

KVANT August 2024 2

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 35. årgang

MINITEMA OM DANSK RUMFART

- DANMARK ER GODT MED I RUMMET
- VAMB (VIRTUAL ASSISTANCE MENTAL BALANCE)
- DEN INTERNATIONALE RUMSTATION OG DANMARK (DEL 1)
- VERA C. RUBINOBSERVATORIETS STORE STUDIE AF RUM OG TID
- KAN NANOPARTIKLER DETEKTERE KRÆFT? • AKTUELLE BØGER
- INTERVIEW MED NIELS ROLAND • BREDDEOPGAVER • KVANTNYHEDER

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 (AS)

Dansk Fysisk Selskab (DFS)

Selskabet for Naturlærens Udbredelse
(SNU)

Redaktion

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

Michael Cramer Andersen,

Christianshavns Gymnasium

Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-
redaktør), DTU Electro

Ole Mørk Lauridsen, SNU

Steen Lærke, AS

Maren Malling, DFS

John Rosendal Nielsen

Lars Occhionero, AS

Dorte Olesen, SNU

Finn Berg Rasmussen,

Niels Bohr Institutet, KU

Svend Erik Rugh

Abonnementspris : 185 kr./år.

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

Abonnement tegnes på www.kvant.dk.

Øvrige henvendelser vedr. abonnement til
Christine Pepke Gunnarsson:

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

Annoncepriser

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

1/4 side: 1600 kr.

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

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.

Oplag: 2.500.



Produktionsplan

Nr. 3-2024 udkommer ca. 15. september

Nr. 2-2024 udkommer ca. 1. december

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

Indhold:

Danmark er godt med i rummet

Ole J. Knudsen 3

Den Internationale Rumstation og Danmark

– Første del: Fra Skylab til Shenanigans

Carol Anne Oxborrow 6

VAMB (Virtual Assistance Mental Balance) – et værktøj til vedligeholdelse af astronauters psyke

Per Lundahl Thomsen 10

Vera C. Rubinobservatoriets store studie af rum og tid

Christa Gall 13

Kan nanopartikler detektere kræft?

Simon Peter Slot Jessen 17

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen 21

Interview med Niels Roland om Bohrs kvantespring i København

Michael Cramer Andersen 23

Boltzmannfaktoren – breddeopgave 107, 108, 109 og 110 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen 26

Om nøjagtighed og opløsningsevne

Erik Høg 29

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Cecilie Pedersen 30

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Maren Malling 31

Nyt fra Astronomisk Selskab

Lars Occhionero 32

Kvant-nyheder: Kvantetrommen

Christine Pepke Gunnarsson 32

Kvant-nyheder: Universets allertidligste galakse

Christine Pepke Gunnarsson 33

Kommende foredrag

. 34

Helten Arkimedes

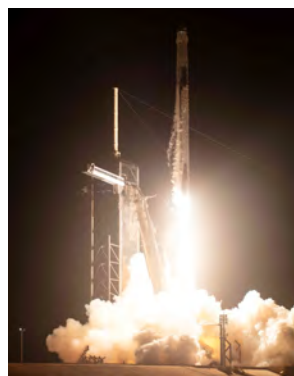
John Rosendal Nielsen 35

Kvant-nyheder: Turbulensen i en kop kaffe

Christine Pepke Gunnarsson Bagsiden

Minitemanummer om dansk rumfart

Dette nummer af Kvant har dansk rumfart som tema. Forsiden viser en SpaceX Falcon 9-raket, der den 26. august 2023 sendte Dragon-rumfartøjet op til Den Internationale Rumstation. Ombord var NASA-astronaut Jasmin Moghbeli, ESA-astronaut Andreas Mogensen, astronaut Satoshi Furukawa fra Japan Aerospace Exploration Agency og Roscosmos-kosmonauten Konstantin Borisov. Opsendelsen skete fra Kennedy Space Center i Florida. Foto: NASA/Joel Kowsky.



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

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

Danmark er godt med i rummet

Ole J. Knudsen, Stellar Astrophysics Centre, ESON-Danmark, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

De færreste tænker på Danmark som en rumnation, hvis vi ikke lige har en astronaut i kredsløb, som i det forløbne halve års tid, men i forhold til befolkningens størrelse er vi ganske godt med. "Rummet" er i hastig vækst, både indenfor industri og forskning, og både forskningsresultater og "dimser" fra Dansk rumforskning er højt i kurs internationalt.

Vi starter med en lille hurtig quiz. Svarene er måske desværre overraskende, fordi almen viden om rummet og Danmarks bidrag er ret begrænset. De findes i slutningen af artiklen.

1. Hvor mange danske satellitter er der opsendt til dato?
2. Hvor mange danske virksomheder arbejder indenfor rumbranchen?
3. Hvor mange mennesker har der været i rummet?
4. Hvor længe har Den Internationale Rumstation ISS konstant haft mennesker ombord?
5. Hvor mange mennesker er der i rummet lige nu?
6. Hvor længe har et menneske opholdt sig uafbrudt i rummet?



Figur 1. De to første danske astronauter, Andreas Mogensen og Rasmus Klump, nyder udsigten til Jorden. Foto: ESA.

Fra 26. august 2023 til den 12. marts 2024 har ESA's astronaut Andreas Mogensen opholdt sig ombord på Den Internationale Rumstation ISS, hvor han har været kommandør. Det har naturligt nok vakt en hel del opmærksomhed i Danmark, og forhåbentlig vil det smitte af på interessen blandt børn og unge for en karriere indenfor rumbranchen. Det har i hvert fald været formålet med at anvende omkring 17 millioner kroner til udstillinger, foredrag, undervisningsprojekter, konkurrencer og PR-arrangementer centreret omkring hjemmesideportalen Rumrejsen2023.dk. Desuden har dansk industri og danske forskere bidraget med 10 videnskabelige eksperimenter, som Mogensen har arbejdet med under Huginn-missionen, ind imellem alt

hans andet arbejde ombord, og han har medbragt en snes danske "kulturgenstande" som rækker fra Niels Bohrs Nobelprisguldmedalje til en Rasmus Klump-bamse.



Figur 2. ESA-astronaut Andreas Mogensen i færd med et af mange "in-flight calls" til Danmark fra Columbus-modulet på ISS, og med Rigsfælleskabets flag i baggrunden. Skærmdump: OJK.

Hvad der er mindre synligt, er, at der i Danmark er omkring 2.400 mennesker, som arbejder indenfor rumområdet, og at tallet er stigende. Investeringer i området giver et afkast på omkring 4,5 gange det investerede beløb, og det er umådeligt flot.

Der skelnes almindeligvis imellem rumaktiviteter indenfor "Upstream" og "Downstream". Det er indenfor det sidstnævnte område, at de danske aktiviteter toppe med over 140 virksomheder, som bruger data fra danske og udenlandske rumfartøjer til deres arbejde. Godt 50 virksomheder sender satellitter og dele til rumfartøjer den anden vej, altså "Upstream", og nogle gør selvfølgelig begge dele. I alt har rumvirksomhederne en omsætning på mere end 6,2 milliarder kroner i 2017-tal.

Ud over de aktiviteter, som giver økonomisk afkast, er flere af universiteterne stærkt involverede i rummet. Antallet af udbudte kurser med nogen relation til rumområdet var i 2021 i alt 221, og her er ikke indregnet kurser og forskningsaktiviteter indenfor astrofysik, medmindre forskningsområdet er afhængigt af data fra rumsonder og satellitter. Vi tillader os i denne sammenhæng ikke at medregne Ole Rømer, Tycho Brahe og lignende som rumforskere, uanset deres kvaliteter i øvrigt.

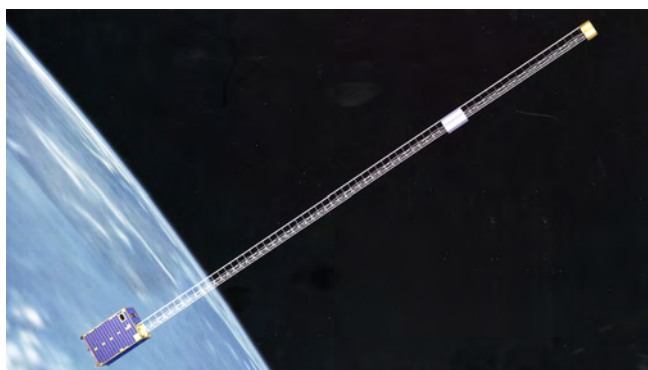
I forbindelse med en del af disse kurser får de studerende helt konkret "fingrene i fadet": både på Aalborg Universitet, Aarhus Universitet og DTU planlægger og bygger man småsatellitter, de såkaldte CubeSats, og

de studerende er med hele vejen. De er også med til at kontrollere satellitterne og nedtage data for de satellitter, som kommer godt i kredsløb. De studerende er umådeligt efterspurgt i erhvervslivet både i Danmark og i udlandet, når de på denne måde har været med i både den teoretiske og den praktiske del af rumforskningen.

Den største samarbejdspartner for dansk rumforskning er Den Europæiske Rumorganisation ESA. Danmark bidrager i alt med cirka 0,8% til ESA's budget, eller cirka 45 kroner årligt pr indbygger. Det er på højde med Polens bidrag. Bidraget er opdelt i et obligatorisk fællesbidrag og en række bidrag til ESA's ikke-obligatoriske programmer. I perioden 2023–2025 er Danmarks bidrag cirka 734 millioner kroner, men Danmarks bidrag er i ESA's seneste budget faldet 0,1 procentpoint.

Ifølge både astronaut Andreas Mogensen og flere rumforskere og rumfirmaer er det alt for lidt, hvis vi skal kunne følge med i udviklingen indenfor dette frontlinieområde, og hvis vi skal kunne få lov at være med i en række nye programmer uden at "blive sat udenfor døren". Tendensen og den manglende politiske interesse for rumforskning er helt uforståelig, blandt andet fordi Danmark ikke forærer disse penge væk. De kommer godt og vel tilbage til landet igen i form af forskellige industrikontrakter med ESA. For hver investeret krone i rumbranchen er afkastet desuden omkring 4,50 kroner!

Ud over samarbejdet indenfor ESA er vores største rumsamarbejdspartner NASA, men danske universiteter og virksomheder samarbejder desuden med russiske Roskosmos, med Kinas rumorganisation CNSA og med Indiens ISRO.



Figur 3. Ørsted-satellitten i rummet med udfoldet 8 m lang instrumentbom. Illustration: DTU-Space.

Skulle der være nogle af læserne af denne artikel, som har drømmen om at blive astronaut, så hold øje med rumnyhederne. Det er planen, at ESA indbyder til en ny ansøgningsrunde i 2027, så der skulle være tid til at kvalificere sig, og der er gode råd at finde på www.BlivAstronaut.dk. Men rumbranchen har brug for mange, mange flere motiverede og velkvalificerede medarbejdere i snart sagt alle fag. Dygtige håndværkere og teknikere, ingeniører og forskere – der er plads til alle, hvis man ønsker et job, som er udfordrende og aldrig ensformigt.

Den næste danske satellit i klassen lidt over de små CubeSats er nu fuldt finansieret, og projektet går ind i

en konkret planlægningsfase. Satellitten hedder STEP. Den er på størrelse med et pænt stort køleskab. Den indeholder blandt andet et astronomisk teleskop med en diameter på 20 centimeter og en spektrograf, og den skal, som navnet "STars and ExoPlanets" fortæller, bruges til at følge op med detaljerede observationer af nogle af de jordlignende exoplaneter, som er fundet blandt andet med de større rumprojekter Kepler, TESS og de kommende Plato og ARIEL. STEP udvikles og bygges i et samarbejde imellem en række danske universiteter og rumvirksomheder. Projektet ledes fra Aarhus Space Centre på Aarhus Universitet. Prisen bliver omkring 85 millioner kroner, og opsendelsen bliver sidst i dette årti.

Blandt rækken af danske satellitter skiller især Ørsted sig ud. Den er med fuld ret blevet kaldt "Den lille seje satellit" (i en bogtitel). Med en vægt på omkring 60 kg og en største udstrækning på 72 cm – som et rullekabinet med skrivebordsskuffer, kom den med som passager ved en amerikanske raketopsendelse den 23. februar 1999. I pressen var man mest interesseret i at berette, at det tog 10 udsatte forsøg, før opsendelsen endelig blev til noget, men Ørsted var nu ikke årsag til nogen af udsættelserne. Formålet med Ørsted var præcisionsmålinger af Jordens magnetfelt, og det klarede den lille satellit så fint, at de modeller for magnetfeltet, som blev beregnet fra Ørstedes data, i en årrække var international standard. Den formelle datamodtagelse blev afsluttet i maj 2015, fordi SWARM-satellitterne, som blev opsendt i november 2013 kunne tage over og levere endnu bedre data. Selvom Ørsted-satellittens levetid var planlagt til 14 måneder, fungerer den forunderligt nok stadigvæk her i 2024, hvor den har fejret sit 25-årsjubileum.



Figur 4. Bomærke for studentersatellitten DISCO-2. Illustration: DISCO-2/AU.

De andre danske satellitter har alle været CubeSats i størrelsesordenen 10–40 centimeter. De er enten fremstillet som studenterprojekter på universiteterne, eller af firmaer, som er udsprunget af nogle af disse studenterprojekter, og branchen er i rivende udvikling. De fleste af disse småsatellitter er opsendt i baner, som passerer de arktiske egne, hvor de bruges til forsøg med kommunikation, fotografering og overvågning i samarbejder blandt andet med Forsvaret og Danmarks

Meteorologiske Institut. Et eksempel er DISCO-2, som i et studenter samarbejde imellem fire danske universiteter fra midt i 2024 skal observere gletcherstrukturer og -udvikling samt temperaturer i arktiske områder i havet og på land, for på den måde at få bedre oplysninger om gletcherhernes afsmeltning.

Det til nu største danske rumprojekt er instrumentet ASIM, som siden 2018 har været installeret udvendigt på ISS. ASIM observerer udladninger i Jordens atmosfære, som udsendes fra skyerne og opad, og som er langt kraftigere end de lyn, vi normalt ser mellem skyerne og jordoverfladen. Denne mangfoldighed af fænomener med navne som røde feer (red sprites), elver og blå stråler (blue jets), er kortvarige udladninger af ukendt oprindelse, og som forekommer sammen med udbrud af gamma- og røntgenstråler, som ASIM også registrerer. De optræder i så stort antal, at de formentlig har indvirkning på atmosfæren og dermed på klimaet.



Figur 5. ASIM er den blå kasse, som her ses monteret på det europæiske Columbus-modul på Den Internationale Rumstation ISS. Foto: NASA.

ASIM er en "kasse" på 314 kg, som er omkring en meter på hver led, og projektet er et samarbejde imellem flere danske virksomheder og universiteter både i Danmark, Norge, Spanien, Polen og Italien.

