side 20200192. doi.org/10.1098/rsta.2020.0192



Martin Sæbye Carøe er ph.d.-studerende på DTU Compute og DDSA Fellow (Danish Data Science Academy).

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

ALICE's alkymi

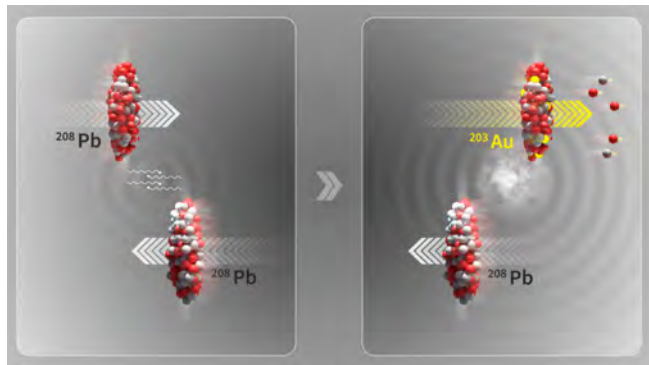
PARTIKELFYSIK. På ALICE i CERN har forskere i ægte alkymistil lavet bly om til guld. Det har de gjort i kollisioner mellem højenergi blykerner, som genererer intense elektromagnetiske felter, der kan slå protoner ud og omdanne en blykerne til en guldkerne.

ALICE er en detektor i CERN's Large Hadron Collider (LHC). ALICE studerer højenergikollisioner

mellem kerner med det formål at forstå universet som det var lige efter Big Bang.

At omdanne bly til guld er en ældgammel drøm, der stammer fra middelalderen, og idéen stammer fra opdagelsen af, at bly har en densitet, som minder om gulds densitet. Senere blev det tydeligt, at bly og guld er forskellige grundstoffer, og at det ikke er muligt at omdanne den ene til den anden vha. kemiske processer.

Selvom bly og guld har næsten samme atommasse (bly ca. 207 u, og guld ca. 197 u), er deres kemiske egenskaber meget forskellige. Det skyldes, at det primært er antallet af protoner og elektroner, der bestemmer et grundstofs kemiske egenskaber og ikke massen.



Figur 1. Illustration af en nærkollision mellem blykerner. I dissociationsprocessen kan en foton der vekselvirker med en kerne excitere svingninger i dens indre struktur og udsende tre protoner og nogle neutroner, hvilket resulterer i en guldkerne. Figur fra kilde.

Da kernefysikken senere blev udviklet i det 20. århundrede, opdagede fysikerne, at tunge grundstoffer kunne omdannes til andre, enten naturligt ved radioaktivt henfald, eller i laboratoriet, ved at bombardere dem med partikler som neutroner og protoner.

Selvom guld tidligere er blevet kunstigt fremstillet på denne måde, har ALICE nu observeret omdannelsen af bly til guld gennem en mekanisme, som involverer nær kollisioner (near-miss collisions) mellem blykerner i LHC.

Ekstreme højenergikollisioner mellem blykerner kan skabe et kvark-gluon plasma, hvilket er en varm og tæt suppe af kvarker og gluoner som der fandtes i universet lige efter Big Bang. Men i de fleste vekselvirkninger, hvor kernerne lige akkurat undgår at ramme hinanden, kan de kraftige elektromagnetiske felter omkring dem fremkalde foton-foton og foton-kerne vekselvirkninger.

Det skyldes, at det elektromagnetiske felt fra en blykerne er meget kraftigt, fordi kernen indeholder 82 protoner, som hver bærer en elementarladning. Når blykernerne i LHC bevæger sig tæt forbi hinanden med næsten lyshastighed, genererer de ekstremt stærke elektromagnetiske felter. Felterne kan beskrives som en sky af virtuelle fotoner (lyspartikler), som udsendes af den hurtige ladning i bevægelse. Virtuelle fotoner er ikke rigtig fotoner, men fotoner der kan opstå som udvekslingspartikler i en vekselvirkning mellem relativistiske elektromagnetiske felter. Da de er virtuelle, eksisterer de kun i kort tid, jf. Heisenbergs ubestemt-hedssprincip. De virtuelle fotoner fra den ene blykerne kan vekselvirke med den anden blykerne og forårsage elektromagnetisk dissociation. Det er en proces, hvor en foton exciterer svingninger i kernens indre struktur, hvilket resulterer i, at et lille antal protoner og neutroner bliver udsendt. For at skabe en guldkerne (guld indeholder 79 protoner) skal tre protoner derfor fjernes fra blykernen.

Forskerne på LHC har været positivt overrasket over, at deres detektorer både kan håndtere frontalkollisioner, som producerer tusind af partikler, mens de også er følsomme nok til at detektere kollisioner, hvor kun få partikler bliver produceret, hvilket netop gør det muligt at studere elektromagnetisk dissociation. ALICE-teamet brugte detektorernes zero degree calorimeters (ZDC) til at måle antallet af partikler efter nærkollisionerne. ZDC'erne er placeret langs stråleaksen og kan måle partikler, der ikke ændrer retning særlig meget efter en nærkollision. I frontalkollisioner, hvor der dannes tusindvis af partikler, som bevæger sig i alle mulige retninger, bruges andre detektorer. Ved at måle antallet af udsendte protoner og neutroner kan forskerne bestemme hvilke kerner, de oprindelige blykerner er blevet omdannet til. Fx resulterer udsendelsen af en, to eller tre protoner efterfulgt af mindst en neutron i produktionen af hhv. thallium, kviksølv eller guld. Når guldkernerne fra kollisionerne (stadig med meget høj energi) rammer forskellige steder i LHC's vakuumrør, bliver de med det samme fragmenteret til enkelte protoner, neutroner og andre partikler. Guldet når derfor kun at eksistere i en brøkdel af et sekund.

