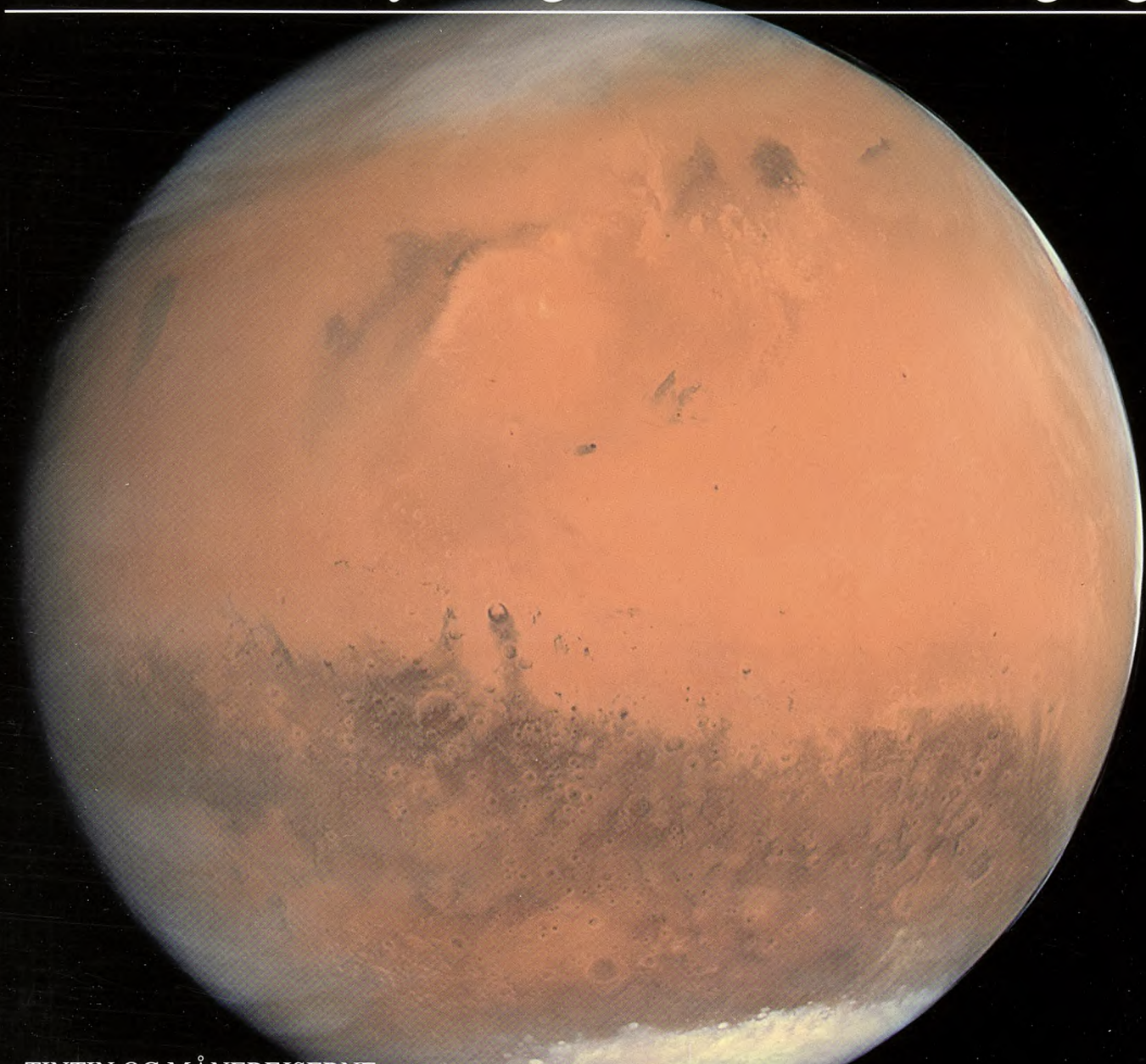


KVANT

Marts
2021

1

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 32. årgang

- 
- TINTIN OG MÅNEREJSERNE •
 - KOMPLEKS DYNAMIK I CELLESIGNALERING •
 - KOBBERLAGKAGER OG ANDRE SUPERLEDERE •
 - NORTH – DET VARMESTE STED I SKANDINAVIEN •
 - DET OBSERVERBARE UNIVERS – OG DET UDENFOR •
 - 150-ÅRSJUBILÆUM FOR FYSIKEREN MARTIN KNUDSEN •
 - IN VITRO • BREDDEOPGAVE • MARSLANDING • ÅRETS TAL •

Løssalgspris: 50 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

Dansk Fysisk Selskab

Dansk Geofysisk Forening

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Redaktion

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

Michael Cramer Andersen,

Christianshavns Gymnasium

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

Steen Lærke (astro@kvant.dk),

Astronomisk Selskab

John Rosendal Nielsen,

Aurehøj Gymnasium

Dorte Olesen (SNU),

DTU Compute

Finn Berg Rasmussen,

Niels Bohr Institutet, KU

Svend Erik Rugh

Julie Søgaard (Facebookredaktør og AS)

Sarah Pepke Pedersen (korrektur)

Abonnementspris: 180 kr./år.

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

Abonnement tegnes på www.kvant.dk.

Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:

christine@kvant.dk (tlf. 27 51 01 76).

Annoncepriser

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

1/4 side: 1600 kr.

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

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 2-2021 udkommer ca. 15. juni

Nr. 3-2021 udkommer ca. 15. september

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

Indhold:

Tintin og månerrejserne

Flemming Hansen 3

In vitro

Emil Boye Kromann 14

Kommende foredrag 17

Det observerbare univers – og det udenfor

Erik Høg 18

NORTH – det varmeste sted i Skandinavien

*Alexander S. Thrysoe, Asger S. Jacobsen, Thomas Jensen, Martin
Jessen, Søren B. Korsholm, Jesper Rasmussen, Mirko Salewski, Mads
G. Senstius, Volker Naulin, Raheesty D. Nem, Jens Juul Rasmussen,
Mikhail Gryaznevich og Stefan K. Nielsen* 22

Kobberlagkager og andre superledere

Astrid Tranum Rømer 26

Kompleks dynamik i cellesignalering

Mathias Heltberg 30

150-årsjubilæum for fysikeren Martin Knudsen

Bjarne Fredberg Knudsen 34

Gammakvant i tyngdefelt – breddeopgave 90

Jens Højgaard Jensen 40

Succesfuld Marslanding

Christine Pepke Gunnarsson 42

Årets tal – et talteoretisk mønstereksempel og en god selskabsleg

Christian Marinus Taisbak Bagsiden

Billedet på forsiden viser et farvebillede af Mars i
"ægte" farver taget af OSIRIS-instrumentet på ESAs
Rosetta-rumfartøj under dens passage af planeten
i februar 2007 fra en afstand på ca. 240.000 km.
Billedopløsningen er ca. 5 km/pixel, og billedet blev
genereret ved hjælp af OSIRIS' orange, grønne og blå
filtre. (© ESA & OSIRIS Team).
Læs om landingen af den nye Perseverance-rover på
Mars side 42.



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

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

Tintin og månerejserne

Flemming Hansen, RadioLab Consulting

Tintins rejse til Månen og optakten hertil blev skildret i to album, der blev tegnet i 1953-54, og som begge udkom på dansk i 1962. Denne artikel vil undersøge tegneren Hergés koncept for en månerejse sammenlignet med realiteterne, som de udfoldede sig med Apollo-missionerne og den senere udforskning af Månen, samt Hergés inspirationskilder.

Hvem satte først sin fod på Månen? Neil Armstrong, der 21. juli 1969 med de berømte ord *“One small step for man, one giant leap for mankind”* skrev sig ind i verdenshistorien?

Nej, alle Hergé-fans ved, at det var Tintin, der i albummet¹ *“Månen tur-retur, 2. del”*, i 1954 kom først. Hergé tegnede i en hyldest til Neil Armstrong, at han blev modtaget på Månen af Tintin, Terry, Kaptajn Haddock og professor Tournesol², se figur 1 [1].

Nå, spøg til side, historien er sluttet. Den 25. august 2012 døde Neil Armstrong 82 år gammel, og han selv og hans enestående heltedåd er nu helt og holdent historie.

I figur 2 er de to scenarier i Hergés koncept og Apollo-missionerne stillet over for hinanden. De grynde billeder af Armstrong, der stiger ned på Månen, Buzz Aldrin på månevandring, hvor Neil Armstrong spejler sig i hjelmens kuppel, og Tintins første skridt på Månen. Hvor fik Hergé sin inspiration fra? Hergé er kendt for at researche sine historier meget grundigt, inden han begynder at tegne for alvor, og i Benoit Peeters’ bog: Hergé – *“Bogen om Tintin og hans skaber”*, [1], nævnes, at Hergé benyttede Alexandre Ananoffs bog: *“L’astronautique”* [2] som sin *“lærebog”* i rumrejser.³

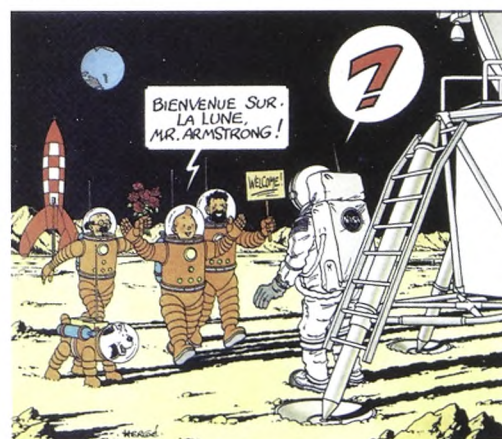
Bogen findes på Det Kongelige Bibliotek, men har tidligere tilhørt Institut Français i København. Bogen bærer præg af, at jeg sandsynligvis var den første låner i de 62 år, der var gået siden dens udgivelse, og som forventet afslørede den rigtig mange detaljer om, hvorfor tingene i Tintin *“Månen tur-retur”* ser ud, som de gør, og det var lidt af en åbenbaring at få mulighed for at studere den nærmere.

Tintins månerejse begynder med, at professor Tournesol er rejst til den sympatiske balkanstat Syldavien for i hemmelighed at udvikle en atomraket, der kan danne grundlaget for en månerejse. Senere slutter Tintin og kaptajn Haddock sig til Tournesol og indvies i planerne. Spioner fra den fjendtlighedsindede nabostat Bordurien har fært af, at der foregår noget epokegørende på atomstationen og prøver at intervenere . . .

Inspiration fra V2-raketten

En sjov detalje er, hvorfor den midterste del af kroppen af professor Tournesols raket er bemalet med rødt og hvidt skakbrætmonster. Det siges, at dette er inspireret af tyskernes V2-raketter fra 2. verdenskrig, som havde en lignende bemaling, så man lettere visuelt kunne

konstatere, om de roterede under opsendelsen (figur 3). Faconen på Tintin-raketten virker tydeligt inspireret af en tegning i Ananoffs bog, som viser en V2-raket modificeret til bemannet suborbital flyvning med én astronaut om bord.



Figur 1. Neil Armstrong, 5. august 1930 – 25. august 2012 (NASA-foto) og Hergés tegning (© Hergé/Moulinart 2021).

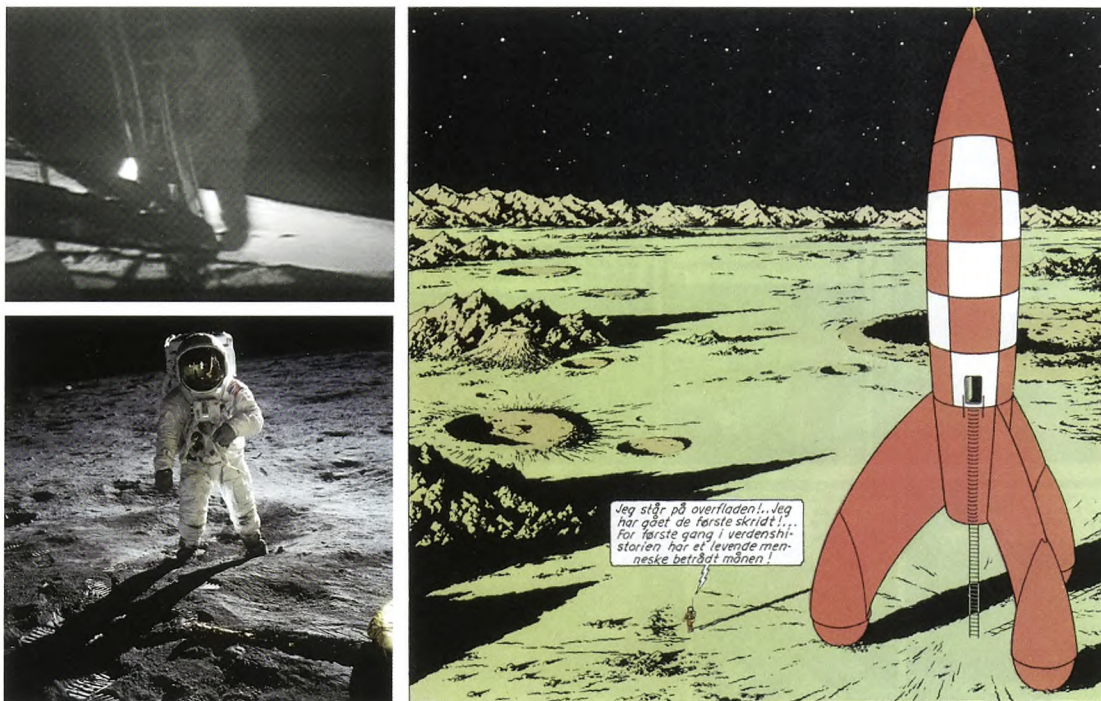
Raketteknologi: Hergé versus Apollo

Af indlysende grunde er der ingen billeder fra et kamera på Månen, mens Apollo 11-landingsfartøjet langsomt daler ned med fuldt blus på bremserraketten og forsigtigt sætter benene på fast månegrund, men metoden for Tin-

¹De franske originaltitler var *“Objectif Lune”* (1953) og *“On a Marché sur la Lune”* (1954). I de nyoversatte album er titlerne henholdsvis: *“Mission til Månen”* og *“De første skridt på Månen.”*

²Alle Hergés tegninger i denne artikel er gengivet med tilladelse fra Hergé/Moulinart.

³Lyt evt. også til podcasten [3].



Figur 2. Neil Armstrong træder ned på måneoverfladen, Buzz Aldrin på månevandring (NASA-fotos) og Tintin på månevandring (© Hergé/Moulinsart 2021).

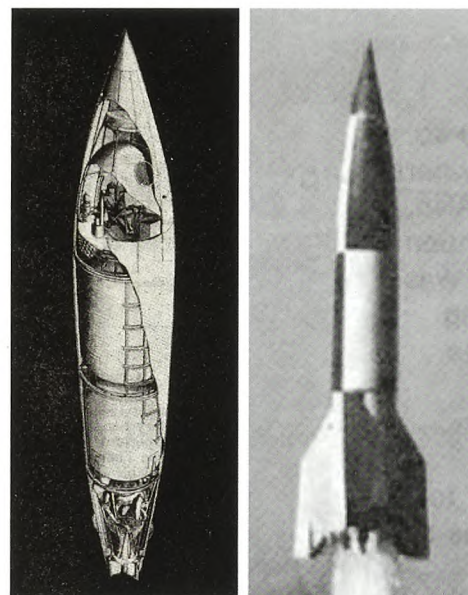
tin og Apollo 11 [4–8] er den samme: en bremseraket. Da der ingen atmosfære er på Månen, er det den eneste måde at bremse fartøjet på. I de sidste kritiske sekunder holdes fartøjet svævende af raketten, mens man sikrer sig, at landingsstedet er uden farlige klippestykker.

Derimod er selve Tintin-raketten og Saturn V-raketten [9] design helt forskellige. Tintin-raketten bygger på et såkaldt “single stage to orbit” (SSTO)-koncept, som er i stærk modsætning til Saturn V-raketten tretrinskoncept. Det teoretiske fundament for rumfart med raketter blev lagt i starten af det 20. århundrede af den russiske forsker Konstantin Tsiolkovsky [10], som opstillede “raketligningen” (se appendiks) og påviste, at en flertrinraket kunne opnå den hastighed på ca. 28.000 km/t, som er nødvendig for at kunne komme i kredsløb om Jorden. Tsiolkovsky fandt også frem til, at det mest effektive drivmiddel er flydende brint og flydende ilt, som brænder fuldstændig rent til vanddamp. Dette benyttedes både i Saturn V-raketten 2. og 3. trin og i rumfærgens hovedmotor og i hovedmotoren i Ariane 5-raketten, som er den europæiske rumfarts arbejdshest.

Netop flertrinraketten var nøglen til at kunne sende satellitter op. For at få størst mulig nyttelast sendt i kredsløb er det nødvendigt med flere rakettrin, idet man ellers vil slæbe alt for megen dødvægt i form af næsten tomme brændstoftanke med op. Nyttelasten i forhold til raketten startvægt bliver alt for lille, hvis man forsøger at gøre det med et enkelt rakettrin.

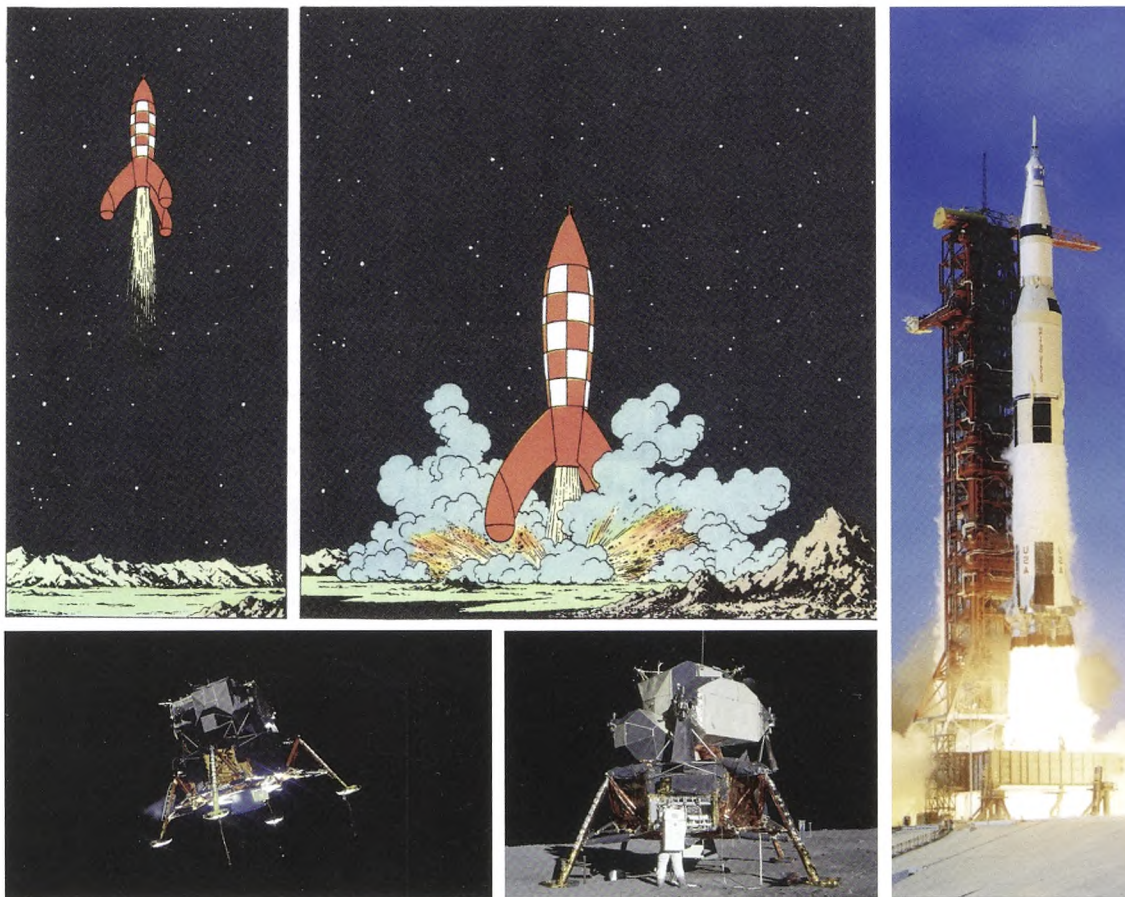
Endnu værre bliver det, hvis man forsøger at rejse til Månen med en SSTO-raket, hvortil hastigheden skal op på næsten 40.000 km/t. Efter at Tintin er landet på Månen og skal rejse hjem til Jorden igen, sætter han derfra med hele fartøjet og lander på Jorden, først med brug af raketten atommotor som bremseraket, og under den sidste del af nedstigningen ved brug af den kemiske raketmotor, i stedet for at bremse op i atmosfæren med

et varmeskjold. Med kemiske drivmidler er dette helt urealistisk, uanset hvilket brændstof/iltningsmiddel, der benyttes. Med Apollo-missionerne er det kun den øverste del af månelandingsmodulet (Ascent Stage), der letter fra Månen, går i kredsløb og sammenkøbes med Apollo-rumkapslen (Command & Service Module – CSM). Efter at de to astronauter og deres nyttelast af måneprøver er kommet over i CSM, frakobles dette og sendes til crash-landing på Månen. Kun Apollo-rumkapslen vender tilbage til Jorden.



Figur 3. Alexandre Ananoff: “L’astronautique” [2] samt V2-raket.

Tournesol-raketten kan kaldes et modificeret SSTO-koncept, eftersom der er både en kemisk motor, der benyttes tæt på Jorden, og en atommotor, som udsender radioaktive stoffer, der aktiveres over 800 km’s højde.



Figur 4. Apollo 11 “Eagle”-månelandingsmodulet og Saturn V-raketten (NASA-fotos), Tintin-raketten lander på Månen (© Hergé/Moulinsart 2021).

NASA forsøgte i 1990’erne at udvikle en SSTO-rumfærge “X-33 Venturestar” [11], som afløser for de gamle rumfærger, baseret på en meget avanceret såkaldt “linear aerospike”-raketmotor [12], men måtte opgive projektet i 2001, se figur 5.

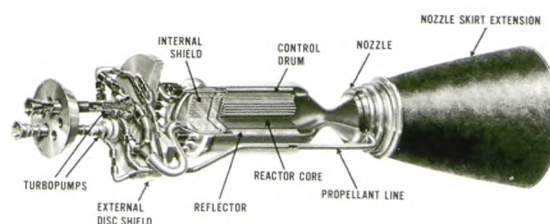


Figur 5. X-33 Venturestar (NASA-illustration).

Atomraketter

En afgørende forskel mellem Saturn V-raketten og professor Tournesols konstruktion er atommotoren, som afsløres i 1. del på side 16, hvor den lille forsøgsraket præsenteres. Tournesol fortæller også, at atommotoren først aktiveres uden for Jordens atmosfære, da der ellers ville opstå en kraftig radioaktiv forurening. Dette er samstemmende med nogle af de typer af atomraketter, der har været på tegnebrættet i tidens løb, men ikke alle.

Den amerikanske Atomic Energy Commission (AEC) igangsatte i 1955 et program kaldet Rover til udvikling af atomraketmotorer [13]. Ved NASAs dannelse i 1958 blev der oprettet en særlig afdeling, Space Nuclear Propulsion Office, der skulle varetage NASAs samarbejde med AEC, men programmet forblev under AEC’s kontrol. Indtil programmets endelige ophør i 1973 konstruerede og testede man adskillige atomraketmotorer.



Figur 6. NERVA-atommotoren (NASA-illustration).

I en kemisk raket er det forbrændingen af drivmidlet, der skaber energien og tryksætter forbrændingskammeret. Raketydens koniske form accelererer forbrændingsprodukterne op til de udstødes ved dysens munding med høj hastighed. I atommotoren sendes en gas under højt tryk ind i den glødende reaktorkerne, hvor det opvarmes til en meget høj temperatur, accelereres op og udstødes gennem raketyden.

NERVA-motoren (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Applications) var den, der kom tættest på at

være flyveklar som erstatning for Saturn V-raketten 3. trin [14,15]. I [16] er der en fascinerende samling af fantasifulde koncepter for atomraketter.

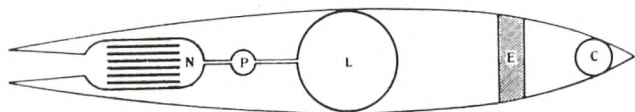


Fig. 52. — L'une des possibilités (?) d'appliquer l'énergie atomique aux fusées. C, cabine; E, écran protecteur; L, liquide (hydrogène, par exemple); P, pompes; N, réacteur nucléaire.

Figur 7. Skitse til atomraketsmotor. Alexandre Ananoff: "L'astronautique", side 153.

Ananoffs bog indeholder også et afsnit om atomraketter, som viser, at man i 1950 allerede havde et godt begreb om de grundlæggende principper for disse. Figur 7 viser en atomraketsmotor efter samme princip som NERVA-motoren.

Med NASAs planer om at genoptage månerejserne i 2020'erne med Artemis-programmet, og Marsrejser i 2030'erne, er der kommet fornyet interesse for atomraketter [17,18].

Analyse af Tournesols måneraket

Tournesol har til sin raket altså både udviklet en atommotor og en avanceret kemisk raketmotor, der kan løfte fartøjet fri af Jordens atmosfære, inden atommotoren tager over. Sammenlignet med Saturn V-raketten er Tournesols raket en del mindre. Ved hjælp af forsidebilledet på 1. del af tegneserien kan man anslå raketten højde til ca. 55 meter inkl. "spiret", heraf er dog kun ca. 42 meter den egentlige raketkrop, når man fraregner de enorme styrefinner og "spiret". Saturn V-raketten [9] er 110,5 m høj inkl. "Launch Escape System", som er en redningsraket, der kan løfte Apollo-kapslen med astronauterne fri af Saturn V-raketten, hvis der skulle ske et uheld under opsendelsen. Til sammenligning er Københavns Rådhusårn 105,6 m højt.

I Tournesol-raketten skal der være plads til både en kemisk raketmotor, atomraketsmotoren, kemisk brændstof og iltningsmiddel, flydende brint (hydrogen) til atommotoren (evt. fælles tank med den kemiske raket), månebil, opholdsrum, lagerrum, kontrolrum osv. Hele indretningen kan ses på et "blueprint" på side 35 i 1. del. De store pontoner på styrefinnerne bruges tilsyneladende kun som støddæmpere ved landingen, selv om de kunne gøre nytte som ekstra brændstoftanke.

Tournesols raket er beregnet for fire astronauter, én mere end Saturn V/Apollo: Tournesol, Tintin, kaptajn Haddock, ingeniør Wolff samt Terry, ikke at forglemme, men uheldigvis kommer Dupond og Dupont med ved en fejltagelse, og ligeledes har en bordurisk agent sneget sig om bord for at bemægtige sig raketten. Altså tre personer mere end raketten er designet til. Dette er naturligvis en voldsom ekstra belastning, ikke så meget på grund af den ekstra vægt, men på grund af det ekstra ilforbrug, som det også viser sig under hjemturen.

Vægten af Tournesols raket er ikke opgivet, men den må være betydeligt lettere end Saturn V, lad os sige halvdelen af Saturn V's startvægt på 2800 tons [9], altså 1400 tons. Saturn V's motorer yder ved starten et løft

(thrust) på ca. 3400 tons. Tournesol-raketten halvdelen: 1700 tons eller ca. 17 MN (MegaNewton).

Hvilken atomreaktor skal der så til for at kunne præstere det krævede løft? Godt nok skal atommotoren ikke løfte i begyndelsen, men hvis Tournesol skal kunne lave en månemission med et SSTO-koncept, skal atommotoren nok være lige så kraftig som den kemiske motor.

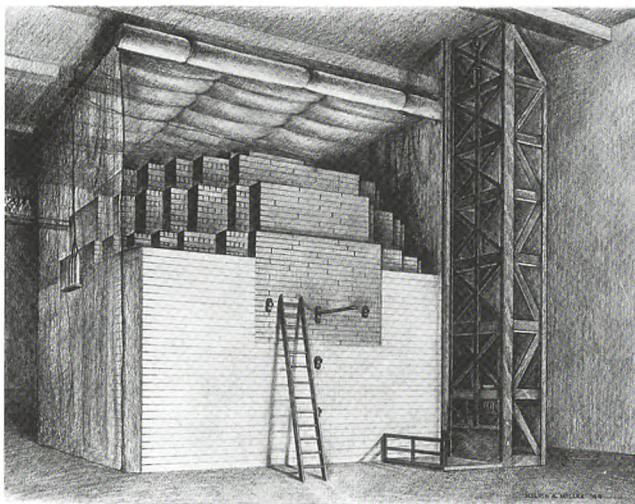
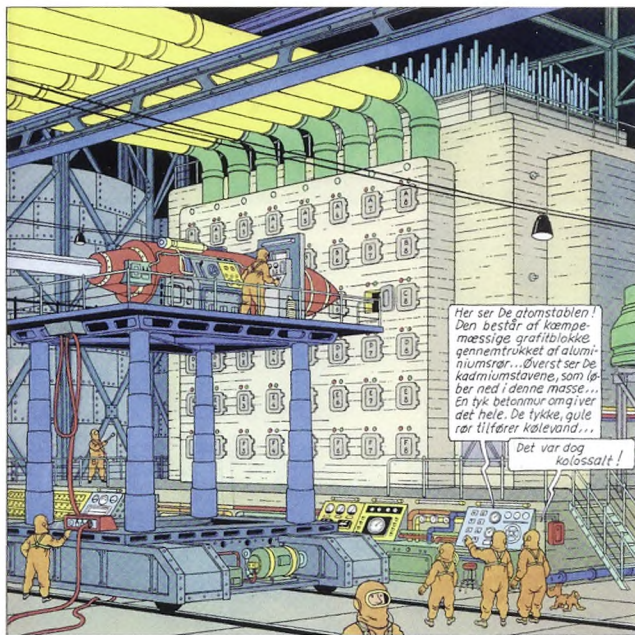
Den effekt, som atommotoren skal levere, kan beregnes som $P = F \cdot I_{sp} \cdot g$, hvor F er løftekraften (thrust), I_{sp} er specifik impuls for det valgte brændstof/iltningsmiddel og g er tyngdeaccelerationen $9,8 \text{ m/s}^2$. Specifik impuls har enheden sekunder og udtrykker effektiviteten af brændstof/iltningsmiddelkombinationen og kan i en vis forstand sammenlignes med, hvor langt en bil kører på literen.

Saturn V's første trin benytter RP-1-petroleum og flydende ilt med $I_{sp} = 263 \text{ sek}$. Heraf fås:

$$P_{\text{Saturn V}} = 87,7 \text{ GW}$$

og Tournesols raketmotor halvdelen:

$$P_{\text{Tournesol}} = 43,9 \text{ GW.}$$



Figur 8. Øverst: Atomreaktoren i Sprodj (© Hergé/Moulinsart 2021). Nederst: Verdens første atomreaktor (atomstabel) på University of Chicago i 1942, [15]. Stigen angiver størrelsesforholdet.