Blandt de mange andre upstream-aktiviteter, hvor danske firmaer og forskere er dybt involverede, kan nævnes motionscykler, røntgendetektorer og -spejle, stjernekameraer, strømforsyninger og testudstyr.

Downstreamaktiviteterne er i omfang noget mere omfattende end det, vi fra Danmark sender den modsatte vej. Det, som hentes ned, er i bred forstand data indhøstet af en bred vifte af satellitter og rumsonder. Virksomheder og institutioner modtager, bearbejder og videredistribuerer data til for eksempel navigation, logistikplanlægning, meteorologi, jordobservationer og kommunikation. Brugerne spænder fra landmænd, som pløjer ved hjælp af GPS-navigation, lastvognsfirmaer, som optimerer deres vognpark og opgaver over planlæggere og beredskabstjenester i det offentlige, og til forskere, som studerer Universets struktur, stjerner, exoplaneter og forholdene på måner og planeter i vores eget nabolag, inklusive forandringer her på Jordkloden.

Danmark er godt med indenfor branchen "rummet" på de fleste områder, og der er rigtig god udsigt til, at rumområdet bliver et kraftigt voksende aktivitetsfelt i en overskuelig fremtid – en fremtid, hvor alle brancher råber på veluddannet arbejdskraft og gode hoveder.

Svar på quizen

1. Cirka 12 danske satellitter. Det kan diskuteres, hvad det vil sige, at en satellit er dansk. Da Ørstedesatellitten blev sendt op, var der for eksempel ingen statslig institution i Danmark, som kunne tage ansvaret, så det blev overdraget til det tyske meteorologiske institut.
2. Der er cirka 200 danske virksomheder, som hovedsagelig har deres aktiviteter indenfor rumbranchen.
3. Pr 1. januar 2024 har cirka 683 forskellige personer været over "Karman-linien", som er 100 km over jordoverfladen.
4. Siden den 2. november 2000 har der konstant været mennesker ombord på ISS – altså i snart 24 år.
5. I skrivende stund 10; tre ombord på den kinesiske rumstation Tiangong og 7 ombord på ISS, men det varierer ofte. På ISS kan der maksimalt opholde sig 11 personer, og der er desuden planlagt missioner, hvor for eksempel et Dragon-rumskib kredser uafhængigt af rumstationerne med 3-5 personer ombord.
6. Kosmonaut Valery Polyakov har opholdt sig uafbrudt i 437 dage i rummet ombord på rumstationen MIR. Kosmonaut Sergej Krikaljov har i alt opholdt sig 804 dage i rummet. Han blev opsendt som sovjetborger og landede som russer!

Litteratur

- [1] Webportalen www.Rumrejsen2023.dk.
- [2] Opdateret statistik om rumerhvervet samt analyse af rumerhvervets vækstpotentiale, Rambøll, 2018: <https://ufm.dk/publikationer/2018/opdateret-statistik-om-rumerhvervet-samt-analyse-af-rumerhvervet-vækstpotentiale>.
- [3] This is ESA: https://esamultimedia.esa.int/docs/corporate/This_is_ESA_DK_LR.pdf.
- [4] Naturvidenskabernes Hus, ESERO: <https://nvhus.dk/wp-content/uploads/2024/01/Rumrelaterede-uddannelser-og-virksomheder-i-Danmark.pdf>.
- [5] DI Analyse – Danmark skal med i rumkapløbet: <https://www.danskindustri.dk/arkiv/analyser/2023/5/danmark-skal-med-i-rumkaplobet/>.
- [6] Videnskab.dk – analyse af økonomien: <https://videnskab.dk/rummet/kritik-danmark-staar-paa-sidelinjen-under-oekonomisk-rumfartseventyr/>



Ole J. Knudsen har en bachelorgrad i astronomi og fysik, og har arbejdet i seks årtier med formidling af naturvidenskab; især astronomi og rumforskning i medierne, som foredragsholder og som skribent, samtidig med at han indtil 2014 var leder af planetariet på Steno Museet i Aarhus. Han er bl.a. kommunikationsmedarbejder på Aarhus Space Centre på Aarhus Universitet.

Den Internationale Rumstation og Danmark

– Første del: Fra Skylab til Shenanigans

Carol Anne Oxborrow, DTU Space

Jeg har arbejdet med adskillige projekter på ISS, den Internationale Rumstation, siden 2014 – først på Andreas Mogensens 1s-mission og Thor, og derefter med ASIM, Thor-Davis og TOTEM. Her vil jeg give en hurtig rundvisning i ISS, som er kulissen for Andreas Mogensens missioner, men også for nogle succesfulde rummissioner såsom ASIM og NICER, der har stor dansk deltagelse. De følgende artikler kommer til at handle om Andreas Mogensens missioner og eksperimenter, og de mere langvarige danske missioner.

Det store fredsprojekt

I de tidlige 1970'ere, efter at missioner til Månen havde mistet deres kapløbsagtige glans, var den næste rumgrænse for USA og Sovjetunionen at skabe en vedvarende menneskelig tilstedeværelse i rummet. NASA havde Skylab (1972–1973), og Sovjetunionen havde Salyut (1971–1986) og Mir (1986–2001). Selvom USA hjalp til med Mir og besøgte stationen, blev det klart i 1980'erne, at begge lande havde brug for en bedre, større rumstation, uden at de enkelte lande havde råd eller opbakning til det. Dermed blev det store fredsprojekt ISS født, som har overlevet trods adskillige proxykrige, og nu krigen i Ukraine. Vi, som har instrumenter på ISS, har fået varsler om formodede nedlukninger i 2021, 2024, 2025 og nu 2028. Nu er der tale om, at NASA vil holde stationen kørende et godt stykke ind i 2030'erne – alt efter hvor meget stationen slides op og udvikler problemer de kommende år.



Figur 1. ISS set nedefra. Forsiden med ASIM, Columbus, Harmony og Kibo ses øverst. Bagsiden med Zarya, Unity og Zvezda ses nederst i billedet. Foto: NASA/Dragon Crew 2021 (CC BY-NC-ND 2.0 DEED).

Selve fredsprojektet flyver videre, selvom infrastrukturen ældes. Det ses i de mange lande, der har bidraget til stationen siden 1990'erne. USA og Rusland har bidraget med nogle af de største moduler, der er blevet opsendt, men ESA, det Europæiske Rumagentur, har bidraget blandt andet med Columbuslaboratoriet (opsendt 2008), Tranquility Node (Stilheden: forbindelsesmodul, N3 fra 2010) og det tilhørende Cupola-vinduesmodul (Kuppel

fra 2010). Canada har bidraget med den største robotarm, der blev brugt til at sammensætte de forskellige moduler, der blev opsendt. Japan har et laboratorium, Kibo, der er nabo til Columbus på den anden side af Harmony Node (N2 fra 2007) på forsiden af stationen.

Nogle myter skal aflives

Der snakkes meget om ISS, takket være Andreas Mogensen, men nogle af de daglige vendinger, der høres, er både fejlagtige og irriterende. For det første er ISS ikke ude i “det yderste rum”, ikke engang i “verdensrummet”. ISS befinder sig i en højde af 400 km over Jordens overflade i en bane med en hastighed på 27.600 km/t – den vi kalder for LEO (Low Earth Orbit). Højden, der officielt adskiller Jordens atmosfære og rummet, er ved 100 km over Jordens overflade. Den kaldes Karmanlinjen, og ved denne højde er luften så tynd, at det er umuligt at få aerodynamisk løft med en flyvemaskine, uanset hvor hurtigt den flyver. Luften er dog tyk nok til at bremse en satellit, så den ikke kan færdiggøre et enkelt kredsløb omkring Jorden. Der er ikke noget fysisk tegn på denne grænse – atmosfæren bliver bare tyndere og tyndere. ISS farer rundt kun 300 km ovenover Karmanlinjen, hvor det er muligt at kredse i en vedvarende bane. ISS bremses dog en smule af den tynde atmosfære, og hver gang et rumfartøj besøger stationen med lidt brændstof tilovers, bliver det brugt for at “booste” stationens hastighed igen.

Den næste myte, der høres overalt, er, at stationen, og især astronauterne, er i et miljø uden tyngdekraft. Det er derfor, de svæver rundt, ikke? Der er næsten lige så meget tyngdekraft oppe hos ISS som her på Jordens overflade – de er dog kun 400 km (6%) længere væk fra Jordens centrum end os. Forskellen er, at ISS og alt på den er i frit fald – det hele bevæger sig totalt efter tyngdekraftens præmisser, mens vi modstår tyngdekraften ved at stå på Jorden eller gulvet, der trykker op på os og forhindrer os i at komme tættere på Jorden. ISS og astronauterne er “vægtløse” ikke “tyngdekrafts-løse”. Frit fald er ellers ekstremt farligt medmindre objektet, som ISS, bevæger sig så hurtigt i vandret retning, at krumningen af dens bane, der bestemmes af tyngdekraften, svarer til krumningen af Jordens overflade. Dermed undgår ISS, og alle andre satellitter, at ramme Jorden som fx et objekt, der er i

frit fald mellem toppen af et tårn og fortovet, ellers ville gøre.

Den tredje myte, der promoveres især af Hollywood, er at en rumvandring, eller EVA (Extra-Vehicular Activity), kan foregå næsten så nemt som en gadevandring på Jorden – bare man husker at tage rumdragten på. Faktisk tager det en uge at planlægge sådan noget, og dem, der skal uden for ISS, sover natten over i luftslusen, hvor lufttrykket langsomt nedsættes til omkring 70% af trykket inde i ISS og på Jorden. EVA-dragterne holder mindre tryk end rumstationen, og derfor skal astronautens krop vænne sig til det, ligesom dykkere vænner sig til trykfald, når de kommer op fra havets dybder. EVA-astronauterne skal med andre ord undgå dykkersyge. Udover de ressourcer det kræves at oppumpe EVA-dragten til atmosfærisk lufttryk, er det begrænset, hvor meget tryk, der er fordelagtigt – dragten bliver desværre meget stiv og svær at bevæge sig rundt i, især fingrene, når den pumpes op. Astronauterne tager ikke ud på EVA bare for at se verdens flotteste udsigt – opgaven er den farligste del af en ISS-mission, og foretages kun efter behov for vedligeholdelse – og derfor må astronauterne kunne bevæge fingrene. Ved den mindste bekymring for astronautens velbefindende aflyses EVA'en, som det blev gjort for Andreas Mogensen, da et russisk kølesystem begyndte at lække ammoniak.



Figur 2. NASA-astronaut Ricky Arnold på EVA vedligeholdelse udstyr på ISS's store bjælke. Bemærk Canada 2.0-robotarm og ASIM-instrumenterne øverst til højre. Foto: NASA/Andrew Feustel (CC BY-NC-ND 2.0 DEED).

Stationsamling i LEO

En rumstation kan ikke opsendes som en helhed – den må samles af færdiglavede moduler oppe i rummet. De første to moduler, den russiske Zarya og amerikanske Unity, blev opsendt i 1998, og en tredje, den russiske Zvezda, blev tilføjet i 2000, hvorefter 2 astronauter (en russer og en amerikaner) kunne bo på stationen for første gang. Derefter kom 11 år med rumbyggeri og i alt 159 EVA'er. På NASAs YouTube-kanal kan man se en flot animation af hele processen på 2 minutter [1].

I alt er 20 forskellige moduler, der kan holde lufttryk, blevet opsendt med Space Shuttle (NASA), Sojuz, Progress og Proton-raketter (Roscosmos). Opsendelses- og samlingsplanen blev forsinket, efter at NASA måtte ophøre med Space Shuttle-opsendelser mellem 2003 og 2005, som følge af Columbia-katastrofen, hvor alle

syv besætningsmedlemmer omkom. Hele Space Shuttle-programmet blev nedlagt i 2011, og derefter var ISS mest afhængig af Ruslands Sojuz-raketter for forsyninger, indtil Space-X og Orbital Services begyndte kommercielle forsyningsmissioner i henholdsvis 2012 og 2014. Luftsluser og dokingsportaler tælles også blandt de beboelige moduler.

En af de meste innovative moduler er NASAs BEAM (Bigelow Expandable Activity Module), der er et oppusteligt modul, der blev opsendt og oppumpet i 2016, som en mindre dyr modulløsning for udstyrsoplagring. BEAM er forbundet til Tranquility Node, ved siden af Cupola.

Udover modulerne, hvor astronauterne kan bo med dyrebare ressourcer som lufttryk og ilt, er der mange andre infrastrukturelementer og tekniske redskaber, æsker og instrumenter, der ligger udenfor disse beboelige moduler: den store bjælke med solpaneler og sølvfarvede radiatorer er det meste iøjnefaldende af disse elementer, mens mindre robotarme, eksterne eksperimenter og kommunikationsudstyr også pynter stationen.



Figur 3. Andreas Mogensen i ESAs Columbus-laboratorium, August 2023. Bemærk total mangel på vinduer. Foto: NASA Johnson Space Center (CC BY-NC-ND 2.0 DEED).

Cupola og den nye æra

Et af de vigtigste moduler for astronauternes velbefindende er Cupola – og i sådan en grad, at nogle snakker om før-Cupola og efter-Cupola-æraen på ISS. Modulet sidder som en lille bums på undersiden af Tranquility Node og består af 7 store og tykke vinduer af skudsikkert glas. Det centrale vindue er 80 cm i diameter og er omringet af 6 mindre vinduer. Det hele peger ned mod Jorden, men man kan se ud til alle sider.

Grunden til, at den er så epokegørende, er, at astronauterne elsker at se på Jorden, og uden et dedikeret modul er der ingen vinduer på ISS undtagen de små køjne i hver dokingsportal, der kan bruges til at styre en besøgende kapsel til sin ankerplads. På tidligere rumstationer er ventiler og lignende udstyr blev brugt som håndtag, mens astronauterne så på hjemmeplaneten gennem et lille køje – og ikke til gavn for udstyret. Nu kan ISS's astronauter bruge Cupolaen til deres pauser. At bruge dette hellige sted til forskning kræver særlig tilladelse, som vores Thor og Thor-Davishold opdagede.

Noget af det mest imponerende ved Cupola er de 7 kæmpe beskyttelsesskodder, der kan lukkes, når rumskrot truer stationen. De er lavet af kevlar, der ellers bruges til skudsikre jakker, og her kan man fornemme, hvor risikabelt det er at flyve rundt om Jorden med 27.600 km/t.



Figur 4. Den italienske ESA-astronaut, Samantha Cristoforetti, i Cupola, 2022. Bemærk de blå hånd/fod-tag, der findes overalt på ISS for de svævende astronauter. Man skal tage fat i et håndtag, ikke i udstyret! Foto: NASA Johnson Space Center (CC BY-NC-ND 2.0 DEED).