I løbet af LHC's "Run 2", som varede fra 2015 til 2018, blev der skabt omkring 86 mia. guldkerner. I masse svarer det blot til 29 picogram ($2,9 \times 10^{-11}$ g) – så ikke særlig meget! Efterfølgende blev luminositeten i LHC øget, og den seneste kørsel, "Run 3", producerede næsten dobbelt så meget guld, men det er stadig utrolig lidt i forhold til hvad der skal bruges til fx at lave et smykke.

ALICE har derfor skabt guld som middelalderens alkymister ønskede sig, men ikke nok til evig rigdom. Forskerne på CERN bruger resultaterne af guldproduktionsforsøgene til at teste og forbedre teoretiske modeller af elektromagnetisk dissociation, som ud over at forstå fundamental kernefysik bruges til at forstå og forudsige stråletab, som er en væsentlig begrænsning for LHC's ydeevne. Måske en dag det lykkedes CERN at producere guld nok til at tilfredsstille middelalderens alkymister eller til at finansiere deres næste generation af accelerators.

Kilde: CERN og S. Acharya m.fl (2025) "Proton emission in ultraperipheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV", *Physical Review C*, bind **111**, side 054906, doi.org/10.1103/PhysRevC.111.054906.

Løg uden tårer

BIOFYSIK. Læserne kender måske til irritationen ved at skulle skære løg; irritation, svie og til sidst tårer i øjnene. Nu er der godt nyt til alle os løgskærere. Et hold af fysikere, biologer og ingeniører ved Cornell University i USA har forsket i løgskæring og opdaget nogle af de faktorer, der fører til mere eller mindre øjenirritation, når man skærer løg.

Tidligere forskning har vist, at øjenirritation ved løgskæring skyldes frigivelsen af syn-propanethial-S-oxid til luften sammen med andre såkaldte safter fra løget. Syn-propanethial-S-oxid er en flygtig, svovlholdig forbindelse, der dannes i løg, når de bliver skåret i

stykker. Den fordamper fra løget og stiger op i luften, og når den rammer øjnet, reagerer den med fugten i tårer og danner svovlsyreforbindelser, som irriterer øjets slimhinder og udløser tårer.

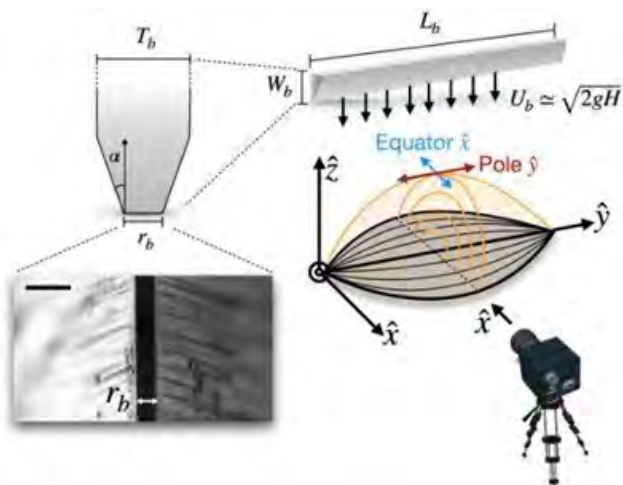
I dette nye studie ønskede forskerne at finde ud af, hvilke faktorer der fører til mere eller mindre mængde af de safter, der bliver frigivet og slynget ud i luften under løgskæring.

For at finde ud af det designede forskergruppen en særlig guillotine, hvor der kunne monteres forskellige typer af knive. Guillotinen blev brugt til at skære løgprøver, som var tilsat farvestoffer for at få en bedre visualisering af skæreprocessen. I forsøgene varierede forskerne knivenes størrelse, skarphed og skærehastighed, og optog det hele på film. De brugte endda et elektronmikroskop til at måle knivene nøjagtigt inden brug.

Videoerne viste, at forskellene i mængden af saftsprøjt – og dermed graden af øjenirritation – skyldtes knivens skarphed og hastigheden, hvormed den skar løget. Jo skarpere kniv og jo langsommere snit, desto mindre sprøjt. Forskerne mener at det skyldes, at sløve knive har tendens til at presse ned på løget og tvinge lagene til at bøje indad – og når snittet så sker, springer lagene tilbage og sender saft ud i luften.

De bemærkede også, at saftdråberne, der blev slynget ud i luften, havde en tendens til at fragmentere til mindre dråber, hvilket gjorde, at de blev hængende i længere tid i luften. En hurtigere skæring resulterede desuden i, at der blev dannet mere saft til at irritere øjnene.