En atomraketmotor er meget bedre til at udnytte drivmidlet, for et sådant er nødvendigt, selv om der ikke sker nogen kemisk "forbrænding" i atommotoren. Det bedste drivmiddel er (flydende) brint.

En kemisk raket med flydende brint og flydende ilt kan opnå en specifik impuls på 453 sek. (rumfærgens hovedmotor – Space Shuttle Main Engine), mens brint, benyttet i en atommotor som NERVA, yder ca. det dobbelte, altså $I_{sp} \approx 900$ sek.

Heraf følger, at vi kan "nøjes" med 263/900 gange mindre effekt i Tournesols atommotor:

$$P_{Tournesol} = 12,8 \text{ GW.}$$

En typisk atomreaktor ligger på ca. 3 GW i termisk ydelse (elektrisk kun ca. 1 GW), og den største atomreaktor, der nogen sinde er blevet bygget, var på ca. 5 GW og blev testet under amerikanernes atomraketmotorprogram. Men Tournesol kan også ting, som andre genier ikke kan!

I [13] omtales også andre typer atomraketmotorer, som er endnu mere effektive, men disse har ikke været afprøvet i praksis. Den mest effektive er en "gas-core engine", og den har, som Tournesols atommotor, den ulempe, at der slipper radioaktive stoffer med ud. Til gengæld kan den specifikke impuls nå op på 3000-5000 sek. Tager man værdien midt i intervallet, kan man "nøjes" med en reaktor på $\sim 2,9$ GW, hvilket er tættere på noget, som lader sig realisere.

Billedet på side 13 i 1. del af Månen tur-retur viser atomreaktoren på den syldaviske atomforskningsstation

Sbrodj og minder utroligt meget om billedet af verdens første "atomstabel" [19,20] på University of Chicago i 1942 (figur 8). Betegnelsen "atomstabel" (nuclear pile) blev brugt om de første reaktorer, eftersom de bestod af en enorm stabel grafitblokke, som omsluttede reaktorkernen, der bestod af "briketter" af urandioxid (UO_2). Grafitblokkene virker som en moderator, der bremser neutronernes hastighed, hvilket er nødvendigt for at få kædereaktionen til at forløbe. Denne første atomreaktor var en del af Manhattanprojektet, som førte til udvikling af atombomben.

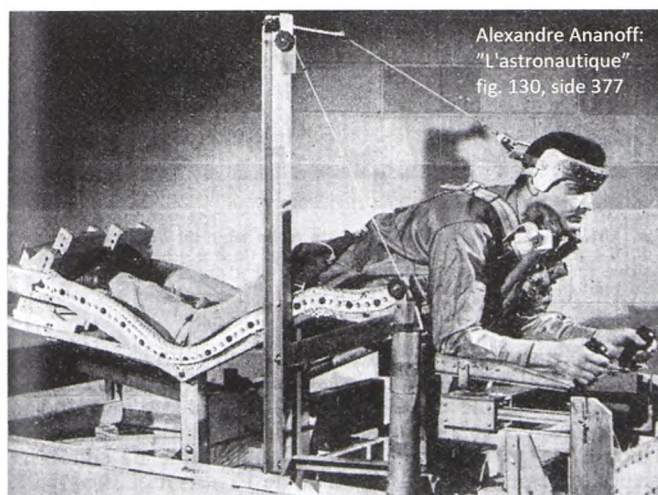
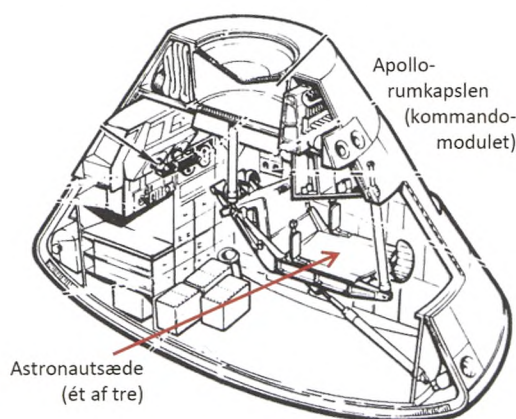
Atomteknologien i det tidsrum, hvor Hergé tegnede Månen tur-retur, var ikke så avanceret, at man kunne lave en Tournesol-atomraket, men efter 2. verdenskrig gik det ellers stærkt med udviklingen af atomreaktorer. Det første civile atomkraftværk blev taget i brug i Rusland i 1954, og det første kommercielle værk i England i 1956.

Kryogene raketdrivmidler

Kryogene drivmidler er stoffer, der er kølet ned til meget lave temperaturer for at blive flydende, så de kan opbevares og transporteres uden at fylde for meget. Flydende brint er som nævnt det mest effektive brændstof sammen med flydende ilt. Også i atomraketmotoren er brint det mest effektive drivmiddel. Der er bare den ulempe ved flydende brint, at det er afsindigt koldt, -253°C (20 K), og fylder enormt meget. Vægtfylden er 70,9 g/ltr, hvilket er ca. 14 gange lettere end vand. Der-

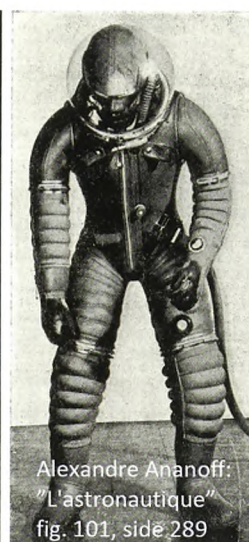
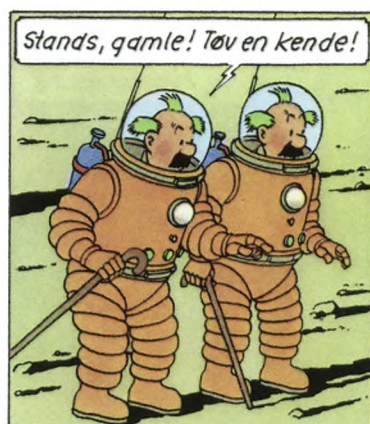


Et kig ind i Apollo 9 kommandomodul, San Diego Air & Space Museum, [21]



Phot. Ass. Press.

Figur 9. Tintin-astronautsæderne (© Hergé/Moulinsart 2021), Alexandre Ananoffs forlæg, samt Apollo-astronautsæderne (NASA-tegning).



Figur 10. Dupond og Dupont på månevandring (© Hergé/Moulinsart 2021), Apollo-rumdragten yderst og inderst (NASA-fotos), samt Alexandre Ananoffs "scaphandre martien".

for vil tanken med flydende brint være meget større end tanken med flydende ilt, selv om massen af den flydende ilt er meget større, for at opnå det rette 1:8 vægtforhold mellem brint og ilt. Flydende ilt har temperaturen -183°C (90 K), og vægtfylden er 1141 g/ltr, altså lidt tungere end vand. Uanset om der er en tyk superisolering uden på brændstoftankene, står de to væsker og småkoger hele tiden, og derved tabes drivmiddel. Derfor egner flydende ilt/brint sig ikke til at lagres i lang tid i en raket.

Apollo-rumkapslen (Service Module) med raketten, der skal sende astronauterne tilbage til Jorden, benytter aeroxine og nitrogen-tetroxid (NO_4) som brændstof og iltningmiddel. Aeroxine er en blanding af hydrazin (N_2H_4) og usymmetrisk dimethylhydrazin (UDMH – $\text{H}_2\text{NN}(\text{CH}_3)_2$). Både dette og NO_4 er giftige stoffer, men fremragende som raketbrændstof, da de er flydende ved almindelige temperaturer og kan holde sig i tankene i årevis. Derfor benyttes de i udstrakt grad i satellitter, som har brug for at korrigere banen gennem deres levetid. Efterhånden er der dog udviklet ugiftige alternativer, som tages i brug i nye satellitter.

Astronautsæderne

Det har altid været en gåde for mig, hvordan Hergé havde fundet på, at Tournesol & co. skulle ligge på maven under opsendelsen i stedet for på ryggen med løftede ben og fuldkrops-understøttelse som alle andre astronauter og kosmonauter, vi kender (figur 9). Under den kraftige g-påvirkning under opsendelsen (op til ca. 4g for Saturn V [9]) er det næsten umuligt at løfte hovedet, og selv om det skulle lykkes, ville de besvime efter kort tid, fordi blodet presses bort fra hjernen. Ikke noget godt design. Læsning af Alexandre Ananoffs bog bragte klarhed på side 377 med et koncept, der er Storm P. værdigt (figur 9). Hergé har brugt det viste koncept, men hagestøtten er erstattet af en pude, og "pandebåndet" er udeladt. Den rygliggende stilling er uægteligt noget enklere og giver ligeledes astronauterne i et vist omfang mulighed for at betjene kontrolpanelet under opstigningen. Det kan astronauten ganske vist også på billedet i Ananoffs bog, men det er

et stort spørgsmål, om han vil kunne undgå at besvime under g-påvirkningen.

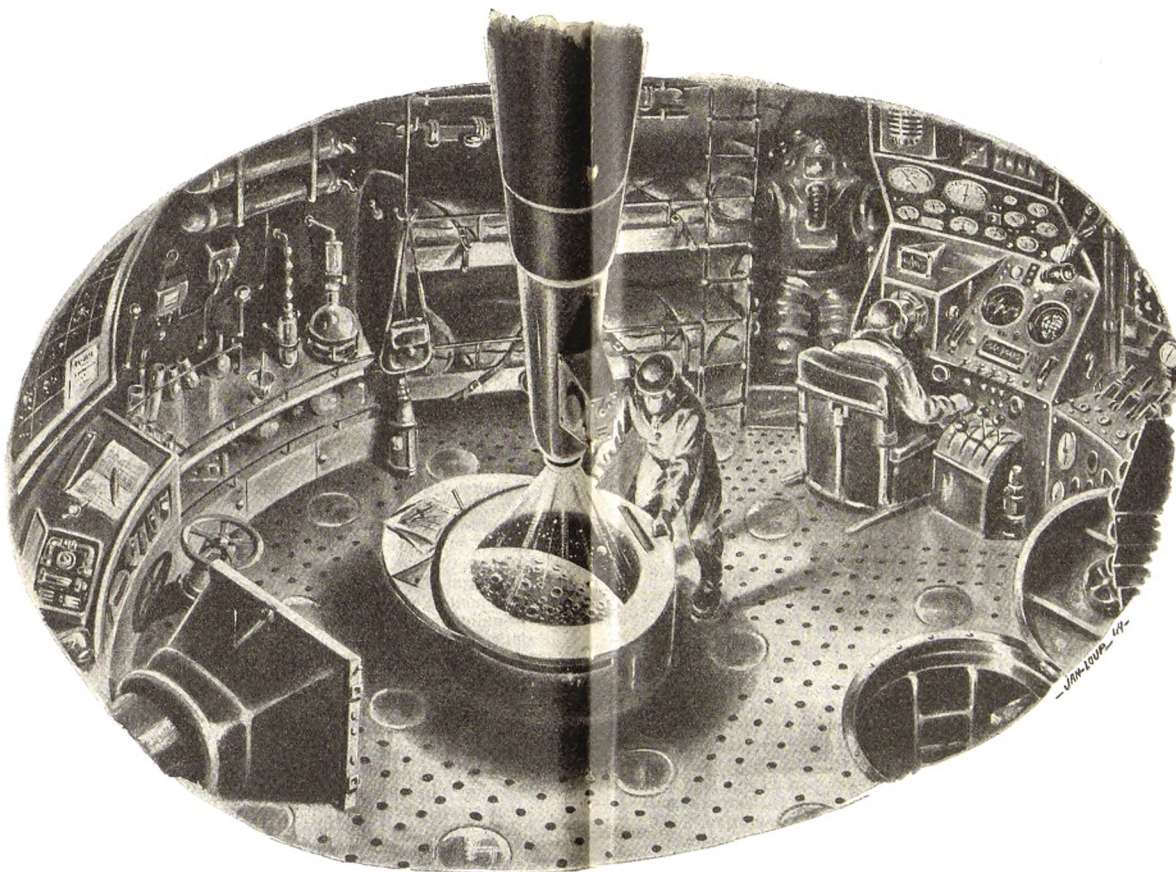
Rumdragterne

Når man ser rumdragterne, som Tintin & co. bærer på Månen, tænker man mere på en Michelin-mand end på en Apollo-astronaut. Dette har igen sin oprindelse fra Alexandre Ananoff (figur 10 øverst til højre). Samme billede findes i Nicholas de Monchauxs utroligt spændende bog "Spacesuit: Fashioning Apollo" [22], hvor Apollo-rumdragtens tilblivelse skildres. Her kaldes rumdragten "wormsuit", mens Alexandre Ananoff nævner, at en "scaphandre martien" (Mars-rumdragt) nok ville ligne den viste "scaphandre stratosphérique" – en dragt til stratosfæreflyvninger.

Ifølge de Monchaux [23] blev designeren af dragten inspireret af en "tomato worm". Her i landet ville vi nok vælge en kålorm som forbillede, men princippet med de ringformede udbulninger sikrer, at dragten er medgørlig, selv om der er atmosfæretryk indeni og vakuum udenfor. Princippet kendes også fra støvsugerslanger, drænslanger og lignende, der er både stive og fleksible på én gang og ikke klapper sammen, når støvsugeren kører, eller der kastes jord på drænet. Dette kaldes også en "korrugeret" slange.

Meget overraskende blev Apollo-rumdragten ikke udviklet af et rumfirma, men af International Latex Corporation, der med varemærket "Playtex" er kendt for at lave hofteholdere, BH'er og andet lingeri.

Apollo-rumdragten A7L [24] ligner, bortset fra hjelmen, slangerne og "rygsækken" med "life support system", mere de flyverdragter, små børn iføres om vinteren, men dette er faktisk vildledende, idet der indenunder den hvide overtræksdragt skjuler sig en dragt, det minder om "wormsuit", og som giver bevægelsesfrihed, uden at dragten pustes op som en ballon (figur 10). "Glasboblen" bæres indenunder den ydre hjelm, som skærmer mod Solen, og som er den, man kender fra Apollo-billederne. Den yderste dragt beskytter mod mikrometeoritter, og den hvide farve sørger for, at astronauten ikke overophedes af det stærke sollys på Månens dagside.



Figur 11. Alexandre Ananoffs kontrolrumsdesign.

Kontrolrummet

Til udformningen af kontrolrummet eller "flight deck" har Hergé også haft næsen i Ananoffs bog, der har et vidunderligt dobbelttopslag med et kontrolrum til et "astronaf" (stjerneskip) efter Ananoffs design og udført af en tegner ved navn Jean Loup (figur 11). Igen er ligheden iøjnefaldende, men Hergé har selvfølgelig fortolket forlægget i henhold til sine egne idéer (figur 12).

Måne bilen

Tintins månerejse og de sidste Apollo-missioner (15, 16 og 17) har også det til fælles, at de begge medbragte en månebil. Mens Apollo-roveren mest ligner en "beach buggy" til to personer, får Tournesols månebil design én til at tænke mere på en kampvogn (figur 13). Det

enormt tunge køretøj er formodentlig fragtet til Månen i adskilt stand i de kasser, som kaptajn Haddock hejser ned på måneoverfladen. Det fremgår også af Tournesols dagbog den 3. juni kl. 23:45: "*Kaptajn Haddock og Tintin monterer tanken*", og allerede den 5. juni kl. 19:20: "*Kaptajnen har lige meddelt os, at tanken er klar til at køre*".

Vand på Månen

Hvad var det så, den store opdagelse, som Tintin gjorde på Månen? Ja, han fandt is dybt nede i en månegrotte (figur 14), længe før NASAs satellitter bekræftede, at der med stor sikkerhed er vand/is på Månen. NASAs satellitter kan dog ikke kigge ned i månegrotter (se dog nedenfor), men kigger i stedet ned i dybe kratere omkring Månens poler, hvor Solen aldrig skinner. På grund af Månens mangel på atmosfære vil vand kun

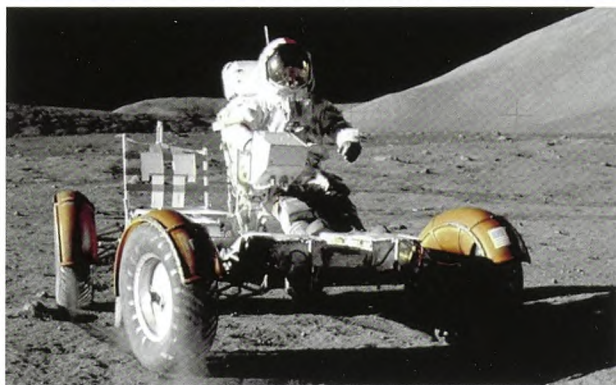


1. del side 44



2. del side 5

Figur 12. Tournesol fremviser kontrolrummet i måneraketten (© Hergé/Moulinart 2021).



Figur 13. "Tanken" (© Hergé/Moulinsart 2021) og Apollo 17-månebil, som er betydelig lettere (NASA-foto).

kunne eksistere som is, dybt nedkølet til i nærheden af -200°C på steder med evig skygge. Eksistensen af månegrotter kendte man ikke til på Apollo-missionernes tid.

NASA har haft flere satellitter i kredsløb om Månen i de seneste år for at kortlægge Månens geologi og fotografere hele dens overflade i meget høj opløsning som forberedelse til næste generations månefærder og evt. etablering af en permanent månebase.



Figur 14. Tintin finder vandis i en månegrotte (© Hergé/Moulinsart 2021).

Den første satellit, der fandt tegn på frossent vand i dybe kraterer ved polerne, var SDI-NASA Clementine opsendt af NASA og Strategic Defense Initiative (SDI) i 1994. Ved hjælp af en radar om bord fandt man tegn på brint-rige mineraler. En kandidat til radarsignaturen er kulbrinter, som imidlertid ikke findes på Månen, idet der aldrig har været et hav, hvor organiske sediment

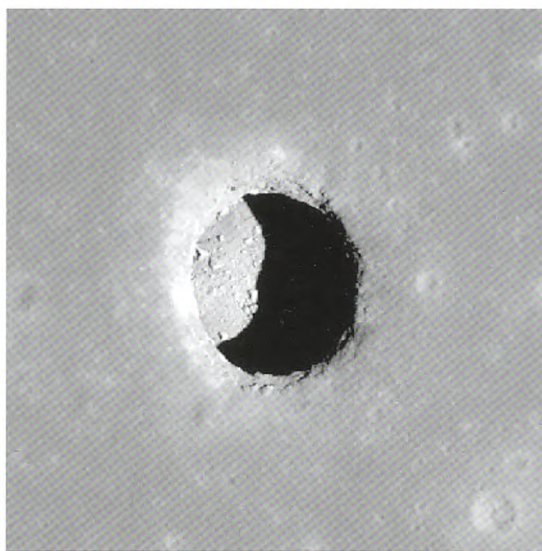
har kunnet omdannes til olie og naturgas. Derfor er der af kendte stoffer kun vand med et så stort indhold af brint, at det giver en kraftig radarsignatur.

Lunar Prospector, opsendt af NASA i 1998, havde et såkaldt neutronspektrometer om bord, og med dette instrument fik man bekræftet Clementines målinger og kortlagt forekomsterne mere detaljeret. I oktober 1999 havde Lunar Prospector opfyldt sin mission, og man dirigerede den til en kontrolleret nedstyrtning i et krater nær Månens sydpol i det håb, at der ville frigøres en sky af vanddamp, som kunne registreres med instrumenter fra Jorden. Dette eksperiment viste ingen forekomst af vand, og forskerne var skuffede.

Næste forsøg på at styrke udforskningen af vand på Månen kom med NASA-satellitten LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite). NASA havde ladet raketens øverste trin følge med i kredsløb om Månen, og i oktober 2009 lod man dette rakettrin styrte ned i krateret Cabeus nær Månens sydpol, mens LCROSS og teleskoper fra Jorden registrerede den sky, der blev frigivet ved "crash"-landingen. Denne gang blev tilstedeværelsen af vanddamp i skyen og dermed is på bunden af krateret bekræftet [25,26].

Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) opsendtes den 18. juni 2009 med det formål at fotografere og kortlægge Månens overflade i hidtil uset detaljeringsgrad. Fra en bane i 50 km's højde kan dens kamera skelne detaljer på $\frac{1}{2}$ meter. Dens meget lave bane er selvfølgelig kun mulig, fordi Månen ikke har nogen atmosfære.

Forekomsten af vand på Månen gør en fremtidig etablering af en månebase meget mere bæredygtig, men der forestår et omfattende udviklingsarbejde for at finde metoder til udvinding af isen i de ultrakolde, mørke omgivelser på bunden af kraterne.



Figur 15. Månegrotte fotograferet af NASAs LRO-sonde.

Månegrotter

Som nævnt ovenfor var månegrotter ukendte indtil for nylig, men dette ændredes, da den japanske månesonde Kaguya fotograferede et "hul i Månen" i 2009. Efter opsendelsen af Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) fik man et kamera med meget større opløsning, som har ført til et detaljeret kig ned i hullet [27].



Figur 16. Tintin i månegrotten (© Hergé/Moulinsart 2021).

Det overraskende var, at der var “huller” i Månens overflade med dragende kig ned i dybe grotter. Figur 15 viser grotten i Mare Ingenii, og det vil kræve avanceret bjergbestigerudstyr at komme ned i grotten, idet hullet er ca. 65 m i diameter og 80–90 m dybt. Forskerne mener, at hullet er et lavarør, hvor lava en gang har strømmet under en størknet overflade, som efter lavaudtømmningen er styrtet sammen. Man kan ikke se på disse billeder, om hullet i måneoverfladen bare er et enligt hul. Et system af grotter, som det Tintin og kaptajn Haddock træder ind i på figur 16, kan man derfor ikke bekræfte, men fra lignende formationer og på Jorden ved man, at det sandsynligvis vil være tilfældet også på Månen. En grotte kan være et godt sted at placere en fremtidig månebase. I grotten vil man være beskyttet mod de enorme dag/nat-temperaturudsving på måneoverfladen og være afskærmet mod den kosmiske stråling fra rummet samt udbrud af energirige elementarpartikler fra Solen.

Bedømt ud fra lignende formationer af lavarør her på Jorden er det ikke utænkeligt, at der kan møde fremtidige astronauter et syn som det, der mødte Tintin og kaptajn Haddock. Dog vil det ikke være drypsten, de vil se i grotten, men lavaformationer, der kan ligne dem på Hergés tegninger. Lavarørsgrotter findes fx på Lanzarote og Hawaii, i Island, Californien og Sydkorea.

Hergé har også hentet inspiration til grotterne og månelandskaberne hos den fascinerende amerikanske science fiction-kunstner Chesley Bonestell, [28], som i samme periode malede mange billeder af fiktive rumrejser og landskaber på Månen og andre planeter [29].

Alexandre Ananoff, International Astronautical Federation og “den danske forbindelse”

At Alexandre Ananoff er tæt forbundet med Hergé og “Månen tur/retur” må stå klart, når læseren er nået hertil i denne artikel, men at der også er en forbindelse

til Danmark, er nok noget, de fleste ikke umiddelbart forestiller sig.

Alexandre Ananoff tog i 1950 initiativ til at afholde den første “International Astronautical Congress” (IAC) i Paris fra den 30. september til 2. oktober 1950 (figur 17) [30].



Figur 17. Plakaten fra den første “Congrès International d’Astronautique”.

Til stede var 18 repræsentanter fra syv lande, heriblandt Danmark, som mødtes i *l’Aero-Club de France* med det formål at undersøge, om man kunne danne et selskab til styrkelse af fremtidigt internationalt rum-samarbejde.

Man nåede til enighed, og på et møde et år senere i British Interplanetary Society (BIS), London, grundlagde man International Astronautical Federation (IAF).

IAC har været afholdt hvert år lige siden 1950. Den sjette kongres blev afholdt i København den 2.–6. august 1955.

Det fortælles også om Alexandre Ananoff, at han var meget inspireret af Konstantin Tsiolkovski [10], og at det var denne inspiration, der var hans drivkraft til at gøre en stor indsats for at fremme rumfarten. Ananoff er født i 1910 i Tbilisi, Georgien, og døde i 1992. En af de 18 delegerede på mødet i Paris var “Mr. Hansen” fra Danmark. Han var repræsentant for Dansk Selskab for Rumfartsforskning (DSR), som blev stiftet 20. september 1949 med det formål at udbrede kendskabet til og viden om rumfart i det danske samfund, og som stadig er i fuldt vigør. På denne måde var Danmark med i rumalderen fra første færd som stiftende medlem af IAF, og DSR er stadig stemmeberettiget medlem af IAF.

En nærmere efterforskning af “Mr. Hansen” har ved hjælp af de tidligere formænd for DSR, Steen Eiler Jørgensen og Thomas A.E. Andersen godtgjort, at “Mr. Hansen” er Leo Hansen, én af stifterne af DSR. Leo Hansen (1905-1983) var civilingeniør og ansat i Københavns Belysningsvæsen det meste af sin karriere, men gjorde gennem DSR en stor indsats for at udbrede kendskabet til rumfart. Det ses bl.a. ved en artikel i “Ingeniøren” den 27. januar 1951 med den lidt spøjse titel “Uden for jordatmosfæren” [31]. Leo Hansen var også aktiv i dansk tv’s spæde begyndelse, hvor han den 13. oktober 1951 optrådte sammen med observator, mag.scient. Julie Vinter Hansen, Københavns Universitets Astronomiske Observatorium, og professor i maskinlære Johan Ludvig Mansa, Polyteknisk Læreanstalt (nu DTU), i udsendelsen “Rejse i rummet”.

Litteratur

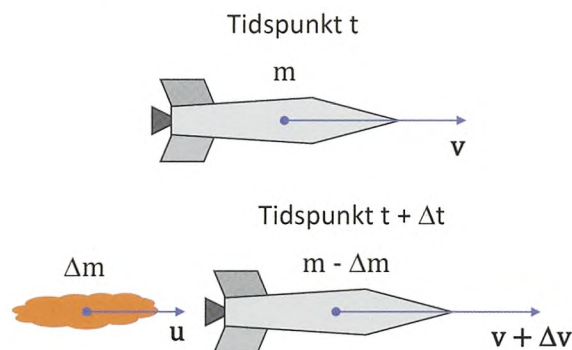
- [1] B. Peeters (1983) Hergé – Bogen om Tintin og hans skaber (originaltitel: "Le Monde d'Hergé"), Carlsen Comics.
- [2] A. Ananoff (1950): "L'astronautique", Collection "Savoir", Librairie Arthème Fayard, Paris.
- [3] Alexandre Ananoff, l'homme qui inspira Hergé pour "On a marché sur la lune", Podcast, (fransk tale), www.franceculture.fr/emissions/les-nuits-de-france-culture/alexandre-ananoff-lhomme-qui-inspira-herge-pour-a-marche-sur-la-lune
- [4] Apollo 11: da.wikipedia.org/wiki/Apollo_11
- [5] Apollo 11: www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/apollo11.html
- [6] Generelt om Apollo-missionerne: www.nasa.gov/mission_pages/apollo/index.html
- [7] Apollo-programmet: en.wikipedia.org/wiki/Apollo_missions
- [8] "One small step for man, one giant leap for mankind" www.hq.nasa.gov/alsj/a11/a11v.1092418-0354.avi
- [9] Saturn V: en.wikipedia.org/wiki/Saturn_V
- [10] Konstantin Tsiolkovsky: en.wikipedia.org/wiki/Konstantin_Tsiolkovsky
- [11] Venturestar: en.wikipedia.org/wiki/VentureStar
- [12] Aerospike engine: en.wikipedia.org/wiki/Aerospike_engine
- [13] Nuclear Thermal Rocket: en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_thermal_rocket
- [14] NERVA: en.wikipedia.org/wiki/NERVA
- [15] Nukleare Antriebe: www.bernd-leitenberger.de/nukleare-antriebe.shtml
- [16] Atomic Rockets: www.projectrho.com/public_html/rocket/engineelist.php
- [17] New Space Race: www.satnews.com/story.php?number=725854493
- [18] Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations, DRACO: www.darpa.mil/program/demonstration-rocket-for-agile-cislunar-operations
- [19] Chicago Pile-1: en.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile-1
- [20] Nuclear reactor: en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor
- [21] Apollo 9 command module, San Diego Air & Space Museum: www.flickr.com/photos/sortingoutscience/5300684998/
- [22] N. de Monceaux (2011) "Spacesuit – Fashioning Apollo", MIT Press.
- [23] N. de Monchaux (videoforedrag) "Spacesuit: Fashioning Apollo". Ca. 29 min. inde i foredraget fortælles, at designeren af dragten blev inspireret af en "tomato worm". www.youtube.com/watch?v=Slr3f4bkLYg
- [24] Apollo/Skylab A7L Space Suit: en.wikipedia.org/wiki/Apollo/Skylab_A7L
- [25] LCROSS Finds Water on the Moon: science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2009/13nov_lcrossresults
- [26] Lunar Impact Uncovered More Than Just Moon Water: science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2010/21oct_lcross2
- [27] LRO Takes Closer Look at Moon Caves: www.universetoday.com/73659/lro-takes-closer-look-at-moon-caves

- [28] Chesley Bonestell: www.bonestell.org
en.wikipedia.org/wiki/Chesley_Bonestell
- [29] M. Farr (2015) "En rejse gennem Hergés univers", Forlaget Cobolt.
- [30] Il y a 70 ans, à Paris, le premier Congrès international d'astronautique: www.air-cosmos.com/article/il-y-a-70-ans-paris-le-premier-congres-international-dastronautique-23674
- [31] L. Hansen (1951) "Uden for jordatmosfæren", Ingeniøren, nr. 4, 27. januar 1951, 60. årgang, side 104-106.

Appendiks: Raketligningen

I det følgende opstilles Raketligningen eller rettere ligningerne, for der er faktisk to af dem: Tsiolkovskys og den, der udtrykker raketens løftekraft.

Den første baserer sig på impulsbevarelse, når forbrændingsgasserne udstødes fra raketdysen. I øverste del af illustrationen har vi til tidspunkt t en raket med massen m (raket + brændstof) og hastigheden v . Raketten impuls er $p = mv$. I nederste del, til tidspunkt $t + \Delta t$, har raketten udstødt massen Δm , som bevæger sig med hastigheden u , og raketten har nu hastigheden $v + \Delta v$. Alle hastigheder er set i forhold til observatøren.



Om det er vandmolekyler fra forbrænding af brint og ilt, eller det er tennisbolde, man skyder bagud, er ligegyldigt. Fysikken er den samme.