Shenanigans: 6 ud af 8.413

I 2008 udgav ESA en lille bog og CD på engelsk og fransk med titlen: "European Astronaut Selection", der fortalte, hvordan man søger ind til astronauttræning hos ESA. Det allerførste trin er at skaffe sig en lægeattest, klasse 2, fra en luftfartslæge, der er godkendt nationalt. Man behøver ikke at snakke russisk, men det er en fordel. Derefter kommer der en masse tests og interviews. Som Andreas Mogensen sagde engang – man skal være i god form, men man behøver ikke at være stærk, idet alting er vægtløst på ISS.

Den lille bog tiltrak hele 8.413 ansøgere, hvoraf seks blev valgt til ESA-astronauttræning. Andreas Mogensen, som den allerførste dansker, der ville op i rummet, havde mange fordele som astronautkandidat: en ph.d. i automatiske landingssystemer for rumfartøjer var ikke den mindste af dem. Han havde arbejdet et år på en boreplatform ud for Afrikas kyst – og det tæller meget, fordi det ikke er en hvem-som-helst vovehals, der kan blive astronaut. Folk på ISS må have is i blodet, når ulykken er ude. De må være venlige, tålmodige, hjælpsomme og samarbejdsvillige, selv med folk de bor tæt på og ikke kan komme væk fra. Andreas Mogensen kunne dog ikke russisk og havde ikke pilotlicens som fx Samantha Cristoforetti og Tim Peake, der begge havde været militære piloter. Andreas Mogensen har sagt, at det at lære russisk for at kunne forstå al undervisning om Sojuz-raketten og -kapslen, var noget af det sværeste for ham. Han fik dog flyvetimer hos Lufthansa, der ikke foregik på russisk.

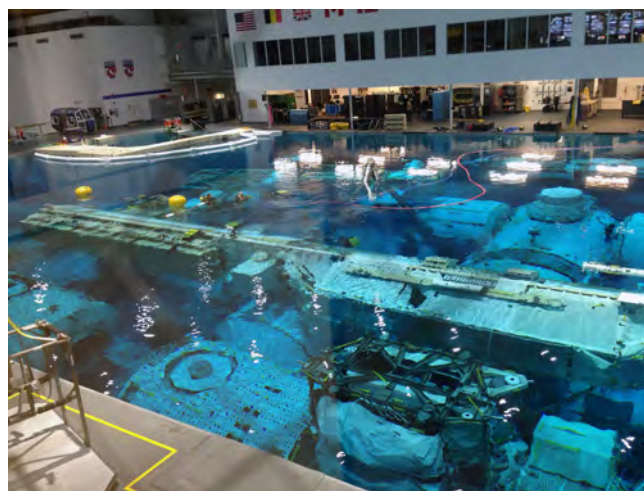
De seks astronautkandidater valgte holdnavnet "Shenanigans" (Fjollerier) og kom i gang med træning i 2009 – noget, der krævede meget rejseri rundt om på Jorden – længe før de blev sendt op til ISS. Mange aktiviteter forbundet med grundforløbet skete rundt

omkring i Europa, andre måtte udføres i særlige anlæg i USA, mens alt, der havde med deres opsendelser og landing at gøre, blev undervist på russisk i Star City uden for Moskva. Hele forløbet styredes af ESA Astronaut Centre (EAC) i Köln, Tyskland.

I Europa trænede de i at løse opgaver i svære miljøer ved at bruge en uge i mørket i et grottesystem. Miljøet er valgt for at give en fornemmelse af de udfordrende forhold i rummet – forstyrret døgnrytme, kunstig belysning, trange vilkår og en overhængende fare, hvis tingene udvikler sig dårligt. Gennem dette og lignende kurser lærte astronauterne at følge aftalte procedurer og regler, mens de trænede bestemte færdigheder.

Et andet "rum-analogt"-miljø er NEEMO, der styres af NASA ud for Floridas kyst. NEEMO er et undervands-indkvarteringsanlæg, hvor astronauterne i små grupper bor og udfører opgaver på havbunden. Dens placering på havbunden betyder, at man ikke bare kan komme væk, når man bliver træt af sine kammerater. Man skal bestemt ikke lide af klaustrofobi som astronaut, for man befinder sig tit i meget trange omgivelser – ikke mindst i sit "soveskab" på ISS, hvor der er plads til en sovepose og en bærbar computer.

Noget af det sværeste at træne er den uundgåelige vægtløse tilstand på ISS. I NASA Johnson Space Centre i Houston, Texas, findes Neutral Buoyancy Lab (NBL), der blandt andet omfatter en fuldskaalmodel af ISS i et svømmebassin. Her kan astronauter træne i ISS-operationer, mens de flyder rundt i rumdragt med vægte, der sørger for, at de hverken synker til bunden eller flyder op til vandets overflade – de bliver vægtmæssigt neutrale. Selvom man svæver i bassinet nogenlunde som omkring ISS, findes der stadig "op" og "ned", og vandet giver en misvisende modstand for astronauters bevægelser. På ISS er det nemt at skelne dem, der lige er kommet til stationen – de ramler ind i ting hele tiden og bruger alt for mange kræfter på at komme rundt.



Figur 5. Neutral Buoyancy Lab på NASAs Johnson Space Center, Houston, Texas. Foto: NASA Johnson Space Center (CC BY-NC-ND 2.0 DEED).

Andreas Mogensen fortæller en historie om, hvordan det var for ham at komme om bord på ISS for første gang i 2015. Lige efter at han var kommet ud af Sojuz-kapslen, fik han fortalt af kaptajnen, der bød ham velkommen, at han skulle langs den store gang og helt hen til enden

for at deltage i det første TV-interview ombord. Nemt nok, ville man tro, men Andreas Mogensen kunne ikke genkende gangen og var lidt forvirret over den retning, han skulle dreje. Han følte sig lidt dum, fordi han havde trænet i årevis i ISS-modellen på NBL og syntes selv, at han skulle kunne klare det her. Så drejede han sig selv således, at fødderne tog hovedets plads, og omvendt, og pludselig kunne han genkende stedet, han havde trænet i, og dermed finde vej til interviewet.

Den anden måde at træne for den vægtløse tilstand er NASAs "vomit comet" – eller mere teknisk sagt en "C-9 Low-G Flight Research aircraft", som er en specielt forstærket flyvemaskine, der kan flyve i en række paraboliske baner. Som i en rutschebane, hvori passagererne i den "nedre" side af banen oplever op til 25 sekunder i vægtløs tilstand – til gengæld oplever de langt mere end den sædvanlige 1g på vejen op til toppen af parabolbanen. Femogtyve sekunder er ikke længe nok til at lære fornemme astronautfærdigheder, men langt nok til at opdage, hvem der har en følsom mave.

Noget af det mest praktiske var den overlevelsestræning, Andreas Mogensen deltog i uden for Moskva i 17 graders frost. Her lærer man at tage alt indhold ud af sin kapsel, hvori man formodentligt lige er kommet ned fra ISS, og bruge de forskellige dele for at lave læ, bål og mad nok til et par dage i ødemarken. Mærkeligt nok, kan denne træning få direkte anvendelse under en Sojuz-landing. Hvis det går galt med den "bløde" hårdlanding i Ruslands ødemark, og kapslen lander langt fra det opsamlingshold, der skulle tage astronauterne ud fra kapslen, så må astronauterne kunne passe sig selv i nogle dage dér, hvor de lander, indtil velkomsthødet dukker op. Hvor godt dette lykkes i praksis for 3 astronauter, der har været på ISS i 6 måneder, ved jeg ikke.



Figur 6. Oleg Kotov i Cupola. Bemærk de store beskyttelsesskodder og mange gule håndtag til EVA'er. Foto: NASA Johnson Space Center (CC BY-NC-ND 2.0 DEED).

Ved hver eneste træningsopgave og -forløb bliver der lagt vægt på alle de nødsituationer, der kan opstå, og de procedurer, der skal følges, i snesevis af undtagelsestilstande. Astronauternes førstehjælpskursus er mere omfattende end blot hjertemassage, fordi der ikke er lægeservice på ISS. I hvert fald skal mindst én person i hver besætning kunne udføre lidt sårsyning, hvis det bliver nødvendigt. Da jeg snakkede med

Andreas Mogensen om filmen "Gravity" og de ting, jeg kunne lide ved den, nævnte han den første scene, hvor flere astronauter er ude på EVA og George Clooneys karakter fjoller rundt med en lille personlig raketpakke. Sådan noget sker aldrig under en rigtig EVA. Selvom Andreas Mogensens årgang hedder "Shenanigans", er det åbenbart ment mere ironisk end som en erklæring om livsfilosofi.

For alle 6 astronautkandidater blev i hvert fald godkendt som medlemmer af ESA's Astronautkorps i 2010, og derefter måtte de vente på at få tildelt deres missioner.

Luca Palmitano fra Italien fik den første mission på 6 måneder i 2013. Andreas Mogensen måtte vente indtil september 2015 for at udføre sin 10-dages iriss-mission til ISS. Grunden til, at Andreas Mogensen blot fik en 10-dages mission for at bringe en ny, frisk Sojuz-kapsel op til ISS og fragte den gamle ned igen, kan ses i ESA's budget: Danmark betaler 0,7% af ESA's budget i 2024, mens Storbritannien betaler 8,6%, Frankrig 20,1%, Tyskland 22,4% og Italien 16,9%.

ISS og Danmark



Dette er den første af tre artikler om Den Internationale Rumstation og Danmark.

I den næste artikel fortæller jeg, hvordan Andreas Mogensens 10-dages iriss-mission blev en kæmpe succes, og hvad han denne gang har arbejdet med på huginn-missionen.

Den tredje artikel handler om danske eksperimenter og instrumenter på ISS (læs også Per Lundahl Thomsens artikel på næste side).

Litteratur

- [1] https://www.youtube.com/results?search_query=iss+assembly+sequence



Carol Anne Oxborrow er fysiker, ph.d. Hun har arbejdet på DTU Space i 26 år med adskillige ESA-rummissioner: INTEGRAL (2002), Planck (2010), ASIM (2018), MIRI på James Webb Space Telescope (2021), og ATHENA Wide Field Imager, der skal opsendes i 2038. Carol Anne er leder af ASIM Science Data Centre og gruppen for Atmosfærisk Elektricitet på DTU Space.

VAMB (Virtual Assistance Mental Balance)

– et værktøj til vedligeholdelse af astronauters psyke

Per Lundahl Thomsen, DTU Space og Nord Space ApS

Vores projekt til Huginn-missionen, kendt som VR Mental Care eller VAMB (Virtual Assistance Mental Balance), anvender Virtual Reality (VR) til bevarelse af astronauters mentale helbred under lange rummissioner. Denne artikel beskriver kort de udfordringer, astronauter står over, projektets udfordringer, og hvordan VAMB kan hjælpe med at opretholde astronauternes psykiske balance.

Rumrejsens mentale udfordringer

Forestil dig at arbejde og bo i et larmende, rodet, vinduesløst, klinisk serverrum uden naturligt lys. Her er du spærret inde med en lille håndfuld kollegaer i flere måneder eller endda år, omgivet af den konstante larm fra servere, skærme og elektroniske apparater.

Arbejdet er fra 7 morgen til 7 aften efter et nøje planlagt skema, der følges minut for minut. Du er overvåget døgnet rundt og de samme historier bliver fortalt igen og igen. Du kan ikke komme i bad og må udholde dine kollegaers "duft" i månedsvis. Måltiderne består af frysetørret mad og genbrugt vand. Du sover i et kosteskab eller i en sovepose, som er sat på væggen, med begrænset privatliv og komfort, og kommunikationen med ens kære er korte øjeblikke via en iPad fortrinsvist om søndagen. Døgnet rundt skal man være på vagt og klar til at reagere hurtigt, hvis en alarm pludselig lyder.



Figur 1. ISS Columbusmodul. Foto: ESA.

Det er derfor ikke overraskende, at astronauter på Den Internationale Rumstation (ISS) elsker at trække sig tilbage til Cupola, der er en udsigtskuppel på rumstationen, hvor de kan finde ro ved at nyde udsigten til Jorden. Med fremtidige missioner til Månen er Cupola ikke tilgængelig, og Jorden bliver en lille farverig bold i det fjerne. Når Mars bliver det ultimative mål, vil Jorden være reduceret til en lille blå prik, og kommunikationsforsinkelser på helt op til 22 minutter vil hindre regelmæssig kontakt med familie og venner, hvilket forstærker følelsen af komplet isolation i rummet.

Dette er virkeligheden for astronauter på langvarige rummissioner. Ud over de mange fysiske udfordringer, som vægtløshed og afstanden fra Jorden, er ensomhed og psykologisk stress en helt særlig del af livet som astronaut.

Historisk har flere astronauter efter en lang mission kæmpet med nærvær, angst og i enkelte tilfælde misbrug, skilsmisser og andre psykiske eftervirkninger. Prioriteringen har altid været at sikre, at astronauterne overlever fysisk. Derfor er fysisk træning meget højt prioriteret i deres dagligdag, men desværre er det mentale helbred totalt overset.

Hvis mennesker skal overleve og trives i rummet i årevis, hvilket er tilfældet når vi i de nærmeste år igen tager til Månen for senere at tage videre til Mars, er det afgørende med en aktiv indsats for at sikre, at astronauterne og ikke mindst mere almindelige rumrejsende forbliver hele mennesker.



Figur 2. Transformation fra Lunar Gateway (Foto: NASA) til den virtuelle verden (Grafik: XR Health).

VAMB's rolle i at styrke astronauters psykiske helbred

Her kommer Virtual Reality (VR) ind i billedet. VR vil være den eneste mulighed for, at astronauterne kan undslippe det kliniske miljø på rumstationen. VAMB eller Virtual Assistance Mental Balance-eksperimentet til Andreas Mogensens Huginn-mission giver astronauten mulighed for at bevæge sig ind i en verden af glæde og velvære gennem selvvalgte, høj kvalitets 360 graders-film med god lyd. I forbindelse med Huginn-missionen vil der være mulighed for at dykke med delfiner, se en solnedgang over en bjergryg med fuglesang i baggrunden, eller sidde ved Vesterhavet eller i Tisvilde Hegn og betragte havet og marsken, mens bølgerne bruser og vinden suser. Film, der er blevet udvalgt af astronauten selv ud fra en bred vifte af muligheder.

Målet er at give astronauterne et frikvarter, hvor alt omkring dem udskiftes med en anden og meget nærværende verden, så forbindelsen til Jorden bevares, og det psykiske helbred vedligeholdes og styrkes. VAMB har på Huginn-missionen fået tildelt 20 sessioner, hver med en varighed på 20 minutter. Her skal Andreas Mogensen pakke udstyret ud, opsætte det, svare på et spørgeskema om hans psykiske velvære før en session, se filmen, pakke udstyret sammen igen og besvare endnu et spørgeskema efter sessionen.

Data bliver efterfølgende analyseret af psykiatrien på Aarhus Universitetshospital.