Forskerne konkluderede derfor at løgskærere bør bruge den skarpeste kniv, de kan finde, og skære løget langsomt. Tippet er hermed givet videre til KVANTs læsere!



Figur 2. Dråbeudsendelse fra løgskæring. Figur fra kilde.

Kilde: phys.org og Z. Wu m.fl. (2025) “Droplet Outbursts from Onion Cutting”, *arXiv*.
doi.org/10.48550/arXiv.2505.06016.

Sort hul-bombe i laboratoriet

SUPERSTRÅLING. Det er lykkedes en gruppe fysikere fra University of Southampton at skabe en eksperimentel analog til en sort hul-bombe i laboratoriet. Et

sort hul er som bekendt et meget tæt objekt, hvor tyngdekraften er så stærk, at intet, selv ikke lys, kan undslippe, når det kommer inden for en bestemt radius (begivenhedshorisonten) af det sorte hul. Sorte huller har mange interessante egenskaber, og idéen om at udvinde energi fra roterende sorte huller til fx at skabe en bombe er over 50 år gammel, og blev foreslået af de to amerikanske fysikere William Press og Saul Teukolsky.

Tidligere havde fysikeren Roger Penrose opdaget, at roterende sorte huller kan afgive energi, hvilket sker i ergosfæren, som er den yderste kant af det sorte hul inden begivenhedshorisonten. Her kan objekter have negativ energi, og en partikel, der befinder sig i ergosfæren, kan dele sig i to: en med positiv energi og en med negativ energi. Den ene partikel trækkes med det sorte huls rotation og mister så meget energi, at den får negativ energi (set fra en observatør langt væk), mens den anden positive partikel undslipper. Den negative partikel bliver trukket ind i det sorte hul og reducerer derfor det sorte huls rotationsenergi, mens den positive partikel slipper fri, med en højere energi end før, da der må være energibevarelse. Sorte huller kunne derfor være gigantiske energikilder, og man kunne forestille sig, at processen kunne yderligere forstærkes, hvis man satte spejle omkring det sorte hul. Hvis man så sender en elektromagnetisk bølge ind i ergosfæren for at vekselvirke med det roterende sorte hul, og den derved får tilført mere energi fra rotationen end bølgen havde før, og bølgen derefter reflekteres, kommer den forstærket ud igen - med højere energi. Dette fænomen kaldes superstråling (superradiance). Men det var dengang mest en teoretisk ide.



Figur 3. Kunstners illustration af et sort hul omgivet af en lysende skive af materiale. Lyset bliver forvrænget af det sorte huls stærke tyngdekraft. Figur fra kilde.

Fysikeren Yakov Zel'dovich viste, at princippet om superstråling ikke er unikt for sorte huller: alle roterende, aksialsymmetriske objekter, der absorberer elektromagnetisk stråling som fx en roterende metalcylinder kan, under de rette betingelser, også forstærke elektromagnetiske bølger og udvise superstråling. For at forstærkning opstår, skal cylinderens rotationshastighed overstige fasehastigheden af de indkommende bølger, så absorptionen bliver til forstærkning.

Desuden viste Zel'dovich, at vakuumfluktuationer også kan forstærkes gennem superstråling – selv uden et indkommende elektromagnetisk felt, fordi kvante-vakuummet ikke er tomt. Virtuelle partikler i form af partikel-antipartikel-par kan opstå spontant i vakuum og kan vekselvirke med roterende objekter, som fx et sort hul, og blive forstærket af det. Den berømte fysiker Stephen Hawking var først skeptisk overfor idéen, men efter at have regnet på det, blev han overbevist og udviklede senere teorien om udsendelse af stråling fra sorte huller uden rotation, hvilket blev kendt som Hawking-stråling.

For at opnå betragtelig forstærkning foreslog Zel'dovich og senere Press og Teukolsky, at det roterende objekt (fx et sort hul eller en metalcylinder) kan omgives af spejle, der reflekterer strålingen tilbage og dermed kan forstærke de elektromagnetiske bølger yderligere og opbygge så meget energi inde i spejlene at det til sidst vil eksplodere – en effekt de kaldte for en “sort hul-bombe”.

I laboratoriet brugte fysikerne fra Southampton en roterende metalcylinder som “sort hul”. Den roterende metalcylinder blev placeret i et kredsløb omgivet af tre lag af metalspoler, som kunne generere og reflektere et magnetfelt. Spolerne snurrer med samme hastighed som cylinderen og producerer et magnetfelt inde i den, som producerer elektromagnetisk stråling. I eksperimentet fungerer spolerne også som spejle, der reflek-

terer elektromagnetiske bølger tilbage mod cylinderen.

Først sendte de et svagt magnetfelt ind i systemet. Når bølgerne ramte den roterende cylinder, blev de reflekterede bølger forstærket, og forskerne målte et endnu større magnetfelt og demonstrerede derved superstråling. Da de slukkede for det ydre magnetfelt, opstod der alligevel elektromagnetiske bølger fra baggrundsstøj, som blev forstærket igen og igen. Det skyldes, at systemet havde nået en ustabil tilstand, hvor energien opbygges af sig selv – ligesom i en teoretisk “sort hul-bombe”. Udfordringen i laboratorieopsætningen var, at systemet ofte blev overbelastet, hvilket fik komponenterne i kredsløbet til at eksplodere – og “spejlene” til at kollapse – et tydeligt tegn på kraftig energiforstærkning.