Eftersom vi er langt fra alle tyngdefelter, og der ikke virker eksterne kræfter på systemet, må systemets samlede impuls være den samme til t og $t + \Delta t$, eller $\Delta p / \Delta t = 0$, hvor Δp er ændringen i impuls. Dette udtrykkes:

$$\Delta p = [(m - \Delta m)(v + \Delta v) + \Delta m \cdot u] - mv = 0$$

Dividerer vi igennem med Δt og foretager grænseovergangen $\Delta t \rightarrow 0$ får vi:

$$\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = -(u - (v + \Delta v)) \frac{dm}{dt}$$

Størrelsen $(u - (v + \Delta v))$ er hastigheden af udstødningssgasserne i forhold til raketten, og hvis vi indfører et fortegnsskift, så den regnes positiv og kalder den v_x (exhaust velocity), samt konstaterer, at dv/dt er accelerationen, og at masse gange acceleration er kraft, får vi:

$$F = m \frac{dv}{dt} = m \cdot a = v_x \frac{dm}{dt} = v_x q$$

hvor a er accelerationen, og q er masse-flowet i kg/sek. af forbrændingsgasserne ud af raketdysen.

Omskriver man ligningen lidt og integrerer den, kan man beregne hastighedstilvæksten for et givet forbrug af brændstof:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{v_x}{m} \frac{dm}{dt}$$

Der ganges igennem med dt på begge sider og integreres fra starthastigheden v_0 til v_1 og massen fra m_0 til m_1 :

$$\int_{v_0}^{v_1} dv = -v_x \int_{m_0}^{m_1} \frac{dm}{m}$$

Minustegnet skyldes, at $m_0 > m_1$, dvs. vi taber masse (forbruger brændstof) ved accelerationen. Til arbitrært tidspunkt t har raketten opnået hastigheden v_1 :

$$v_1 = v_0 + v_x \ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right) \Rightarrow \Delta v = v_1 - v_0 = v_x \ln \left(\frac{m_0}{m_1} \right)$$

Dette er Tsiolkovskys raketligning.⁴ Konventionen omkring raketligningen er, at man benytter specifik impuls til at karakterisere brændstof/iltningmiddel-kombinationen i stedet for v_x , således at: $v_x = I_{sp} \cdot g$, hvor I_{sp} kaldes den specifikke impuls, og $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ er standard tyngdeaccelerationen. Dette er retteligt et matematisk trick, så I_{sp} får enheden sekunder, hvorved man undgår diskussioner om talværdier, uanset om man bruger et pound-foot-second-enhedssystem eller SI-enheder.

Betegner man den forbrugte mængde af brændstof $m_p = m_0 - m_1$ og hastighedstilvæksten $\Delta v = v_1 - v_0$, kan man omskrive ligningen til:

$$m_p = m_0 \left(1 - e^{-\frac{\Delta v}{I_{sp} \cdot g}} \right).$$

Når man taler om raketopsendelser og manøvrer i rummet, taler man hele tiden om "delta-v", hvor stor en hastighedsændring en manøvre kræver (ligegyldigt om hastigheden øges eller mindskes). Det vil føre for vidt her at lave en beregning af hele månerejsen fra start til slut. Beregning af opstigningen gennem atmosfæren inklusiv luftmodstand under påvirkning af Jordens tyngdefelt og banens udformning er betydeligt mere kompliceret. Et enkelt eksempel skal dog diskuteres:

Nedstigning fra en bane omkring Månen til landing på måneoverfladen kræver et delta-v på: $\Delta v = 2100 \text{ m/s}$, og det samme for at komme væk derfra igen. Hvis vi antager, at Tournesol benytter atommotoren med et $I_{sp} = 4000 \text{ s}$ under hele nedstigningen (se hovedteksten), og at raketens masse er 900 tons efter at have brugt anslået 500 tons af brændstoffet til turen fra Jorden til Månen, får vi: $m_p = 46,9 \text{ tons}$, og det er jo ikke afskrækkende. Til gengæld må Tournesol regne med, at der er radioaktiv forurening af landingsstedet, og det er jo ikke så godt. Derfor vil han nok bruge den kemiske raketmotor til det sidste stykke.

Den sidste raketligning udtrykker løftekraften af en raketmotor med alle bidrag:

$$F = q \cdot v_x + A_e (P_e - P_a) = q \cdot I_{sp} \cdot g + A_e (P_e - P_a)$$

hvor A_e er raketdysens åbningsareal, P_e er forbrændingsgassernes tryk ved raketdysens åbning, og P_a er trykket i raketens omgivelser. Der er således i forhold til udledningen ovenfor et ekstra bidrag i form af et ukompenseret tryk ved raketdysens åbning. Inden i raketdysen og forbrændingskammeret vil væggenes reaktion kompensere gassernes tryk, og netto er der ingen kraft. Af denne ligning kan man også konstatere, at en raket, alt andet lige, virker bedst i vakuum.



Flemming Hansen er ph.d. og seniorkonsulent inden for satellitkommunikation, satellitnavigation og rumteknologi. Indehaver af RadioLab Consulting (fh@radiolab.dk).

PFEIFFER VACUUM

Nyhed

Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m³/t)
Ekstrem lyd- og vibrationssvag
pumpe med kompakt design



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

⁴en.wikipedia.org/wiki/Tsiolkovsky_rocket_equation

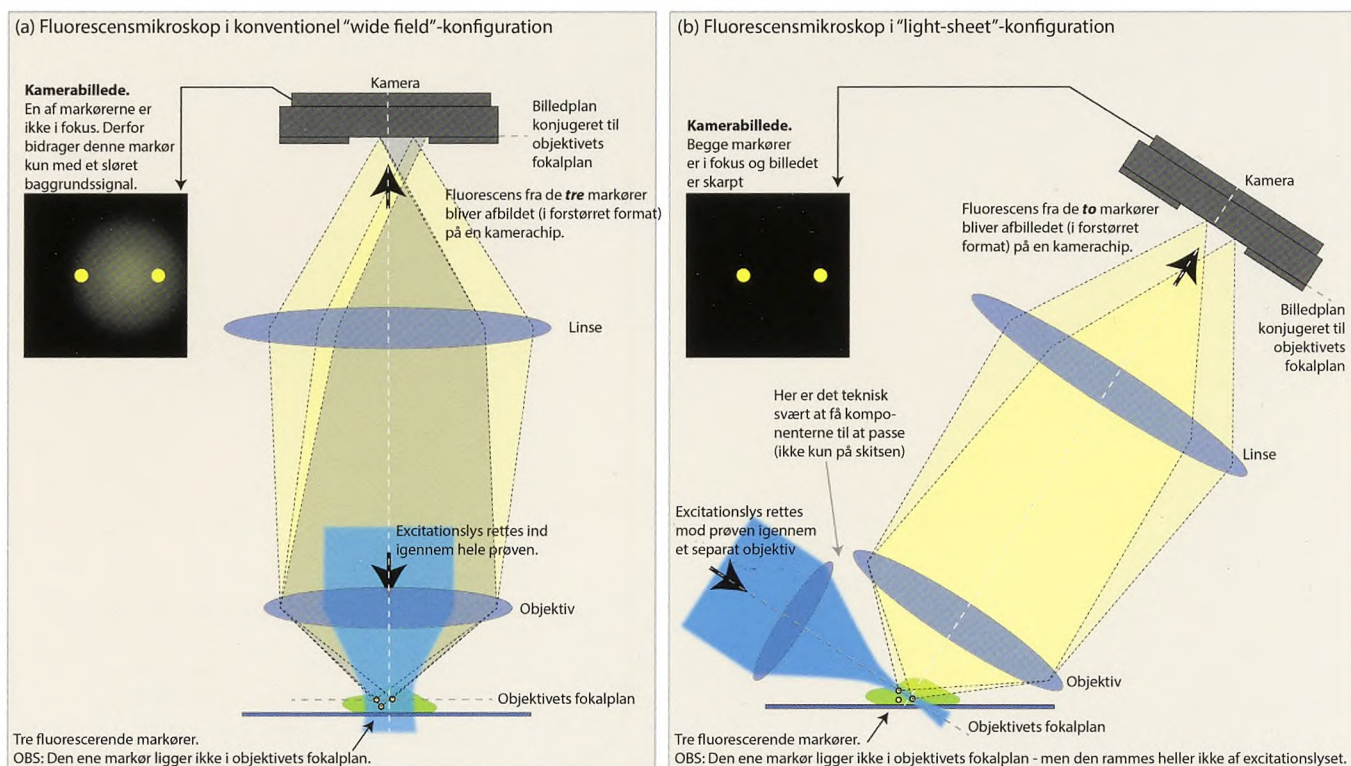
Meget af vores viden om cellebiologi er udledt af klassiske mikroskopbaserede eksperimenter, som har taget udgangspunkt i en simpel prøve: En isoleret celle i en petriskål. Men kan vi regne med, at en isoleret celle i en petriskål opfører sig, som den ville gøre i sit naturlige miljø? – Nej, det kan vi nok ikke altid. Denne artikel belyser ét aspekt af den igangværende mikroskopudvikling – nemlig udviklingen af mikroskoper, som kan observere levende celler i intakte væv.

Kvant er et tidsskrift for fysik og astronomi – et tidsskrift, der behandler “observationer af verdensrumets giganter” og “teleskopteknologi”. Jeg føler mig meget privilegeret og måske lidt fejlcastet, når jeg nu har fået lov til at bringe denne beretning om “observationer af bio-rummets bitte små celler” og “mikroskopeteknologi”. Jeg håber at du, kære læser, er med på at tage et kig igennem den anden ende af teleskopet – nedad og indad.

I min optik er den væsentligste forskel imellem mikroskopi og “teleskopi”, at vi kan ændre og perturbere den prøve, vi undersøger med vores mikroskoper. Fx kan vi få bestemte proteiner i en celle til at lyse op vha. fluorescerende markører, og vi kan observere, hvordan neuroners respons på stimuli ændrer sig, når vi sænker temperaturen. Tænk lige over, hvor effektivt vi ville kunne udforske verdensrummet, hvis vi havde lignende muligheder for at påvirke de objekter og fænomener, som vi forsøger at observere igennem vores teleskoper. Mon ikke vi kunne danne os en hel masse nye indsigter,

hvis vi kunne få exoplaneter til at “lyse op” eller bare se, hvad der sker, når en galakse køles ned. Den luksus har vi desværre ikke, når vi kigger op. Men når vi kigger ned, er det en helt anden sag.

Det er absolut en fordel, at vi kan påvirke de prøver, vi mikroskopierer. Men det er også en faldgrube. Eksempelvis har vi længe været tilfredse med at observere, hvordan levende, eukaryote celler opfører sig i isolation på en glasoverflade (*in vitro*) – altså efter en betydelig perturbation, hvor cellerne er blevet isoleret fra deres naturlige miljø, som typisk består af andre celler samt et hav af signalstoffer. Jeg ville ikke selv opføre mig helt normalt, hvis jeg blev ladet alene på en glasflade – og da slet ikke, hvis jeg blev gennemlyst af en meget kraftig lyskilde, som det ofte er tilfældet for biologiske prøver, der mikroskoperes. I dette lys må vi tage visse forbehold, når vi konkluderer på observationer, som foretages under “unormale” forhold for den biologiske prøve.



Figur 1. Reduktion af lysdosis. (a) Et almindeligt fluorescensmikroskop belaster hele prøven med excitationsslys og producerer relativt slørede billeder. (b) Et light-sheet-fluorescensmikroskop belyser kun et tværsnit igennem prøven og producerer skarpe billeder. Bemærk, at excitationsslysets strålebane er en smule forøget.



Figur 2. Light-sheet konfiguration jf [2].

Mikroskopbrugerne (aka. biologerne) er ikke blinde for denne problematik, og de har længe efterspurgt bio-billeddannelsesmetoder, der kan “filme” cellers opførsel i intakte væv – helst hurtigt, helst i tre dimensioner, og helst uden at prøven perturberes af selve billeddannelsesprocessen. Ja, de er ikke kede af det, biologerne. Disse behov har været (og er fortsat) en hård nød at knække for det teknisk-videnskabelige samfund omkring udviklingen af mikroskoper til biologisk billeddannelse – altså den faggruppe, jeg selv tilhører. Vi er slet ikke i mål endnu. Men det går hurtigt fremad. I denne artikel tager vi et kig på nogle af de centrale udfordringer og løsninger, som karakteriserer den igangværende udvikling af fluorescensmikroskoper til billeddannelse af levende væv.

Udfordring #1: Lysdosis

En af udfordringerne ved fluorescensbaseret billeddannelse af levende væv er, at vi må begrænse den lysdosis, vi udsætter vævet for. For at frembringe fluorescens fra en markør i vævet, er det nødvendigt at ramme markøren med lys, typisk fra en laser med en passende fotonenergi, som kan bringe markøren i en exciteret (mere energirig) tilstand. Herefter kan markøren falde tilbage til sin grundtilstand ved at fluorescere. Mere specifikt foregår fluorescens ved, at markøren først afgiver lidt af den tilførte energi til omgivelserne og derefter emitterer en foton med lavere (Stokes-forskudt)

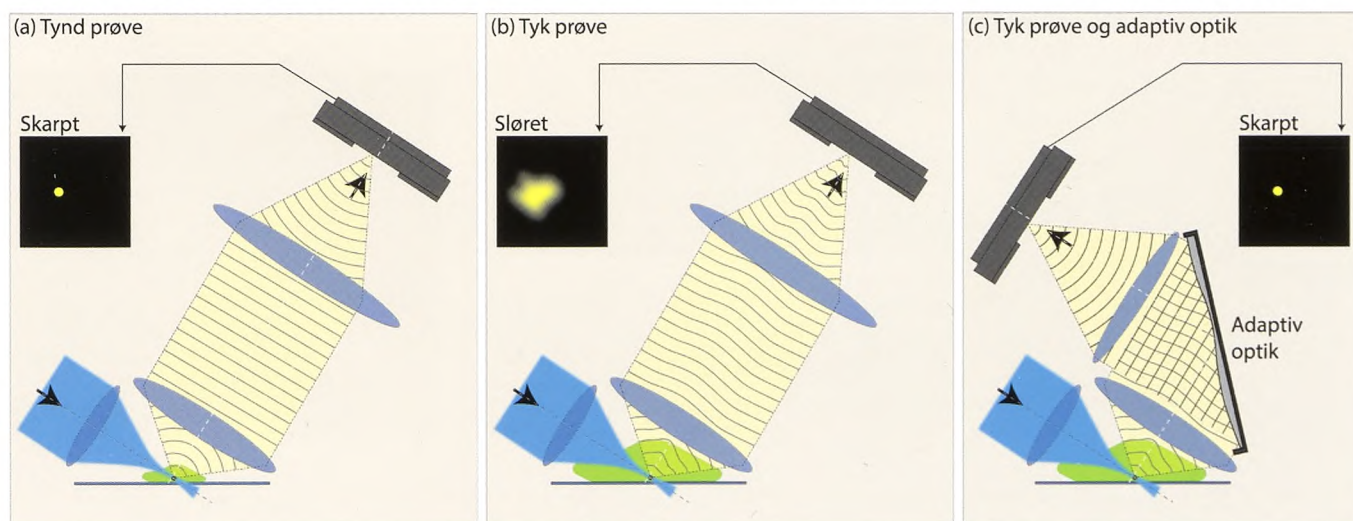
energi, end den blev tilført. Vi kan så være heldige at detektere den emitterede foton med et kamera placeret i et billedplan konjugeret til prøven, som vist i figur 1a. I konventionelle fluorescensmikroskoper indfører vi det exciterende lys gennem det samme mikroskopobjektiv, som vi bruger til at opsamle emitteret lys (fluorescens), herved gennemlyser vi hele prøven og ikke kun det plan i prøven, vi forsøger at tage et billede af.

Denne lysgeometri har to ulemper: For det første er der altid en risiko for, at det exciterende lys interagerer med prøven på destruktiv vis, hvorved de naturlige biokemiske processer i prøven perturberes. Når hele prøven gennemlyses, er der relativt høj risiko for, at sådanne perturbationer manifesterer sig. For det andet exciteres en masse markører uden for billedplanet helt unødigt. Hver gang en markør exciteres, er der en risiko for, at dens kemiske struktur ændres, hvorved markøren kan miste sin evne til at fluorescere. Når de fluorescerende markører gradvist bliver ødelagt, må vi kompensere ved at skruer mere op for excitationslyset – og så ødelægger vi bare endnu flere markører og øger risikoen for at perturbere prøvens naturlige biokemi.

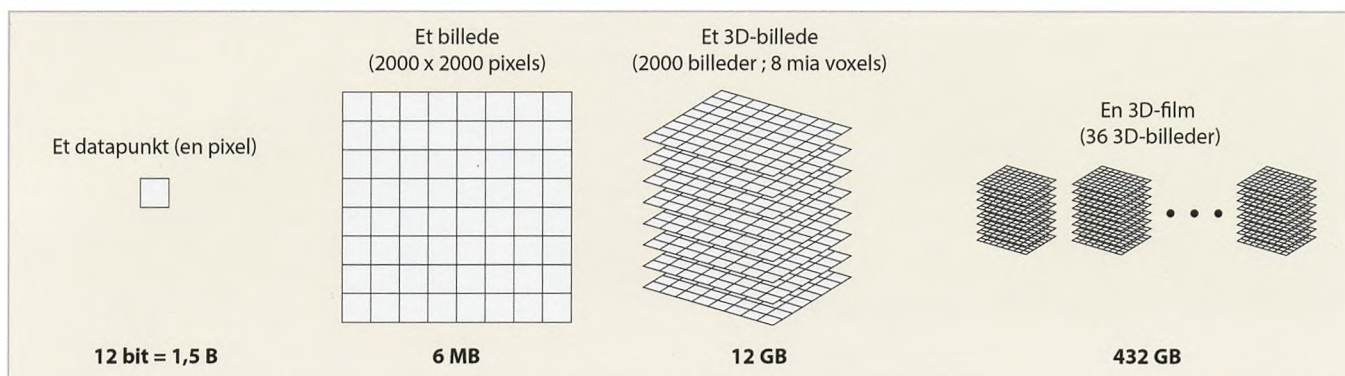
En løsning, som i nogen grad omgår disse to problemer, er “light-sheet”-lysgeometrien, der benytter to objektiver som vist i figur 1b og figur 2 [1,2]. Det ene objektiv indfører et smalt tæppe af lys, som kun exciterer markører i ét plan i prøven. Fluorescens emitteret fra markørerne i dette plan afbildes på kameraet via det andet objektiv. Ideen bag light-sheet-lysgeometrien er flere årtier gammel, men den er først begyndt at vinde indpas i de seneste år, hvor automatisering og specialfremstillede optiske komponenter har gjort teknologien praktisk anvendelig og tilgængelig.

Udfordring #2: Strålebaneforvrængninger

En anden stor udfordring er at kigge dybt ind i levende væv, uden at skære det i stykker. Et levende væv består nemlig af mange lommer med forskellige brydningsindeks (fx cellekernen, cytosol, og det ekstracellulære rum). Som sådan kan vi sammenligne et levende væv



Figur 3. Adaptiv optik. (a) Et light-sheet-fluorescensmikroskop og en tynd prøve. Her har vi ingen problemer med strålebaneforvrængninger. (b) En tykkere prøve forvrænger strålebanen imellem markør og kamera. Derfor får vi et sløret billede af markøren. (c) Med adaptiv optik kan vi kompensere for de strålebaneforvrængninger, den tykke prøve inducerer. Den viste adaptive optik (selv komponenten) er et deformerbart spejl (engelsk: deformable mirror) – en computerstyret, reflektiv membran, som kan bøjes i arbitrære former.



Figur 4. En hel masse data. En kort 3D-film kan hurtigt sluge 432 GB hukommelse.

med ornamenteret glas, som vi kender det fra gammeldags badeværelsesvinduer: Mediet er rimeligt gennemsligt, så vi kan godt tage et billede af et objekt på den anden side. Det er imidlertid svært at få et skarpt billede, fordi mediet forvrænger lysets strålebane. En fornuftig løsning på dette problem blev faktisk kopieret direkte fra "teleskopien", hvor man længe har brugt adaptiv optik (engelsk: adaptive optics) til at kompensere for strålebaneforvrængninger forårsaget af "ujævnheder" i Jordens atmosfære [3]. Den mest almindelige form for adaptiv optik er et computerstyret spejl, der kan bøjes i arbitrære former – ligesom spejlene i Tivolis spejlkabinet. Tricket er at bøje spejlet i netop den form, der modsvarer den strålebaneforvrængning, som indføres af mediet imellem kamera og objekt. Jeg har aldrig brugt adaptiv optik til at kigge igennem badeværelsesvinduer, men det burde i princippet være muligt. Figur 3 viser, hvordan adaptiv optik kan bruges (fornuftigt) til at kompensere for strålebaneforvrængninger fra et væv, hvorved vi får et skarpt billede af fluorescerende strukturer relativt dybt inde i vævet.

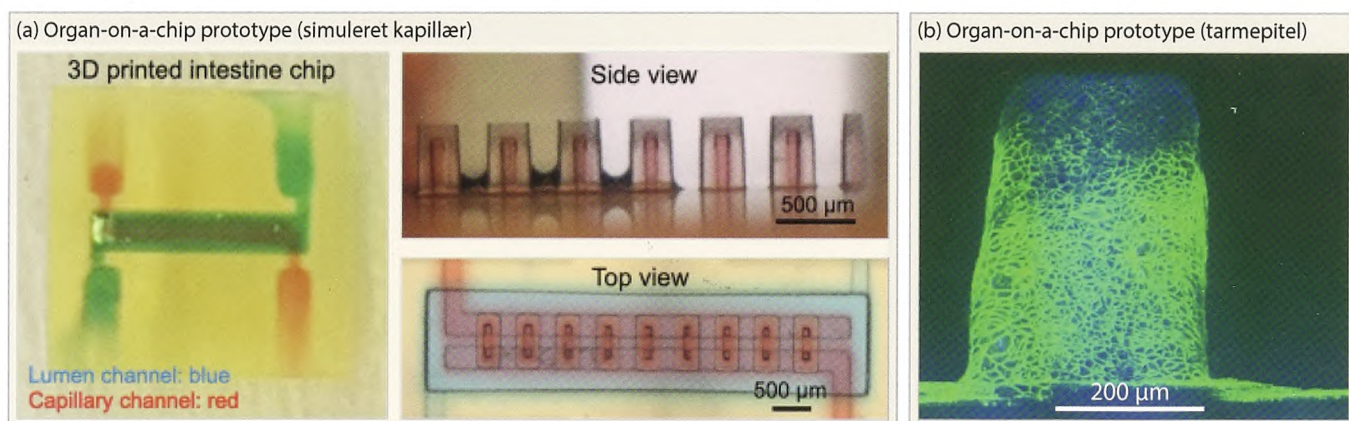
Udfordring #3: Datamængden

Det har længe været muligt at kortlægge den tredimensionelle fordeling af fluorescerende markører i biologiske strukturer. Rent praktisk gøres dette ved at optage en serie/stak billeder af forskellige tværsnit igennem

prøven, som vist i figur 4. Med nye metoder som light-sheet-mikroskopi kan vi optage et "3D-billede" meget, meget hurtigt – alt for hurtigt, vil nogen sige, på grund af den datamængde, vi så skal håndtere. Med eksisterende teknologier kan vi fx sagtens optage et 3D-billede bestående af 2.000 billeder, hvert bestående af 2.000×2.000 pixels. Dette vil give os 8 milliarder datapunkter (voxels). Hvis hvert datapunkt har en bitdybde på 12 bit (svarende til 1,5 byte), så vil vores 3D-billede optage 12 GB hukommelse. Hvis kameraet optager 20 billeder per sekund (det er lavt sat), så tager det 100 sekunder at optage vores 3D-billede. Hvis vi nu skal lave en 3D-film, altså en serie af 3D-billeder, så vil vi efter en time have opsamlet 432 GB data. Vi kan altid købe flere harddiske, så datamængden er egentlig ikke et uoverstigeligt problem i sig selv [4]. Det helt store problem har vi, når vi skal trække meningsfuld og kvantitativ information ud af vores billeddata. Heldigvis er 3D/4D-billedanalyse også et felt i hastig udvikling [1].

Udfordring #4: Den biologiske prøve

Det er relativt simpelt at "tagge" bestemte proteiner i isolerede celler med fluorescerende markører. En forholdsvis håndgribelig metode er at indføre "skræddersyet" DNA, som får de isolerede celler til selv at producere proteiner med fluorescerende markører. Dette er langt mere kringlet at gøre i intakte væv eller



Figur 5. Organ-on-a-chip-prototyper. (a) Et blødt stillads, som tarmceller skal kunne bruge som udgangspunkt for at forme de børstelignende strukturer, vi kender fra tarmepitelet. Et kunstigt kapillær gennemløber hvert børstehår. I panelet til venstre gennemstrømmes den simulerede tarmlumen og den simulerede blodbane med hhv. en blå og en rød væske. (b) Et andet organ-on-a-chip system, som også simulerer tarmepitelet. Celler (grøn og blå) dækker overfladen af chippens bløde stillads. En kombination af organ-on-a-chip-systemer som disse kan måske hjælpe os til at observere, hvordan bestemte næringsstoffer, medikamenter og toksiner finder vej fra tarmes lumen, igennem tarmepitelet, til blodbanen. Med lidt videre udvikling kan vi også begynde at undersøge samspillet imellem forskellige celletyper og sammenhængen imellem cellernes placering og deres funktion. Tak til Rujing Zhang, Nayere Taebnia og Niels B. Larsen (DTU) for lån af figurer.

hele organismer – ikke umuligt, men svært, dyrt og tidskrævende. Affotograferingen af intakte vævsprøver kompliceres yderligere af, at vævet hurtigt holder op med at fungere, hvis det fjernes fra “moderorganismen” – fx fordi tilførslen af iltet blod ophører. Kort sagt: Hvis vævet ikke er tilgængeligt på organismens yderside, så har vi et problem. En rigtig god løsning på dette problem ligger i horisonten i form af organ-on-a-chip-systemer – altså små kunstige organ-efterlignende biologiske strukturer, som fremdyrkes af fx stamceller, se figur 5 [5]. Denne krydsning imellem en *in vitro*- og *in vivo*-prøve kan hurtigt danne basis for en helt ny måde at undersøge biologien og de mekanismer, der ligger til grund for liv og sygdom [6]. En særligt spændende vinkel på organ-on-a-chip-systemer er, at vi måske vil kunne lave person-specifikke systemer og observere, hvordan det kunstige væv responderer på medicinsk behandling. Men det er en helt anden historie.

Nu fik vi skrabt lidt i overfladen på, “hvad der rører sig” i forbindelse med billeddannelse af levende væv – men der er meget mere at tage fat på. Fx fik jeg slet ikke nævnt superopløsningsmikroskopi (se Nobelprisen i kemi 2014), eller det væld af billeddannelsesmetoder, der kan komplementere fluorescensmikroskopi [7]. Mikroskopiens udvikling foregår i krydsfeltet mellem elektronik, biologi, kemi, optik, mekanik, programmering og sågar kvantefysik. Når ét af disse felter rykker sig markant, så følger mikroskopi ofte trop. Måske er det ikke helt galt, at naturvidenskabsbrikken i Bezzerwizzer ser ud, som den gør (eller gjorde, sidst jeg spillede det; dengang viste naturvidenskabsbrikken nemlig et billede af et mikroskop) – og måske er denne artikel alligevel ikke helt malplaceret i tidsskriftet Kvant.

Litteratur

- [1] Y. Wan, K. McDole og P.J. Keller (2019) Light-sheet microscopy and its potential for understanding developmental processes, *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.*, bind 35, side 655–81.
- [2] T. Liu, S. Upadhyayula m.fl. (2018) Observing the cell in its native state: Imaging subcellular dynamics in multicellular organisms, *Science*, bind 360, side eaaq1392.
- [3] M.J. Booth (2014) Adaptive optical microscopy: The ongoing quest for a perfect image, *Light Sci. Appl.*, bind 3, side e165.
- [4] A. Andreev og D.E.S. Koo (2020) Practical Guide to Storage of Large Amounts of Microscopy Data, *Microscopy Today*, bind 28, nr. 4, side 42–45.
- [5] R. Zhang og N.B. Larsen (2017) Stereolithographic hydrogel printing of 3D culture chips with biofunctionalized complex 3D perfusion networks, *Lab Chip*, bind 17, side 4273–4282.
- [6] L.A. Low, C. Mummery, B.R. Berridge, C.P. Austin og D.A. Tagle (2020) Organs-on-chips: Into the next decade, *Nat. Rev. Drug Discov.*, doi.org/10.1038/s41573-020-0079-3.
- [7] J. Alvelid og I. Testa (2019) Fluorescence microscopy at the molecular scale *Curr. Opin. Biomed. Eng.*, bind 12, side 34–42.



Emil B. Kromann er lektor ved DTU, hvor han udvikler nye instrumenter til billeddannelse af levende celler og væv. Hans tidlige studier fandt sted ved DTU og han modtog senere sin ph.d.-grad fra Yale University (USA).

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Apr 2021				
12/4	19.30	Vacciner i pandemiens tid Efter foredraget er der uddeling af en Ørsted grundskolelærermedalje	Peter Lawætz Andersen	SNU
26/4	19.30	Kan voldsomme klimaforandringer forudsiges? Efter foredraget er der generalforsamling	Peter Ditlevsen	SNU
Maj 2021				
3/5	19.30	The Phenomenon of Superspreading its role as an Achilles Heel for coronavirus Efter foredraget er der uddeling af en Ørsted gymnasielærermedalje	Kim Sneppen og Lone Simonsen	SNU
17/5	19.30	Modeller for galaksedannelse	Troels Haugbølle	SNU
Juni 2021				
7/6	19.30	Ørsted, Faraday & Tesla – om teknologisk udnyttelse af elektromagnetismen	Hans Buhl	SNU

SNU: Aud. 1, H. C. Ørsted Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø. Der kan komme ændringer grundet COVID-19 restriktioner, så følg med på www.naturlaeren.dk eller facebook.com/SNU1824

Det observerbare univers – og det udenfor

Erik Høg, Niels Bohr Institutet

Observationer i mikrobølger og i synligt lys viser, at universet er meget større end det observerbare univers (OU). Dette afgrænses ved *den sidste spredende overflade*, den kosmiske horisont, der stammer fra dengang, universet var 380.000 år gammelt. Imidlertid peger nye observationer i begge bølgelængdeområder på, at der kan være afvigelser fra det enkle svar, at fortsættelsen uden for horisonten statistisk set rummer det samme som indenfor.¹

Vi skal i denne artikel især tænke på universet, da det er blevet 380.000 år gammelt. Det bestod af en glødende gas, hvis temperatur var faldet til ca. 3000 grader. Sådan var det overalt i universet, og temperaturen varierede kun 0,02 K fra sted til sted, se figur 1, så der var slet ingen kontraster i lysstyrke eller farver, som ellers er det, der gør vort nuværende univers så smukt og levende.