Figur 3. Andreas Mogensen og Huginn-logoet. Foto: ESA.

Udviklingen af VAMB's VR-løsning

Projektet lyder i virkeligheden meget simpelt. Både Danish Aerospace Company (DAC), Nord Space ApS og vi på DTU troede, at man blot kunne anvende de VR-briller, der allerede er på ISS. Det er trods alt ikke nyt, at ESA's og NASA's astronauter i årevis har arbejdet med AR (Augmented Reality) og VR på ISS. Men mens VAMB's mål var klart, stod vi over for udfordringer med at tilpasse den traditionelle VR-teknologi til rumstationens miljø uden tyngdefelt.

Når en person bærer VR-brillerne og bevæger hovedet, styres billedet i brillerne af accelerometre og gyroer. Dette gælder for samtlige VR-briller på markedet i dag. Sensorerne driver ganske langsomt, men her på Jorden nulstiller man nemt denne drift i forhold til tyngdefeltet. I vægtløs tilstand mangler man tyngdefeltsreferencen, hvilket betyder, at billedet i brillerne drejer og ryster efter blot et par minutter, så VR kan kun i yderst begrænset omfang anvendes i rummet.



Figur 4. HTC VIVE Focus 3. Foto: HTC.

ESA og NASA har arbejdet på en løsning siden 2016, men er ikke nået i mål, og det kom som en stor

overraskelse for teamet. Efter omhyggelig research og test af mange forskellige fabrikater og typer af VR-briller, valgte VAMB-teamet dog at arbejde videre med HTC VIVE Focus 3.

Disse briller har mange fordele. Herunder høj kvalitet og muligheden for at lave specialdesignede applikationer med adgang til sensorer, kameraer og aktuatorer. Batteripakken er placeret i nakken og er aftagelig, hvilket gør kvalifikationsprocessen meget lettere. For at spare omkostninger ved kvalifikationen valgte Danish Aerospace Company dog at ændre brillerne, så de kan bruge strømmen fra en almindelig powerbank, der allerede er kvalificeret og tilgængelig på rumstationen.



Figur 5. VR Set-up. Grafik: HTC.

VAMB-teamet etablerede et solidt samarbejde med HTC, der udvikler en applikation til store forlystelsesparker. Denne applikation anvender en bevægelig reference i form af IR-kilder indbygget i venstre controller. Controlleren fungerer som ankerpunkt for det, man ser i VR-brillerne, og fastholder horisonten. Dermed erstatter man den manglende tyngdefeltsreference. I vores tilfælde er ISS "forlystelsen". Controlleren fastgøres via en arm til væggen af ISS, og så længe referencen er i brillernes synsfelt, vil billedet forblive stabilt.



Figur 6. Opsendelsen af SpaceX 29 fra Florida den 10. november 2023. Foto: SpaceX.

ESA var meget skeptiske til at begynde med, men i forbindelse med kvalifikationsprocessen gennemførte ESA to vellykkede parabolflyvninger med idéen, hvilket gav en grundlæggende fornemmelse af, at vi var på rette vej. Det kan desværre ikke lade sig gøre at teste brillerne i et sådant mikrotynghdefelt i længere tid end ca. 20 sekunder ad gangen på Jorden, og derfor var vi nødt til at vente i månedsvis i spænding til brillerne og eksperimentet blev sendt op til Andreas Mogensen på rumstationen.

To enheder – en flight-model samt en flight-spares-model – af udstyret blev opsendt den 10. november 2023 med en SpaceX Falcon 9-raket.

Den 17. november 2023 blev den første test af udstyret gennemført, udstyret blev introduceret for

Andreas Mogensen, og efter lidt indlæring blev der logget 20 minutters succesfuld operation i logbogen. Denne testsession beviste endeligt, at den valgte løsning fungerede i rummet, og at alle vore anstrengelser i de sidste par år ikke var forgæves. Andreas Mogensen gav karakteren 10 ud af 10 for systemets performance. Det er dermed første gang nogensinde, at VR fungerer i længere tid i vægtløs tilstand. Data fra sessionerne er sendt til psykiatrien på Aarhus Universitetshospital, hvor de undersøges i detaljer.



Figur 7. Andreas Mogensen under den første test af VAMB.
Foto: ESA.

Denne succes har vakt stor begejstring hos ESA, der nu ønsker at bruge VR-løsningen, også efter at Huginn-missionen er afsluttet.

VR i fremtiden

VAMB bliver forhåbentlig et banebrydende skridt i retning af at styrke astronauternes mentale helbred. Gennem samarbejde, innovation og hårdt arbejde har vi overvundet udfordringerne med at tilpasse VR til rumstationens miljø, og vores løsning er nu klar til ISS, til Lunar Gateway og videre ud i rummet.

Målet med VAMB er at hjælpe astronauterne med at trives i rummet og bevare deres integritet som hele mennesker, mens de udforsker fjerne verdener. Med VAMB kan vi bidrage til at forme fremtidens rummissioner, hvor psykisk helbred er en prioritet, og hvor vi sikrer, at vores astronauter ikke kun overlever, men også trives under de ekstreme forhold.

VR kan, ud over fysiske og mentale øvelser, anvendes til underholdning, samt til at installere, vedligeholde og operere instrumenter, værktøjer, og systemer på rumstationer og i fremtiden på missioner til Månen og til Mars. Teamet, bestående af Nord Space, HTC, DTU Space, Danish Aerospace Company, XR Health, Aarhus Universitetshospital m.fl., er fulde af forhåbninger om, at vores indsats kan åbne op for mange nye muligheder for VR i rummet til glæde for alle fremtidens rumrejsende. Håbet er også, at VAMB-missionen vil medvirke til, at psykiatrien her i Danmark får øjnene yderligere op for de mange muligheder med VR som et godt og veludviklet værktøj til behandling af mange psykiske lidelser og som et forebyggende værktøj imod stress i almindelighed.



Per Lundahl Thomsen er chefkonsulent hos DTU Space og partner hos Nord Space ApS.

The Women of NBI – Then and Now



Kvinder i Fysik og Niels Bohr Arkivet afholder en 2-dages konference den 12.–13. november 2024 med fokus på kvinders rolle i Niels Bohr Institutets historie.

Læs mere i næste nummer af Kvant og på kvinderifysik.dk/2024/06/04/women-of-nbi/.

PFEIFFER VACUUM

Nyhed

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



www.pfeiffer-vacuum.com

Vera C. Rubinobservatoriets store studie af rum og tid

Christa Gall, *DARK*, Niels Bohr Institutet

Vera C. Rubinobservatoriets “Legacy Survey of Space and Time” (LSST), er et projekt, der starter i 2025 og strækker sig over det kommende årti. Det vil skabe det hidtil bredeste og dybeste billede af universet og gøre det muligt at besvare nogle af de mest presserende spørgsmål om universet.

De store fremskridt i forståelsen af universet er i de seneste århundreder i høj grad blevet muliggjort, men også begrænset, af den teknologiske udvikling af nye redskaber til at udforske, observere samt måle vores univers og alt, der er i det. Nu åbner de hurtige fremskridt inden for informations- og detektorteknologi samt i computernes regnekraft for nye veje til at studere universet. Disse udviklinger gør det muligt at opbygge en ny generation af kraftfulde observationsfaciliteter med meget brede, hurtige og dybe himmelundersøgelser, der vil undersøge stadig større områder af himlen i hele det elektromagnetiske spektrum. Dette vil åbne op for at løse gamle problemer og revolutionere vores grundlæggende forståelse af universets oprindelse og udvikling. Vi står derfor overfor en ny æra inden for astrofysikken.

Næste år starter Vera C. Rubinobservatoriet projektet “Legacy Survey of Space and Time” (LSST), som denne arikel vil se nærmere på.

“Legacy Survey of Space and Time (LSST)”

Figur 1 viser Vera C. Rubinobservatoriet, som er en helt ny astronomisk observationsfacilitet beliggende ved Cerro Pachónryggen i Atacamaørkenen i det nordlige Chile. De første skitser til et teleskop, der kan fremme astrofysikken ud over det nuværende niveau, blev lavet på en serviet af en gruppe forskere i begyndelsen af 1990'erne. Den primære videnskabelige drivkraft var at klarlægge det mystiske mørke stof, som udgør størstedelen af massen i universet, men aldrig er blevet “set” med noget instrument.

I løbet af det efterfølgende årti begyndte idéen at blive til virkelighed, og i 2003 blev LSST Corporation grundlagt som en non-profit organisation til støtte for projektet. Den første udvikling blev støttet af flere amerikanske nationale og private fonde, og der kom også betydelige økonomiske bidrag fra milliardærerne Charles Simonyi (der var en af ophavsmændene til Microsoft Word) og Bill Gates (grundlæggeren af Microsoft) til udvikling af teleskopets spejle. Efter næsten et årti blev den traditionelle grundstensnedlæggelse afholdt for at markere den officielle start på projektet på Cerro Pachón i 2015. Samtidig med byggeriet på bjergtoppen, der fortsatte over nogle år, blev flere dele, såsom teleskopets spejle samt stålelementerne til teleskopet og kameraet, bygget på faciliteter og laboratorier rundt om i verden.

På det tidspunkt blev projektet kaldt “Large Synoptic Survey Telescope” (LSST). Det blev designet til at detektere svage astrofysiske objekter, der spænder fra

nærjordiske asteroider, objekter i solsystemet, herunder uopdagede planeter, stjerneeksplosioner i fjerne galakser samt selve de fjerne galakser. Dermed strækker den videnskabelige rækkevidde sig ud over undersøgelsen af mørkt stof og mørk energi, som var (og stadig er) attraktiv for en bred vifte af astrofysikere rundt om i verden.

Ved udgangen af 2019 blev faciliteten og programmet omdøbt. Faciliteten blev navngivet til ære for Vera C. Rubin, en amerikansk astronom og den første, der leverede bevis for eksistensen af mørkt stof [1]. Det er den første offentligt finansierede store astronomiske facilitet i USA, der er opkaldt efter en kvinde. Undersøgelsen selv blev omdøbt til “Legacy Survey of Space and Time” (LSST), og det 8,4-meter store teleskop blev navngivet “Simonyi-teleskopet” efter Charles Simonyi.

Undersøgelseskoncept

LSST er en omfattende astrofysisk undersøgelse, der vil kortlægge hele den sydlige halvkugle over 10 år [2]. Konceptet for undersøgelsen er: “Wide-Fast-Deep”. Det betyder, at LSST vil fotografere store områder af himlen (Wide) på kort tid (Fast) med svage størrelsesklasser (Deep). Således vil LSST tage 30-sekunders billeder (2 gange 15-sekunders eksponeringer for at reducere påvirkningen fra kosmisk stråling) hver nat med et synsfelt på 9,6 kvadratgrader over en periode på 10 år. Denne undersøgelse vil blive udført med et kamera på 3200 megapixel, hvilket er det største digitale kamera, der nogensinde er bygget. Billedtagning af himlen vil blive udført med seks forskellige optiske filtre, u, g, r, i, z, y , der dækker et samlet bølglængdeområde fra cirka 320 til 1050 nm. Hver position på himlen vil blive fotograferet 3–4 dage i mindst et af de seks filtre.

Den grundlæggende undersøgelsesstrategi er designet til at optimere synsfeltet og den undersøgte dybde. Den primære Wide-Fast-Deep-undersøgelse vil dække cirka 18.000 kvadratgrader, og hver position på himlen vil i gennemsnit blive besøgt omkring 825 gange over en 10-årig periode. Der vil desuden være “mini-undersøgelser” over mindre himmelområder. Disse inkluderer “Deep Drilling Fields”, som vil have flere besøg end hovedundersøgelsen. Andre mini-undersøgelser, såsom “North Ecliptic Spur”, “Galactic Plane” og “South Celestial Pole”, vil få færre besøg end hovedundersøgelsen.



Figur 1. Vera C. Rubinobservatoriet på toppen af bjerget Cerro Pachón, Chile. Foto: Rubinobservatoriet/ NSF/AURA/H. Stockebrand.

Samlet set vil LSST undersøge et himmelområde på cirka 25.000 ud af 41.253 kvadratgrader og dermed mere end halvdelen af hele himlen. Den forventede 5σ -punktkildedybde af et enkelt besøg (2×15 -sekunders eksponering) i r -båndet er cirka 24,5 mag, og når det kombineres over 10 år, vil det resultere i en 5σ -dybde på $r \sim 27$ mag [3,4]. LSST vil være unik i forhold til at registrere astrofysiske objekter og transiente fænomener, der er svage eller ændrer sig enten i lysstyrke eller position inden for korte tider fra minutter til dage. Dette inkluderer galakser, eksploderende stjerner som supernovaer i fjerne galakser eller asteroider, der kunne udgøre en fare for Jorden.

Videnskabelige hovedformål

LSST er specifikt designet til at tackle de mest presserende videnskabelige spørgsmål inden for disse fire videnskabelige områder:

- Beskaffenheden af mørk energi og mørkt stof
- En kortlægning af solsystemet, fra nærjordiske asteroider til objekter i det ydre solsystem
- Strukturen af Mælkevejen
- Universets udvikling

I øjeblikket er den bedste model, der beskriver vores univers og som matcher observationerne, Λ -CDM- (Cold Dark Matter – koldt mørkt stof)-modellen [5,6]. Dens hovedkomponenter består af en kosmologisk konstant forbundet med mørk energi, koldt mørkt stof og almindeligt stof. Mørk energi er ansvarlig for den accelererede udvidelse af universet og ses fx i Hubble-diagrammet [5,7]. Mørkt stof udgør omkring 80% af stoffet i universet og viser sig gennem den gravitationelle effekt, stoffet har på dannelse og udvikling af galakser og deres fordeling i store skalaer samt i gravitationel linsning. Sidstnævnte er en effekt, hvor lys fra en fjern kilde bliver forvrænget og forstørret af en forgrundskilde, såsom en massiv galakse eller en galaksehob, der begge består af almindeligt og mørkt stof.

Imidlertid er de sande egenskaber ikke kendt for hverken mørk energi eller mørkt stof. Da LSST-undersøgelsen er designet til at observere store områder af himlen med svage størrelsesordener, kan der opnås præcise målinger af forskellige kosmologiske parametre, og i kombination vil alle disse målinger gøre det muligt at bestemme de kosmologiske parametre med stor nøjagtighed. Det forventes, at LSST vil observere omkring 20 milliarder galakser over 10 år.

I vores egen omegn vil LSST lave en dybdegående opgørelse af de legemer, der passerer gennem solsystemet, herunder objekter som nærjordiske asteroider, kometer, Kuiperbælte-objekter og endda planeter i mærkelige baner. Sådanne objekter er svage, og omkring 30% af de nærjordiske objekter, der indtil videre er opdaget, er kun omkring 140 m i størrelse, men stadig store nok til at udgøre en fare for os på Jorden, hvis de er på kollisionskurs. Efter de 10-årsundersøgelelsesperioder forventes det, at LSST vil have katalogiseret banerne, farverne og variabilitetsoplysningerne for 6 millioner af sådanne legemer i solsystemet.