Fysikerne har med forsøget vist, at superstråling ikke er begrænset til sorte huller, men er et generelt fænomen, der kan studeres i laboratoriet med roterende objekter. Resultaterne åbner desuden nye muligheder for at undersøge sorte hullers fysik i laboratorier her på Jorden. Fysikerne fortsætter forsøgene og ser frem til at udforske vakuumbaseret superstråling, som potentielt vil kunne afsløre, om det er muligt at generere energi fra vakuum i laboratoriet – hvilket ville være en uudtømmelig energikilde.

Kilde: *Scientific American* og M. Cromb m.fl. (2025) “Creation of a black hole bomb instability in an electromagnetic system”, *arXiv*, doi.org/10.48550/arXiv.2503.24034.

Atomtid er nu indført

Leif Kahl Kristensen

Ved lov nr. 294 af 20. marts 2023 blev dansk normaltid defineret som: “UTC + 1 time”. Et verdens omspændende net af atomure udsender hvert sekund et vægtet middel af deres visning. Danmarks Nationale Metrologi-institut (DFM) i Hørsholm bidrager. Små variationer i Jordens rotation elimineres ved skudsekunder et par gange om året. Antallet af sekunder omregnes til døgn og brøkdeler heraf ved division med 84.000 ($= 24 \times 60 \times 60$) og betegnes “juliansk dato” (JD). Tirsdag den 1. januar 4713 f.Kr. (år -4712), kl. 12:00 middag, er tidspunktet, hvor den astronomiske julianske dagtælling starter:

$$\text{JD } 1.00 = \text{Tirsdag den 1.5 januar år -4712} \quad (1)$$

Epoken er ikke tilfældig men nøje beskrevet [1, s. 6–7]. I dagligdagen er vi ikke interesserede i summen af dage, men i en kalender som angiver tiden på året og dets fester.

Kalenderne

Vi ønsker at omregne juliansk dato til den gregorianske kalender. Den er imidlertid meget kompliceret fordi Vatikanet ikke ønskede, at 26. april kunne blive påskedag. Denne finurlighed er nøje beskrevet i [1, s. 22–30].

Den julianske kalender, hvor skuddagen hvert fjerde år er 29. februar er langt enklere og i perioden 1900–2199 fås juliansk dato ved at trække 13 dage fra den gregorianske.

Lad os som eksempel beregne JD den 31.5 dec. 2023. Vi regner juliansk og adderer 6736 normalår af 365 dage og de 1683 skuddage mellem årene -4712 og 2020, i alt 2460323 dage, til ligning (1):

$$1.5 \text{ jan. år} + 2024 \text{ (Juliansk)} = \text{JD } 2460324.00 \text{ dage} \quad (2)$$

som også kan skrives:

$$14.5 \text{ jan. år} + 2024 \text{ (Gregoriansk)} = \text{JD } 2460324.00 \text{ dage} =$$

$$45.5 \text{ dec. } 2023, \text{ hvoraf ved subtraktion af 14 dage}$$

$$31.5 \text{ dec. } 2023 \text{ (Gregoriansk)} = \text{JD } 2460310.00 \quad (3)$$

som er skrivemåden i Almanak 2024 [2, s.4].

Skuddagen

Atomtiden omregnes således til den julianske og gregorianske kalender, som har skuddag den 29. feb. Som påvist i [3] er der flere fejl i Almanak 2024 [2, s. 5]. Lad os for eksempel finde ugedagen for Matthias’ dag den

24. feb. Først findes JD for

24.5 feb. 2024 (gregoriansk) = 31.5 dec. 2023 + 31 + 24,

som med (3) giver JD 2460365 og ugedag lørdag. Almanak 2024 angiver søndag, fordi den fejlagtigt har skubbet "Skuddag" ind den 24. feb.

Søndagsbogstaverne er GF, hvor G gælder fra 1. jan. til 28. feb. og F resten af året. Det giver korrekt søndag den 25. feb. og 3. marts.

I 1980 er søndagsbogstaverne FE, som giver søndag 17. og 28. feb.+ 2. Den første giver søndag på skuddagen og den anden kræver en søndag den 23. feb. Dette opfylder Almanakkens krav om, at (citat) "der i skudår tildeles skuddagen 24. feb. samme bogstav som 23. feb., således at der i skudår forekommer to søndagsbogstaver, et før og et efter skuddagen". Denne forklaring er åbenlyst non-sense.

Når der er fejl i noget, som anbefales til undervis-

ning, er det en pligt at søge det rettet.

Litteratur

- [1] L.K. Kristensen (2020) "Kalenderen", Forlaget Historia.
- [2] Almanak 2024 (2023), Forlaget Almanak, Københavns Universitet.
- [3] L.K. Kristensen (2021) "Er det skuddag den 24. eller 29. februar?", *Kvant*, bind 35, nr. 3, side 28–29.