Man tør nok sige, at hele universet dengang var i en *meget enkel og meget "kedsommelig"* tilstand! Denne artikel skal først handle om netop denne "*spændende*" tilstand, spændende, fordi gassen på det tidspunkt pludselig blev gennemsigtig, og fordi vi faktisk kan observere lyset derfra, det ældste lys i universet. Tilstanden var samtidig så enkel, at den må kunne forstås af interesserede lægfolk.

Universet ved 3000 K

Universets udvikling begyndte ved big bang (BB) for 13,8 milliarder år siden. Denne udvikling forstår vi i dag gennem den generelle relativitetsteori (GR), det ekspanderende univers og BB-fysik, og Kvant har bragt en artikel herom [1].

Ved en alder af 380.000 år indeholdt universet næsten kun brint og helium, hvor brinten var ioniseret. Rummet var derfor fyldt med frie elektroner, der blev dannet allerede i det første sekund efter big bang. Elektronerne spredte hele tiden lyset, så det hver gang blev sendt af sted i en ny retning, lyset kom altså ingen vegne: rummet var fyldt med stråling og derfor helt uigennemsigtigt.

Da temperaturen var faldet til ca. 3.000 K blev hver elektron bundet til en proton, så vi nu havde neutral brint. Der var desuden 25% helium, som også var ioniseret, men som allerede blev neutralt, inden brinten blev det. Der var kun ca. 270 atomer pr. cm^3 , så gassen var omtrent så fortyndet som det bedste vakuum, man kan skabe i et laboratorium på Jorden.

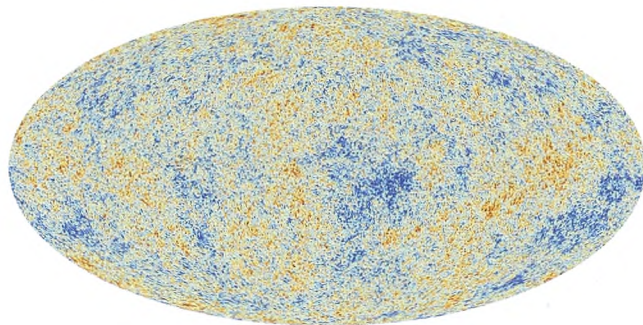
Denne tynde, neutrale gas var fuldstændig gennemsigtig for elektromagnetisk stråling, så de fotoner, de elektromagnetiske bølger, der netop var undervejs, fortsatte ligeud, og hver foton vil blive ved med det i al fremtid, hvis den ikke rammer noget. I tidens løb voksede lysets bølgelængde i takt med universets udvidelse og er nu, i vore dage, 1100 gange større, se nærmere nedenfor. Bølgelængden var først ca. 1 μm (som for

almindeligt synligt lys), og er nu i vore dage blevet 1 mm, lyset er altså blevet til mikrobølger, omtrent som strålingen i en almindelig mikroovn.

Hvor kom lyset fra?

Disse mikrobølger kommer fra alle retninger, fra hele himlen. Strålingen blev opdaget i 1964 af A.A. Penzias og R.W. Wilson under afprøvning af nye, meget følsomme kryogeniske mikrobølgemodtagere til radioastronomiske observationer, og de modtog i 1978 nobelprisen i fysik.

Strålingen er i de senere år blevet målt nøjagtigt fra flere videnskabelige satellitter. Figur 1 viser det billede, vi således har af himlen. Vi må spørge: Hvor kom dette lys fra? Svaret er: Lyset må være kommet fra gas, der lå så langt væk, at det netop har taget 13,8 milliarder år for lyset at nå hertil. Da lyset kommer fra alle retninger, må det være kommet fra en kugleskal med centrum i os, som vist i figur 2. Selvfølgelig blev der afsendt lys fra alle steder i gassen, og lys blev sendt i alle retninger. Vi modtager kun det, der netop tilfældigt havde retning, så det kunne træffe os nu i vort solsystem, der blev dannet af gas og støv små ti milliarder år senere.



Figur 1. Billede af hele himlen i mikrobølgestrålingen. Temperaturen er dermed målt til knap 3 K over det absolutte nulpunkt, faktisk præcis 2,725 K. Variationerne fra sted til sted på himlen, som ses på billedet, svarer til kun ca. 0,018 mK i den modtagne stråling og til kun 0,02 K i den oprindelige glødende gas, der var ca. 3.000 K varm (ESAs Plancksatellit).

Hvor langt er kugleskallen væk?

Den kugleskal skal vi nu tænke på, og det er jo kun en *tænkt* kugleskal. Gassen i denne kugleskal var ganske som den gas, der fyldte *hele* universet dengang. Enhver observatør hvor som helst i universet kan tænke på sin

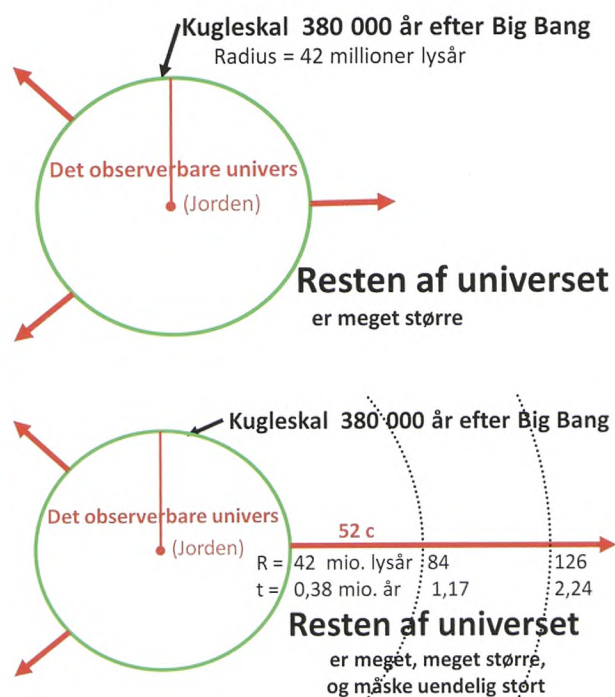
¹En stor tak skyldes jeg Leif Hansen, Steen Harle Hansen, Peter Laursen og Jørgen Otzen Petersen, mine kolleger på Niels Bohr Institutet for mange år siden, for hjælp til afklarende spørgsmål. Jeg takker også mange læsere af tidligere versioner for nyttige kommentarer.

egen kugleskal, hvor han er i centrum, og hvorfra han netop nu modtager mikrobølger, ganske som vi gør.

Denne kugleskal kalder vi den *kosmiske horisont*, fordi lys fra det, der er længere ude, endnu ikke er nået frem til os. Det rum, der er inde i kugleskallen, kalder vi det *observerbare univers*.

Hvad var afstanden til skallen, da lyset til os blev afsendt, altså hvad var radius i vores kugleskal? Afstande og hastigheder er beregnet som angivet i [5], hvor man kan finde nærmere om formler og beregninger. Med universets ekspansion er radius i denne kugleskal af gas blevet 1100 gange større, og gassen er blevet til støv, stjerner og galakser ganske som i vores nære omegn i universet. Radius er øget fra 42 millioner lysår til nu at være 46 milliarder lysår, som nævnt ved figur 2. Radius er altså vokset med en hastighed i gennemsnit på $46/13,8 = 3,3$ gange lyshastigheden, c , som er ca. 300.000 km/s. Til at begynde med voksede radius endda med en hastighed på $52c$, som der står ved figur 2!

Vores kosmiske horisont



Figur 2. Øverst: Hele universet er fyldt med glødende gas. Overalt er der nøjagtig samme temperatur og tæthed. Gassen indeholder kun 270 atomer pr. cm^3 . Med grønt er markeret en kugleskal i gassen, hvorfra det tog lyset 13,8 milliarder år at nå frem til Jorden. Denne tegning siger noget væsentligt og også meget enkelt om universet dengang. Nederst: Den oprindelige, glødende gasskal udvider sig sammen med hele universet som vist ved de punkterede cirkler, hvor radius og tidspunkt er angivet ved R og t . Udvidelsen sker med en hastighed, der er 52 gange lysets til at begynde med. Stoffet i skallen har efterhånden dannet stjerner og galakser, som nu befinder sig i en afstand af 46.000 millioner lysår. I astronomien anvendes enhederne lysår (= 9.460 milliarder km) eller parsec (= ca. 3,26 lysår).

Her vil den opmærksomme læser undre sig over hastigheder og afstande og spørge, hvordan lyset overhovedet kan nå til Jorden, når det observerbare univers er større end den afstand, lyset kan nå at tilbagelægge i universets levetid. Beregningen af fotonens vej gennem

rummet viser, at dens hastighed i forhold til det lokale koordinatsystem altid er netop lyshastigheden c , men samtidigt vokser afstanden til Jorden på grund af ekspansionen, og den tilbagelagte vej vokser ligeledes. Når fotonen endelig når frem, er den tilbagelagte strækning større, end den ville have været i et statisk univers.

Selve navnet *observerbar* fører let til, at man tror, der menes det, der faktisk kan observeres, men det er forkert. Fx kan man ikke i en for mennesker overskuelig fremtid observere de galakser, der nu i dag ligger næsten ude, hvor horisonten ligger i dag, i en afstand fra os af 46 milliarder lysår; en afstand, der hele tiden vokser hurtigere end lyshastigheden. Derude lå stof, som har dannet stjerner og galakser, ganske som i vores omegn, men det skete mange millioner år efter BB.

På grund af lysets endelige hastighed, kigger vi tilbage i tiden, når vi kigger ud i universet. Derfor vil de fjerneste, observerbare galakser kunne ses på et meget tidligt stadium af deres udvikling i det tidlige/ynge univers. Lyset fra galakserne, som udsendes netop nu i retning mod Jorden, vil først kunne observeres om mange år efter en lang rejse gennem rummet. Observationer af fjerne galakser er for eksempel Hubble Ultra Deep Field. Et tilsyneladende tomt område af himlen er blevet observeret i dagevis med Hubble Rumteleskopet, hvilket afslørede en masse galakser på et meget tidligt stadium i deres udvikling. En af disse galakser vises i figur 4 i [1] fra 2012. Vi ser den ældste galakse, man dengang kendte, idet universet kun var 750 millioner år gammelt, da det lys blev udsendt, som vi modtager nu. Ved den alder var universet kun et barn på fem år, hvis vi sætter det nuværende gamle univers til 100 år.

Betegnelser eller navne om disse sager er ganske velvalgte, men misforståelser kan alligevel kun undgås ved stor omhu. Man kan også sige, at OU i dag er den del af universet, hvorfra optisk lys ville kunne have nået Jordens sted engang i løbet af hele tidsrummet fra BB til nu. Man ser somme tider, at astronomer kalder det observerbare univers for det *synlige univers*, men det kan jo også misforstås. Lad det være sagt allerede her: Den del af universet, der ligger uden for OU, må man IKKE kalde *det ikke-observerbare univers*, for den del er i princippet observerbar, som vi forklarer i et afsnit nedenfor. Dette fænomen ville straks blive misforstået på grund af selve navnet.

Universets udvidelse

Relativitetsteorien er den basale, fysiske lov, der giver os en matematisk beskrivelse af universets udvidelse. Albert Einstein præsenterede den *specielle relativitetsteori* (SR) i 1905, men den teori behandler kun bevægelser uden accelerationer i et rum uden tyngdekrafter. I 1915 forelagde Einstein den *generelle relativitetsteori*, der også omfatter accelerationer i et rum med tyngdekrafter. Derved blev SR et specialtilfælde af GR, så man kan sige, at der kun findes én relativitetsteori, og det er GR. *Det er først med GR at forskningsområdet kosmologi har fået et sundt teoretisk grundlag*, således som der står om relativitetsteori i Den Store Danske Encyklopædi, bind 16, side 97.

Observationer af fjerne objekter i universet viser,

at hastigheden bort fra os for fjerne objekter vokser med disses afstand. Sammenhængen mellem hastighed og afstand kan udtrykkes i en matematisk model baseret på GR, som nærmere beskrevet i [5]. Det kan siges i få ord: det matematiske rum i GR, dvs. det anvendte koordinatsystem, udvider sig, således at alle afstande vokser i samme forhold. Vi siger, at selve det fysiske rum udvider sig, eller bare: *selve rummet udvider sig*. Denne matematiske model for udvidelsens forløb beskriver altså det, man måler, men den siger intet om årsager til udvidelsen. GR er en *makroskopisk* teori, der beskriver rummets geometri og dynamik. Men den bryder sammen i det meget tidlige univers, hvor kvanteteori også spiller ind.

At rummet udvider sig, betyder ikke, at galakser eller en bygning på Jorden udvider sig. På Jorden, i galakser og galaksehobe dominerer tyngdekraften og holder sammen på det hele. I det lokale univers har objekterne relative hastigheder, der er beskedne i forhold til lyshastigheden, og i middel er hastigheden tæt på nul i forhold til det store univers – for eksempel målt i forhold til mikrobølgebaggrunden. Det må fremhæves, at tilsyneladende over-lyshastighed og andre forhold ved universets udvidelse kun kan beskrives korrekt ved hjælp af den matematiske form, som GR har i forbindelse med BB-modellen.

Alt dette lyder måske besynderligt i nogles ører, men det er korrekt i det store, sammenhængende billede af universet, som kosmologer er nået frem til gennem anvendelse af fysiske teorier og observationer. Dog er der selvfølgelig meget, teoretikerne stadig ikke forstår, eller er uenige om.

Det er en udbredt opfattelse, at intet kan bevæge sig hurtigere end lyset, så udbredt, at man kan tale om en almen viden blandt lægfolk. Denne populære opfattelse stemmer med SR, men ikke med GR anvendt på universets udvidelse. Alligevel går enkelte også i dag så vidt som til at forkaste al moderne kosmologi, på grund af over-lyshastighederne ved universets ekspansion. Det er en ekstra grund til at behandle dette emne grundigt her. I Appendiks anbefales note A4 og især reference [7].

GR siger ligesom SR, at et objekt ikke kan have en hastighed større end lysets i forhold til et andet objekt, der ligger i nærheden. Men det gælder ikke, hvis objekterne ligger så langt fra hinanden, at rummets udvidelse spiller en rolle. Det må betones, at det IKKE er stoffet, der farer gennem rummet følgende inertiens lov, som mange tror, og mange får bildt ind. For der er jo ikke tale om en eksplosion i rummet.

Universets størrelse

Den observerede fordeling af stoffet inde i det observerbare univers, OU, er ret homogen, ens overalt, når man ser på de store træk, hvad der gøres rede for i note A4 i [2]. Derfor er det nærliggende at mene, at dette må fortsætte udenfor. Det ville dog være mærkeligt, hvis Jorden netop var centrum i en kugleformet massefordeling med ingenting eller noget helt andet udenfor. Siden Kopernikus for 500 år siden flyttede Jorden bort fra centrum af verden, har en sådan tanke været umulig.

Desuden påvirker masserne uden for OU de masser, der er indenfor, gennem deres tyngdekraft, men hvis fordelingen fortsætter kuglesymmetrisk uden for OU, vil denne kraft netop ophæves, hvilket er en elementær følge af Newtons gravitationslov, der let kan bevises. Det betyder samtidig, at vi i princippet vil kunne se en virkning på fordeling og bevægelser af stjerner og galakser indenfor, såfremt massen udenfor IKKE er fordelt kuglesymmetrisk, altså hvis det kosmologiske princip, CP (se note A4 i [2]) ikke er opfyldt for hele universet. En sådan detektering kan kaldes global, og den tillader ikke detektering af enkelte objekter uden for OU, kun af globale afvigelser fra kuglesymmetri. Det vil dog være vildledende at kalde universet uden for “det observerbare univers” for “det ikke-observerbare univers”. Nogle vil nemt kunne tro, at der ligger en betydning i selve navnet, hvad der advares imod ovenfor.

Den slagside (bias) i mikrobølgestrålingen, der er fundet i Planckdata (se nedenfor), kan måske skyldes en asymmetrisk fordeling af masserne uden for det observerbare univers?

Hvad er der udenfor?

Det følgende er nærmere beskrevet og dokumenteret i noterne A4 og A5 i [2] med citater fra korrespondence med forskere, og hvor også skepsis kommer til udtryk.

En analyse fra 2018 (se dog diskussion i note A4) af observationer viser, at hele universet har en radius, der er mindst 5 gange større end det observerbare univers, altså mindst $5 \times 46 = 230$ Giga-lysår med 99% sandsynlighed. Imidlertid er det kun en nedre grænse, at udstrækningen af hele universet kun er 5 gange større end OU, som man her har fået fra analyse af observationer. Det kan stadig være meget, meget større. Hvad jeg også synes, er nødvendigt, hvis der overhovedet skal være plads til multiverset. Med *multivers* tænker vi her fx på den teoretiske mulighed, at der uden for vores OU findes andre områder, andre universer, hvor udviklingen har været lidt eller meget anderledes end i vores OU.

I samme analyse fra 2018 beregnes en sandsynlighed mellem 67% og 98%, for at universet er rumligt uendeligt: Forfatterne antager, at universet er præcist fladt, det betyder, at det er uendeligt, og så kan de give et statistisk mål for sandsynligheden for, at universet ikke er fladt, og dermed et statistisk mål for at universet ikke er uendeligt. Men det er alt sammen indenfor de samme begrænsninger: fx antager de en given kosmologisk model med stof, kosmologisk konstant, osv.

Andre analyser viser, at det observerbare univers ikke er helt homogent på meget stor skala. Data fra Planckmissionen viser bias (på dansk: slagside) for en halvkugle af himlen i forhold til den anden, såkaldt halvsfære-bias, på to måder: det ene bias drejer sig om den gennemsnitlige temperatur (dvs. temperaturvariationer), det andet drejer sig om, at der er større variationer i perturbationerne (dvs. tæthederne). Derfor konkluderer ESA (som står for Planckmissionen), at disse anisotropier (uensartetheder) er statistisk signifikante og ikke længere kan ignoreres.

Et antal observationer er meddelt som værende i modstrid med forudsigelserne om en maksimal størrelse

for strukturer i universet. Her er eksempler: 1. Den såkaldte Sloan Great Wall (SGW), opdaget i 2003, har en længde på 1380 millioner lysår, og det er kun lige netop foreneligt med det kosmologiske princip. 2. I november 2013 blev en ny struktur opdaget, som er 10 milliarder lysår borte, og som måler 6,6 til 10 milliarder lysår (mere end syv gange større end SGW), kaldet Hercules-Corona Borealis Great Wall, og det rejser yderligere tvivl om gyldigheden af CP.

Der er altså håndfaste tegn i observationer, både af mikrobølger og i optisk lys, på, at universet fortsætter uden for det observerbare, men også på at fortsættelsen ikke er helt som det, vi kender. Det må derfor ikke undre, hvis der er meget store forskelle på endnu større skala. Så der er rigelig plads til multiverset og til tanker om dette som fra Martin Rees i [3], en fremragende bog, der førte mig til at begynde på denne artikel om det, der er udenfor. Men en advarsel om multiver-ser: der findes mange forskellige forslag, se [4].

Litteratur

- [1] E. Høg, P. Laursen og J. Samsing (2012) Universets begyndelse, Kvant, bind 23, nr. 1, side 7–12.
- [2] E. Høg (2021) Det observerbare univers - og det udenfor. Hele artiklen med Appendiks A1–A9 findes på www.astro.ku.dk/~erik/xx/Udenfor.pdf.
- [3] M. Rees (1999) Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape The Universe. En paperback udgave er trykt i 2015, men der findes ingen egentlig ny udgave.
- [4] L. Mersini-Houghton (2013), Birth of the Universe from the Multiverse, [de.arxiv.org/pdf/0809.3623](https://arxiv.org/pdf/0809.3623).
- [5] J. Samsing og E. Høg (2012), Noter til kosmologi, www.astro.ku.dk/~erik/xx/KosmoNote3.pdf.

Appendiks

Her følger to noter, A1 og A2, af de ni, som udgør hele appendikser, der findes i [2]. De ni noter, A1–A9, uddyber selve artiklen, men skønnes ikke nødvendige til en første læsning, hvor det først og fremmest drejer sig om rigtigt at forstå, hvad der menes med det observerbare univers, OU. Noterne er:

A1: Afstande i universet. A2: Andre kosmiske horisonter. A3: GR og inflation. A4: Det kosmologiske princip (CP). A5: Fra Wikipedias artikel om CP. A6: Over-lyshastigheder. A7: Relativitetsteori og komplekse tal. A8: Referencer. A9: Opdatering.

A1: Afstande i universet

Det er ikke så enkelt at tale om afstande i universet, hvad der gøres nærmere rede for i [5]. I denne artikel anvendes dog kun det, man i kosmologien kalder for proper distance på engelsk, og på dansk: metrisk afstand eller egenafstand. Afstande kan angives i km, men i astronomien anvendes enhederne lysår (= 9.460 milliarder km) eller parsec (= ca. 3,26 lysår). I kosmologien skal et lysår kun forstås som en afstand på så mange km. Man kan imidlertid ikke omsætte X lysår til, at lyset har været X år undervejs, hvis afstanden er

så stor, at universets udvidelse spiller en væsentlig rolle. Men ikke alle astronomer synes at vide dette, for et sted på nettet skriver en astronom: “Fordi Big Bang skete for 13,8 milliarder år siden, har lyset altså kunnet rejse 13,8 milliarder lysår. Det er grænsen for, hvad vi kalder “Det synlige univers”, forklarer han.” Det samme høres tit i populære foredrag.

Nogle astronomer foretrækker i kosmologisk sammenhæng slet ikke at tale om en afstand, men kun om hvor længe lyset har været undervejs. Det ville være upraktisk her, hvor vi skal kunne sige, hvor langt kugleskallen var væk, da lyset blev afsendt, og hvor langt den er væk nu i dag.

A2: Andre kosmiske horisonter

Man betragter i kosmologien også andre *kosmiske horisonter* end den horisont, som vi har særlig fokus på i denne artikel. Jeg har her defineret den kosmiske horisont som *overfladen for sidste spredning* af elektromagnetisk stråling. På det tidspunkt var universet allerede 380.000 år gammelt. Men faktisk foreligger der også information fra epoker, da universet var yngre. Meget vigtig er den tidlige kernesyntese (en fusion), hvor brint- og heliumkerner dannes ved velforståede processer kun få minutter efter BB.

Vi har information om dannelsen af variationer (perturbationer) i tætheden af det, der var der under *inflationsperioden*, men andre signaler er ifølge teorien også mulige såsom af neutrinoer og gravitationsbølger. Mere fundamental er derfor *partikelhorisonten*. Ifølge GR kombineret med kvantefysik, er dette den yderste grænse for signaler, og den ligger ved et tidspunkt nær Plancktiden på omkring 10^{-43} s efter BB. Ifølge GR alene er det kun selve singulariteten, der er forbudt. Med kvantefysik vides, at fysikken før Plancktiden, og dermed muligheden for signaler, er ukendt. Plancktiden er det korteste tidsrum, det vil være muligt at måle ifølge Heisenbergs usikkerhedsrelation, men det korteste tidsrum, der hidtil faktisk er målt, er 10^{-21} s.

Det er egentlig opløftende, at det har været meget nemmere at inkludere mørkt stof og mørk energi i BB, end nogle troede, idet man ikke behøver noget principielt nyt fra Einstein 1915/16. Mørkt stof indgår helt som almindeligt kendt stof, og mørk energi er i BB-modellen Einsteins lambda-led.

De resterende noter A3 til A9 findes i [2].



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

NORTH – det varmeste sted i Skandinavien

Alexander S. Thrysoe, Asger S. Jacobsen, Thomas Jensen, Martin Jessen, Søren B. Korsholm, Jesper Rasmussen, Mirko Salewski, Mads G. Senstius, Volker Naulin, Raheesty D. Nem, Jens Juul Rasmussen, Mikhail Gryaznevich og Stefan K. Nielsen, Sektionen for Plasmafysik og Fusionsenergi, DTU Fysik

I et donutformet vakuumkammer, som befinder sig på Institut for Fysik ved Danmarks Tekniske Universitet, fastholdes et plasma med en temperatur på over 100.000°C. Stærke magnetfelter holder det flygtige plasma i skak, imens to magnetroner opvarmer plasmaets elektroner, så den høje temperatur opretholdes. Faciliteten kaldes NORTH og med denne kan forskere og studerende undersøge plasmadynamikken i det indesluttede plasma og dermed bidrage til udviklingen af fusionsenergi som en fremtidig energikilde her på Jorden.¹

Fusion er den fysiske proces, som frigiver energi fra sammensmeltning af lette grundstoffer i Solen og de andre stjerner. Hvis vi kan skabe betingelserne for fusion i en reaktor her på Jorden, er potentialet for fusionsenergi enormt, da det vil udgøre en energikilde, som er ren, bæredygtig og sikker. Solen fusionerer primært brint, som gennem flere trin omdannes til helium. Processen er dog meget langsom, alt for langsom til at det kan betale sig at efterligne denne reaktion i en reaktor. I stedet fusioneres de tungere isotoper af brint, deuterium (^2H) og tritium (^3H), i reaktionen

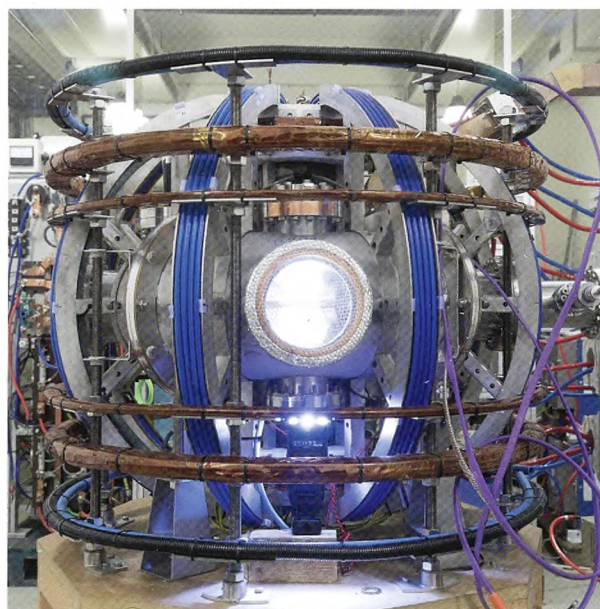


Processen frigiver en energi på 17,6 MeV, som primært bæres af den frie neutron. I et fremtidigt fusionskraftværk vil de producerede neutroner bremses og derved afgive deres energi som varme i en kølevæske, som kan bruges til at drive en turbine og generere strøm, nøjagtig som i alle andre termiske kraftværkstyper.

Reaktionen i ligning (1) er i sin enkelthed simpel, men der er store tekniske udfordringer forbundet med at skabe de forhold, hvor denne forløber ofte nok, til at det kan skabe et overskud af energi. Den måske mest centrale udfordring ligger i indeslutningen af fusionsmaterialet. For at optimere reaktionstværsnittet skal brintisotoperne opvarmes til en temperatur i omegnen af 150 mio. grader. Det er 10 gange højere end temperaturen i Solens kerne. Ved denne temperatur vil brintisotopgassen være overgået til plasmaform. I et plasma er den atomare struktur nedbrudt, og de positive kerner og negative elektroner er ikke længere bundet i atomer, men bevæger sig som i en gas af ladede partikler. Den høje temperatur er altså nødvendig for at få nok fusionsreaktioner, men skaber også store udfordringer, da fusionsplasmaet så vidt muligt skal afholdes fra at røre ved væggene i det kammer, som det indesluttet i, for ikke at miste sin energi [1].

Det er imidlertid muligt at fastholde det varme plasma, uden at det kommer i kontakt med andre materialer. Netop fordi et plasma består af ladede partikler, påvirkes det af elektromagnetiske felter. Et stærkt magnetfelt vil tvinge partiklerne i spiralbevægelser rundt om magnetfeltlinjerne, og lukkes disse som i en donutform,

er plasmaet (i højere grad) indesluttet. Et design, hvor plasmaet indesluttet ved at sætte magnetfeltspoler omkring et toroidalt vakuumkammer, kaldes en tokamak. På figur 1 ses DTU Fysiks nye tokamak NORTH [2].



Figur 1. NORTH-tokamakken på DTU Fysik. Igennem åbningen ses lyset fra et plasma, der indesluttet magnetisk af de blå feltspoler, som ses viklet omkring det donutformede vakuumkammer.

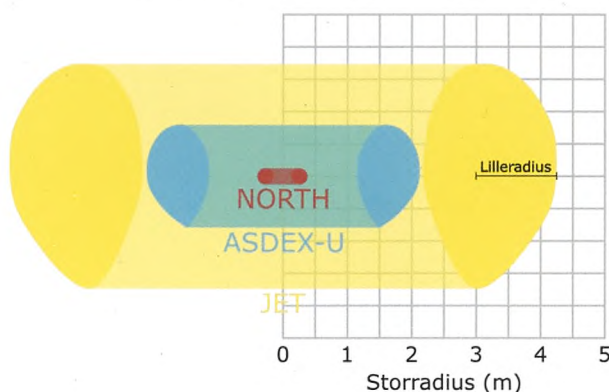
På store tokamakker, som fx Joint European Torus (JET) [3] i Storbritannien og ASDEX Upgrade [4] i Tyskland, arbejder forskere blandt andet på at opnå tilstrækkeligt høje temperaturer og indeslutningstider for plasmaudladninger. JET er den nuværende største tokamak, med en storradius på knap 3 m og en lille-radius på 1,25 m, se figur 2. Meget andet fusions- og plasmaforskning kan imidlertid også foretages på mindre tokamakker som NORTH, der med fordel også kan bruges til undervisning og uddannelse af studerende og unge forskere frem for de større maskiner, som er mindre tilgængelige.

I det følgende beskrives tokamakken NORTH mere detaljeret og nogle af maskinens første resultater præsenteres.

¹Forfatterne vil gerne takke Tokamak Energy for at have leveret kritisk udstyr til NORTH. Derudover takkes Novo Nordisk Fonden (grant NNF200C0062340) og Villum Fonden (grant 15483) for deres økonomiske bidrag.

De første resultater fra NORTH

NORTH i sin nuværende form er forholdsvis ny. De primære dele kommer fra det private fusionsforskningsfirma Tokamak Energy [5] og er permanent udlånt til DTU Fysik, hvor NORTH blev indviet i august 2019. NORTH har en storradius på 25 cm og en lilleradius på 12,5 cm. Forholdet mellem de to tal betegnes A og kaldes for tokamakens *aspect ratio*. Med en værdi på $A = 2$ tilhører NORTH således gruppen af såkaldte sfæriske tokamakter, modsat ASDEX Upgrade og JET, som har værdier på hhv. $A = 2,4$ og $A = 3,3$. Magnetfeltet i centrum af plasmaet, B_0 , i NORTH kan nå værdier op til 0,4 T, og plasmaet opvarmes af i alt 7 kW mikrobølgeopvarmning. Opvarmningen giver en central temperatur i plasmaet på mellem 10 og 20 eV, eller hvad der svarer til mellem 100.000 og 250.000°C og en partikeltæthed på omkring $0,1 - 1,0 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. Med de forestående opgraderinger af NORTH forventes der endnu højere temperaturer på 50 – 100 eV.