Den nuværende form og struktur af Mælkevejen er resultatet af gentagen stjernedannelse og sammensmeltning af materiale inden i mindre galakser over omkring 10 milliarder år. Imidlertid ved vi ikke meget om arten af og detaljerne af de mange processer, der styrer Mælkevejens udvikling,. Dertil kommer, at mørkt stof spiller en rolle i dannelsen af strukturer på subgalaktiske skalaer ligeledes er uklar. Mælkevejen er et ideelt astrofysisk laboratorium til at studere en galakses dannelseshistorie ved at kortlægge dens stjerner.

LSST vil derfor observere og måle hastighederne og andre fysiske egenskaber af cirka 17 milliarder stjerner ud til en afstand af 300 kiloparsec.

Tidsskalaerne for dannelse, udvikling og død af astrofysiske objekter kan være lige så lange som hele universets levetid, og ændringer kan således ikke fanges i løbet af et menneskes korte levetid. Nogle forbigående fænomener, såsom de mest energiske gammastråleudbrud, massive stjerner, der eksploderer som supernovaer, eller stjerner, der ødelægges, fordi de kommer for tæt på et sort hul i en galakse, kan dog være så korte, at de varer enkelte sekunder eller dage. Hver nat forekommer i hundredtusindvis af disse forbigående begivenheder i fjerne galakser, men de nuværende undersøgelser og teleskoper kan kun fange en brøkdel af fænomenerne. LSST vil udvide nuværende undersøgelser med en faktor 100, hvilket vil muliggøre opdagelsen af nye fænomener og lette studiet af kendte fænomener. Inden for 60-sekunders observationer vil LSST detektere hvert objekt, der har ændret sig enten i lysstyrke eller position, og vil øjeblikkeligt advare hele det astrofysiske samfund om disse begivenheder, hvilket vil løbe op i cirka 10 millioner advarsler hver eneste nat.

Teleskop- og kameradesign

Figur 2 viser monteringen af det 8,4 m store Simonyi-teleskop. Teleskopet har et unikt tre-spejlsdesign, hvor det indfaldende lys opsamles af et 8,4 m primært spejl. Dette reflekterer lyset til et 3,4 m konvekst sekundært spejl og videre til et 5 m konkavt tertiært spejl, der dirigerer lyset ind i kameraet. Det mest unikke er, at primær- og tertiærspejlene er fremstillet af det samme monolitiske substrat ved hjælp af en helt ny borosilikat-teknologi udviklet af Richard F. Caris Mirror Laboratory ved University of Arizona i Tucson, USA. Teleskopets design resulterer i en åbning på 6,7 m og et bredt synsfelt på himlen på 9,6 kvadratgrader. Dette er cirka 40 gange Månens overflade.



Figur 2. Den massive støttestruktur til teleskopet med den åbne observatoriumskuppel. Foto: Rubinobservatoriet/ NSF/AURA/H. Stockebrand.

Den høje hastighed i dataopsamlingen betyder, at der er brug for et stort kamera, og her har SLAC National Accelerator Laboratory i Californien bygget det hidtil største digitale kamera til astrofysisk brug, som vist på figur 3. Det har et 3,2 gigapixel fladt fokusplan, der er belagt med 189 stk $4k \times 4k$ CCD-sensorer, som hver især er opdelt i 16 forstærkere. Den fysiske pixelstørrelse er $10 \mu m$.

Fokusplanet har en fysisk diameter på 65 cm, og for at begrænse elektronisk og termisk støj er hele fokusplanet med alle dets komponenter indlejret i en vakuumkryostat med et kølesystem, der opretholder en driftstemperatur for CCD'erne på omkring $-100^\circ C$. Kameraet består af tre linser, hvoraf én er indgangsvinduet til kryostaten. De to andre linser, som er monteret foran kamerahuset, er primært designet til at korrigere for kromatiske aberrationer og for at udbrede fokusplanet over hele bølglængdeområdet. Imponerende nok har den første linse en diameter på 1,55 m og er optaget i Guinness Rekordbog som verdens største linse.

Datastyring

LSST-teleskopet vil skanne hele den sydlige halvkugle og tage cirka 1000 billeder hver nat og dermed hver nat opnå cirka 20 terabyte rådata, der behandles i realtid. Hele det bearbejdede datasæt vil blive frigivet årligt, og den endelige 10-årige datafrigivelse vil omfatte cirka 15 petabyte data. I alt vil LSST levere en kumulativ datamængde på cirka 500 petabyte bestående af billeder og dataprodukter. Disse kan omfatte kataloger og behandlede billeder, som er gjort klar til at blive anvendt af LSST-brugerne. For at forbedre slutbrugerens videnskabelige produktivitet vil datakataloger eller dele af det blive opbevaret i uafhængige datacentre, som er placeret rundt om i verden. Alle datacentre vil dog være underlagt en toårig ejerperiode, hvor de kun kan bruges af forskere, der er LSST-datarettighedshavere.

For at udnytte den usædvanligt store datamængde produceret af LSST og besvare videnskabelige spørgsmål, skal der udvikles automatiserede metoder og værktøjer til behandling og analyse af datamængden. Dette åbner unikke muligheder, ikke kun for astrofysikere,

men også for dataloger, til at udvikle nye metoder inden for kunstig intelligens og maskinlæringsteknikker og -værktøjer på tværs af forskningsområder, der omfatter, men ikke er begrænset til, astronomi, astrofysik og datalogi.



Figur 3. LSST-kameraet med dets 1,5 m brede indgangslinse og det 65 cm brede fokusplan. Foto: Jacqueline Ramseyer Orrell/SLAC National Accelerator Laboratory.

Derudover vil der være en stor mængde højkvalitets offentlige data (fx alle de natlige advarsler og tilhørende data, der frigives inden for 60-sekunder efter eksposering), hvilket vil fremme en rigdom af forskningsmuligheder. Desuden udvikler *Rubin Observatory Education and Public Outreach*-programmet en overflod af open-source-materialer og offentlige aktiviteter for at fremme formidling, uddannelse og borgerforskning.

Status

Konstruktionen af observatoriet på bjergtoppen, som bl.a. inkluderer teleskopets monteringsenhed, servicebygning, vedligeholdelsesfaciliteter og kuppel, blev fuldført i slutningen af 2023. Spejlene er bygget og er allerede ankommet til observatoriet. Konstruktionen og test af kameraet er i den sidste fase og forventes at blive sendt fra SLAC National Accelerator Laboratory, hvor kameraet er bygget, til teleskopet her i 2024.

Systemets *first light* med LSST's kamera forventes at finde sted i starten af 2025, og *Operation Readiness Review* forventes at være færdig i midten af 2025. Den endelige start på måleprogrammet er planlagt til begyndelsen af 2026. Yderligere information og liveopdateringer kan findes på www.lsst.org.

I Danmark er Instrumentcenteret for Dansk Astrofysik anerkendt af LSST, og der er en proces i gang for at få dansk medlemskab af LSST, hvilket vil sikre datarettigheder for en række forskere ved danske institutioner. Til gengæld bidrager vi til driften af observatoriet, og undertegnede leder arbejder med at opbygge et "Object-lite Independent Data Access Center", som vil betjene LSST's "Object Lite Catalog"-dataudgivelser suppleret med en række andre eksterne datakataloger af relevans for det danske astrofysiske samfund. Det vil blive kombineret med omfattende computerkraft og lagerplads for at tillade en bred vifte af maskinlæringsapplikationer, der skal producere de endelige resultater.

Litteratur

- [1] V.C. Rubin, J.W.K. Ford og N. Thonnard (1980) "Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 ($R=4\text{kpc}$) to UGC 2885 ($R=122\text{kpc}$)", *ApJ*, bind **238**, side 471–487.
- [2] Ž. Ivezić m.fl. (2019) "LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products", *ApJ*, bind **873**, id 111, ArXiv 0805.2366.
- [3] F.B. Bianco m.fl. (2022) "Optimization of the Observing Cadence for the Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time: A Pioneering Process of Community-focused Experimental Design", *ApJS*, bind **258**, id 1, ArXiv 2108.01683.
- [4] F.B. Bianco, L. Jones, Ž. Ivezić, S. Ritz og the Rubin Project Science Team (2022) "Updated estimates of the Rubin system throughput and expected LSST image depth", <https://pstn-054.lsst.io/>
- [5] S. Perlmutter m.fl. (1999) "Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae", *ApJ*, bind **517**, side 565–586. 1, astro-ph/9812133.
- [6] Planck Collaboration m.fl. (2020) "Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters", *A&A*, bind **641**, side. A6 ArXiv 1807.06209.
- [7] A.G. Riess m.fl. (1998) "Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant", *AJ*, bind **116**, side 1009–1038, astro-ph/9805201.



Christa Gall er lektor ved Niels Bohr Institutet (ansat i 2016) og er Villumfondens "Young Investigator" for projektet "Searching for the Known Unknowns: Lightening up the Dusty Universe".

Læs mere om kosmologi i Kvant



Du kan finde en række artikler om aktuel kosmologi i KVANTs store temanummer om kosmologi, april 2024, nr. 1.

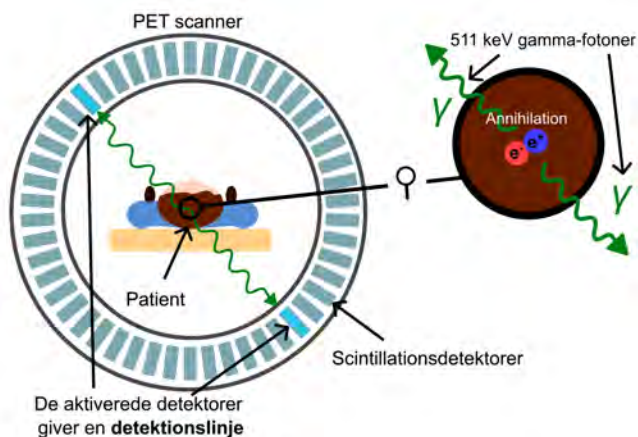
Kan nanopartikler detektere kræft?

Simon Peter Slot Jessen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Den medicinske afbildningsmetode Positron Emissions Tomografi (PET) er i øjeblikket det bedste tilgængelige værktøj til at detektere og afbilde kræft. Der er dog alligevel potentiale for at forbedre metodens billedkvalitet ved at øge tidsopløsningen af de scintillationsdetektorer, der udgør en PET-scanner. Hvis målet om en *rekonstruktionsløs* PET-scanner skal realiseres, er man nødt til at anvende nye materialer såsom CdSe/CdS nanoplader, som gennem deres mikroskopiske struktur har unikke optiske egenskaber. Denne mikroskopiske struktur gør dog visse egenskaber svære at undersøge, specielt bestemmelsen af materialets *Light Yield*, hvilket denne artikel vil præsentere en mulig løsning på, nemlig *z-scan-metoden*.

Positron Emissions Tomografi

I dag rammes én ud af tre danskere af kræft, inden de fylder 75, og i takt med, at vi som befolkning bliver ældre, vil kræftbehandlingen spille en stadig større rolle for vores sundhed. Første skridt i enhver kræftbehandling er diagnosticering, og til dette er Positron Emissions Tomografi (PET) et afgørende redskab.

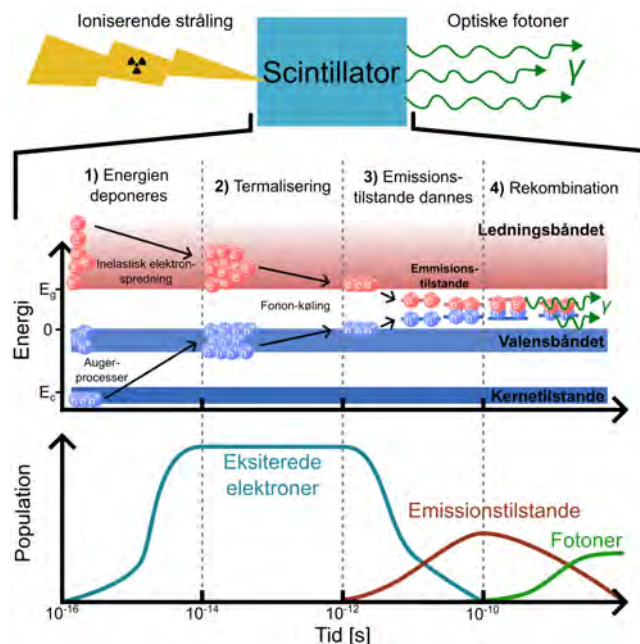


Figur 1. En skitse af de grundlæggende principper bag PET. Efter at sporingstoffet henfalder, bestemmes positionen ved at detektere de to resulterende gamma-fotoner med scintillationsdetektorer.

En PET-scanning starter med, at kroppen injiceres med et radioaktivt sporingstof i ufarlige, men målbar mængder, som indgår i kroppens biomekaniske processer. I tilfældet kræftdiagnosticering anvendes som regel sporingstoffet fluordeoxyglukose, hvori der indgår en β^+ -radioaktiv isotop af fluor, som optages af celler med høj metabolisme. Når en radioaktiv kerne β^+ -henfalder, dannes en positron, som næsten omgående vil rekombinere med sin antipartikel, en elektron fra det omkringliggende væv. Når en partikel og en antipartikel rekombinerer, omdannes begge partiklers hvileenergi for det meste til to fotoner, som i henhold til impulsbevarelse vil udsendes i modsatrettede retninger. De to fotoner har hver især en energi på ca. 511 keV, hvilket gør dem til ioniserende gamma-fotoner, der kan undslippe kroppen og detekteres af to detektorer på hver sin side i en detektorring (se figur 1). Ét enkelt henfald giver altså to aktiverede detektorer, som registreres og parres, hvilket giver en *detektionslinje*, langs hvilken

henfaldet må have fundet sted. Kombinerer man flere detekterede henfald, vil detektionslinjerne overlappe der, hvor cellerne har højest metabolisme, hvilket netop er de steder i kroppen, der er udviklet kræftsvulster.

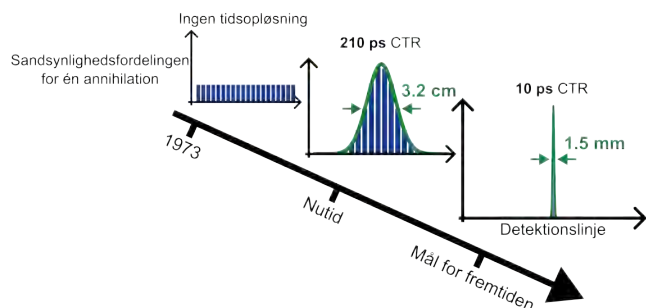
Billedkvaliteten fra PET-scanningsbilleder kan forbedres markant ved at benytte tidsfølsomme detektorer, kaldet *Time of Flight PET* (ToF-PET), der ikke blot kan sige på hvilken linje, men også hvor på denne linje et henfald er sket. Dette kræver detektorer, der er i stand til at bestemme tidsforskellen mellem ankomsten af de to gamma-fotoner meget præcist. Dette lyder i grunden simpelt, men for at forstå, hvad det indebærer, må man kigge nærmere på den fysiske proces, der tillader detektionen af gamma-fotonerne i en PET-scanner, nemlig *scintillation*.