Leif Kahl Kristensen er mag.scient. og lektor emeritus fra Aarhus Universitet og var i 1961 den første kandidat i teoretisk fysik fra Det fysiske Institut. Arbejdede i en årrække med almindelig relativitetsteori og bidrog til Astronomisches Rechen-Instituts (Heidelberg) forbedring af fiksstjernerpositioner.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Sep 2025				
1/9	18.15	Hvorfor mørk energi?	Thomas Tram	AS (Kbh.)
8/9	18.15	Problematic measurements of the expansion rate of the universe: Crisis in cosmology or misunderstanding? (på engelsk)	Radek Wojtak	AS (Kbh.)
9/9	17.30	Hvorfor mørk energi?	Thomas Tram	AS (Aarh.)
15/9	18.15	Mørk stof – hvor står vi dag?	Mads Toudal Frandsen	AS (Kbh.)
15/9	19.30	På odysse med GHB	Petrine Wellendorph	SNU
16/9	17.30	Problematic measurements of the expansion rate of the universe: Crisis in cosmology or misunderstanding? (på engelsk)	Radek Wojtak	AS (Aarh.)
22/9	18.15	Using Supernovae Ia to map the cosmic expansion history (på engelsk)	Radek Wojtak	AS (Kbh.)
23/9	17.30	Mørk stof – hvor står vi dag?	Mads Toudal Frandsen	AS (Aarh.)
29/9	18.15	Kosmisk tilbagevirkning	Christa Gall	AS (Kbh.)
30/9	17.30	Using Supernovae Ia to map the cosmic expansion history (på engelsk)	Radek Wojtak	AS (Aarh.)
Okt 2025				
6/10	19.30	"Støvsugning" af dyrs DNA fra luft	Kristine Bohmann	SNU
7/10	17.30	Kosmisk tilbagevirkning	Christa Gall	AS (Aarh.)
27/10	19.30	Lys vi ikke ser: Om Ørstedes elektriske konflikt, radiobølger, antenner og satellitkommunikation	Olav Breinbjerg	SNU
Nov 2025				
10/11	19.30	Statistisk modellering og machine learning	Line Clemmensen	SNU
Dec 2025				
1/12	19.30	De yngste nyheder om den ældste is I forbindelse med foredraget uddeles SNU's H.C. Ørsted-gymnasiebronzemedalje	Jørgen Peder Steffensen	SNU

AS (Kbh.): Sønder Campus, Njalsgade 74-76, 2300 Kbh. S. Lokale: 9A.0.01 (bygning 9A, stuen), Kierkegaard Aud.

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

Man skal tilmelde sig foredragsrækken "Kosmologiens uløste problemer" gennem Folkeuniversitetet i København eller Aarhus. Medlemmer af AS får tilsendt et nyhedsbrev, før foredragsrækken går i gang, med information om tilmelding samt en rabatkode.

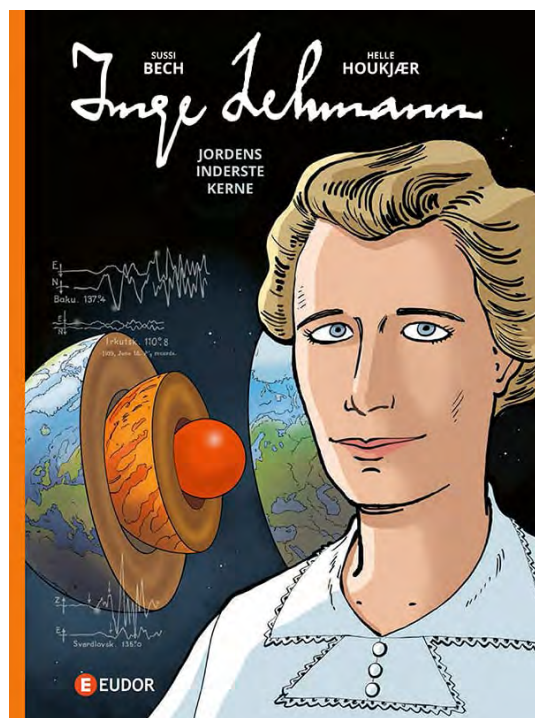
SNU: Aud. 1, H.C. Ørsted-bygningen, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (snu.dk, facebook.com/SNU1824).

Inge Lehmann som tegneserie

Michael Cramer Andersen, KVANT

Bog anmeldelse

Sussi Bech og Helle Houkjær, "Inge Lehmann – Jordens inderste kerne", Forlaget Eudor 2025, www.eudor.dk, 96 sider, 250 kr.