Figur 2. Geometrien for et tværsnit af det donutformede plasma i tokamakkerne NORTH, ASDEX Upgrade og JET.

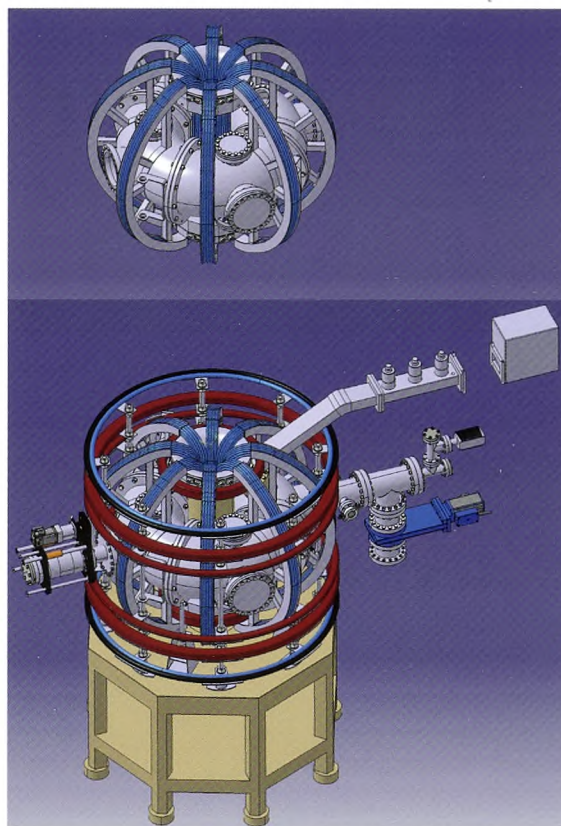
Eftersom forskningen på NORTH, og næsten alle andre nuværende tokamakter, drejer sig mere om plasmafysik end fusionsfysik, er det sjældent, at de tunge brintisotoper fra ligning (1), specielt ^3H , anvendes. På NORTH dannes der plasma af enten argon, helium eller en af de to lettere brintisotoper. Fælles for alle tokamakter er, at plasmaudladningerne ikke kan opretholdes i uvilkaarlig lang tid. For NORTH varer et plasma op til 20 sekunder. En tegning af NORTH og dens komponenter ses i figur 3.

Den plasmafysikforskning, som primært vil beskæftige forskere og studerende på NORTH, omhandler især studier af mikrobølgeopvarmede plasmaer, ikke-lineære vekselvirkninger mellem plasma og bølger og plasmaturbulens på kanten af de indesluttede plasma. Vi præsenterer her nye resultater fra to typer målinger på NORTH. Udstyret til at foretage målingerne, hhv. Langmuirprobe [6] og Rogowskispole [7], er udviklet på DTU Fysik.

Målinger med Langmuirprobe

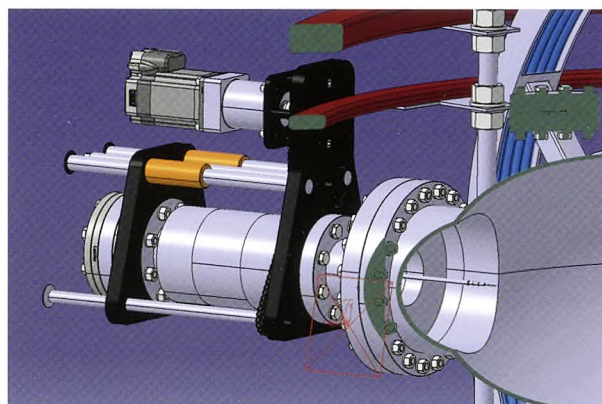
Hvordan ville du måle temperaturen på et fusionsplasma, som er hundredvis af millioner grader varm, eller bare 100.000°C som i NORTH? Grundstoffet med det højeste kendte smeltepunkt er wolfram, som smelter ved 3.414°C, og selvom det er muligt at lave materialer,

som overgår dette, kommer de ikke i nærheden af at kunne modstå fusionsplasmaernes høje temperaturer.



Figur 3. Tegning af NORTH. Øverst ses vakuumkammeret med dets observationsporte og de toroidale magnetfeltspoler (blå) omkring kammeret. Nederste billede viser yderligere de ydre poloidale magnetfeltspoler (røde). Langmuirproben ses til venstre i billedet og forbindelsen til vakuumpumpen til højre.

På de store tokamakter kan den centrale temperatur kun måles med avancerede laser-systemer. På kanten af de store maskiners og NORTHs indesluttede plasma, er det muligt at bruge en såkaldt Langmuirprobe til at måle blandt andet temperaturen. En tegning af NORTHs Langmuirprobe ses i figur 4.



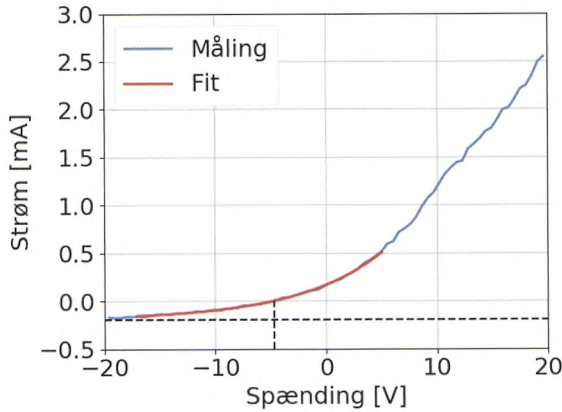
Figur 4. Tegning af Langmuirproben på NORTH. Proben kan bruges til at bestemme plasmaets tæthed og elektron-temperatur og sidder på en bevægelig arm, så dens radiale position i plasmaet kan ændres.

Selve proben består af en keramisk beklædt metaltråd med en diameter på 5 mm med en 3 mm lang probespids, hvis diameter er 1 mm. Den keramiske

beklædning af proben sikrer, at denne vekselvirker mindst muligt med plasmaet. Probens radiale placering kan styres, så den måler på forskellige positioner i plasmaet, helt ude fra den yderste kant og ind til 5 cm fra den inderste væg i vakuumkammeret. Det er vigtigt at kunne måle forskellige steder i plasmaet, da der er store tætheds- og temperaturgradienter, og plasmadynamikken ændrer sig på tværs af plasmaet.

Det smalle område mellem et plasma og en materialoverflade, fx vakuumkammerets væg eller Langmuirprobens spids, kaldes for et *sheath*. I sheath-området ændrer det elektriske potential sig fra det omkringliggende afhængig af probens og plasmaets relative spændingsforskel, da plasmaets partikler forsøger at "skærme" probens potential. Der vil løbe en strøm i proben, som afhænger af dens påtrykte spænding og ud fra strøm-spændings -(I-V)-kurven kan plasmaets tæthed og temperatur omkring probespidsen bestemmes.

I figur 5 ses en I-V-kurve for NORTHs Langmuirprobe. Ved en høj negativ spænding over proben i forhold til plasmapotentialt løber per definition en negativ strøm, som vender fortegn og stiger i takt med, at probens positive spændingsforskel øges. Strømmen er negativ ved en høj negativ probespænding, fordi proben her tiltrækker de positivt ladede ioner i plasmaet, som ved en tilstrækkelig høj negativ spænding vil strømme med den såkaldte ionmætningsstrøm. Omvendt tiltrækker proben plasmaets elektroner ved en positiv spændingsforskel.



Figur 5. Strøm-spændings-(I-V)-kurve (blå) for Langmuirproben på NORTH. Fra den fittede kurve (rød) kan værdierne for elektrontemperatur $T_e = 7,1 \pm 0,8$ eV og -tæthed $n_e = 6,7 \pm 0,8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ ved probens spids bestemmes. De stiplede linjer angiver ionmætningsstrømmen ($-0,14 \pm 0,01$ mA) og det flydende elektriske potential ($-5,09 \pm 0,33$ V).

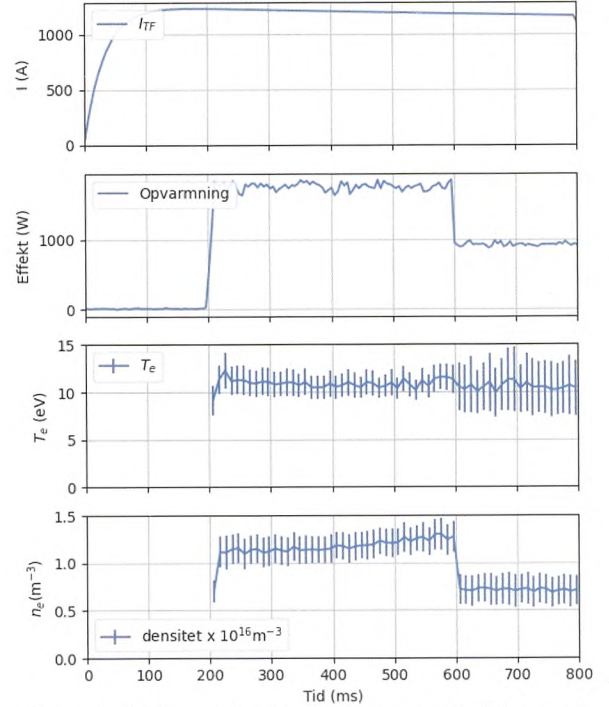
På grund af ionernes og elektronernes store masseforskel er deres dynamik på forskellige tidsskalaer, hvilket bl.a. viser sig i en I-V-kurve ved, at elektronernes mætningsstrøm er langt større end ionernes. Masseforskellen gør også, at selv om spændingsforskellen er 0, vil der løbe en positiv (elektron) strøm, da elektronerne statistisk set rammer proben oftere. Ved det såkaldt flydende elektriske potential løber der ingen strøm i proben. Sammenhængen mellem det flydende potential (V_f), plasmapotentialt (V_p) og elektrontemperaturen (T_e) er

$$V_f = V_p + \frac{kT_e}{e} \ln \sqrt{\frac{1}{4\pi} \frac{m_i}{m_e}}, \quad (2)$$

hvor k er Boltzmanns konstant, e er elementarladningen og m_i , m_e er henholdsvis ionernes og elektronernes masse. Ud fra det flydende potential og ionmætningsstrømmen kan elektronernes temperatur og tæthed bestemmes. Elektrontemperaturen kan, sammen med ionmætningsstrømmen (I_{sat}), bruges til at bestemme ion- og elektrontætheden ($n_i = n_e$) ved proben, idet ionmætningsstrømmen afhænger af elektrontemperaturen og -tætheden ved

$$I_{\text{sat}} = 0,6en_i \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} A, \quad (3)$$

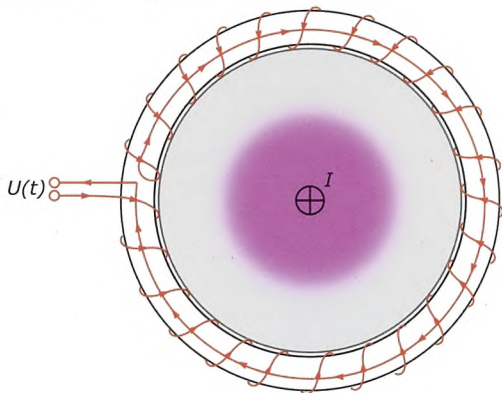
hvor A er probespidsens areal.



Figur 6. Målinger på et heliumplasma i NORTH over en periode på 800 millisekunder. Graferne viser (fra toppen): (1) Strømmen i de toroidale magnetfeltspoler, (2) mikrobølgeeffekten sendt ind i plasmaet fra (3) elektrontemperaturen og (4) elektrontætheden. Elektrontemperaturen og -tætheden er målt med Langmuirproben 1,5 cm fra kammerets ydervæg.

Målinger på et heliumplasma i NORTH, hvor elektrontætheden og -temperaturen er målt med Langmuirproben, er vist i figur 6. Her ses, hvordan strømmen i de toroidale magnetfeltspoler øges til 1,2 kA, hvilket svarer til et magnetfelt på 92 mT i midten af plasmaet, i løbet af de første 100 ms. Ved $t = 200$ ms tændes to mikrobølgekilder, begge på 900 W, og heliumgassen i tokamakken ioniseres til et plasma. Elektrontemperaturen og -tætheden er målt i den ydre kant af plasmaet, 1,5 cm fra kammerets væg, ved at variere spændingsforskellen over proben lineært fra -20 V til +20 V og tilbage 100 gange i sekundet. Dette giver en tidsopløsning på probesignalet på 10 ms. Elektrontemperaturen forbliver nogenlunde konstant på 11 eV over hele forsøget, mens tætheden starter på lidt over $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ og senere falder en smule, da den ene mikrobølgekilde slukkes, og der derfor genereres mindre plasma. Ved det målte tryk ville et fuldt ioniseret heliumplasma have en tæthed i omegnen af $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, hvorfor det må antages, at det målte plasma kun er svagt ioniseret.

Langmuirproben er et eksempel på en såkaldt aktiv diagnostik, hvor der måles på plasmaet ved at sende noget, fx en probe eller laserlys, ind i dette. Den anden kategori af diagnostikker kaldes passive diagnostikker, hvor der måles på signaler, som plasmaet selv udsender uden nogen anden ydre påvirkning. Rogowskispolen er et eksempel på en passiv diagnostik.



Figur 7. Princippet bag en Rogowskispole (rød). Spolen er viklet omkring tokamakens vakuumkammer, så den omslutter plasmastrømmen.

Målinger med Rogowskispole

Vikles en spole omkring vakuumkammeret, som vist i figur 7, vil ændringer i strømmen i plasmaet, som er et udtryk for partikeldynamikken heri, inducere en spænding i spolen. Spolens spænding som funktion af tid ($U(t)$) er givet ved

$$U(t) = -\frac{AN\mu_0}{L} \frac{dI(t)}{dt}, \quad (4)$$

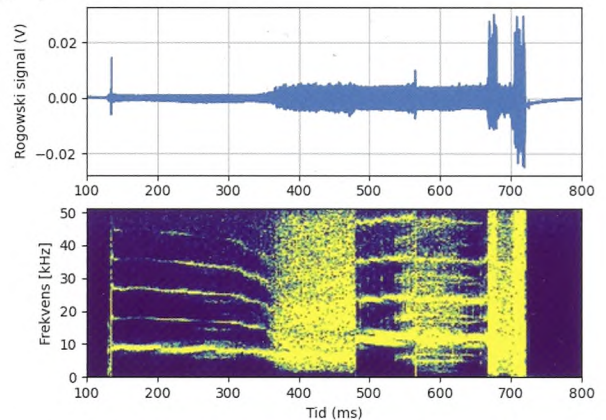
hvor A er det omviklede areal af en af spolens løkker, N er antallet af vindinger, μ_0 er vakuumpermeabiliteten, L er spolens omkreds og $\frac{dI(t)}{dt}$ raten hvormed strømmen i plasmaet ændres. Ligning (4) giver således sammenhængen mellem den målte spænding i spolen og ændringen i plasmastrømmen. Denne type spoler kaldes for Rogowskispoler.

I figur 8 ses målingerne fra Rogowskispolen på et andet NORTH-plasma end det, som betragtes i figur 6. Efter $t = 0,1$ s genereres plasmaet og et klart 10 kHz signal fremkommer. Signalets frekvens falder frem mod $t = 0,35$ s, hvor det erstattes af en mere bredbåndet struktur. Ved $t = 0,5$ s fremkommer nye strukturer, frem til plasmaudladningen stoppes ved $t = 0,7$ s. Signalet i perioden $t = 0,5 - 0,7$ s er meget dynamisk og har adskillige frekvensskift, som i fremtiden vil blive undersøgt i nærmere detaljer, når der installeres flere Rogowskispoler, samt en såkaldt Mirnovspole. Mirnovspolen er en anden passiv diagnostik, som kan måle fluktuationer i det magnetiske felt, der også forårsages af dynamik i plasmaet.

Opsummering

Skandinaviens eneste tokamak, NORTH, er placeret på DTU Fysik, og godt et år efter indvielsen måles der interessante signaler på det indesluttede plasma. NORTH hører til familien af mindre tokamakker, men arbejdet på denne maskine vil supplere forskningen på

de større maskiner som ASDEX Upgrade eller stellatoren Wendelstein 7-X [8], og endda fusionsforskningens flagskib, tokamakken ITER [9]. Specielt ikke-lineær bølgefysik, samt plasmaturbulens og hurtig-ionfysik, er oplagte emner at forske i på NORTH, hvor der allerede nu er vist tilstedeværelsen af dynamik i plasmaet. Andre forskningsemner, som er i kikkerten for NORTH, er udviklingen af nye plasmadiagnostikker og opvarmningsmetoder.



Figur 8. Øverst: Rogowskispolens spænding som funktion af tid under en plasmaudladning i NORTH. Nederst: Spektrogram af spolens signal, hvor der ses stærke signaler ved specifikke frekvenser i perioderne 0,1–0,35 s og 0,5–0,7 s.

Derudover vil det være muligt at bruge NORTH til at uddanne unge fysikere og ingeniører på et internationalt niveau. Således er de forberedt til fremtidig deltagelse i forskning på ITER og andre tokamakker og kan bidrage til realiseringen af fusionsenergi som fremtidig energikilde.

Er du gymnasieelev eller -lærer, så tilbyder DTU Fysik en række aktiviteter, hvor I kan få inspiration til at bruge fusionsenergi som emne i projekter eller undervisningen, og muligheden for at komme på DTU, hvor I kan se NORTH med jeres egne øjne og måske endda lave eksperimenter på tokamakken. Aktiviteterne tilbydes under projektet *Fusionsenergi til Alle*, som er finansieret af en bevilling fra Novo Nordisk Fonden. Læs mere om aktiviteterne for gymnasieelever og -lærere på fusionsenergi.dk.

Litteratur

- [1] A.S. Thrysoe (2017) Kan vi bygge en sol på Jorden?, *Kvant*, bind 28, nr. 2, side 3–6.
- [2] <https://www.fysik.dtu.dk/english/research/ppfe>
- [3] <https://ccfe.ukaea.uk/research/joint-european-torus/>
- [4] <https://www.ipp.mpg.de/16195/asdex>
- [5] <https://www.tokamakenergy.co.uk/>
- [6] R.L. Merlino (2009) Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics, *American Journal of Physics*, bind 75, side 1078.
- [7] M.H. Samimi m.fl. (2014) The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review, *IEEE Sensors Journal*, bind 15, side 651.
- [8] <https://www.ipp.mpg.de/w7x>
- [9] <https://www.iter.org/>

Kobberlagkager og andre superledere

Astrid Tranum Rømer, Niels Bohr Institutet

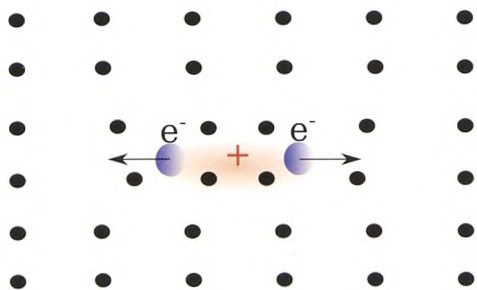
Superledning kan tage mange former. Fælles for alle superledere er evnen til at føre strøm uden modstand. Her dykker vi ned i den teoretiske forståelse af, *hvorfor* superledning opstår og hvilke mikroskopiske vekselvirkninger, der er på spil. Både i de materialer, vi forstår, og de, vi er på vej til at forstå.

Strøm uden modstand

Det er en kendt sag, at elektrisk udstyr bliver varmt som følge af den modstand, der forekommer, når elektronerne bevæger sig gennem materialet. I vores huse føres strømmen rundt gennem kobberledninger, og jo renere materialet er, jo mindre er modstanden. Men er ledningen meget lang, vil der være et ikke-ligegyldigt energitab, når man sender strøm igennem den.

Der findes imidlertid materialer, hvor modstanden forsvinder fuldstændig. Det vil sige, at man i princippet kan transportere strøm helt uden et energitab undervejs. Det lyder jo forjættende. Og det er også både fantastisk og mystisk, at sådanne superledende materialer eksisterer. Dette er nu efterhånden old news: Vi har kendt til superledning lige siden, at den hollandske fysiker Kamerlingh-Onnes i 1911 opdagede, at kviksølv mister al modstand, når det nedsænkes i flydende helium og derved nedkøles til 4,2 K.

Siden er der kommet oceaner af nye superledende materialer til og heldigvis også nogle, som bliver superledende ved højere temperaturer. Faktisk blev der sidste år fundet superledning ved 287 K, dvs. ca. 15 grader celsius [1], men dette under voldsomt højt tryk. Vi mangler stadig at finde de vises sten, som kan føre os til superledning ved stuetemperatur og atmosfærisk tryk.

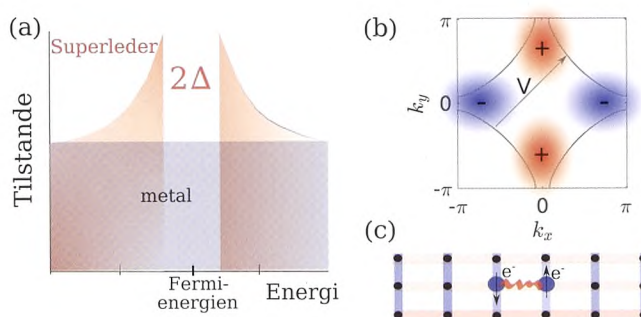


Figur 1. To elektroner, der bevæger sig i et krystalgitter af positive ioner, tiltrækker hinanden gennem en deformation af gitteret. Tegningen viser en forsimplet fremstilling af Cooperpar dannet ved hjælp af gittervibrationer i krystallen.

Elektronernes pardans

Det tog sin tid og mange fejlslagne forklaringsforsøg, før et fysiker-trekløver i 1957 lykkedes med en mikroskopisk teori for superledning. Teorien beskriver, hvordan elektronerne vekselvirker med hinanden og de omgivende atomer og derved kan overgå til en tilstand uden modstand. Det var et overraskende resultat opdaget af den unge fysiker Leon N. Cooper, der satte

gang i sagerne. Han fandt, at hvis to elektroner i et metal mærker en tiltrækning mellem sig, vil de forme et par. Også selvom denne tiltrækning er nok så lille. Dette lyder måske besynderligt, eftersom vi ved, at elektroner vil frastøde hinanden på grund af deres negative ladning. Men eftersom elektronerne ikke er alene i verden, men bor inde i et materiale, hvor der er kun én elektron per kvantetilstand, kan sådanne par opstå.



Figur 2. (a): Illustration af tilstandstætheden omkring Fermienergien for et metal (grå) og for en superleder (rød). I den metalliske tilstand er tilstandstætheden næsten konstant omkring Fermienergien, men i superledende tilstand åbnes et gab i det elektroniske spektrum, som resultat af dannelsen af Cooperpar. (b): Fermioverfladen for elektroner i et periodisk gitter, dvs. elektrontilstande for hvilke $\xi_{\mathbf{k}} = 0$, vist med sorte linjer. Størrelsen k er den såkaldte krystalimpuls. I ukonventionelle superledere skifter det superledende energigab $\Delta_{\mathbf{k}}$ fortegn som funktion af $\mathbf{k}$. Dette er vist i farver for et eksempel, hvor gabet har såkaldt d -bølgeform. Rød angiver positive værdier, og blå angiver negative værdier for $\Delta_{\mathbf{k}}$. Den sorte pil viser vekselvirkningen $V_{\mathbf{k},\mathbf{k}'}$. (c): Krystalgitter med Cooperpar for d -bølge-superledere. Elektroner med modsat spin på nabopladser i krystallen danner et Cooperpar ved hjælp af spinbølger vist som en rød bølge.

Elektronparrene er ikke overraskende blevet kaldt for Cooperpar og udgør de fundamentale byggesten i en superleder. Opdagelsen blev startskuddet til, at Cooper sammen med to andre fysikere, John Bardeen og John Robert Schrieffer, formulerede en teori (BCS-teorien), der kan forklare superledning både i kviksølv og andre konventionelle superledere, og som med rette er blevet kaldet en af kvantemekanikkens absolutte succeser. Tiltrækningen mellem de to elektroner kommer fra gittervibrationer udført af de positive ioner, som udgør gitteret i metallet. Dette gitter kalder vi for krystalstrukturen, og det er vist med sorte prikker i figur 1, der viser en forsimplet fremstilling af elektron-elektron-vekselvirkningen.

Den helt centrale ligning i BCS-teorien kan skrives

således:

$$\Delta = - \sum_{\mathbf{k}} V \frac{\Delta}{\sqrt{\xi_{\mathbf{k}}^2 + \Delta^2}} \quad (1)$$

Her er Δ et mål for den energi, der binder to elektroner sammen.

Når Δ antager en endelig værdi, signalerer dette, at superledning er stabiliseret i systemet. Dette kan måles ved tilstandstætheden ved Fermienergien, som vist på figur 2(a). I ligning (1) ovenfor løber summen over alle elektroniske tilstande, som indiceres ved krystalimpulsen $\mathbf{k}$, og $\xi_{\mathbf{k}}$ er energien af en elektron, når den ikke mærker de andre, men bevæger sig frit rundt i krystallen. Vi kan se, at fortegnet på V er afgørende for, om vi kan løse ligningen. Kun hvis V er negativ, findes der en løsning $\Delta \neq 0$. Dette sker netop, når gittervibrationer giver en effektiv tiltrækning mellem to elektroner. Det er vigtigt for denne mekanisme, at ionerne bevæger sig langsomt i forhold til elektronerne. Man siger, at vekselvirkningen er retarderet.

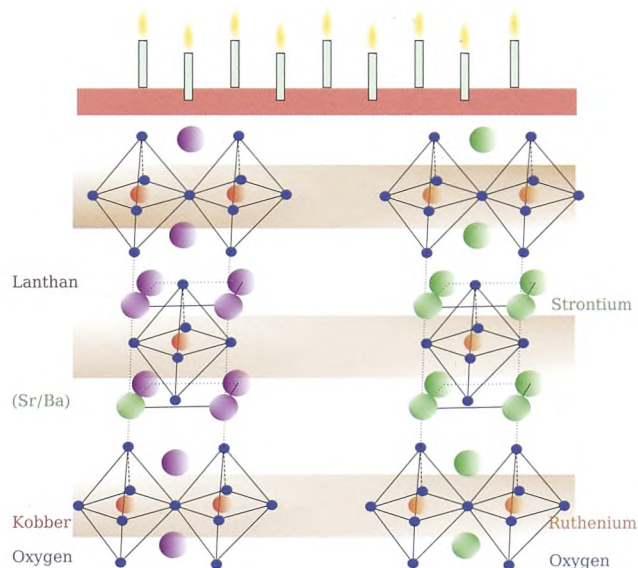
BCS-teorien er blevet efterprøvet ved at indsætte lidt tungere ioner i gitteret. På denne måde bliver gittervibrationerne langsommere, og dette har direkte indflydelse på, hvor godt de to elektroner hænger sammen. Vi kan måle dette ved den kritiske temperatur, T_c , som markerer overgangen fra den normale metaliske tilstand af materialet til den superledende tilstand. Denne temperatur går ned, hvis ionerne er tungere, som forudsagt af Bardeen, Cooper og Schrieffer.

Kobberlagkager

I kølvandet på BCS-teorien forsøgte man sig med endnu mere præcise beregninger, som tog udgangspunkt i de konkrete krystalstrukturer og disses gittervibrationer: Kunne man forudsige den kritiske temperatur for forskellige stofsammensætninger og måske tilmed komme med forslag til de mest optimale strukturer, der ville give højest mulig T_c ? Det var det store spørgsmål.

Desuden forestillede man sig, at man gjorde bedst i at undgå materialer med tendens til at blive magnetiske. Dette skyldtes en anden karakteristisk egenskab ved superledning: at magnetiske felter afbøjes fuldstændig omkring en superleder, og at man kan ødelægge en superleder ved at placere den i et stort magnetisk felt. Derfor var overraskelsen stor, da to eksperimentalfysikere, Johann Georg Bednorz og Karl Alex Müller, i 1986 lavede en ny type lagkage-superleder, hvor den vigtigste bestanddel er lag med kobber og ilt, og som i udgangspunktet er en magnetisk isolator. Strukturen af disse krystaller er vist på figur 3 til venstre. Mellem lagene er der sjældne jordarter, og alt efter den konkrete sammensætning og doteringen, hvor man udskifter en procentdel af La-ionerne med eksempelvis Ba-ioner, fandt de et isolerende magnetisk materiale, et metal eller en superleder! Og hvad mere var, den kritiske temperatur for disse materialer var uset høj. Faktisk fandt man kort efter en superleder, hvor det i stedet var yttrium og barium, der udgjorde fyldet i lagkagen, og den var så god – med kritisk temperatur over kvælstofs kogepunkt – at man kunne begynde at bruge den superledende egenskab til praktiske formål.

Men der var stor undring blandt forskerne; hvordan kunne det lade sig gøre at lave materialer med så høje kritiske temperaturer? Beregninger af gittervibrationerne, der hidtil havde virket så godt, kunne ikke forklare kritiske temperaturer over 70 K. Og selvom der stadig var tale om relativt lave temperaturer, var døren nu åbnet til en helt ny klasse af materialer, hvor den mikroskopiske vekselvirkning mellem elektronerne muligvis var en helt anden.



Figur 3. Lagkagestruktur for kupraterne (til venstre) og strontium-ruthenat (til højre). Disse består af henholdsvis kobberoxidlag og lag med ruthenium og oxygen. Kupraterne doteses ved ion-udskiftning i de mellemliggende lag eksempelvis med en grøn strontium-ion i stedet for en lanthan-ion. Dotering er nødvendig for at opnå superledning. Strontium-ruthenat skal derimod ikke doteses for at blive superledende.

Superledning fra frastødning

At det havde vist sig, at man kunne lave lidt om på en isolator med magnetiske egenskaber og dermed få en superleder, gav anledning til en ny idé, som der stadig arbejdes intenst på den dag i dag [2]. Kan man forestille sig, at tiltrækningen mellem elektronerne opstår ved hjælp af en anden type vibrationer, nært beslægtet med den magnetiske struktur? Såkaldte spinbølger kan måske give den fornødne lim til at binde elektronerne sammen i Cooperpar.