Figur 2. En grafisk udlægning af de delprocesser, der ligger til grund for fænomenet scintillation. Øverst ses den makroskopiske proces, mens der på den midterste graf er skitseret energiniveauerne af de exciterede elektroner og deres efterladte huller valensbåndet, samt de relaxationsprocesser, der foregår i de forskellige stadier af scintillationsprocessen. Nederst er skitseret antallet af hhv. exciterede elektroner, emissionstilstande og udsendte fotoner i de fire delprocesser. Figuren er inspireret af figur 3.7 i [1].

Scintillation

En scintillator er et materiale, der udsender synligt lys, når det udsættes for ioniserende stråling. Processerne, der ligger til grund for scintillation, er komplicerede og varierer fra scintillator til scintillator, men kan generelt opsummeres i fire grundlæggende delprocesser [1], som er skitseret i Figur 2: 1) Den ioniserende strålings energi bliver afgivet til materialet ved, at materialets elektroner bliver exciteret fra deres grundtilstand, kaldet valensbåndet, til exciterede tilstande i det såkaldte ledningsbånd. 2) De exciterede elektroner vil afgive meget af deres energi til det omkringliggende krystalgitter gennem udsendelse af fononer, som opvarmer materialet og sender elektronerne ned i stadig lavere energitilstande. 3) Elektronerne (og hullerne) finder vej til de lavestliggende energitilstande, kaldet emissionstilstande. 4) Elektronerne og hullerne i emissionstilstandene rekombinerer og udsender en foton. Energien af denne foton vil, selvfølgelig bestemt af energitilstanden af emissionstilstanden, som regel ligge i det synlige spektrum, og dermed er ioniserende stråling omdannet til synligt lys.



Figur 3. En grafisk opsummering af den historiske udvikling af ToF-PET-metoden, hvor den resulterende rumlige opløsning ved en given CTR er angivet.

På trods af kompleksiteten af disse underliggende processer opsummeres egenskaberne for en scintillator som regel i blot to tal: *Light Yield* (LY) og *decay time* (τ_d). Disse tal beskriver hhv. hvor mange fotoner, scintillatoren udsender pr. deponeret energi, og hvor hurtigt disse fotoner bliver udsendt. En scintillators LY bestemmes som udgangspunkt af, hvor meget energi, der går tabt i proces 1), 2) og 3), mens τ_d bestemmes i proces 4) af rekombinationsraten af emissionstilstanden.

The 10ps ToF-PET challenge

I en PET-scanner kan præcisionen, hvormed tidsforskellen mellem de to gamma-fotoner er detekteret i de to scintillationsdetektorer, kaldet *Coincidence Time Resolution* (CTR), gives som

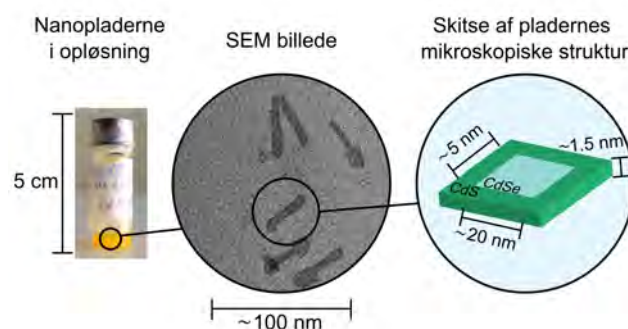
$$CTR = 2,18 \sqrt{\frac{\tau_r \tau_d}{Y}}, \quad (1)$$

hvor Y angiver antallet af udsendte fotoner (dvs. proportional med LY), og τ_r angiver signalets rise time, som typisk er meget kort og ikke en begrænsende faktor [2]. I øjeblikket har de bedste kommercielle ToF-PET-scannere en tidsopløsning omkring 210 ps, hvilket medfører en rumlig opløsning på 3,2 cm (se

figur 3). Et billede med denne opløsning er dog ikke godt nok til at kunne planlægge et kirurgisk indgreb ud fra, og man er derfor stadig nødt til at kombinere flere detektionslinjer for at opnå tilstrækkelig rumlig opløsning. Hvis man vil skabe en PET-scanner, hvor hvert eneste hændelse repræsenterer et brugbart datapunkt, kaldet rekonstruktionsløs PET, er man nødt til at forbedre CTR til omkring 10 picosekunder (ps), hvilket ikke er muligt med de scintillatorer, der anvendes på nuværende tidspunkt. Da tidsopløsningen bestemmes af materialespecifikke egenskaber (se ligning (1)), er jagten gået ind på materialer med et højt LY og en kort τ_d .

Denne søgen efter nye materialer, der skal være med til at realisere en PET-scanner med en tidsopløsning på blot 10 ps går under navnet "The 10 ps ToF-PET challenge" [2]. Først og fremmest skal man søge efter materialer med hurtige emissionsprocesser (scintillationsdelproces 4), som gerne skulle have en τ_d under et nanosekund (ns). Dette er en stor udfordring, da der er få fysiske emissionsprocesser ved synlige bølgelængder, der foregår på disse tidsskalaer. Det viser sig dog, at lysudsendelse fra rekombinationen af en bunden tilstand mellem en elektron og et hul efterladt i valensbåndet, kaldet en *exciton*, i en halvleder faktisk kan foregå på sub-ns-tidsskalaer. Problemet er dog, at excitoner sjældent er særligt stabile i halvledere, så man er nødt til at fremstille materialer med mikroskopisk struktur, der øger excitonens bindingsenergi.

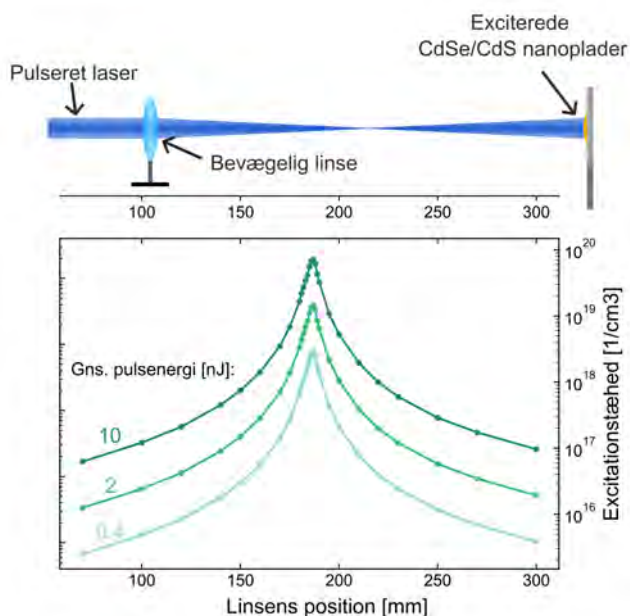
Et eksempel på et sådant materiale er CdSe/CdS-nanoplader, som er skitseret i figur 4. Nanopladernes mikroskopiske struktur øger excitonens bindingsenergi gennem fænomenet *quantum confinement*, og tillader sågar også dannelsen af biexcitoner, en bunden tilstand mellem to excitoner, ved stuetemperatur. Dette er en unik egenskab, hvilket gør dette materiale meget interessant at studere fra et videnskabeligt synspunkt.



Figur 4. Fra højre til venstre: CdSe/CdS nanopladerne i opløst tilstand. Billede af nanopladerne i opløsningen frembragt af et elektronmikroskop. En skitse af den tiltænkte geometri af nanopladerne.

At anvende materialer som CdSe/CdS-nanoplader løser måske problemet med at finde en hurtig emissionsproces, men det bringer en masse yderligere udfordringer med sig; for hvordan bygger man en makroskopisk detektor ud af nanopartikler? En løsning, som er blevet afprøvet, er at skabe en komposit-detektor, der primært består af en konventionel scintillator, men som er tilført små lag af deponerede nanoplader. Med denne teknik

er det lykkedes at skabe en detektor med en CTR på omkring 80 ps [3], hvilket repræsenterer en forbedring, men det er stadig et stykke vej fra de 10 ps. Det er dog svært at sige præcis hvorfor; skyldes dette, at CdSe/CdS-nanopladerne simpelthen har et for lavt LY , eller skal svaret findes i en ikke-optimal detektorstruktur? Der er med andre ord brug for en metode, der kan bestemme CdSe/CdS-nanopladerne og potentielt set også andre nanomaterialers LY uafhængigt af en makroskopisk detektorstruktur.



Figur 5. Øverst ses en skitse af den eksperimentelle opstilling. Under denne ses inducerede excitationstætheder ved forskellige linsepositioner, som er udregnet ved at måle w_0 og indsætte den i ligning (2).

z-scan-metoden

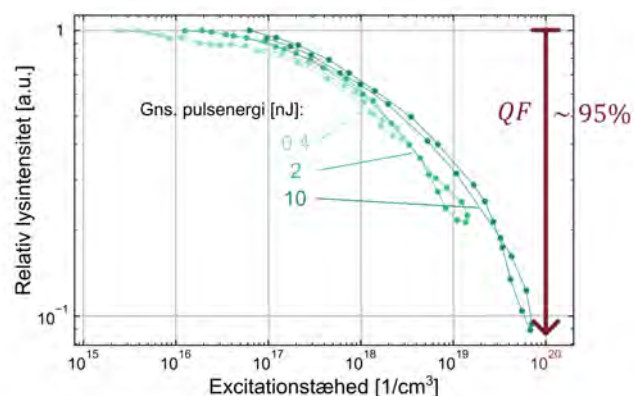
For næsten alle kendte scintillatorer afhænger materialets LY af energien af den indkomne partikel. En gamma-foton med en energi på 1000 keV vil altså ikke nødvendigvis inducere 10 gange så mange udsendte fotoner som en gamma-foton med en energi på 100 keV. Denne ikke-intuitive opførsel kaldes *Non-Linear Quenching* (NLQ) og kan forklares ved at kigge nærmere på de processer, der afgør materialets LY . Hvor meget energi, der går tabt i scintillationsdelproces 1), 2) og 3) afhænger nemlig af, hvor rumligt tæt de exciterede elektroner befinder sig. Exciteres materialet meget tæt, øges sandsynligheden for, at energien går tabt gennem processer som Auger-rekombination og Förster-dipol-dipolinteraktion [4]. Den inducerede excitationstæthed afhænger af den indkomne partikels energi, hvilket forklarer ændringen i LY .

En eksperimentel metode, som benyttes til at beskrive en scintillators NLQ, er *z-scan-metoden*, der anvender en pulseret laser og en bevægelig linse som skitseret øverst i figur 5. Excitationstætheden, som laserens inducerer, n_0 , kan udregnes som

$$n_0 = \alpha \frac{2E_p}{\pi h\nu w_0^2}, \quad (2)$$

hvor α er materialets absorptionskoefficient, E_p er energien af laserpulsens, og $h\nu$ er laserens fotonenergi. Laserpulsens rumlige udstrækning, w_0 , styres ved at bevæge linsen, hvilket enten fokuserer eller defokuserer laserens ind i materialet. Vælges pulsenergien og fokuseringstætheden korrekt, er det muligt at observere scintillatorens lysudsendelse ved alle relevante excitationstætheder, hvilket gør det muligt at identificere, hvilke(n) proces(ser), der bidrager til NLQ [4]. Man kan også anvende z-scan-metoden til at sige noget om en scintillators LY ved at undersøge, hvor meget den relative lysudsendelse falder, når excitationstætheden øges til 10^{20} elektroner/ cm^3 , kaldet *Total Quenching Fraction* (QF). Netop denne excitationstæthed er valgt som benchmark, da simulationer viser, at det er den højest observerede ved deponering af en 511 keV gamma-foton i en scintillator.

Det er interessant at benytte z-scan-metoden til at studere CdSe/CdS-nanoplader, da den gør det muligt at sammenligne deres lysudsendelse med kendte scintillators uden at skulle anvende ioniserende stråling såsom gamma-fotoner, hvilket fordrer anvendelsen af en makroskopisk detektorstruktur. Man skifter så at sige én høj-energetisk gamma-foton ud med en fokuseret puls af mange lav-energetiske, optiske fotoner, der i sidste ende har samme effekt på materialet.



Figur 6. Den relative emissionsintensitet af CdSe/CdS-nanoplader ved forskellige inducerede excitationstætheder. Hvert datapunkt repræsenterer et gennemsnit af emissionsmålinger fra 5000 laserpulser.

De indledende resultater fra z-scan på CdSe/CdS-nanoplader er vist på figur 6. Her er den relative lysudsendelse plottet mod den inducerede excitationstæthed ved 3 forskellige laserpulsenergier. Ud fra de nuværende resultater kan det konkluderes, at CdSe/CdS-nanopladers NLQ minder en del om andre konventionelle scintillatorers. Den afgørende QF -parameter kan bestemmes til omkring 95%, hvilket er i samme størrelsesorden som kommercielt anvendte scintillatorers, hvilket lover rigtig godt for potentielle anvendelsesmuligheder. Der hersker dog en del tvivl om bestemmelsen af materialets absorptionskoefficient, hvilket gør bestemmelsen af excitationstætheden og dermed også QF usikker. En præcis bestemmelse af absorptionskoefficienten er altså næste skridt på vejen mod at besvare, om CdSe/CdS-nanoplader er materialet, der vil muliggøre rekonstruktionsløs ToF-PET.

Litteratur

- [1] M. Korzhik m.fl. (2020) "Physics of Fast Processes in Scintillators". Springer International Publishing, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21966-6>.
- [2] P. Lecoq m.fl. (2020) "Roadmap toward the 10 ps time-of-flight PET challenge", *Physics in Medicine & Biology*, bind **65**, side 21RM01, <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6560/ab9500>
- [3] R.M. Turtos m.fl. (2019) "On the use of CdSe scintillating nanoplatelets as time taggers for high-energy gamma detection", *npj 2D Materials and Applications*, bind **3**, side 37, <https://doi.org/10.1038/s41699-019-0120-8>
- [4] J.Q. Grim m.fl. (2013) "Nonlinear quenching of densely excited states in wide-gap solids", *Physical Review B*, bind **87**, side 5117, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.125117>



Simon Peter Slot Jessen er ph.d.-studerende i "Materials and Light"-gruppen på Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet. Ph.d.-stillingen er en del af et større projekt, finansieret af Novo Nordisk Fonden, der undersøger hurtige luminescensprocesser i 2D-materialer og vejledes af Brian Julsgaard og Rosana Martinez Turtos.