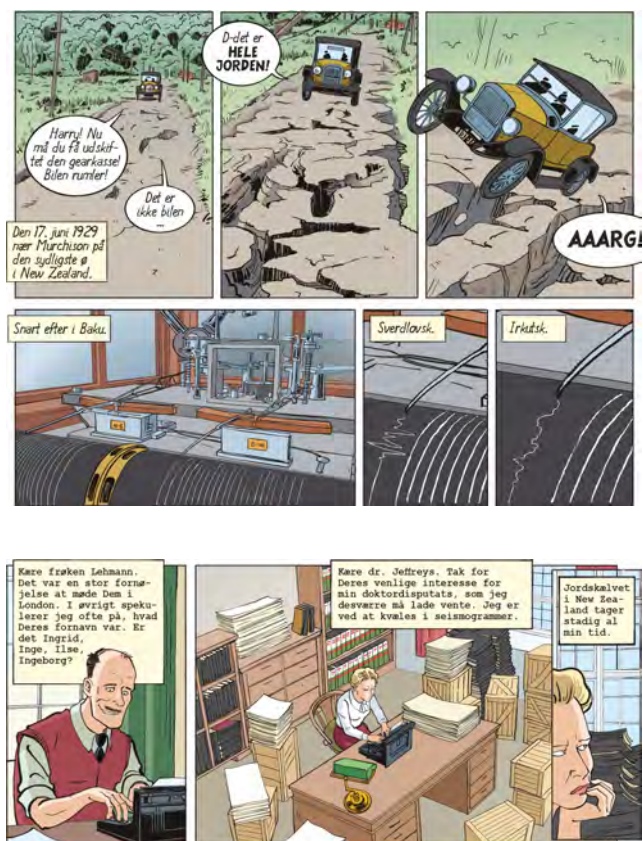
Den danske seismolog og geofysiker Inge Lehmann (1888–1993) kendes af mange som hende, der opdagede Jordens indre faste kerne, mens detaljer fra hendes liv i mange år har været underbelyst. Med denne tegneserie får vi både fortællingen om hendes liv og de kampe hun kæmpede for at få lov til at forske i jordskælvsbølger.

Inge Lehmann var én af Danmarks mest betydningsfulde kvindelige forskere og hun er bl.a. blevet portrætteret i DR's dokumentarserie "Store danske videnskabsfolk" (2015), i en roman af Lotte Kaa Andersen (2021) og i en biografi af Hanne Strager (2022). KVANTs temanummer om "Kvinder i Fysikkens Historie", nr. 1 (2025), havde også en artikel om Inge Lehmann.

Det er et ideelt medium at skildre både hendes livshistorie og forskning gennem en videnskabstegneserie. Idéen til historien kom fra fysik- og kemilærer Helle Houkjær, inspireret af den store succes med "Ørsted – Han satte strøm til verden". Hun har også skrevet et efterskrift der beskriver Inges familiebaggrund og rollemønstre og forklaring af Jordens indre og seismiske bølger. Det er helt passende, at historien er fortalt og tegnet af Sussi Bech, der er én af Danmarks dygtigste og meget produktive kvindelige tegneseriestybere, kendt for sine historiske serier om bl.a. Nofret.

Inge Lehmann levede i en tid hvor kvinder nok kunne tage en uddannelse, men det hørte til sjældenhederne at de fik lov til at undervise og det var nærmest umuligt at blive ansat i en ledende stilling. Kvinder var henvist til at være assistenter. Lehmann var imidlertid i mange år leder af Geodætisk Instituts afdeling for seismologi med ansvar for at skrive bulletiner om jordskælv.

Her ser vi registreringer af et jordskælv og levedøgrelsen af en brevveksling med en førende international forsker indenfor feltet.



Det var kun i kraft af hendes ukuelige vilje og dygtighed, at hun gennemførte det forskningsarbejde – i lange perioder i sin fritid – som resulterede i opdagelsen af Jordens indre faste kerne.

De to temaer om Inge Lehmanns videnskabelige udvikling, drevet af nysgerrighed, og kampen for ligestilling mellem kvinder og mænd, flettes fint sammen. Lehmann trodsede tidens normer og opnåede international anerkendelse for sin forskning, endnu mens hun levede. Det videnskabelige miljø i Danmark havde dog ikke meget at tilbyde hende, og hun brugte sine senere år på forskning i udlandet. Det er kun på tide at hun anerkendes bredt i sit hjemland.

Tegneserien er godt researchet og er en helstøbt fortælling. Den kan varmt anbefales til næsten enhver læser og måske særligt inspirere unge kvinder.

Livets gåde

Finn Berg Rasmussen, KVANT

Boganmeldelse

Gunver Lystbæk Vestergård, "Vores levende univers - Videnskabens søgen efter rumvæsner og alt livs oprindelse", 2025, People's, 357 sider, 199,95 kr.



Gunver Lystbæk Vestergård er videnskabsjournalist på Weekendavisen. Hun har tidligere (2019) udgivet en bog om exoplaneter, "Fjerne kloder", og nu tager hun altså fat på spørgsmålet om eventuelt liv derude.

Bogens titel kunne have været "Liv i Universet?", men med "Vores levende univers" tror jeg, at Vestergård vil signalere en yderst generel og fantasifuld betragtning. Et grundlæggende problem er jo at definere, hvad der skal forstås som liv. De sædvanlige naive forestillinger om grønne marsmænd skal man selvfølgelig glemme. Hvis de eksisterede, ville vi nok have set spor af dem i de detaljerede billeder, vi har fra overfladen af Mars.

I den videnskabelige efterforskning leder man efter organismer eller strukturer, der har et stofskifte og/eller kan reproducere sig selv. Ideerne spænder fra éncelledede (eller endnu mere primitive) væsener og til intelligent liv. Tilsvarende spænder metoderne fra forsøg på at se simple tegn på stofskifte og til at lytte efter signaler fra andre civilisationer (SETI – Search for ExtraTerrestrial Intelligence).