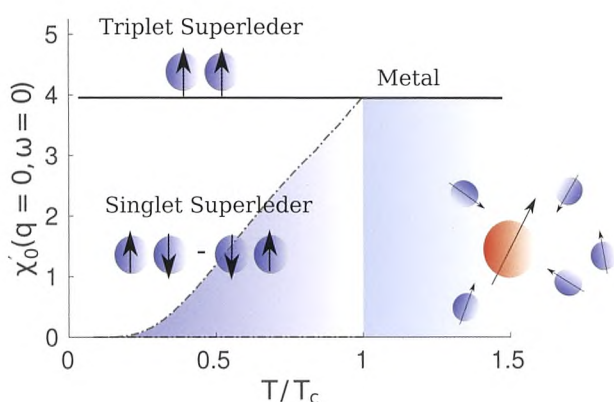
Imidlertid er det elektronerne selv, der giver anledning til spinbølger, og man befinder sig derfor i den temmelig komplicerede situation, at elektronerne både er dem, der binder sammen, og bindes sammen. Men denne besynderlige slutning kan på den anden side vendes til noget positivt i og med, at vi kan forestille os en simpel model til at beskrive systemet, nemlig Hubbardmodellen.

Denne model siger simpelthen, at elektroner kan beskrives fuldstændigt ved deres tilbøjelighed til at bevæge sig rundt i krystallen og ved deres indbyrdes frastødning. Det lyder simpelt, og måske lyder det også umiddelbart som om, at en sådan model aldrig ville kunne give anledning til superledning, for hvor skulle tiltrækningen mellem elektronerne komme fra?

Svaret er paradoksalt nok, at tiltrækningen kommer fra frastødningen, men kun fordi vi har med en frygtelig masse elektroner at gøre. Når elektronerne vekselvirker med hinanden, opbygges der spinbølger i materialet, og disse spinbølger kan fungere som den superledende lim. Vi vil altså løse ligning (1), men nu med $V > 0$. Det kan kun lade sig gøre, hvis vekselvirkningen får en struktur som afhænger af krystalimpulsen. Derfor skriver vi ligningen mere generelt

$$\Delta_{\mathbf{k}} = - \sum_{\mathbf{k}'} V_{\mathbf{k},\mathbf{k}'} \frac{\Delta_{\mathbf{k}'}}{\sqrt{\xi_{\mathbf{k}'}^2 + \Delta_{\mathbf{k}'}^2}}. \quad (2)$$

og finder løsningen i tilfældet hvor $V_{\mathbf{k},\mathbf{k}'} > 0$ for alle kombinationer af $\mathbf{k}$ og $\mathbf{k}'$. Dette kræver dog, at $\Delta_{\mathbf{k}}$ har en struktur med fortegnsskift. Dette fortegnsskift skal findes for par af $\mathbf{k}$ og $\mathbf{k}'$ hvor $V_{\mathbf{k},\mathbf{k}'}$ er stor. En illustration af dette kan ses på figur 2(b). Sådan en slags superledning kalder vi for ukonventionel, fordi den i modsætning til de "simple" superledere som kviksølv, har fortegnsskift i gabet $\Delta_{\mathbf{k}}$.



Figur 4. Den uniforme spin-susceptibilitet i en superleder målt med kernemagnetisk resonans (NMR). Atomkernen (vist i rød) er sensitiv overfor en eventuel magnetisering af de omgivende elektroner (vist i lilla), når der påtrykkes et magnetisk felt. Bliver metallet superledende under nedkøling, vil de elektroniske spin "fryses ude", og dette vil give en ændring i NMR-signalet. Er superlederen i stedet opbygget af triplet Cooperpar, dvs. begge elektronspin peger i samme retning, vil NMR-signalet være uændret under nedkøling. Værdien T_c markerer den kritiske temperatur, der adskiller den metalliske og den superledende tilstand.

Sr₂RuO₄ og de fem benspænd

En sådan ukonventionel superleder finder vi i Sr₂RuO₄, som har samme struktur som kupraterne, men ingen kobber som vist i figur 2(b). Historien om denne superleder er ganske bemærkelsesværdig, og man kan – lidt søgt måske – drage en parallel til et filmprojekt fra 2003 kaldet "De fem benspænd", hvor Lars von Trier udfordrer Jørgen Leth til at skabe en film under kreativt pres, med hårde regler og begrænsninger. Men sådanne begrænsninger kan vise sig at være en inspirerende rettesnor, og for Sr₂RuO₄ er teoretikerne kommet på en meget inspirerende opgave i jagten på en model, der giver en fyldestgørende beskrivelse af alle de eksperimentelle observationer.

Det særlige ved Sr₂RuO₄ er, at den metalliske tilstand, som superledningen udspringer fra, er simpel og

let at beskrive i forhold til fx kupraterne. Så selvom den kritiske temperatur er meget lavere end for kupraterne, er det et godt sted at starte: Det burde være en relativt let opgave at beskrive superledning netop i dette system. Men historien har vist noget andet.

Hvis man ser på eksperimenterne alene, kan de næsten virke indbyrdes modstridende. Her kan man tænke på "fem benspænd" som givet fra de eksperimentelle fakta, der alle må tages i ed og på overbevisende måde inkluderes i en teoretisk model for systemet. Her vil jeg fremhæve fem eksperimentelle teknikker.

1) Neutronspredning udføres ved, at neutroner sendes i en stråle hen mod materialet og bliver afbøjet som følge af vekselvirkninger mellem neutronstrålen og materialet. Neutroner er følsomme over for materialets struktur og over for magnetisk orden, som kan forekomme inde i materialet. Vi er særligt opmærksomme på hvilke spinrelationer, der viser sig ud fra formodningen om, at det kan være spinbølger i materialet, der giver anledning til, at elektronerne går sammen to og to. For Sr₂RuO₄ viser neutronmålinger en særlig struktur af spinrelationerne. En model for systemet skal kunne reproducere denne struktur.

2) Kernemagnetisk resonans (NMR) kan bruges til at undersøge elektronernes opførsel inde i materialet ved at måle på atomkernernes spin. I et superledende materiale kan man indirekte få information om, hvilken spinstruktur Cooperparrene har, alt afhængig af, hvordan elektronerne reagerer på et magnetisk felt fra omgivelserne. Hvis elektronerne går sammen i et Cooperpar med singlet-struktur, som vist i figur 4, vil man observere en ændring af NMR-signalet, når materialet køles ned under den kritiske temperatur T_c . Ved helt lave temperaturer vil alle elektronspinnene være "frosset ude", og der vil forekomme en kraftig reduktion i NMR-signalet. Er elektronerne derimod gået sammen i par med en spin-triplet-struktur, vil de stadig kunne reagere på et magnetisk felt i samme grad, som før de gik sammen i par. Dermed kan man bruge teknikken til at få information om den mikroskopiske struktur af den superledende fase.

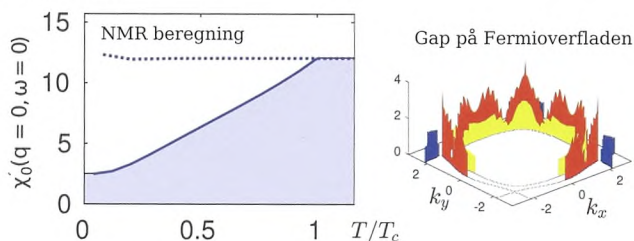
For Sr₂RuO₄ har historien taget en interessant drejning netop på grund af observationer med denne eksperimentelle teknik. De første NMR-målinger blev publiceret kort efter opdagelsen af superledning i Sr₂RuO₄ i 1994. NMR-målinger foretaget i den superledende fase viste, at der ikke var nogen forskel i signalet over og under T_c . Dette blev helt afgørende for forståelsen af materialet, og alle teorier arbejdede i retning af at finde en forklaring på, hvorfor Sr₂RuO₄ udviste superledning med spin-triplet-struktur. Det var derfor et voldsomt vendepunkt, da nye resultater viste, at NMR-signalet blev kraftigt undertrykt, når materialet blev kølet ned under den kritiske temperatur, hvilket tyder på en singlet-struktur af Cooperparrene. Men det vil vi vende tilbage til om lidt.

3) Myon-spin-rotation kan måle svage magnetiske felter inde i et materiale. Myoner er ustabile elementarpartikler, som sendes dybt ind i materialet. Hvis der er et magnetisk felt til stede, vil myonens spin dreje rundt om feltet lidt ligesom en snurretop. Kort efter henfalder

myonen til en positron og to neutrinoer. Ved at måle positronens retning kan man udregne, hvad myonens spin var ved henfaldet, og så kan man gå baglæns og bestemme det felt, som myonen drejede omkring. Det viser sig, at myonerne detekterer et magnetisk felt, som opstår netop som Sr_2RuO_4 køles ned under den kritiske temperatur. Et af de store åbne spørgsmål er den mikroskopiske årsag til dette felt.

4) Ved skanningstunneleringsmikroskopi (STM) kan man måle tilstandstætheden, som vist på figur 2(a). Målingerne viser, at det superledende gab er ukonventionelt, dvs. med fortegnsskift.

5) Ultralydseksperimenter måler, hvordan lyden bevæger sig gennem materialet, hvis man betragter forskellige veje gennem krystallen. Afhængig af hvilken vej, der vælges, vil lyden bevæge sig mere eller mindre ubesværet. Derudover kan der være effekter, der opstår fra de elektroner, der er til stede i materialet, og vi kan forestille os, at lydets bevægelse kan påvirkes af, hvorvidt elektronerne bevæger sig som i et normalt metal, eller om de er superledende. Denne teknik har vist sig at give anledning til et af de mest krævende benspænd, fordi eksperimenterne tilsyneladende kun kan forklares, hvis den superledende orden består af to komponenter. Dette indskrænker antallet af muligheder gevaldigt, og er således årsag til nogle af de vigtigste overvejelser både hvad angår teoretisk modellering såvel som andre eksperimentelle teknikker, der kan gå resultatet efter i sømmene.



Figur 5. Den uniforme spin-susceptibilitet beregnet for Sr_2RuO_4 for et to-komponent superledende gab. Det spektrale gab Δ_k for denne to-komponentløsning vist på Fermioverfladen.

Den store kovending for forskningsfeltet var, da et forskerhold viste, at man under et NMR-eksperiment uforvarende kunne komme til at opvarme superlederen således, at man faktisk målte signalet over den kritiske temperatur [3]. Man troede derfor, at man så responset fra en triplet-superleder, eftersom den jo netop giver samme signal under og over den kritiske temperatur. I virkeligheden målte man bare hele tiden over den kritiske temperatur, og så er det jo ikke overraskende, at man fandt samme respons. Det var bekræftende at være vidne til, hvordan denne kritik blev modtaget af det forskerhold, der stod bag den oprindelige NMR-publikation [4]. De tog kritikken til efterretning og udførte på ny eksperimentet. De fandt samme resultat som kritikerne, altså at Sr_2RuO_4 udviser en opførsel, der bedst kan forstås som opbygget af singlet-Cooperpar.

Historien har tydeliggjort to vigtige pointer, som vi i arbejdet med fysik altid bør holde os for øje. Først og fremmest har den vist os, hvordan selv et veletableret resultat kan vise sig at være forkert. Man kan – og her tænker jeg både på de, der udgiver forskningen og

alle de, der læser den – være så forhoppet på at finde et resultat, at man bliver blind for mulige faldgruber. I tilfældet for Sr_2RuO_4 var der flere indikationer, både teoretiske og eksperimentelle, der pegede i retning af en triplet-superleder, og derfor virkede resultatet fra NMR plausibelt. Dette resultat blev i næsten 20 år regnet som den vigtigste evidens for triplet-superledning.

Hvordan kunne der gå så mange år, før fejlen blev opdaget? Her må man være opmærksom på, at vi arbejder ved at bygge videre på det store arbejde, der ligger forud for os, og som er baseret på mange års forskning med både fejl og nye indsigter. Inden for alle felter bliver vi så specialiserede, at det kræver mere og mere at forstå detaljerne bag eksempelvis et eksperimentelt resultat eller en teoretisk konklusion. Det, der gav anledning til det store vendepunkt for forståelsen af Sr_2RuO_4 , var en meget subtil detalje i udførelsen af NMR-eksperimentet, som minder os om, hvor vigtigt det er at lære af tidligere fejl og blive ved med at stille spørgsmål.

Vi er ikke helt i mål med at forstå dette fascinerende materiale, men vi er godt på vej. I vores gruppe har vi netop beregnet det superledende gab Δ_k ud fra en mikroskopisk vekselvirkning med udgangspunkt i frastødning mellem elektroner og spinbølger, der passer med neutronmålingerne. Vores bud er vist i figur 5: En eksotisk form for superledning, der består af to komponenter, og som ikke falder over de fem benspænd. Fremtidens eksperimenter vil vise, om vi er på rette vej.

Litteratur

- [1] E. Snider, N. Dasenbrock-Gammon, R. McBride, M. Debessai, H. Vindana, K. Vencatasamy, K. V. Lawler, A. Salamat og R. P. Dias (2020) Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride, *Nature*, bind **586**, side 373.
- [2] D. J. Scalapino (2012) A common thread: The pairing interaction for unconventional superconductors, *Rev. Mod. Phys.*, bind **84**, side 1383.
- [3] A. Pustogow, Y. Luo, A. Chronister, Y.-S. Su, D. A. Sokolov, F. Jerzembeck, A. P. Mackenzie, C. W. Hicks, N. Kikugawa, S. Raghu, E. D. Bauer og S. E. Brow (2019) Constraints on the superconducting order parameter in Sr_2RuO_4 from oxygen-17 nuclear magnetic resonance, *Nature*, bind **574**, side 72.
- [4] K. Ishida, M. Manago, K. Kinjo, and Y. Maeno (2020) Reduction of the ^{17}O Knight Shift in the Superconducting State and the Heat-up Effect by NMR Pulses on Sr_2RuO_4 , *Journal of the Physical Society of Japan*, bind **89**, side 034712.



Astrid Trantum Rømer er post.doc. ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, hvor hun forsker i modeller for superledning. Hun har netop modtaget Kirstine Meyers Mindelegat fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse.

Kompleks dynamik i celledynamik

Mathias Heltberg, Niels Bohr Institutet

Cellers evne til at kontrollere produktionen af essentielle proteiner er en helt fundamental del af livets evne til at reagere på udefrakommende perturbationer samt vedligeholde korrekt signalering i og mellem celler. Et yderst spændende aspekt her er de seneste årtiers observationer af dynamik i koncentrationen af nogle af de mest vigtige proteiner. Særligt, hvordan deres koncentrationer i cellekernen har en evne til at udvise veldefinerede svingninger, har åbnet for en række grundlæggende spørgsmål. Hvordan kan levende organismer igangsætte disse rytmer og dynamiske signaler, og hvorledes kan dette benyttes til at respondere på udefrakommende perturbationer samt kontrollere den generelle proteinproduktion og celletilstand?

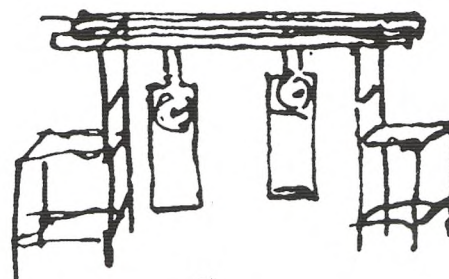
Fra pendulure til proteiner

I året 1665 lå den senere verdensberømte fysiker og matematiker Christian Huygens i sygesengen. Han var kendt for at lave nogle af de mest præcise pendulure, og på hans væg hang derfor adskillige svingende penduler. Fra sengen kunne han pludselig gøre en interessant observation: Ure, der hang tæt på hinanden, havde nøjagtig samme frekvens og en låst faseforskel på omtrent en halv rotation. Som en god videnskabsmand noterede han sig dette, og så snart han var frisk, eksperimenterede han med at spænde urene fast på en bjælke med en bestemt afstand imellem sig. Her opdagede han den grundlæggende sammenhæng, at urene påvirkede hinanden, og selvom de startede med forskellige frekvenser (frekvensen er veldefineret af pendulets længde), ville de efter lidt tid svinge med nøjagtig samme frekvens! Her opdagede han, at jo tættere urene var på hinanden, jo mere effektivt ville de koble til hinanden. Disse resultater opsamlede han og redegjorde for overfor sin far gennem brevudveksling, hvor han bl.a. tegnede forsøgsopstillingen (figur 1a).

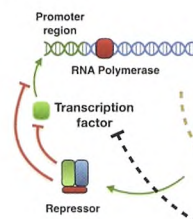
Denne historie er et af de tidligst dokumenterede eksperimentelle studier af ikke-lineære effekter i fysik, og hvad Huygens grundlæggende opdagede, var, at to svingninger kan kobles, og at der er en parameter for koblingsstyrke (i Huygens tilfælde var denne parameter afstanden mellem urene, og koblingen skyldtes vibrationer i bjælken). Huygens' opdagelse af påvirkningerne mellem oscillerende systemer er et meget grundlæggende fænomen, der har anvendelser i mange fysiske og biologiske systemer.

I de seneste årtier er der opstået en stor interesse for dynamikken i proteinkoncentrationer, og særligt de regulerende proteiner, der hedder transkriptionsfaktorer, som er de proteiner, der stimulerer produktionen af en lang række andre proteiner. Et klassisk eksempel på dette er NF- κ B-proteinet, der styrer produktionen af flere hundrede forskellige gener og har stor betydning for immunforsvarets funktion. Mutationer i dette protein er korreleret med udbrud af sygdomme som sukkersyge og cancer. For NF- κ B-proteinet blev det i starten af det 21. århundrede observeret, at når det stimuleres udefra af liganden TNF, begynder koncentrationen af NF- κ B inde i cellekernen at svinge med en periode på ca. halvanden time.

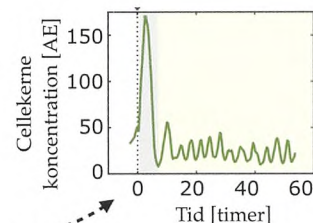
A)



B)



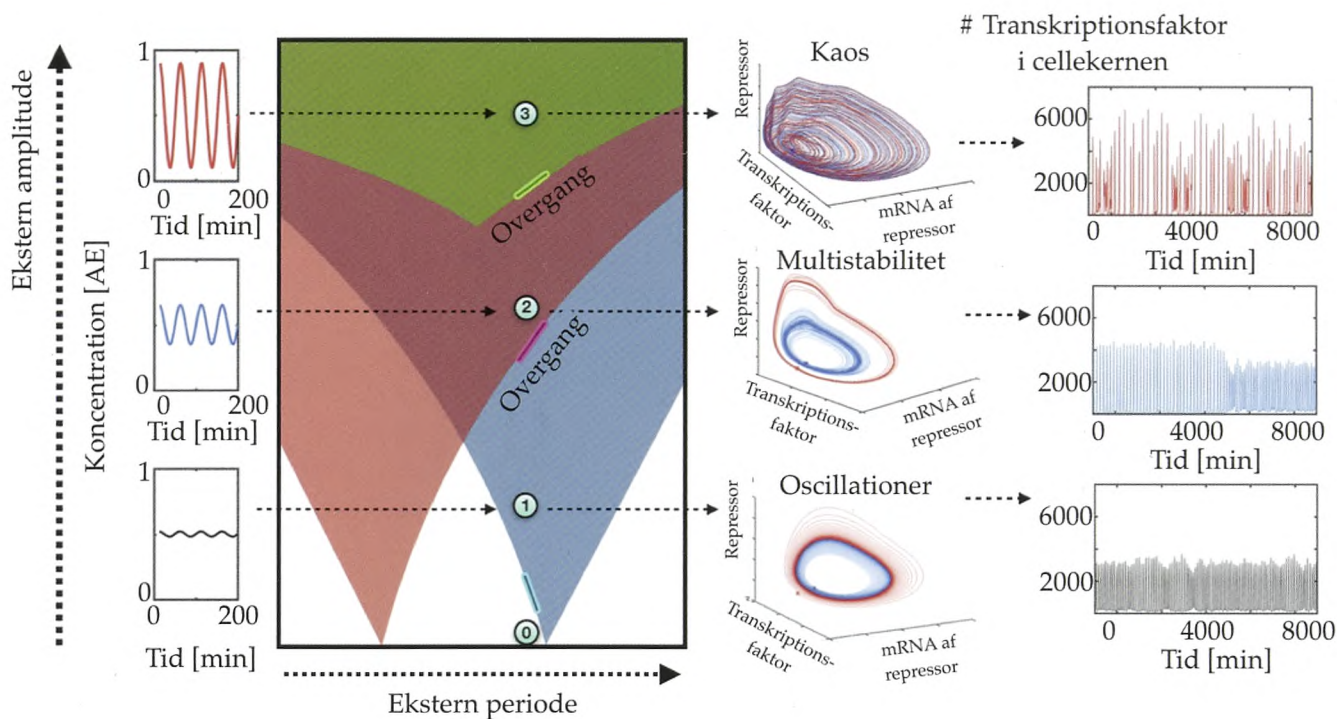
C)



Figur 1. A) Huygens' egen illustration af hans oprindelige eksperiment. B) Skematisk figur af det biologiske netværk, der kan lede til oscillationer. C) Eksempel på oscillerende dynamik i p53 [1].

Et andet eksempel på en vigtig transkriptionsfaktor er proteinet p53, der ligeledes regulerer mange gener, og mutationer i dette protein er koblet til op mod 50% af alle cancertilfælde. Dette skyldes, at p53 spiller en afgørende rolle i reguleringen af celledeling og sikrer, at cellen ikke deler sig, så længe der er skade på DNA'et. For p53 blev det ligeledes i starten af dette århundrede påvist, at når celler udsættes for γ -stråling, igangsættes svingninger i proteinets koncentration i cellekernen, her med en periode på ca. 5 timer.

Årsagen til disse svingninger kan findes ved at studere det grundlæggende genetiske netværk. En transkriptionsfaktor vil opregulere produktionen af en række proteiner, heriblandt en såkaldt "repressor", der enten gør transkriptionsfaktoren inaktiv (som er tilfældet ved NF- κ B) eller nedbryder den (som er tilfældet med p53). Dette giver et negativt feedbackloop, hvor der er en tidsforsinkelse, fordi den negative regulator først virker, efter at den er blevet dannet. Dette er skematiseret i figur 1b, og disse grundsten i et netværk kan ofte lede til oscillationer, der kan fortsætte i flere uger. Et eksempel på denne dynamik for proteinet p53



Figur 2. Visuel beskrivelse af koblinger mellem to svingninger og de dertilhørende Arnold-tunger. Til venstre ses den eksterne oscillators svingninger, i midten ses den tilsvarende parameterregion, og til højre den resulterende dynamik i den interne oscillator, først vist i faserummet og derefter som en tidsserie.

er vist i figur 1c. Derfor er det afgørende at forstå, hvorfor celler benytter sig af disse dynamiske signaler, og på det nuværende stadie i forskningen er dette stadig et mysterium. Da der er utallige celler, der kan udvise svingninger, og da der er utallige genetiske netværk, der kan lede til svingninger, er det yderst interessant at se, hvilke typer dynamik, der kan opstå, når svingninger påvirker hinanden.

Arnold-tunger som universel beskrivelse af interagerende svingninger

Den matematiske beskrivelse af svingninger, der kobler, er ikke-lineær i sin natur, og dette er en af årsagerne til, at det først var i anden halvdel af det 20. århundrede, at en dybere forståelse blev opnået. Her skal man særligt fremhæve den russiske fysiker og matematiker Vladimir Arnold, der studerede det simpleste system, hvor en oscillator (den eksterne oscillator, EO) påvirker en anden oscillator (den interne oscillator, IO), men hvor EO ikke påvirkes tilbage, og dermed bevarer sin oprindelige amplitude og frekvens. Dette virker som en stor begrænsning, men for mange systemer er dette en rigtig god tilnærmelse. Fx kan man forestille sig, at menneskers rytme for at producere hormoner er bundet til Solens 24-timers periode – der jo på ingen måde påvirkes “tilbage” igen. Arnold studerede dette fænomen gennem en såkaldt fase-model, der beskriver fasen af en EO, hver gang IO har gennemført en hel rotation. Denne tager den matematiske form: $x_{n+1} = x_n + \Omega - \frac{K}{2\pi} \sin(2\pi x_n)$, hvor x_n er fasen (med modulus 1) efter den n 'te omdrejning, Ω er EO's frekvens og K er koblingsstyrken. På baggrund af denne simple struktur kan man vise den rigdom af dynamikker, der kan opstå

ved to koblede oscillatorer, hvilket er visualiseret i figur 2.

Den midterste del af figur 2 illustrerer den grundlæggende sammenhæng, der giver anledning til, hvad man teknisk kalder “Arnold-tunger”. Længs x-aksen varieres EO-perioden og langs y-aksen varieres koblingsstyrken mellem de to oscillatorer, hvilket er vist helt til venstre med svingninger, der har samme middelværdi på 0,5 men forskellige amplituder. Koblingsstyrken er et lidt abstrakt fænomen, men i mange tilfælde kan man forestille sig, at det er amplituden af EO – jo større udsving den har, jo mere vil den påvirke IO.

- Hvis man først antager, at der er en uendelig lille koblingsstyrke mellem disse oscillatorer (svarende til $K = 0$ i fase-modellen og markeret med “0” på figur 2), vil begge oscillatorer være upåvirkede af hinanden. Her kan man dog stadig tale om, at de vil være låst til hinanden, hvis fx EO har en frekvens på 1, og IO har en frekvens på 2, idet de så altid mødes i samme punkt, hver gang EO har færdiggjort sin omgang. Dette defineres som en $\frac{1}{2}$ kobling. Dette argument kan man let udvide, og derfor vil alle rationelle forhold i frekvens mellem oscillationerne lede til en kobling, og matematisk set vil dette give en lukket cyklus i deres fælles faserum. Hvis derimod forholdet er irrationelt, således at IO har en frekvens på $\sqrt{2}$, vil deres baner aldrig mødes i det samme punkt i faserummet, hvilket giver *quasiperiodicitet* (bemærk dog, at begge systemer stadig vil oscillere hver for sig). Matematisk set er det meget interessant, da der er uendeligt mange rationelle forhold, men uendeligheden af de irrationelle tal er meget større (dette er defineret ved det såkaldte Lebesgue-mål), og derfor vil oscillationer i praksis aldrig være låst

for denne koblingsstyrke.

- Hvis man øger koblingsstyrken, hvilket i figur 2 ses ved den forøgede amplitude til venstre, når man til punktet “1”, der ligger inde i regionen markeret med blå. Denne region er det, man definerer som en “Arnold-tunge”, og er alle de parameter-værdier, hvorved IO vil have et bestemt rationelt forhold til EO. I dette område kan man altså ændre perioden af EO med det resultat, at IO følger med, så de har det samme forhold. I praksis betyder dette, at systemet vil have en stabil svingning, og lige meget hvilke begyndelsesbetingelser man vælger, vil kurven altid falde tilbage til denne løsning. IO vil i så fald altid have en fast amplitude, selv hvis der er støj i systemet (figur 2, nederst til højre). Et universelt element er, at der til hvert rationelt tal er tilknyttet en tunge. Alle tunger vil vokse i bredde, når koblingsstyrken forøges. Tunger med mindste nævner vokser hurtigst, så $1/1$ breder sig mere end $1/2$. Dette virker helt umuligt, men det er netop det, der sker, at tungerne tager form som omvendte pyramider og skubber til de irrationelle værdier (der dog allesammen også eksisterer).

- Nu øges koblingsstyrken yderligere, og man når punktet “2”, der ligger i overlappet mellem den blå og røde region. Man kan forestille sig, at siden tungerne vokser, må de komme til at overlapse, og det er netop det, der sker her. Den resulterende dynamik er, at der opstår flere forskellige stabile svingninger, og afhængigt af hvilket punkt man starter i, kan man ende i to forskellige svingninger (rød og blå kurve i figur 2, i midten til højre), og hvis der er støj i systemet kan kurven blive skubbet mellem de forskellige svingninger. Dette sker kun, når koblingsstyrken er tilpas stor, og i fasemodellen er det bevist, at dette kun kan forekomme, når $K \geq 1$.

- Endelig opnår man en meget stor koblingsstyrke i punktet “3”, hvor mange store tunger overlapper hinanden. De har alle mistet deres stabilitet, og den resulterende dynamik bliver kaotisk.

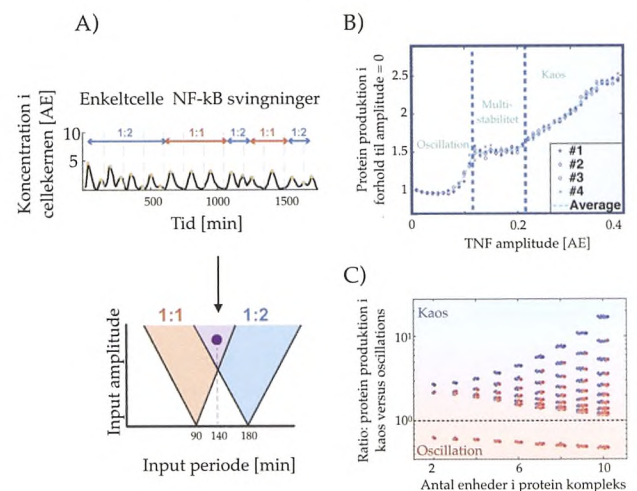
Matematisk set er kaos et veldefineret koncept og er overordnet set defineret ved, at to kurver, der startes næsten ved siden af hinanden (blå og rød kurve, øverst til højre), vil fjerne sig fra hinanden, aldrig komme tilbage til det samme punkt, og dermed bevæge sig på det, der hedder en kaotisk attraktor. Hvis man studerer en kaotisk tidsserie, har den, som fremvist i figur 2, svingninger, der ligner en oscillator, men disse er præget af meget forskellige perioder og amplituder.

Koblinger, kompleksitet og kaos

Opdagelsen af de oscillerende proteinkoncentrationer har åbnet for nogle meget grundlæggende spørgsmål: Kan dynamik i de regulerende proteiner give en forøget kontrol over signaler? Kan man opregulere grupper af proteiner ved at starte svingninger? Og er det muligt at koble oscillerende proteiner og observere den rige dynamik fra Arnolds teori?

For at begynde med det sidste spørgsmål, så er det blevet påvist flere gange, at det er muligt at koble sådanne svingninger, og dette har ledt til nye dynamikker i koncentrationen af de vigtige transkriptions-faktorer.

Dette kan gøres på enkelt-celle niveau, hvor man kan aflæse koncentrationen af et bestemt protein over tid. Hvis cellen sættes til at oscillere, fx som i p53, hvor disse oscillationer fremkommer efter bestråling med en γ -kilde, kan cellen stimuleres periodisk af andre proteiner, og afhængigt af perioden og koblingstyrken kan dette lede til koblinger som beskrevet ovenfor. Netop dette er fx gjort i studier af proteinet NF-kB, der stimuleres udefra af TNF. Ved at lade TNF variere i koncentration med en periode på 140 minutter, kunne man finde et område mellem de to Arnold-tunger og netop se to stabile svingninger i NF-kB, hvor systemet hoppede mellem de to perioder. Dette resultat er vist i figur 3a. På samme måde studeres i dag mange aspekter af proteinsvingningerne, og ved at benytte teorien for Arnold-tunger kan man fremtvinge kompleks dynamik og studere, hvordan dette påvirker cellerne.