Lise Meitners liv og forskning



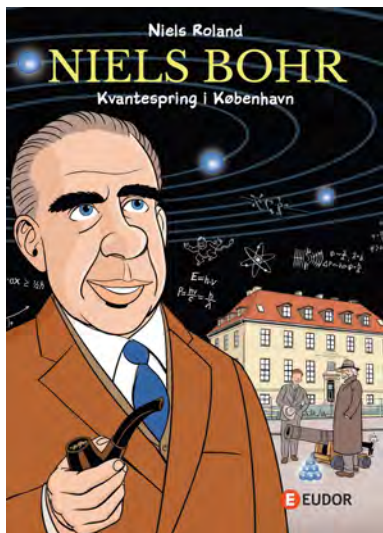
Kvinder i Fysik og Niels Bohr Arkivet afholder et offentligt foredrag om Lise Meitners liv og forskning, tirsdag den 12. november 2024 kl. 17.30-19.00 i Lundbeckfond Auditorium, Københavns Biocenter, Ole Maaløes Vej 5, 2200 København N. Alle er velkomne.

Sammen med Otto Hahn, Fritz Strassmann og Otto Frisch opdagede Lise Meitner fissionsprocessen i 1938. Lise Meitner blev nomineret 30 gange til Nobelprisen i fysik og 19 gange til Nobelprisen i kemi, men modtog den aldrig. Hun fik således ikke del i kemiprisen i 1944, da den blev tildelt Otto Hahn for nuklear fission. Foredraget hodes af Anthea Coster, assisterende direktør og forsker ved MIT Haystack Observatory.

Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen, KVANT

Bohrs kvantespringeri



Niels Roland, “Niels Bohr – Kvantespring i København”, 2024, Forlaget Eudor, 140 sider, 249,50 kr.

Denne tegneserie er tegnet og forfattet af Niels Roland, der bl.a. er kendt for talrige striber om videnskabelige emner i bl.a. Weekendavisen. Bogen er et led i markeringen af 100-året for Niels Bohr Institutet og Bohrs nobelpris og er støttet af Novo Nordisk Fonden. Tegneren har undervejs modtaget feedback fra flere forskere og sin bror Kaj Roland, der er fysiker.

Bogen er opdelt i fire dele: Springet, Usikkerheden, Spaltningen og Arven.

Første del starter i 1932. Bohr byder læseren velkommen til sit institut for teoretisk fysik. Han har indbudt mange af de forskervenner, som besøgte instituttet i 1920'erne, og som var med til at udvikle kvantemekanikken. Vi præsenteres bl.a. for Landau, Gamow, Meitner, Ehrenfest, Delbrück, Heisenberg, Dirac og Pauli. To af Bohrs sønner, Aage på 10 år og Ernest på 8 år, løber rundt og leger og får en tur på Gamows motorcykel. Inden fortællingen giver sig i kast med kvantefysikken, forklarer Bohr nogle af grundbegreberne i klassisk fysik. Bohr træder ofte ind og ud ad døre til et rum (en faktaboks) med overskriften “laBOHRatorium”, når nogle begreber skal udfoldes lidt. Bohr springer nu tilbage til sin studietid. Først hos Thomson i Cambridge og derefter hos Rutherford i Manchester. Problemerne med at forklare atomets stabilitet og Bohrs løsning med sin atommodel beskrives meget underholdende. Elektronens kvantespring mellem to baner illustreres ved, at Bohr forsvinder i en røgsky i én bane, og derefter dukker han op i en anden bane. Han passerer ikke rummet mellem banerne. Tilbage på instituttet holder gæsterne oplæg for hinanden i det historiske auditorium A, og de forbereder en sketch, hvor Bohr spiller rollen

som Gud. De begynder at tale om Einstein, som ikke er med, da han er flygtet fra Tyskland til USA.

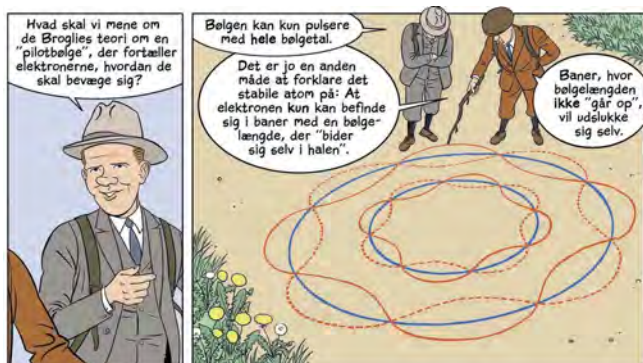
I anden del fortæller Bohr, hvordan han som nyudnævnt professor i 1916 ansatte sin første videnskabelige medarbejder Hendrik Kramers og en sekretær Betty Schultz. De havde i starten ét lille kontor. Efter nogle år fik Bohr sit eget Institut for Teoretisk Fysik i 1921. Bohr inviterede flere yngre talentfulde fysikere der bl.a. kom fra Göttingen, hvor Sommerfeld havde en gruppe, der forskede i kvantefysik. Vi hører om opdagelsen af grundstof nr. 72, som blev forudsagt og fundet i 1922 i laboratoriet i kælderen på Bohr Institutet, og derfor fik navnet Hafnium. Vi ser de unge fysikere spille bordtennis i biblioteket, mens de diskuterer de nye ideer i fysikken og biografteren, hvor Bohr har taget sine medarbejdere med ind for at se en western, samt diskussionerne efter filmen om, hvorfor det altid er helten, der skyder først og vinder i dueller. En duel med Bohr som cowboyhelt er illustreret i bedste spaghettiwesternstil.



Figur 1. Niels Bohr henter Albert Einstein ved Hovedbanegården, hvor de tager en sporvogn mod Trianglen. Her er Bohrs nye institut på Blegdamsvej under opførelse, men de to fysikere bliver så optagede af deres samtale, at de glemmer at stå af.

Bohr og Heisenberg tager på vandretur og diskuterer om elektroner er bølger eller partikler i et dobbeltspalteeksperiment. Mens de to venner går og sludrer uskyldigt, ser man en paddehattesky i baggrunden fra en atombombe. Heisenberg er plaget af høfeber og rejser til øen Helgoland. Her kan han koncentrere sig om at formulere matrix-mekanikken, hvor elektronens position og impuls ikke kommuterer ($p \times q \neq q \times p$). Dobbeltspalteeksperimentet forklares i et laBOHRatorium med Bohr og Heisenberg. Tilbage i auditorium A (i 1932) er gæsterne i fuld gang med at tegne og fortælle på tavlen. Gamow fører kridtet (der er anvendt nogle af hans originaltegninger i bogen). Vi hører om Schrödingers besøg i 1926. Bohr tager på skitur i Norge, mens Heisenberg tilbage i København formulerer ubestemthedsprincippet på en af sine ture i Fælledparken. Tilbage igen fra Norge formulerer Bohr komplementaritetsprincippet. I bogen skriver Bohr det op på vinduet under et besøg på kagehuset La Glace.

Fortællingen bevæger sig videre med Bohr og Einsteins diskussioner om kvantefysikkens realisme. I auditorium A på Institutet opføres sketchen bygget over Goethes Faust, og snart tager gæsterne hjem.



Figur 2. Bohr og Heisenberg diskuterer atommodeller på vandretur.

Tredje del foregår i 1930'erne til 1950'erne. Bohr er flyttet ind i Carlsbergs Æresbolig i 1931. Hitlers magtovertagelse i Tyskland i 1933 fører til hjerneflugt af mange fysikere af jødisk slægt. Bohrs bror Harald, der er blevet professor i matematik, får sit eget matematiske institut ved siden af Bohrs institut på Blegdamsvej. Bohr begynder at studere atomkernen som en væskedråbe sammen med Wheeler. Urankernes spaltning (fission) opdages kort før, at Tyskland besætter nabolandene og kernefysik bliver politisk. Bohr får besøg af Heisenberg, som er blevet leder af det tyske atomvåbenprogram, hvilket fortvivler Bohr. Bohr rejser til USA med sin søn Aage og bliver involveret i Manhattanprojektet. I 1944 forsøger Bohr at overbevise verdens ledere om, at udnyttelsen af atomenergien ikke skal holdes hemmelig, men deles åbent og udnyttes fredeligt. Han var dog næsten alene med det synspunkt, og blev betragtet som en spion, der delte fortrolige oplysninger med russerne. Efter atombombesprængningerne ender anden verdenskrig. Bohr genoptager arbejdet med at imødegå Einsteins kritik af, at kvanteteorien er ufuldstændig.

Bohr, Einstein og Schrödinger diskuterer det berømte katteekspirement. Det munder ud i et par kvantespring frem i tiden til Bells ulighed i 1964 og Aspects forsøg i 1982, som støtter Bohrs fortolkning. Bohr hædres med elefantordenen i 1947 og får et våbenskjold med Yin og Yangsymbolet, der symboliserer komplementaritet. I slutningen af 1950'erne er Bohr med til at grundlægge det europæiske kernefysikcenter CERN i Geneve og forskningscenteret RISØ i Danmark. Han er ved at blive gammel. Men i tegneserien bliver figuren forynget og er klar til endnu et kapitel.

I fjerde del er en ung Bohr på besøg i en fremtid hvor kvantefysikken bliver anvendt til mikrochips, lasere, hospitalsscannere og mobiltelefoner. Kvantefysikken bliver anvendt i radioaktive sporstoffer til diagnostisering, kvantebits, kvantekryptering og kvantecomputere (tegningen af denne på side 129 blev først brugt på KVANTs temanummer om kvantecomputeren, nr. 4, december 2023). Historien slutter med, at Bohr besøger sit gamle institut og den nye Niels Bohr Bygning på Jagtvej for til sidst at køre væk i en sporvogn sammen med sine gamle venner.

Niels Roland har i tyve år beskæftiget sig med formidling af videnskab i tegneserier, så han har de bedste forudsætninger for at skabe et værk som dette. Det er en tætsammenvævet fortælling, der på forbilledlig vis kombinerer videnskabshistorie og fysikformidling i en spændende historie. Tegneren og forfatteren fortæller selv at, "Vægten i tegneserien er lagt på en fabulerende rundtur i kvantefysikkens univers med tegneseriens særlige muligheder for at lege med tid, rum og kontinuitet, alt sammen nøglebegreber i kvantefysikken." Der er mange spring i tid og rum i historien, og det kan godt virke lidt forvirrende i starten. Men da hovedpersonen Bohr ofte taler direkte til læseren og minder om hovedhistorien, bliver læseren ført sikkert igennem fortællingen.



Figur 3. I tegneserien træder Bohr ofte ind og ud ad døre til et rum (en faktaboks), når nogle begreber skal udfoldes lidt.

Bohr er ofte citeret for at have sagt, at "kvante-verdenen er principielt uanskelig." Dette siger han også i tegneserien på side 121. Baggrunden for dette "billedforbud" var, at den klassiske determinisme tilsyneladende brydes i kvantefysikken. Man kan principielt ikke forestille sig, hvordan en elektron bevæger sig, da det er svært at tænke på den som bølge og partikel samtidig, og at den kan være to steder på én gang. Bohr har måske nok ret i, at ét billede ikke er nok. Nu har vi en hel tegneserie til at spore sig ind på kvanternes mærkelige verden. Plus alt det, man kan tænke sig sker mellem billederne. Roland lykkedes rigtig godt med at falsificere Bohrs billedforbud.

Det er ifølge denne anmelder en sand kraftpræstation at skabe en bog som denne, der er både saglig og humoristisk og undertiden også en æstetisk nydelse at læse. Der er til mange timers oplysende og underholdende selskab med Bohr og hans venner. Bogen har internationalt format og vil i engelsk oversættelse kunne konkurrere med de bedste videnskabelige "graphic novels".

Alle, der er interesseret i Bohr, kvantefysik eller en godt tegnet historie kan få glæde af bogen. Aldersgrænsen er sat fra 13 år og opefter. Bogen er oplagt til elever på fysik B eller A, og classesæt kan købes med rabat.

Se desuden interviewet med tegneren Niels Roland på næste side.

Interview med Niels Roland om Bohrs kvantespring i København

Michael Cramer Andersen, KVANT

Niels Bohr er kommet med på holdet af fysikere, som har fået deres egen tegneserie. Niels Roland fortæller om den opgave, det var at forfatte og tegne en historie med Niels Bohr og kvantefysikken i centrum.

Baggrunden for Bohrtegneserien

Niels Roland er én af Danmarks mest erfarne tegnere og fortællere med en forkærlighed for naturvidenskab bl.a. fysik. Han har længe haft en drøm om at skabe en tegneserie om Niels Bohr.

I 2021–22 blev 100-året for Niels Bohr Institutets indvielse (1921) og Bohrs nobelpris (1922) markeret på flere måder. Roland bidrog i juli-august 2021 med en 4 siders sommerserie om Kvantefysik i Weekendavisens tillæg "Ideer". Man kan allerede finde nogle af anekdoterne og flere plotelementer i den nye bog i denne serie. Roland begyndte herefter at researche til en større fortælling. I 2022 søgte han Novo Nordisk Fonden om økonomisk støtte til det betydeligt større projekt, det er at skabe en hel bog.

Med denne støtte kunne han koncentrere sig om opgaven, som kom til at tage omkring et år. Han blev også sat i forbindelse med forskere fra Niels Bohr Institutet og DTU samt medlemmer af Bohrfamilien, som kunne give faglig feedback undervejs i arbejdet. Man kan derfor regne med, at det meste indhold er korrekt.



Figur 1. Niels Roland har været freelancetegner og -fortæller siden 1986 og har tegnet for mange aviser, forlag og fagblade. I årene 2005–2020 tegnede han bl.a. tegneserien "Kloge hoveder" for Weekendavisen.

KVANTs udsendte reporter møder Niels Roland i tegnestuen Gimle på Østerbro. Her deler han arbejdsplads med en række andre danske tegnere. Vi skal tale

om Rolands nye tegneserie om Niels Bohr (anmeldt i dette nummer).

I interviewet kommer vi bl.a. ind på historien, kulisserne og personerne samt fysikken.

Historien

Dialogen er både oplysende, underholdende og kortfattet. Hvordan arbejder du med denne del?

"Jeg prøver på at skrive teksten, så det giver mening med et narrativt flow. Og så forsøger jeg at koge de videnskabelige ting ned. De steder, hvor der har været mulighed for det, har jeg brugt citater fra fysikere ikke mindst fra Bohr. Andre gange har jeg været nødt til at prøve at koge det ned. Der er som lægmand en stor fare for at forkorte eller koncentrere på en måde, så noget væsentligt går tabt. Der har det været uvurderligt at have nogle mere kvikke end mig selv til at læse med på sidelinjen. Især i de passager, hvor jeg skulle illustrere dobbeltspalteeksperimentet og overlejlrede bølgers superposition og sådan noget. Både hvad tekster og tegninger angår, gælder det om at finde nogle analogier, der gør det forståeligt for den ret forudsætningsløse læser. Tanken var jo at lave en tegneserie, der ikke var henvendt til eksperter, men til nogen, der ikke ved specielt meget om fysik, men godt vil have en indføring i hvad kvantefysik grundlæggende går ud på."