Det første eksperiment, der søgte efter en simpel stofskifteaktivitet på Mars, blev foretaget i 1976. Re-

sultatet syntes umiddelbart at vise, at der foregik et stofskifte. Det blev mødt med dyb skepsis fra næsten alle sider, selv om ingen kunne pege på en kemisk proces, der ville give samme udfald. Først for nylig, næsten et halvt århundrede senere, er der fundet stoffer i marsjorden, som ved traditionelle kemisk/fysiske processer ville kunne simulere det første resultat. Der kan således ikke drages nogen sikker konklusion ud fra dette eksperiment.

Mens *astrobiologien* i begyndelsen blev betragtet som noget af en karrieremæssig blindgyde, er feltet efterhånden anerkendt og har udviklet sig i forskellige retninger. Et naturligt spørgsmål kan fx dreje sig om, hvilke organismer der kan leve her på Jorden under de skrappest tænkelige betingelser: på Antarktis, i de største havdybder, i den tørreste ørken, dybt nede i jorden. Findes her organismer med hidtil ukendte genetiske koder? Og det helt store spørgsmål: hvordan opstod livet på Jorden? Tilfældigt, eller fører bestemte betingelser til vores former for liv? Med andre ord fører overvejelserne om liv ude i Universet os tilbage til overvejelser om livet på Jorden.

Når det gælder eventuelt liv uden for Jorden, udfoldes der megen fantasi. På overfladen af Saturns måne Titan er der set floder og søer af flydende methan (ved en temperatur omkring 90 kelvin), og én fantasi kredser om muligt liv med methan, svarende til Jordens liv med vand. Vores naboplanet Venus var anset for et rent helvede, men i en højde på ca. 50 km i dens atmosfære er der et lag, hvor temperaturen er omkring 30 grader Celsius, og der er fundet fosfin, som her på Jorden kun kendes som frembragt af levende organismer.

Alt dette og meget mere kan man læse i Vestergårds bog, og hendes journalistiske stil med fokus på personer og deres indbyrdes enigheder og uenigheder gør læsningen meget let. Til gengæld skal der en klæbeherje til for ikke at miste overblikket. Et emne- og personregister eller en mere detaljeret indholdsfortegnelse ville have været en god hjælp.

Vestergård har konsulteret mange fagfolk, og nogle af disse har også gennemset manuskriptet. Alligevel er der fagligt set et par smuttere: kometers hale giver ikke nogen raketeffekt (side 213-214), og spiralen på forsiden skal formodentlig få os til at tænke på DNA, men DNA's struktur er en dobbeltspiral.

Ude af drift

Kvants hjemmeside (www.kvant.dk) har desværre været ude af drift i længere tid, men vi håber at være tilbage med en ny hjemmeside i løbet af sommeren.

Dansk Fysisk Selskabs årsmøde 2025

Maren Malling

Den 14. og 15. maj blev DFS's årsmøde 2025 afholdt på Danmarks Tekniske Universitet i Lyngby i samarbejde med DTU Fysik. Hovedparten af mødet fandt sted i Glassalen, mens postersessionen blev afholdt i Demantsalen. Mødet samlede ca. 150 deltagere fra hele landet og bød på to inspirerende dage med fagligt udbytte og gode muligheder for netværk.

Årsmødet er en mangeårig tradition, hvor fysikere fra universiteter, gymnasier og erhvervsliv mødes på tværs af felter. Et særligt fokus er at give unge forskere og studerende mulighed for at præsentere deres projekter og opnå erfaring med faglig formidling i større forsamlinger – og i år var deltagelsen fra yngre forskere imponerende stor.

Årets keynote-foredrag blev holdt af tre prominente forskere. Professor Louise Sandberg Sørensen (DTU Space) åbnede mødet med foredraget "When the ice disappears: climate change seen from satellites", hvor hun viste, hvordan rumdata kan bidrage til klimaforskning. Om aftenen holdt Associate Professor Morten Kjærgaard (NBI/NQCP) et spændende oplæg med titlen "Fault-tolerant Quantum Computing — NQCP's mission to the frontiers of quantum information science". Dagen efter lagde Professor Jens Kehlet Nørskov (DTU Fysik) ud med foredraget "Materials design strategies for catalysts", som samlede erfaringer fra flere års forskning i kvantemekanisk modellering.

Programmet omfattede i alt 11 tematiske sessioner, og næsten halvdelen – nemlig fem – havde fokus på kvantefysik og -teknologi. Dette afspejler, at 2025 er udnævnt som FN's internationale år for kvantevidenskab og -teknologi, og DFS ønskede aktivt at understøtte dette tema. Kvantefeltet var dækket med sessioner om kvantekommunikation, kvantesensorer, kvantecomputing, kvantematerialer og kvantefysik mere generelt.

Efter første dag blev der afholdt postersession, hvor 29 deltagere præsenterede deres forskning. Prisen for bedste poster gik til Nina Nathanson fra Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet for posteren "A Unified Algorithm for Multi-Particle Azimuthal Angle and Transverse Momentum Correlations in Ultra-Relativistic Nuclear Collisions", og andenpræmien til Karina Bataeva fra DTU Fysik for posteren "CO₂ Trapping in CaCO₃ Using Aqueous Solutions of Waste Concrete". Tak til bedømmelseskomitéen for det grundige arbejde!