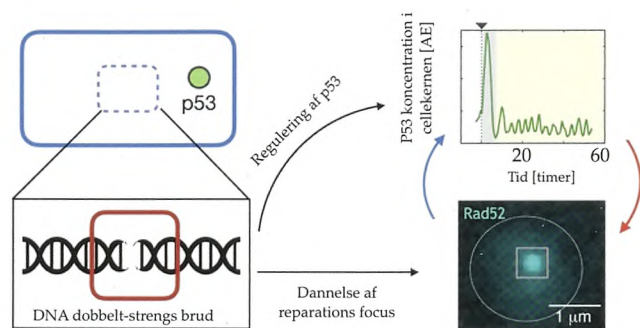


Figur 3. A) Svingninger i NF-kB, under oscillerende stimulus fra liganden TNF, og den tilhørende placering på Arnold-tungediagrammet [2]. B) Gennemsnitsproduktionen af lav-affinitetsproteiner som funktion af TNF-amplituden [3]. C) Produktionen af proteinkomplekser. Her viser x-aksen kompleksets størrelse, og y-aksen viser forholdet mellem produktionen i kaotisk NF-kB-dynamik og oscillerende NF-kB-dynamik, mens punkterne angiver sammensætningen af proteinkomplekser (blå = lav affinitet, rød = høj affinitet).

Det har fra gammel tid været en hypotese i systembiologi, at kaotisk dynamik var noget, levende organismer ville holde sig fra, idet det leder til uorden og mangel på kontrol. Men her har nyere teoretiske resultater åbnet for muligheden for, at kaotisk dynamik kan lede til en opregulering af en gruppe af gener, der er karakteriseret ved at have en lav affinitet til NF-kB. Ved at stimulere med TNF af stigende amplitude, er det tydeligt, at overgangen til kaos kan fordoble produktionen af visse proteiner. Dette kan ses i figur 3b, hvor de tre regioner svarer til punkterne 1, 2 og 3 i figur 2. Derudover kan de varierende udsving, der findes i den kaotiske dynamik, give anledning til en forøgelse i effektiviteten, hvormed proteinkomplekser dannes. Ved at studere en simpel model for, hvordan proteiner sammensættes, kan man studere produktionen af disse komplekser både ved et stabilt niveau af NF-kB, ved oscillationer og ved kaotisk dynamik. Dette er skitseret i figur 3c, hvor det kan ses, at alle proteinkomplekser produceres mere

effektivt i det kaotiske regime i forhold til de simple oscillationer. Kun de komplekser, der udelukkende består af proteiner med høj affinitet til NF- κ B (markeret med rød), produceres mere effektivt i den oscillerende region.

Dette muliggør altså en vigtig rolle for de dynamiske rytmer af transkriptionsfaktorer, og hvordan de kan lede til forøget protein-produktion i specielle situationer. Dette er et element, der i den følgende tid vil studeres intenst gennem eksperimenter, hvor man blandt andet benytter strukturen af Arnold-tunger. Forhåbentlig kan dette kaste yderligere lys over den grundlæggende betydning af oscillerende proteinkoncentrationer og muligvis endnu mere kompleks dynamik.



Figur 4. Skematisk fremstilling af en hypotetisk mekanisme mellem oscillationerne i p53 og reparationen ved hjælp af mikrostrukturer, der fysisk set er dråber, i cellekernen.

Reparation og regulering

DNA-skader er en uundgåelig del af livet på alle niveauer og stadier, og derfor er det af afgørende betydning, at alle levende organismer har et effektivt og optimeret modsvarende til at håndtere dette korrekt. I denne forbindelse er to af de vigtigste aspekter den fysiske reparationsproces og den tilhørende regulering, der sikrer, at ingen celler deler sig, så længe der stadig er skade på DNA'et. I det øjeblik denne mekanisme svigter, kan DNA-skade nedarves gennem cellegenerationer, og man har derfor en motorvej mod udviklingen af cancer. Studier af de molekylære processer ved reparationen af DNA-skader har påvist, at der omkring det skadede DNA-område dannes en mikrostruktur med radius på ca. 100 nm, kaldet et focus. Ved at skabe et lokalt miljø, er det muligt at opregulere de nødvendige proteiner for reparationsprocessen og dermed øge effektiviteten og kvaliteten. Et eksempel på et focus kan ses som den lyseblå cirkel i figur 4.

Studier af den fysiske natur af disse strukturer tyder på, at de kan karakteriseres som en dråbe, der er fase-separeret fra den omkringliggende væske, og ligeledes, at dråberne dannes og opløses på en tidsskala omtrent lig med p53-svingningens periode, som beskrevet i indledningen. Det er påvist, at p53 stimulerer adskillige proteiner, der er relateret til DNA-reparation, men om fremkomsten af svingninger i p53 er relateret til dannelsen af foci, er imidlertid ukendt. Men strukturen

af et focus muliggør en yderst interessant rolle for dynamikken i p53: Ved γ -stråling er det estimeret, at der opstår ca. 20 dobbeltbrud på DNA'et, og derfor kan man let forestille sig, at cellen ikke har ressourcer til at lave dråber omkring alle steder med brud, men må koncentrere sine ressourcer om enkelte steder. På denne måde kan en oscillerende produktion af proteiner give en afgørende tidsskala for, hvornår dråberne opløses og nye skabes gennem tidsrum med maksimal stimulans. Fremtidige eksperimenter kan teste denne hypotese ved at benytte koblete oscillationer til at styre perioden af p53, og samtidig måle mængden af ødelagte DNA-områder. Her ville man forvente, at ved at styre p53-perioden til at blive for hurtig, ville flere steder ikke blive ordentligt repareret, mens en for langsom periode ville skabe unødigt ventetid for at reparere alle steder med brud på DNA'et. På denne måde kan man benytte teorien om synkronisering til at ændre perioden af p53 og dermed teste, om reparationen er dikteret af svingninger, der kan give de optimale tidsskalaer – lidt på samme måde som trafiklys kan optimere trafikken i byer. Om oscillationerne også er det afgørende signal, der sikrer, at cellen ikke deler sig så længe, der er skade, er endnu uvist. Forestillingen om, at de to mest fundamentale elementer i DNA-reparationen er koblet som vist på figur 4, er meget tiltrækkende, men fremtidig forskning vil forhåbentlig kaste yderligere lys over denne afgørende mekanisme.

Litteratur

- [1] M.L. Heltberg, S.H. Chen, A. Jiménez, A. Jambhekar, M.H. Jensen og G. Lahav (2019). Inferring leading interactions in the p53/Mdm2/Mdmx circuit through live-cell imaging and modeling, *Cell systems*, bind 9, side 548–558.
- [2] M. Heltberg, R.A. Kellogg, S. Krishna, S. Tay og M.H. Jensen (2016). Noise induces hopping between NF- κ B entrainment modes, *Cell systems*, bind 3, side 532–539.
- [3] M.L. Heltberg, S. Krishna og M.H. Jensen (2019) On chaotic dynamics in transcription factors and the associated effects in differential gene regulation, *Nature communications*, bind 10, side 1–10.

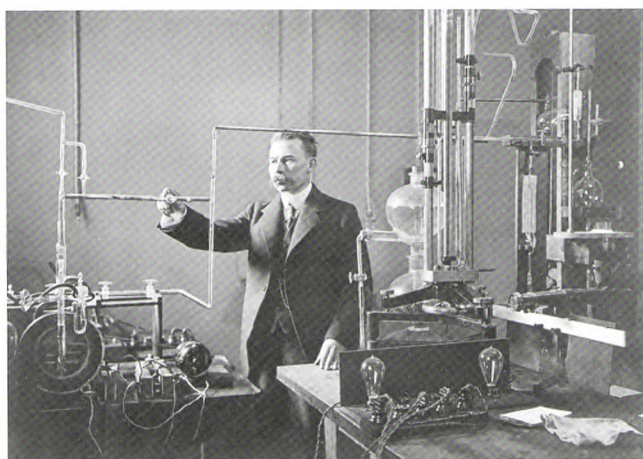


Mathias Luidor Heltberg er postdoc i biokompleksitet ved Niels Bohr Institutet og i statistisk fysik ved det franske universitet École normale supérieure i Paris. Han har netop modtaget Carlsberg-fondets reintegrationsstipendium til at forske i regulering og reparation som respons efter DNA-skader samt Kirstine Meyers Mindelegat fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse.

150-årsjubilæum for fysikeren Martin Knudsen

Bjarne Fredberg Knudsen, EMPAS Consulting, Broby

Martin Knudsen (1871–1949) havde 150-årsfødselsdagsjubilæum den 15. februar 2021. Han var, som adskillige andre af datidens fysikere, én, der havde stået på skuldrene af H.C. Ørsted. Det var også Knudsens fortjeneste, at Ørsted i starten af 1900-tallet blev “revitaliseret”, og således blev hyldet i 100-året for opdagelsen af elektromagnetismen, som vi netop har fejret 200-året for i 2020. Men hvad med Knudsens forskning – er den stadig tidssvarende og brugbar i vor tid? Han forskede i to vidt forskellige områder – havforskning og molekylærfysikken, først og fremmest luftarternes fysik. Er der så nogle af hans forskningsresultater, der stadig bruges? Ja, efter 120 år gælder fortsat hans principper inden for havforskningen med at bestemme havstrømme ud fra havvandets saltholdighed, temperatur og vægtfylde ved overflader og ned i dybhavet. Ud fra de mange elegante eksperimenter Knudsen foretog for at bekræfte den kinetiske teori for luftarter (gas), har man i nyere tid benyttet sig af hans udregninger og formler til bestemmelse af tryk og strømninger i nanobobler [1]. Knudsen anses også for at være pioner for vakuumforskningen, hvor det først og fremmest er fordampning og Knudscellen, der har betydning. Desuden bruges Knudsens cosinusfordeling indirekte ved al tyndfilmsdeponering.

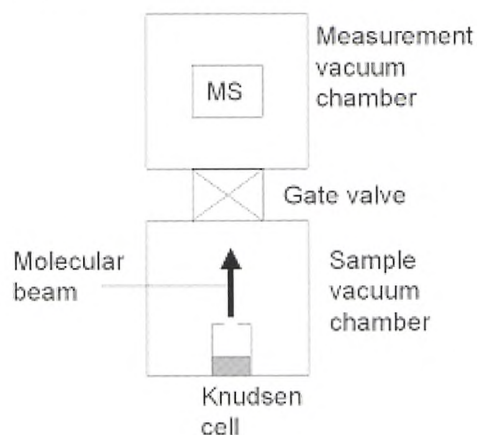


Figur 1. Martin Knudsen fotograferet i perioden 1907–17 med sit apparatur til undersøgelse af luftarters egenskaber ved lave tryk. Foto: DTU.

Først lang tid efter Otto von Guericke (1602–1686) opfindelse af stempelpumpen og eksperimenter kom der forbedringer af luftpumpe-teknikken. I 1857 opfandt Geisler kviksølvluftpumpen, som udvikledes til mange typer bl.a. af K. Prytz; men det var først i 1905, at der kom rigtig gang i udviklingen med tyskeren Gaedes opfindelser, der opnåede meget lave tryk ved at benytte pumper i række, hvorved han konstruerede tre højvakuumpumper: den roterende kviksølvpumpe (1905), molekylærpumpen (1913) og kviksølvdiffusionspumpen (1915). Den unge Martin Knudsen indså straks, at med den forbedrede teknik var muligheden skabt for at kunne arbejde ved så lave lufttryk, at man omtrent kunne undgå de gensidige molekylesammenstød, som ved normalt tryk gør de gaskinetiske fænomener meget indviklede. I en række imponerende arbejder, der regnes blandt den klassiske fysiks allersmukkeste, gennemførte han både de teoretiske beregninger af disse tanker og deres eksperimentelle verifikationer.

I et af de første arbejder afprøvedes gyldigheden af teoriens udtryk for den samlede masse af molekyler, som per sekund rammer en fladeenhed af en beholders væg. Samtidig udførtes en undersøgelse af strømning

gennem snævre rør, hvorved den af Knudsen opstillede *Cosinuslov for molekylers tilbagekastning fra en væg* blev prøvet og bekræftet. Hermed var *lovene for den molekylære effusion og strømning* fundet, og Knudsen udførte straks en smuk anvendelse af effusionen til måling af kviksølvs damptryk ved lave temperaturer. Det blev Knudsens formel for strømningsmodstanden i rør, der blev afsat for udviklingen af vakuumteknik siden 1950'erne [2,3]. Moderne anvendelser er skitseret i figur 2 og 3.



Figur 2. Diagram over Knudscellen anvendt i “Knudsen Effusion Mass Spectrometry” (KEMS), som måler tryk fra 10^1 – 10^{-8} Pa (fra Booth m.fl.).

Den næste opgave, Knudsen tog fat på, var spørgsmålet om, hvorledes en luftart ville opføre sig ved lave tryk i en beholder, hvor der ikke var samme temperatur overalt. Han viste, at ligevægtsbetingelsen ved lave tryk er anderledes end ved høje tryk, så trykket bliver størst, hvor temperaturen er højest. En direkte anvendelse af dette resultat gav en eksakt teori for radiometerkræfter ved lave tryk, og den blev bekræftet ved omhyggeligt gennemførte eksperimenter [4,5].

Arbejdet hermed gav anledning til opfindelsen af det “*absolutte manometer*” eller – som det i reglen nu kaldes – *Knudsen gauge* (Knudsen-manometret), se figur 4. Dette manometer var i mange år det fineste

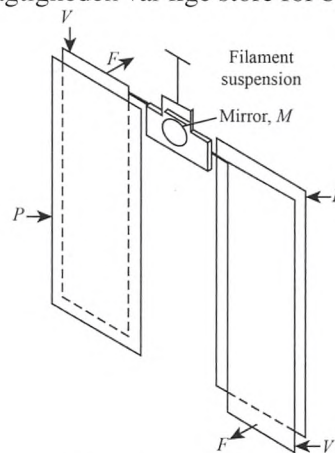
[illegible]

Senere undersøgte Knudsen også det termiske molekyletryk, som fremkaldes af temperaturforskelle i snævre rør og porøse legemer. Han diskuterede de korrektioner, som de kan give anledning til ved brugen af lufttermometer især ved lave temperaturer, og udførte fine demonstrationsforsøg [4,5].

Knudsen viste, at de beregnede værdier altid var større end de observerede, og forklarede dette ved at antage, at luftmolekyler ved stød mod en fast flade i almindelighed ikke vil tilbagekastes med en midelhastighed svarende til fladens temperatur, men at energiudvekslingen er ufuldkommen.

Dette problem optog Knudsen stærkt og blev første gang nærmere uddybet, dels ved en teoretisk og dels

Problemet med den forskellige akkomodation for energi og hastighed (bevægelsesmængde = impuls) var hovedtemaet i Knudsens sidste større arbejde. Her var han i stand til at bestemme akkomodationskoefficienterne for båndets to sider på to af hinanden uafhængige måder. Det gjorde han ved samtidig at måle både den molekylære varmeafgivelse fra hver af de to sider af et ensidigt svættet platinbånd og den på båndet virkende radiometerkraft. Ved desuden at udføre de nævnte målinger både med en enatomig luftart, helium (He), og en toatomig, brint (H₂), var det muligt at skelne mellem akkomodation for translations- og rotationsenergi, og det blev påvist, at akkomodationskoefficienterne inden for målenøjagtigheden var lige store for brint og helium [4,5].

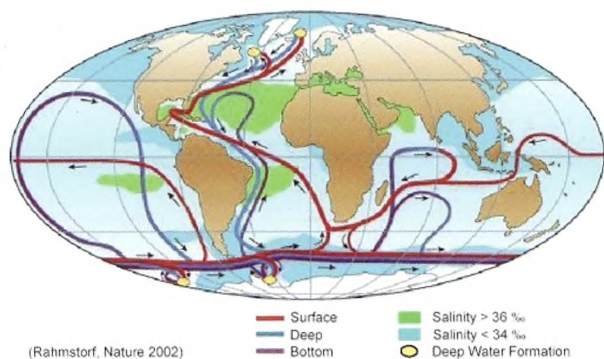


Arbejdet med luftarternes varmeledning førte Knudsen ind på flere andre hermed beslægtede undersøgelser bl.a. af varmetrårdsmanometrets virkemåde og af lovene for fordampning og kondensation. Bedømt af samtidens eksperter [4] var et af de smukkeste og mest betydningsfulde resultater af det sidstnævnte arbejde hans påvisning af, at den maksimale fordampningshastighed fra en væske, som den kinetiske teori giver et simpelt udtryk for, også undertiden kan realiseres som fx fra ren overflade af kviksølv [4,5].

KVANT, marts 2021 – www.kvant.dk

Knudsens betydning for havforskningen

I dag ved vi, at Golfstrømmen er Europas kraftværk. Hvert sekund flytter den 55 millioner m^3 lunt vand, som hver dag opvarmer Europas vestkyster med en energi, der svarer til energien fra verdens kulkraftværker i 10 år. Havde vi ikke Golfstrømmen, ville vi opleve hårde vintre som i Rusland og Canada. Golfstrømmen fortsætter hele vejen op langs Norges kyst og sikrer, at havnene ikke fryser til om vinteren. Her kunne man jo tro, at det varme vand ville smelte al isen ved Nordpolen, men det sker ikke pga. et termodynamisk princip, kaldet *termohalin cirkulation*, som første gang blev formuleret i 1798 af Grev von Rumford.



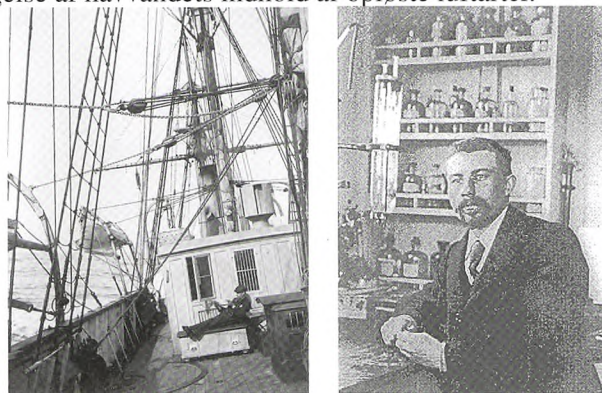
Figur 5. Termohalin cirkulation.

Rumford var en gudsbenådet videnskabsmand, der blev anerkendt som datidens autoritet inden for termodynamik. I hans mange opdagelser indgår den konstatering, at salt havvand opfører sig fundamentalt forskelligt fra ferskt søvand – modsat ferskvand fortsætter havvand med at trække sig sammen, når det afkøles. Jo koldere havvand bliver, des tættere og mere kompakt er det, og Rumford mente, at når varmt vand som Golfstrømmen afgiver varme til luften, må vandet synke:

“Vandet vil tvinge varmere partikler op... det vil nå bunden og straks begynde at sprede sig mod ækvator og dette må nødvendigvis skabe en overfladestrøm i modsatgående retning,” forudsagde han om mekanismen bag dybe havstrømme. Der var nu ikke mange i hans samtid, som accepterede idéen – stort set alle mente, at vinden skabte strømmene, og at vandet måtte være helt stillestående, når man kom ned under de første få hundrede favne; men det var især Knudsens hydrografiske og oceanografiske forskning, der blev det overbevisende. Han blev introduceret til hydrografen (dvs. fysisk oceanografi), da han som ganske ung fysiker blev ansat til i somrene 1895 og 96 at udføre fysiske og kemiske undersøgelser under den danske “Ingolf”-ekspedition i havene rundt om Island og det vestlige Grønland. Denne forskning førte til 56 videnskabelige artikler [5–9], og Knudsen er af andre havforskere citeret i langt over 100 publikationer fra hele verden.

Havstrømmene er således “hjertepumpen” for hele klodens klima, og de drives af forskelle i saltholdighed og temperatur. Godt nok er havene forbundet, men som mange har oplevet, er der stor forskel på, hvor salt vandet i Middelhavet og Øresund smager. Med vandprøver fra alle verdenshavene var det lykkedes danskeren Georg Forchhammer i midten af 1840’erne

at bestemme, at sammensætningen af salte faktisk er stort set ens i alle verdens have. Han havde således sandsynliggjort, at man alene ud fra forskelle i saltholdigheden kunne fastlægge grænserne for de store havstrømme. Så ung og uerfaren Knudsen end var dengang, lykkedes det ham at indføre mange forbedringer af observationsteknikken. Dette gælder først og fremmest bestemmelserne af havvandets klorindhold ved titrering efter Mohrs metode, hvor han konstruerede en pipette til hurtig og nøjagtig afmåling af et bestemt volumen af havvand. Den anvendtes stadig under betegnelsen *Knudsenpipetten* gennem det meste af det følgende århundrede. Et andet stort fremskridt var hans indførelse af *normalvand* (*Standard Seawater*), til kontrol af den ved klortitreringerne anvendte sølvnitratopløsningskoncentration. Desuden konstruerede han et forbedret vendetermometer og et luftanalyseapparat til undersøgelse af havvandets indhold af opløste luftarter.



Figur 6. Laboratoriet på skrueskonnerten Ingolf. Foto: 1895.

Det var derfor helt naturligt, at den unge Knudsen blev den ene af Danmarks delegerede ved de første internationale havforskningskonferencer, som fandt sted i Stockholm 1899, Kristiania 1901 og København 1902 til planlægning af internationale havundersøgelser, og det skyldtes i væsentlig grad hans indflydelse, at centralledelsen af undersøgelserne efter oprettelsen af *The International Council for Exploration of the Sea* (*Det Internationale Havforskningsråd*) ICES/CIEM fik hovedsæde i København fra 1902, hvor det i øvrigt fortsat ligger efter næsten 120 år.

Ved den første af de nævnte konferencer fremsatte Knudsen forslag om en international institution til fremstilling af normalvand og påviste, at man ved anvendelse af dette kunne opnå, at alle klortitreringer, der udførtes på forskellige ekspeditioner og havinspektionsskibe, selv om der anvendtes ganske simple målemetoder, ville være sammenlignelige med den høje grad af nøjagtighed, som er nødvendig. Erfaringen viste nemlig, at variationerne i havvandets indhold af opløste salte er ganske små, men ikke desto mindre af stor biologisk betydning på grund af deres indflydelse på havstrømmene. Derfor krævedes der stor nøjagtighed i målingerne.

Ved den lejlighed blev han medlem af en kommission, der skulle revidere de hidtil anvendte hydrografiske tabeller (tabeller over vægtfyldens afhængighed af temperatur og klorindhold). Arbejdet med denne revision blev overdraget Knudsen, som dels selvstændigt,

dels sammen med et team af gode medarbejdere: S.P.L. Sørensen, J.P. Jacobsen og andre, gennemførte det store antal analyser og beregninger, der kom til at ligge til grund for *Knudsens Hydrografiske Tabeller*. Dette resulterede igen i, at Knudsen og hans assistent J.P. Jacobsen udviklede de såkaldte *T-S-diagrammer*, der sammen med de hydrografiske tabeller blev internationale standarder til bestemmelse af en havvandsprøves karakteristiske størrelser på grundlag af Mohr-titrering under anvendelse af normalvand, som siden er blevet anvendt overalt i verden i størstedelen af det 20. århundrede.



Figur 7. Knudsens vendetermometer og ampul med "Standard Seawater".

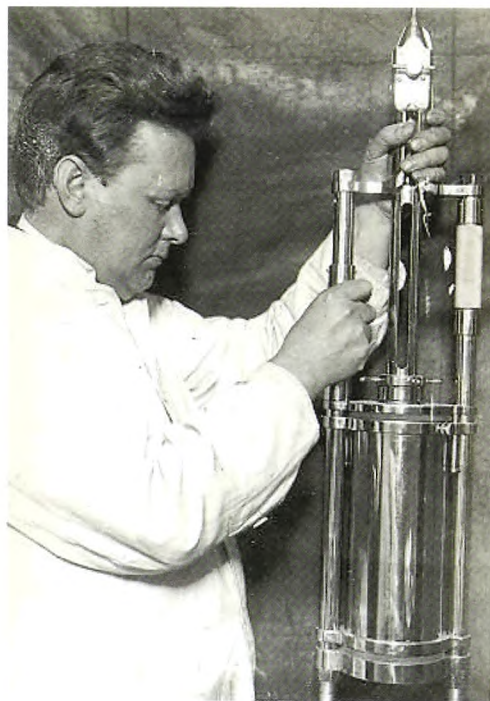
Fremstillingen af *normalvand*, som i tilsmedede ampuller blev sendt ud til alle hydrologiske laboratorier verden over, blev – efter at den i en kort årrække havde været henlagt til "Council Centrallaboratorium i Kristiania (Oslo)" under ledelse af polarforskeren Fridtjof Nansen – overdraget Knudsen, som personligt forestod fremstillingen fra 1908 til 1948.



Figur 8. Ampulfremstilling af "Standard Seawater" (normalvand). Foto fra 1960'erne.

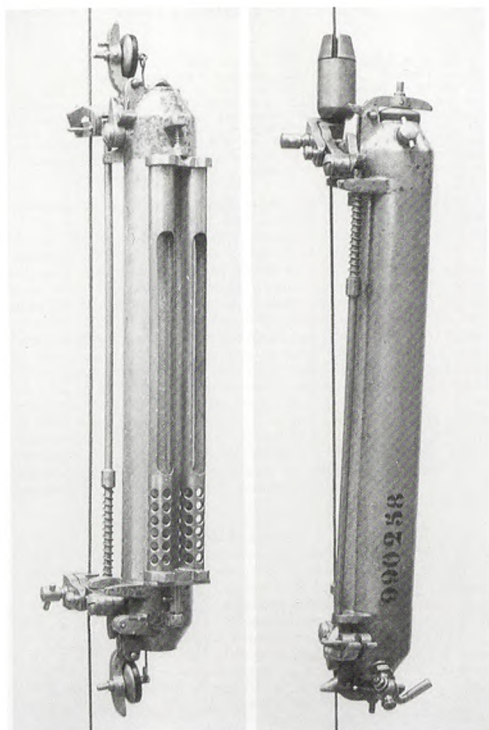
Vandet blev pumpet op fra Atlanterhavet og bragt til tanke på land. *Normalvandet* blev tappet på meget elegante, aflange 150 ml glasampuller, pakket i kasser og

sendt til laboratorier verden over. Herved blev det muligt internationalt at sammenligne saltkoncentrationer og beregne de bevægelser, der er fra overfladevand og ned i dybhavet. Indtil 1970'erne har mange studerende og yngre medarbejdere tjent en ekstraskilling ved dette arbejde – i begyndelsen på Københavns Universitet, men fra 1936 på Charlottenlund Slot og senere på Mariendalsvej på Frederiksberg. I dag er *Standard Sea Water*-laboratoriet en del af en international koncern. Normalvand anvendes fortsat over hele verden i forbindelse med kalibrering af måleinstrumenter i relation til saltholdighedsmålinger.



Figur 9. Instrumentmager og konservator Hans Jørgen Nielsen fremstiller en Knudsen-isolerende vandhenter. Foto fra ca. 1920.

Det stillede imidlertid også særlige krav til ekspeditionernes og havinspektionsskibenes instrumenteringer. Så en lang række udmærkede apparatkonstruktioner – især forskellige typer af vandhenter og bundprøvehenter – har været ekstra udfordringer til Knudsens opfindsomhed og til instrumentmagerens tekniske håndslag. Han designede også andre nye instrumenter fx buretter, pipetter og et spektrofotometer til måling af lysets nedtrængning i havet. Disse instrumenter og adskillige andre skyldtes Knudsens samarbejde med instrumentmager og konservator Hans Jørgen Nielsen, et samarbejde, der i mange år foregik i deres fælles selskab *Laboratoire Hydrographique*. Knudsen blev også kendt for at have forfinet konstruktionen af præcisions-termometeret, der tillod aflæsning af temperaturer med 0,01°C nøjagtighed på store dybder. Han udviklede også apparatur til nøjagtig bestemmelse af havvandets indhold af ilt, kvælstof og kuldioxid. Jacobsen, Nielsen og Knudsen udgjorde også et effektivt team igennem 1920'erne med bl.a. udviklingen af specialudstyr til B&W's bygning i 1931 af havforskningsskibet "Atlantis" til den amerikanske oceanografiske institution Woods Hole, som blev oprettet i 1930.



Figur 10. "Bouteille de Knudsen à renversement". Til venstre: åbne ventiler. Til højre: et faldlod har lukket ventilerne og vendt vandhenteren samt termometret. Foto: Y. Berard, NOAA (2014).

Uanset havenes urgamle betydning var man fortsat kun lige begyndt at forstå dem. Det var derfor først fra omkring år 1900, hvor Knudsen fik tabellagt klorindholdet og lavet en nem titreringsmetode, at der kom fremdrift i forskningen. Derved blev Knudsen en pioner inden for vandkemi og havvandets bevægelser og skabte sig verdensberømmelse inden for den disciplin, han anses som opfinder og grundlægger af: den fysiske oceanografi.

Foruden hans rent videnskabelige indsats har Knudsens administrative virksomhed været af uvurderlig betydning for de internationale havundersøgelers trivsel. Han har således hovedæren for de særdeles repræsentative adresser. Først var det på to fine adresser i København; men fra 1924 flyttede man ind i herskabsvillaen Villa Eltham ved Tuborg havn og i 1936 blev det til indflytning på Charlottenlund Slot, hvor også Kommissionen for Danmarks Fiskeri- og Havundersøgelser (DFH) fik til huse.

Knudsen var tilknyttet ICES' hovedkvarter 1902-1948 i forskellige ledende stillinger: hydrografisk assistent, redaktør for *Bulletin Hydrographique*, som udkom hvert kvartal, hydrografisk konsulent og "Chef du Service Hydrographique". Han var endvidere den danske delegerede ved "the Council" – bestyrelsen for ICES, hvor han var vicepræsident i perioden 1933-1947, og formand for *Hydrography Committee* fra den blev dannet i 1925 til 1947.

Derudover spillede Knudsen den centrale rolle sammen med en svensk ven og kollega, kemikeren Sven Otto Pettersson, i ICES lige fra etableringen i 1902. Under vicepræsidentperioden for ICES fra 1933-1947 fik Knudsen på grund af 2. verdenskrig god anledning til at oplære sin efterfølger mag.scient. Jens Smed, som

afløste J.P. Jacobsen i 1939, til at koordinere ICES i den internationale rådgivning på fiskeriområdet, specielt i de europæiske farvande.

Knudsen-relationerne er et ligningssæt til bestemmelse af vandføringer i marine områder. De er en udvidelse af den såkaldte bevarelsessætning, der udtrykker, at det vand, der strømmer ind i et givet bassin er lig med transporten ud af bassinet + det, der evt. opmagasineres i bassinet. Dette kan (lidt populært) skrives: $Ind = Ud + Opmagasiner$. Hvis bevarelsessætningen opstilles for både vandvolumen og for vandmasse, kan formlerne kombineres og benyttes til at udregne vandføringer. Princippet bag relationerne er ret simpelt, men skal det anvendes på større komplicerede systemer, er det ikke uproblematisk, da det er svært at holde styr på transport af volumen og masse i naturlige systemer. Ved mere komplicerede systemer anvendes således typisk dynamiske modeller til beregning af vandføringer [10].