Årsmødet var også en mulighed for at styrke kontakten mellem fysikmiljøet og industrien. Seks virksomheder deltog som udstillere med egne stande, og mange deltagere benyttede lejligheden til både at høre

om karriereveje uden for universitetsverdenen og om den nyeste teknologiske udvikling.

Under mødet blev desuden KIF-Prisen 2025 uddelt – se artiklen side 19 for en præsentation af prisvinderen, Carolina von Essen.



Figur 1. Formand for DFS, Ian Bearden, og Instituttdirektør for DTU Fysik, Jane Hvolbæk Nielsen, byder velkommen til årsmødet i Glassalen på DTU. Foto: Johan Skak.

DFS og sektionen Kvinder i Fysik afholdt begge generalforsamlinger i forlængelse af programmet, og mange deltog i den fælles middag og det faglige og sociale program. En stor tak skal lyde til årets sponsorer: DFM, Teledyne, Quantum Foundry, VACPRO, Busch Vakuumenteknik A/S og PHYWE. Deres støtte var ikke blot med til at muliggøre afholdelsen af årsmødet – den bidrog også til, at omkring 40 kandidatstuderende kunne deltage gratis via fripladser. Dette er en vigtig prioritet for DFS, og en stor del af mødet havde fokus på at støtte næste generation af fysikere.

DFS takker alle deltagere og oplægsholdere og sender en særlig tak til DTU Fysik og Instituttdirektør Jane Hvolbæk Nielsen for det gode samarbejde omkring planlægningen og afviklingen af mødet.

Opkrævning af medlemskontingent for 2025

Opkrævningen af DFS-kontingentet for 2025 begynder i midten af juli. Betaling kan ske via betalingskort, PBS, faktura per e-mail eller girokort sendt med posten. Bemærk, at der pålægges et ekstra administrationsgebyr ved betaling med Girokort, da det er en omkostningstung løsning. Vi opfordrer derfor alle medlemmer til at tilmelde sig en automatisk betalingsmetode.

Se mere på danskfysikselskab.dk.

Mindeord for Jens Højgaard Jensen

Kristine Niss og Jeppe Dyre, RUC



Jens Højgaard Jensen døde torsdag den 3. april 2025 og blev bisat den 10. april med deltagelse af mange tidligere kollegaer og studerende.

Jens tilbragte hele sin karriere som lektor i fysik på RUC, hvor han blev ansat ved RUCs opstart i 1972. Han var aktiv til det sidste, ikke mindst via sit store engagement i uddannelsespolitik og formidling af fysikkens tænke måder, og han var dekan for naturvidenskab i 1976, prorektor i seks år (1986–1992) og studieleder for den naturvidenskabelige basis/bachelor-uddannelse i mere end ti år.

Tilbage i slutningen af 1970'erne var Jens en vigtig drivkraft bag RUC-fysiks satsning på "amorfes stoffers struktur og dynamik", som dannede basis for det senere grundforskningscenter "Glas og Tid". Jens' egen forskning vedrørte primært didaktik. Hans grundsynspunkt var dog her, at det vigtigste er at kvalificere aktive diskussioner i det faglige miljø af undervisere og studerende, frem for at skrive videnskabelige artikler rettet mod andre didaktikere.

En af Jens' faglige hovedpointer var, at målet med uddannelse bør være at udvikle de studerendes kompetencer, og at man så vidt muligt skal undgå "pensumitis" på kurser, dvs. et for stort pensum, som fører til overfladisk læring og fokus på udenadslære. Han grundlagde ud fra sådanne overvejelser det såkaldte "bredde-kursus" – i dag "problem solving in physics" – hvor fokus ikke er på et afgrænset pensum. Her trænes de studerende i at løse åbne opgaver, hvor de selv skal identificere, hvilke dele af fysikken der er i

spil, og formalisere problemet (før det løses på traditionel vis). Over hundrede af disse opgaver har Jens publiceret med efterfølgende løsning og didaktisk kommentering som et fast indslag i Kvant, hvor der senest udkom en opgave i aprilnummeret. Jens har før sin død forberedt adskillige breddeopgaver til Kvant, som i tråd med familiens ønske, vil udkomme i dette og de kommende numre.

Jens havde et stærkt politisk engagement og var glad for timelange diskussioner, gerne over en øl eller to. Her betonedes han altid, at demokrati involverer ægte medinddragelse, ikke blot på universiteterne, men i hele samfundet – altså at man kun får et godt samfund, hvis folk inddrages og aktiveres reelt, ikke blot formelt. Det er ud fra dette grundsynspunkt, man skal forstå hans generelle hyldest af "amatøren" frem for den "professionelle", et synspunkt som umiddelbart kan synes paradoksalt for en forsker på et universitet, hvor man jo stræber efter det ypperste.

Jens var et usnobbet menneske som gik op i nære relationer og var ligeglad med titler og prestige. Han havde humor, vid og optimisme, og var en højt værdsat ven og kollega. Han var generøs i ordets bredeste forstand og mødte alle mennesker som ligeværdige. Hvor end Jens slog sine folder, groede der meningsfulde fællesskaber frem, og mange af dem lever videre. Jens vil blive savnet og husket med stor taknemmelighed for alt hvad han har givet os. Han blev 81 år og efterlader hustruen Merete, to børn og 4 børnebørn.

Æret være Jens' minde.