Figur 11. ICES' hovedkontor i Dessaufamiliens Villa Eltham ved Tuborg havn i Hellerup. Foto fra ca. 1930.

Knudsens initiativ og medvirken var af afgørende betydning for oprettelsen af *Danmarks Fiskerihøjskole* og *Danmarks Akvarium*, som det i 1939 lykkedes at få rigmanden og ingeniør Knud Højgård til at finansiere, hvor så sønnen Mogens Højgård blev direktør. Akvariet blev opført ved strandvejsindgangen til Charlottenlund og har alle årene lagt megen vægt på formidling og forskning, hvilket positionerede det internationalt. I akvariet fandtes over 3.000 fisk og vanddyr fordelt på 70 akvarier med over 80.000 liter vand.

For sin videnskabelige og administrative indsats modtog Knudsen havforskernes fornemste pris, Agassiz-medaljen, i 1935;

Med ansættelsen i 1963 af svenskeren Nils G. Jerlov (1909-90) blev fysisk oceanografi omsider et universitetsfag. Her videreførte Jerlov sine grundlæggende studier af havvandets optiske egenskaber, bl.a. på et togt med *Dana III* til Sargassohavet i 1966 og på en skandinavisk, optisk-oceanografisk ekspedition i Middelhavet

i 1971. Sammen med geofysik og astronomi blev fysisk oceanografi i omkring 1990 indlemmet på Niels Bohr Institutet.



Figur 12. Indvielsen den 21. april 1939 af Danmarks Akvarium. Statsminister Stauning sidder, mens ingeniør Knud Højgård holder talen. Foto fra Berlingske Tidende.

ICES-organisationen har i dag et sekretariat med en generalsekretær. Det faglige arbejde foregår i arbejdsgrupper, fx sildearbejdsgruppen. Medlemmerne af disse er forskere fra lande med interesser i det pågældende fiskeri. I dag sendes arbejdsgruppens anbefalinger via ICES til EU-Kommissionen, der tager de politiske beslutninger om eventuelle reguleringer af fiskeriet. Alle hos ICES har naturligvis været under ekstra pres under de sidste fire års forhandlinger om fiskeriaftalerne i forbindelse med Brexit og Englands udtræden af EU fra 1. januar 2021.



Figur 13. Niels Bohr og Martin Knudsen med bl.a. Georg de Hevesy og Valdemar Poulsen ved afskedsreception på NBI den 4. februar 1943.

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

På Knudsens 70-årsdag udgav SNU en bog til hans ære, og bestyrelsen skrev i forordet til bogen [11]:

“Selskabet for Naturlærens Udbredelse ønsker på Deres 70-aars-dag at bringe Dem en hjertelig lykønsning i erkendelse af den dybe gæld, hvori Selskabets medlemmer står til Dem for Deres næsten 40-aarige ledelse af Selskabets virksomhed. Da De i aaret 1900 valgtes til formand for direktionen, indledtes en ny epoke for Selskabet for Naturlærens Udbredelse, i hvilken det lykkedes dem ikke alene på smukkeste måde at videreføre Selskabets gamle traditioner, men også at udvide rammerne for dets virksomhed til at omfatte sådanne nye betydningsfulde opgaver som udgivelsen

af “Fysisk Tidsskrift”, oprettelsen af H.C. Ørstedes 100-aars fond og uddelingen af H.C. Ørsted-medaljen. Næst efter Selskabets stifter har ingen som De bidraget til vort gamle Selskabs trivsel, og som et udtryk for den taknemmelighed, som hele Selskabet skylder Dem, ønsker dette for fremtiden at måtte betragte Dem som Selskabets æresmedlem. For at Selskabets årsberetning i dagens anledning kan fremtræde i en så festlig skikkelse som muligt, er denne i år blevet udvidet med et antal artikler af yngre og ældre videnskabsmænd, udarbejdet på grundlag af foredrag, der alle har været holdt i Selskabet for Naturlærens Udbredelse i løbet af de sidste år, og som vi håber vil give et indtryk af Selskabets levende virksomhed, som De har bidraget så meget til at skabe.

På direktionens vegne: Niels Bohr, Niels Bjerrum, P.O. Pedersen, Valdemar Poulsen og Ebbe Rasmussen.”

Litteratur

- [1] J.R.T. Seddon, H.J.W. Zandvliet og D. Lohse (2011) Knudsen gas provides nanobubble stability, *Phys.Rev.Lett.*, bind **107**, side 116101.
- [2] W. Steckelmacher (1951) Knudsen gauges, *Vacuum*, bind **1**, side 266.
- [3] P.A. Redhead (red.) (1994): *Vacuum science and technology*, Springer Verlag. Bogen har et kapitel om Martin Knudsen side 75–78 forfattet af H. Adam og W. Steckelmacher.
- [4] M. Knudsen (1934) *The Kinetic Theory of Gases – Some modern aspects*, Methuen’s Monographs on Physical Subjects, Methuen & Co. Ltd., London (1934).
- [5] R.E.H. Rasmussen (1949) Mindeord over Martin Knudsen, *Meddelelser fra ATV*, nr. 1, side 9–24.
- [6] M. Knudsen (1899) *Hydrography, The Danish Ingolf-expedition*, Report nr. 1, side 23–161.
- [7] M. Knudsen og J.P. Jacobsen (1940) *Urnormal 1937 or primary standard sea-water 1937*, Internat. Assn. Phys. Oceanogr., Pub.sci. 7, Liverpool.
- [8] H. Thomsen (1954) *Instructions pratique sur la détermination de la salinité de l’eau de mer par méthode de titrage Mohr-Knudsen*, Bulletin de l’Institut Océanographique de Monaco, bind **51**, side 1–20.
- [9] J. Smed (2002) Martin Knudsen – the oceanographer, *ICES Marine Science Symposia*, nr. 215, side 124–131.
- [10] M. Knudsen (1900) Ein Hydrographischer Lehrsat, *Hydrogr. Mar. Meteorol.*, bind **28**, side 316–320.
- [11] N. Bohr, N. Bjerrum, P.O. Pedersen, V. Poulsen og E. Rasmussen (1941) Martin Knudsen, 15. febr. 1941, Festschrift af Selskabet For Naturlærens Udbredelse.



Bjarne Fredberg Knudsen har i mere end 50 år været dokumentarist i farmaindustrien og bl.a. CEO for ALK-medicinalvirksomheden.

Gammakvant i tyngdefelt

– breddeopgave 90 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt to nye opgaver. Opgaven i sidste nummer af Kvant var denne breddeopgave (nr. 90 i rækken her i Kvant):

Breddeopgave 90. Gammakvant i tyngdefelt

Ved forsøg med emission af γ -kvanter fra kerner og påfølgende absorption i kerner af samme slags er der konstateret forskellige resultater, når henholdsvis kilde og absorber befinder sig lodret over hinanden, og når de befinder sig i samme vandrette plan. Forklar dette forhold. Begrund svaret.

Løsning

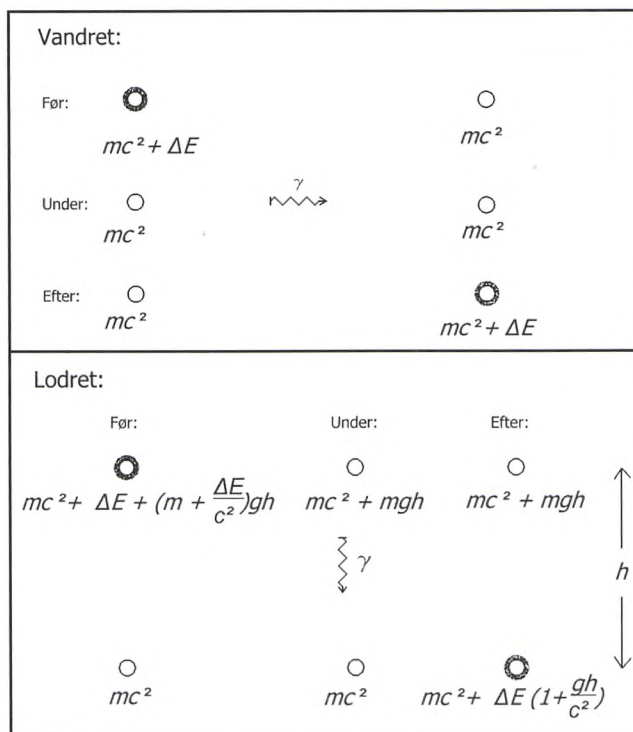
Figur 1 opsummerer overførsel af energi fra en anslået kerne til en kerne i grundtilstanden via et γ -kvant, når henholdsvis kilde og absorber befinder sig i samme vandrette plan eller lodret over hinanden. Det er antaget, at overførslen kan ske rekylfrit uden tilførsel af kinetisk energi til kernerne ved hverken emissionen eller absorptionen af γ -kvantet. Det svarer til at antage kernernes hvilemasse i grundtilstanden, m , for meget stor. I det følgende står c for lysets hastighed, ΔE for anslagsenergien af den anslåede kerne, g for tyngdefeltstyrken, og h for afstanden imellem kilde og absorber i det lodrette tilfælde.

I det vandrette tilfælde betyder energibevarelsen, når vi ser bort fra rekyll, at den absorberende kerne bliver bragt i den anslåede tilstand, den emitterende kerne havde. I det lodrette tilfælde er sagen mere kompliceret. Da de anslåede kerner har hvilemassen $m + \Delta E/c^2$ ifølge ækvivalensen imellem hvilemasse og hvileenergi, er den potentielle energi i det lodrette tilfælde $(m + \Delta E/c^2)gh$ i forhold til absorberens position. Efter udsendelsen af γ -kvantet har kernen den potentielle energi mgh . Energibevarelsen fra før udsendelsen af γ -kvantet til efter absorptionen af kvantet fører da til, at den anslåede absorberende kerne har fået forøget sin energi med $\Delta E(1 + gh/c^2)$ i kontrast til ΔE i det vandrette tilfælde af rekylfri resonansabsorption. Hvis ellers absorptionen kan finde sted.

Kommentar

At komme på den ide, at resonansabsorptionen kunne ske rekylfrit, er ikke trivielt. Det var det, Rudolf Mössbauer realiserede i en vandret opstilling i 1958 og

fik 1961-Nobelprisen i fysik for. Mössbauer-effekten er grundlæggende et kvantemekanisk fænomen. En emitterende kerne vil før emissionen af γ -kvantet ifølge usikkerhedsrelationen have sin impuls p_f sandsynlighedsfordelt omkring $p_f = 0$ med spredningen $\Delta p = \hbar/2\Delta x$, hvis kernen kun kan bevæge sig inden for et begrænset område, Δx , som det er tilfældet i kondenseret stof. $\hbar$ er Plancks konstant divideret med 2π . Efter udsendelsen af γ -kvantet fra kernen, vil dens impuls p_e være sandsynlighedsfordelt med samme spredning, men, på grund af impulsbevarelsen, nu omkring $p_e = -p_f$. Alligevel vil der være en rimelig sandsynlighed for, at emissionen sker rekylfrit, svarende til $p_e = p_f$, hvis $\Delta p/p_f$ er et stort nok tal.



Figur 1. Vandret og lodret rekylfri kerneresonansabsorption.

På samme måde, som der er en vis sandsynlighed for rekylfri emission, er der tilsvarende en vis sandsynlighed for rekylfri absorption. Derfor kan Mössbauer-effektens rekylfri resonansabsorption finde sted.

Et år efter Mössbauers opdagelse blev effekten brugt

af Pound og Rebka til at eftervise, at fotoner vinder energi ved fald på 22,5 m i Jordens tyngdefelt [1,2].

Det er denne eftervisning, som figur 1 og opgaven egentlig handler om. Ifølge figuren skal den absorberende kerne på grund af antagelsen om rekylfrihed og energibevarelse under processen absorbere energien $\Delta E(1+gh/c^2)$. Hvorimod den emitterende kerne afgav energien ΔE . Fra emission til absorption er γ -kvantets energi derfor øget med $\Delta Egh/c^2$. Den relative energiøgning er altså gh/c^2 . Den relative øgning af γ -kvantets frekvens ν er tilsvarende givet ved $\Delta\nu/\nu = gh/c^2$. Da energiniveauerne i den absorberende kerne er diskrete, kan absorptionen i figur 1 ikke umiddelbart finde sted. Absorptionen kræver en tilpasning af γ -kvantets energi til ΔE . Til det formål udnytter Mössbauers set-up Doppler-skiftet af frekvensen ved bevægelse af den absorberende kerne i forhold til den emitterende med varierende fart. Absorptionen fandt da sted ved farten u , givet ved

$$\frac{u}{c} \approx \frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gh}{c^2}. \quad (1)$$

Herved blev det bekræftet, at fotoner øger deres energi relativt med gh/c^2 , når de falder afstanden h i Jordens tyngdefelt.

Læg mærke til, at formlen ikke blev udledt ud fra den generelle relativitetsteori, som den normalt tages som en konfirmation af. Udledningen benytter energibevarelse, newtonsk mekanik og ækvivalensen mellem hvilemasse og hvileenergi udledt fra den specielle relativitetsteori. Ved eksperimentelt at vise, at fotoner accelereres i et tyngdefelt, foregriber Pound og Rebka logisk set den generelle relativitetsteori. Men teorien er altså ikke tvingende for at forklare eksperimentet. Modsat den berømte måling af lysets bøjning omkring Solen ved solformørkelsen i 1919. Her var der en faktor 2 til forskel mellem en newtonsk beregning på fotoner tillagt træ og tung masse svarende til deres energi og den generelle relativitetsteoris beregning, hvor der også må tages hensyn til rummets krumning.

Opgaven er ikke en sædvanlig breddeopgave. Den bevæger sig ud over breddekursets nuværende pensum.

I almindelighed lægger vi vægt på overensstemmelse mellem eksamensopgaver og undervisningsopgaver i en grad, så undervisningen som det vigtigste bygger på tidligere eksamensopgaver. I megen undervisning kan det være et problem, som det hedder på engelsk, at "the matter meant, the matter taught, the matter learnt, and the matter assessed" ikke hænger tæt nok sammen. Vores måde at sikre sammenhængen imellem kursets formål, undervisningen, de studerendes læring, og vurderingen heraf ved eksamen, er da den radikale; at lade formålet styre udarbejdelsen af eksamensopgaverne og lade undervisningen fra starten basere sig på tidligere eksamensopgaver, så de studerende derved fra starten samtidigt kan orientere sig mod eksamen og formålet med kurset. Opskriften er ikke uden problemer. Den er som at lære nogen at svømme ved at skubbe dem i vandet. Og det kræver opmærksomhed på de studerendes ve og vel. Herunder at vi overholder overensstemmelsen mellem karakteren af de opgaver, der arbejdes med i undervisningen, og karakteren af eksamensopgaverne.

Med opgaven her, der ikke har været stillet som eksamensopgave, men alligevel benyttes i undervisningen, har vi ikke kunnet stå for fristelsen til at give udsyn til noget, der ikke er eksamenspensum. Men det er undtagelsesvist, at vi i undervisningen arbejder med opgaver, der ikke har eller kunne have været stillet til eksamen.

Breddeopgave 91 og 92. Benzinforbrug og covid-smitte

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne overveje løsningen til disse opgaver til breddekurset på RUC (fra eksamen juni 2011 og eksamen januar 2021, nr. 91 og 92 i rækken her i Kvant):

Hvordan afhænger benzinforbruget og CO₂-udledningen ved bilkørsel per kørt kilometer af hastigheden, der køres med? Begrund svaret.

I lukkede rum er der fare for at blive smittet med coronavirus, selvom der holdes afstand, hvis ikke der luftes ud. Det skyldes, at mikrodråber (aerosoler) af virussen hænger i længere tid i luften, og derfor kan bevæges længere rundt, end de større dråber, som undgås ved at holde afstand. Hvordan afhænger den tid, som mikrodråberne hænger i luften, af deres størrelse? Begrund svaret.

Løsninger og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] R. V. Pound og G. A. Rebka (1959) "Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance", *Phys.Rev.Lett.*, bind 3, side 439–441.
- [2] R. V. Pound og G. A. Rebka (1960) "Apparent weight of photons", *Phys.Rev.Lett.*, bind 4, side 337–341.

Generalforsamling i Astronomisk Selskab

Astronomisk Selskab holder generalforsamling den 17. april 2021. Det nøjagtige tidspunkt og sted for generalforsamlingen meldes ud senere.

Inge Lehmanns Legat

Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab indkalder ansøgninger til Inge Lehmanns Legat, med ansøgningsfrist den 1. april 2021.

Legatet skal fortrinsvis anvendes til længerevarende forskningsophold eller videregående forskningsuddannelse i udlandet for forskere, der har afsluttet deres ph.d.-uddannelse eller på anden vis har opnået tilsvarende erfaring.

Legatet tildeles (1) forskere inden for geofysik – primært til studier af Jordens indre og dens overfladelag – eller (2) forskere inden for empirisk psykologi. Empirisk forskning baseret på data gives forrang, og rent teoretisk forskning støttes kun undtagelsesvis. For yderligere information henvises til Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskabs hjemmeside www.royalacademy.dk. Vi minder ansøgerne om, at de enkelte krav til ansøgning (fx sideantal) skal overholdes.

Ved rejseaktivitet må afrejse tidligst være den 1. juni 2021.

Succesfuld Marslanding

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

Som en del af NASAs omfattende program til udforskningen af Mars landede roveren Perseverance på Mars i februar 2021, efter at den blev sendt afsted fra Jorden i juli 2020. Perseverance skal blandt andet undersøge geologien i området omkring Jezerokrateret og mulighederne for, at der engang har været liv på planeten.

Torsdag den 18. februar kl. 21.55 dansk tid landede NASAs rumfartøj Perseverance i Jezerokrateret på Mars. Landingen blev fulgt fra NASAs missionshovedkvarter, Jet Propulsion Laboratory (JPL), i Pasadena.

Perseverance var alene under nedstigningen gennem Mars' atmosfære i de såkaldte "seven minutes of terror": De ca. syv minutter, hvor NASA (og resten af verden) ventede i spænding. På grund af signalforsinkelsen fra Mars gik der 11,5 minutter, før vi på Jorden fik at vide, at modulet var landet med succes, og et minut senere kom det første sort-hvide billede frem af den golve Marsørken. Siden da har Percy, som Perseverance bliver kaldt, sendt store mængder data hjem, bl.a. billeder af overfladen på Mars, en video af landingen og lydoptagelser af Mars-vinden.



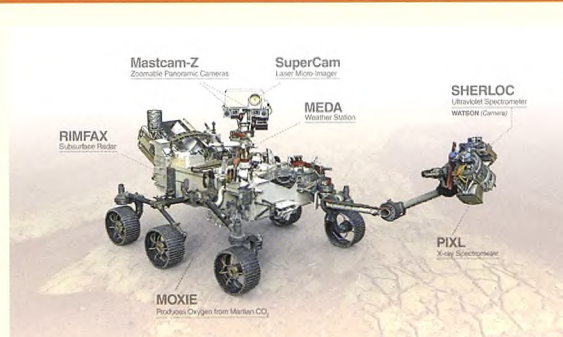
Figur 1. "Himmelkranen" fungerer meget som en helikopter, der ved hjælp af kabler sænker roveren ned til overfladen. Så snart roverens hjul rammer overfladen, klipper den kablerne over og flyver væk fra landingsområdet.

Perseverance er den største og mest avancerede rover, som NASA har bygget. Perseverance er på størrelse med en bil og er en forbedret udgave af roveren Curiosity. Flere af instrumenterne på Perseverance har forskere fra Danmarks Tekniske Universitet og fra Niels Bohr Institutet været med til at konstruere, bl.a. Perseverances avancerede PIXL-kamera, som kan tage detaljerede billeder med en opløsning på 3–5 mm tæt på roveren og 2–3 m længere væk i horisonten. Kameraet skal hjælpe forskerne med at forstå Mars' geologi og med at udvælge de områder, Perseverance skal undersøge nærmere og tage prøver fra. Andre af Perseverances kameraer kan optage video i høj kvalitet samt panorama- og 3D-billeder.

Perseverance er det 9. rumfartøj, som lander på Mars. Perseverance blev opsendt den 30. juli 2020, hvor den udnyttede, at Jorden og Mars var tæt på hinanden.

Syv måneder senere var fartøjsmodulet fremme ved Mars og en kapsel med Perseverance blev frakoblet og sendt gennem Mars' atmosfære. Kapslen ramte Mars' atmosfære med en hastighed på 19.500 km/t og udløste herefter en 21 m bred faldskærm, som den brugte til at bremse kapslens hastighed ned til 320 km/t. Dernæst blev varmeskjoldet sprængt af, mens en radar ledte efter et sikkert landingssted. Endelig blev faldskærmen frakoblet, og landingsmodulet brugte sine jetdyser til at flyve videre med. Landingsmodulet, der var fastgjort til Perseverance med nylonsnøre, fungerede som en kran, der firede Perseverance ned til overfladen for derefter at flyve væk. Denne manøvre kaldes "skycrane manœuvre" (himmelkran manøvre).

Instrumentpakkerne på Perseverance



Mastcam-Z er et avanceret kamerasystem med panorama- og stereoskopisk billedfunktion. Instrumentet bestemmer også mineralogien på Mars' overflade og hjælper med roveroperationer.

SuperCam leverer billeder og kemiske analyser. Instrumentet kan også detektere tilstedeværelsen af organiske forbindelser i klipper og regolitter på afstand. PIXL er et røntgenfluorescensspektrometer, der også indeholder et kamera med høj opløsning for at bestemme sammensætningen af Mars' overfladematerialer.

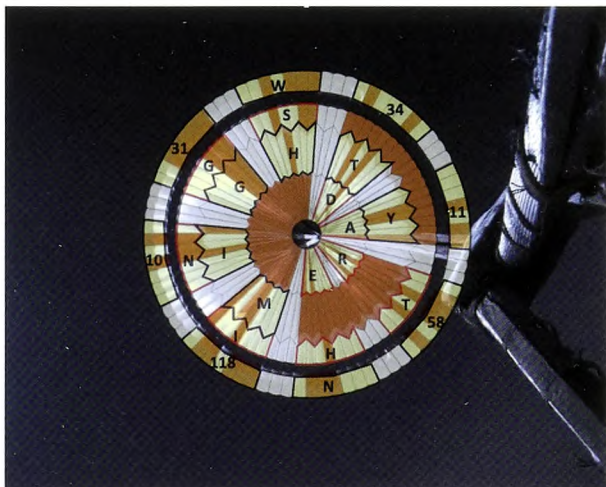
SHERLOC er et spektrometer, der giver billedanalyse i høj opløsning og bruger en ultraviolet laser til at bestemme finskala-mineralogi og detektere organiske forbindelser.

Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) skal producere ilt fra kuldioxid i atmosfæren på Mars.

Mars Environmental Dynamics Analyzer (MEDA) er et sæt sensorer, der måler temperatur, vindhastighed og -retning, tryk, relativ fugtighed og støv.

Radar Imager for Mars' Subsurface Experiment (RIMFAX) er en radar, der registrerer geologiske strukturer i undergrunden. [1]

Som noget nyt bruges teknologien “terræn-relativ navigation” til at ramme landingsstedet. Med den teknologi kan Perseverance hele tiden tage billeder af Mars’ overflade under landingen, mens den sammenligner dem med kendte billeder taget af fartøjer i kredsløb omkring Mars. Metoden gør, at Perseverance let kan navigere og ramme sit landingssted med en fejlbestemmelse på under 40 m, hvilket er flot i forhold til den tidligere NASA-rover Curiosity, der havde en fejlbestemmelse på op til 3 km.



Figur 2. Koden på Perseverances faldskærm læses indefra og ud i grupper af 10 tegn begyndende med sekvensen 0000000100, som er 4 i binær notation. Hertil lægges 64, det giver 68, som er ASCII-koden for D. Næste sekvens er 0000000001, som bliver til A efter samme princip, osv. [2]

Perseverance landede i Jezerokrateret, hvor der for 3,5 milliarder år siden var en sø, og da der dengang var vand, var der muligvis også liv, hvorfor forskerne ønskede, at roveren skulle lande netop her. Dengang var der, ud over vand, også en tykkere atmosfære og et magnetfelt, der beskyttede planeten mod stråling. Alt sammen vigtige betingelser for at opretholde liv.

Nu skal Perseverance kigge efter spor fra liv på Mars ved at identificere områder, der kunne have haft mikrobakterielt liv og tage prøver fra overfladen af bl.a. klippesten, ler og jord. Desuden skal roveren kigge efter biosignaturer, altså tegn på mikrobakterielt liv, og teste iltproduktionen fra atmosfæren på Mars, hvilket er essentiel viden, hvis mennesker en dag skal til Mars.



Figur 3. Ingenuity-helikopteren.

For at finde biosignaturer skal Perseverance skyde laserstråler på klipper og analysere den damp, der udsendes. Herefter vil Perseverance bore i de klipper, hvor analysen viser flest tegn på tidligere liv, samt tage

prøver, som gemmes i forseglede rør, så de kan tages med tilbage til Jorden af fremtidige missioner. NASA har allerede planer om en rumraket til Mars i 2026, som skal hente Perseverances opsamlede prøver. De forventer at kunne tage prøverne med tilbage til Jorden i 2031.

Med om bord har Perseverance en helikopter, der skal udforske Mars oppefra. Det er første gang en helikopter skal flyves på en anden planet, og forskerne håber på at få videomateriale af det terræn, som Perseverance skal igennem.



Figur 4. Landingsområdet fotograferet med roverens Mastcam-Z den 20. februar 2021.

Den store faldskærm har ikke kun på Perseverance under nedstigningen, men også på en hemmelig kode. Da NASA ville farve faldskærmen med et mønster, så de kunne holde øje med dens orientering under landingen, fandt en ingeniør på at kryptere en besked i mønsteret. Med en binær kode er der krypteret teksten “Dare Mighty Things” samt GPS-koordinaterne for JPL-hovedkvarteret. “Dare Mighty Things” er præsident Roosevelts ord og motto for JPL. Kun et par forskere kendte til den krypterede kode, men det tog ikke lang tid, før seerne knækkede den.

NASA og ESA har flere fartøjer i kredsløb omkring Mars, som hjælper med at tage billeder af Perseverance og til at kommunikere mellem Jorden og roveren. Den 5. marts kørte roveren de første 5 m i krateret, og det er håbet, at den kan tilbagelægge en strækning på 20 km. Vi glæder os til at høre mere nyt fra Mars.

Litteratur

- [1] NASA Mars Exploration Program, mars.nasa.gov
- [2] Ingeniøren, [ing.dk](https://www.ingenioren.dk)

300.000 siders videnskab

Videnskabernes Selskab har lanceret en åben platform publ.royalacademy.dk, hvor stort set alle bøger og artikler, der nogensinde er blevet udgivet hos Videnskabernes Selskab, kan læses og downloades gratis. Det drejer sig om 6.500 afhandlinger fordelt på ca. 300.000 sider, og der er derfor rig mulighed for at gå på opdagelse i en masse videnskabeligt stof om både astronomi, kemi, fysik og meget mere.

Årets tal – et talteoretisk mønstereksempel og en god selskabsleg

Christian Marinus Taisbak

Årstallet 2021 har dette nummer, fordi munken Dionysius Exiguus, Johnny den Lille, i sin tid “omdøbte” året 1285 efter Roms grundlæggelse til 532 efter Kristi fødsel. Dette årstal var rent matematisk bestemt, fordi 532 er 19 gange 28, og disse to tal spillede vigtige roller i fastlæggelsen af påskedag. Desuden vidste Dionysius, at tallet ikke var helt forkert. Indtil denne dag er der ikke enighed om, hvor lidt forkert det er i forhold til juleevangeliet om Jesu fødsel (Lukas kap. 2).



Figur 1. Dionysius Exiguus (ca. 470–550.)

Men 2021 spiller med i to morsomme matematiske spil. Det ene hedder *at opløse et tal i sine primfaktorer*, det andet *at finde to kvadrattal, hvis differens er det forelagte tal*. Ethvert helt tal er enten et primtal (som kun kan divideres med 1) eller et produkt af to eller flere primtal, hvor dette produkt er entydigt bestemt – en hovedsætning i talteori. Tallet 2021 er et produkt af kun to primtal, 43×47 . Det særlige ved disse to er, at de

ligger så tæt ved hinanden. Det gør det lettere at forklare og løse den opgave, vi nu vil tage fat på:

Hvis to primtal følger umiddelbart efter hinanden (som for eksempel 11 og 13), kaldes de tvillinger. Men 43 og 47 er matematiske “trillinger” sammen med det mellemliggende 45, som dog er adopteret, for 45 er ikke et primtal, da 3 må gå op i mindst et af tre på hinanden følgende ulige tal. De tre har en matematisk forbindelse, nemlig 2, idet 47 er 45 plus 2 og 43 er 45 minus 2, som vi skriver med symboler: $47 = 45 + 2$ og $43 = 45 - 2$.

Nu lyder en sand sætning om sådan en sum og differens: *To tals sum gange de samme tals differens er lig med differensen mellem tallenes kvadrater*, i vores tal: $(45 + 2) \times (45 - 2) = 45^2 - 2^2$. Som kontrol udregner vi: $2025 - 4 = 2021$. Årets tal er altså produktet af 43 og 47 og en differens mellem to kvadrattal 2025 og 4.

Vores lille nytårsleg – som kan bruges længe under isolationen – går nu således: Tænk på to tal (nok højst to cifrede, ikke nødvendigvis primtal), hvis forskel er et lige tal, for eksempel 11 og 19; gang det ene med det andet, $11 \times 19 = 209$. Opgave: **Find to kvadrattal, hvis forskel er 209.**

Næste trin er at finde midtertallet mellem 11 og 19 (15) og afstanden dertil fra hvert af tallene (4, den halve forskel); så er $11 = 15 - 4$ og $19 = 15 + 4$.

Af vores læresætning véd vi nu, at 209 er differensen mellem 15^2 og 4^2 , $225 - 16$.

Alt dette har vi moret os med, fordi årets tal har en speciel primtalsopløsning. Derved fik vi anledning til at kende en af de vigtigste sætninger i elementær talteori, om to tals sum og differens. At den også er en af de allerældste sandheder om tal, kendt i Ægypten og Nærorienten for 3.000 år siden, gør vel kun året ekstra interessant? Den udtrykkes og anvendes geometrisk i bog II af Euklids *Elementer* (fra ca. 300 f.Kr.), hvoraf Bog I–VI foreligger i ny oversættelse hos Gyldendal inden længe i år 43×47 .