Der må også være nogle overvejelser over, hvad personer skal sige, og hvad der skal vises igennem tegninger. Det er vel nemmest at få så meget som muligt ud igennem tegninger?

"Ja det er klart, for det kan virke kedeligt, hvis det bare er to mennesker der taler sammen. Jeg havde læst, at da Heisenberg kom til København, tog Bohr ham med på en flere dages vandretur, og det giver mulighed for nogle billeder, der er mere sjove end to mænd i jakkesæt foran en tavle, som de skriver formler på.

For at gøre skriblerierne på tavlen mere levende har jeg anvendt Gamows karikaturtegninger på tavler. De blev brugt i opførelsen af en sketch over Goethes Faust. Nogle af hans tegninger er brugt direkte, og andre af mine tegninger er i samme stil. Det var en tydeliggørelse af, at de lidt verdensfjerne ting, der blev skrevet på tavlen, kan træde ud og blive virkelige. Colorado University, som havde rettighederne til Gamows tegninger, gav tilladelse til at bruge dem, og det var jeg meget glad for."

Du har formået at levendegøre flere anekdoter om Bohr i striberne. Har du søgt inspiration i nogle af de bøger, der er skrevet om Niels Bohr, eller har du fået dem fortalt af forskerne?

“Jeg har især brugt bogen redigeret af Aage Bohr i 1964 kort tid efter Bohrs død, “Niels Bohr. Hans liv og virke fortalt af en kreds af venner og medarbejdere.”

Den indeholder alle de kendte anekdoter, som også er blevet fortalt i andre bøger. Det nemmeste havde jo været at lave en ren biografi om hans liv. Men det synes jeg, at der er andre, der har gjort ganske glimrende. Så det var sjovere at lave en fortælling om kvantefysikkens historie og lade Bohr være rundviser i “Oplevelsespark Kvanteland”.”



Figur 2. Bohr er både skuespiller og tilskuer (fortæller) i fortællingen.

Det er også noget du har brugt i dine serier før med en gennemgående figur, der tager læseren med i hånden?

“Netop. I en tegneserie har man mulighed for at træde ud af tid og sted og se lidt stort på kontinuitet og kausalitet og de andre ting, som kvantefysikken udfordrer. Man kan dér gøre noget, som er svært at gøre på samme måde med mange andre udtryksformer.”

I starten af bogen skifter scenen flere gange, og så vender man tilbage til hovedhistorien, idet Bohr husker læseren på, at gæsterne sidder og venter.

“Jeg håber ikke, at det er alt for forvirrende. Jeg har prøvet at møde de store problemer ved bare at gå ind igennem en dør og tage et sidespring, og så senere vende tilbage igen.”

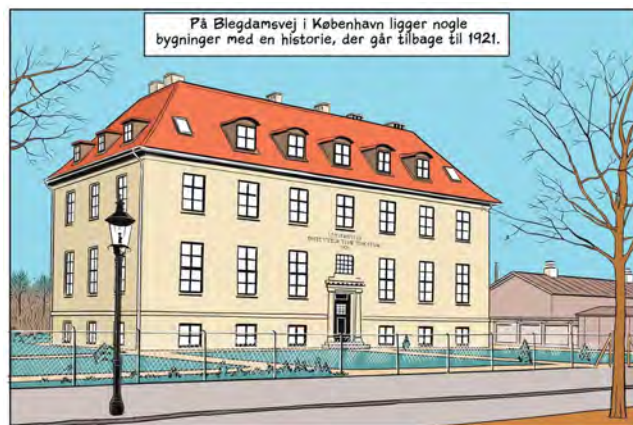
Kulisserne og personerne

Har du fået rundvisning på Niels Bohr Institutet og fået lov til at fotografere og tegne udvalgte lokaler?

“Ja, det har jeg fået lov til af flere omgange. Der er lidt researcharbejde i, hvad der har eksisteret på forskellige tidspunkter, idet instituttet har forandret sig løbende. På et tidspunkt var jeg i tvivl om, hvornår Matematisk Institut, som var ledet af Bohrs bror Harald, blev opført. Det blev indviet i 1934. På en tegning havde jeg anbragt det ved siden af hovedbygningen, og så sagde min bror Kaj, at det var ikke bygget på det tidspunkt. Så måtte jeg ind og ændre i tegningen. Jeg har overhovedet ikke

noget overblik over hele byggeriet og har stort set kun tegnet noget, der foregik i villaen og hovedbygningen (hele bygningskomplekset er opstået ved knopskydning med bl.a. underjordiske gange, så man kan gå tørskoet mellem laboratorierne og kantinen, red.).

Jeg bruger mange fotos som forlæg og laver raskitser digitalt. Tidligere arbejdede jeg med tusch, men de sidste par år er jeg gået helt over til digital tegning. Det er nemmere at have det hele digitalt, både når man skal rette og farvelægge tegningerne, og når det skal forberedes til tryk.”



Figur 3. Bohrs Institut for Teoretisk Fysik i Niels Rolands streg.

Du må have anvendt et væld af historiske fotografier som forlæg til tegningerne?

“Niels Bohr Arkivet har været behjælpelig med mange fotografier. Mange af tegningerne af instituttet er lavet på grundlag af fotos. Der eksisterede ikke noget billede, hvor alle de fremtrædende personer var til stede samlet i auditorium A, så dette billede (på side 117) har jeg selv stykket sammen og sørget for, at alle personerne var samlet. Selve grundtegningen af auditoriet er lavet efter et foto.

Altting skal researches. Man skal finde et billede af et tog, der ser ud som dem, der kørte på det tidspunkt, da Bohr tog fra København til Bruxelles og kørte på de tyske statsbaner. En jernbaneentusiast vil sikkert kunne slå ned på det. Jeg har været mest optaget af, at det fysisk set skulle være rigtigt og de ting, der foregår på Niels Bohr Institutet, ser rigtige ud.

I udformningen af personerne har jeg set på fotografier og lavet min egen udgave af, hvordan de skulle se ud i karikeret udgave på den måde, jeg laver dem på. Der var mange forskellige typer lige fra Bohr selv, der var udendørs menneske, der løb på ski, sejlede og spillede bordtennis, til den noget verdensfjerne Dirac, som var stereotypen på en distræt videnskabsmand.

Bohr var lidt ældre (ca. 15 år, red.) end mange af assistenterne og virkede som en faderfigur for de unge drenge, der lavede det, der blev kaldt “knabenfysik”. Det var de helt unge, skarpe hjerner, der udkastede de store teorier. Man siger, at når man har passeret de tredive, kommer der ikke længere en genial ide, og man arbejder videre med de ting, man har sat i gang. Det gjaldt også for Bohr, som var ret ung da han fremsatte sin atomteori (28 år, red.), og senere byggede han videre på den. De

unge fysikere fik lov til næsten alt, men Bohr synes, de skulle holde lidt igen med at bruge bøgerne i biblioteket som bordtennisbats.

Bortset fra hans helt personlige bidrag til udviklingen af kvantefysikken, så er den største arv, han har givet, nok det miljø, han skabte på Bohr Institutet, og som var forud for sin tid. Det var antiautoritært, hvor mange fysikere samarbejdede på lige fod, og hvor det ikke handlede om, hvorvidt man var professor eller studerende, men om man havde noget at byde ind med. Det er den måde forskningen i høj grad foregår på i dag. Det kunne måske ikke være opstået i et andet land på det tidspunkt.”

Niels Bohr virker både sympatisk og lettere irriterende. Hvordan har det været at puste liv i ham som tegneseriefigur?

“Det tror jeg, han har været. Bohr var et meget, meget venligt og omsorgsfuldt menneske. Når han påpegede fejl, var det ikke for at støde, men fordi det skulle være rigtigt. Han var kendt for at være ustopkelig i diskussioner. Han blev ved med at diskutere, indtil han kunne overbevise andre om rigtigheden af hans argumenter.”

Det kan også være svært at læse hans tekster, fordi de er så indviklede – de er ikke så klart formulerede.

“Han er kendt for, at han hele tiden skulle omgive sig med kolleger. Han kunne ikke bare sidde i elfenbenstårnet og udtænke tanker. Det skulle hele tiden foregå i dialog. Når han holdt foredrag, skulle det foregå efter manuskript, og der kunne han nogle gange gå i stå og holde pause og derefter fortsætte sætningen præcis, hvor han slap. Når han talte sammen med kolleger og venner var han helt anderledes sprudlende og vittig.

Nogle af de ting han har efterladt på skrift, er ret tågede. Han var meget optaget af, at teksten skulle være ufatteligt præcist formuleret, så der ikke kunne være nogen kritikpunkter. Når han sammen med en medarbejder filede på et manuskript en hel aften, mens der blev pulset på piben, og der ikke skete noget, måtte de ofte gå hjem og sove på det. Næste dag kunne han komme strålende med en ændring af et enkelt ord og sige, nu er der virkelig fremskridt!”

Fysikken

Fysikkens modeller er ofte meget visuelle og benytter analogier, men lige netop kvantefysikken er svær at visualisere. Du citerer Bohr for, at sige “kvanteverdenen er principielt uanskelig” (side 121). Hvordan har du fundet inspiration til alle disse billeder, der f.eks. forklarer fænomener som interferens?

“Det med partikler og interferens er blevet udtrykt gennem dobbeltspalteeksperimentet. For at man som forudsætningsløs læser skal kunne forstå det, er man nødt til først at se parallellen til noget fra den makrofysiske verden, fx vandbølger igennem nogle åbninger.

Når fotoner eller elektroner har ansigter på, er det for at gøre det billedmæssigt sjovt og interessant.

Det er noget, jeg har udviklet igennem mange år og er i virkeligheden det, jeg er bedst til og synes er sjovest

at arbejde med i tegneserieform. Jeg har lavet andre ting tidligere, og det gør jeg også stadigvæk. Der har jeg nok en særlig force i forhold til mange andre tegnere. Det kræver et rimelig stort overblik over stoffet, at man både kan gribe det an som et narrativt forløb samtidig med, at man anskueliggør de her ikke specielt nemme problemstillinger.

Udover at vise kvantefysikkens udvikling ville jeg også gerne vise, at det var mennesker af kød og blod, der gjorde det. Der er formodentlig ikke noget andet tidspunkt i videnskabens historie, hvor så mange fagligt store personligheder i tæt dialog med hinanden udviklede teorier, der har betydet så meget for verden.”

I slutningen af bogen behandles udviklingen af atombomben.

“Ja, det er vildt spændende. Man kunne godt bruge mere plads på de moralske og politiske konsekvenser af den opdagelse, men efter Oppenheimer-filmen kender de fleste historien.



Figur 4. Tegning fra bogen.

Den sidste del af Bohrs liv har jeg ikke brugt så meget plads på. Det er ikke der, han gjorde sine opdagelser. Jeg ville også gerne beskrive nogle af anvendelserne i dag med bl.a. halvledere og kvantecomputere. Det kunne selvfølgelig kun blive en overflyvning.

Mit håb er, at jeg kan tage fat på nogle af de andre spændende ting indenfor fysikken og lave en tegneserie mere, hvis der kan findes midler til det. Fortællingen peger lidt frem mod multiverset, og hvad der sker i partikelacceleratorer og astrofysikken med bl.a. gravitationsbølger.”

Boltzmannfaktoren – breddeopgave 107, 108, 109 og 110 med didaktisk kommentar

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

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

Her bringes løsninger og kommentar til opgaverne fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaverne i sidste nummer af Kvant var disse fire breddeopgaver (nr. 107, 108, 109 og 110 her i Kvant):

Breddeopgave 107, 108, 109 og 110. Boltzmannfaktoren

Magnetiske såkaldte enkeltomænepartikler til datalagring har typisk en foretrukken akse, hvor energien er mindst ved magnetisering i de to retninger langs akse. Det kræver større energi proportionalt med partiklernes volumen at magnetisere dem på tværs af akse. Hvordan afhænger den tid, man kan regne datalagringen for uforstyrret af termiske fluktuationer, af partiklernes volumen? Begrund svaret.

Båndgabets i isolatorer er større end i halvledere. Men ikke størrelsesordener større. Hvoraf kommer det da, at de specifikke ledningsevner for isolatorer og halvledere afviger mange størrelsesordener fra hinanden? Begrund svaret.

Mættede dampes tryk over en væske øges typisk med temperaturen proportionalt med $\exp(-T_0/T)$. Forklar dette og angiv hvad T_0 afhænger af.

Erfaringsmæssigt varierer viskositeten af væsker typisk som $\exp(+T_0/T)$ (T_0 er en konstant). Virker det rimeligt ud fra et mikroperspektiv? Begrund svaret.

Løsninger

107: Termiske molekyllære påvirkninger fra omgivelserne kan få magnetiseringsretningerne af partiklerne med tilhørende forskellige energier til at fluktuere afhængigt af temperaturen af partiklerne og omgivelserne. Sandsynligheden for, at magnetiseringen af en enkeltomænepartikel flipper over energibarrieren $E_{\text{vinkelret}} - E_{\text{langs}}$, hvor $E_{\text{vinkelret}}$ og E_{langs} er energien af partiklen magnetiseret henholdsvis vinkelret på og på langs af magnetfeltet, er proportional med Boltzmannfaktoren $\exp(-(E_{\text{vinkelret}} - E_{\text{langs}})/k_B T)$. Da energibarrieren er proportional med partiklernes volumen V , er sandsynligheden for termisk forstyrrelse af datalagringen derfor givet ved faktoren $\exp(-aV/k_B T)$, hvor a er energiforskellen per volumen mellem magnetisering vinkelret på og langs med den foretrukne retning. Tiden, hvor man kan regne datalagringen for stabil, vokser derfor eksponentielt med enkeltomænepartiklernes volumen.

108: Både isolatorer og rene halvledere har et valensbånd med næsten alle enkeltelektronstilstande

besatte og få elektrontilstande besatte i ledningsbåndet. I den situation er antallet af huller i valensbåndet og elektroner i ledningsbåndet i forhold til antallet af enkeltelektronstilstande i valensbåndet $\exp(-E_g/k_B T)$, altså Boltzmannfaktoren, hvor E_g er båndgabets. Antages båndgabets for en isolator, E_{gi} , fx at være 5 gange større end båndgabets for en halvleder, $E_{gh} = 5E_{gi}$, vil forholdet mellem antallet af ledningsbærere og dermed ledningsevner for henholdsvis isolatoren og halvlederen derfor være givet ved

$$\begin{aligned}\sigma_i/\sigma_h &= \exp(-5E_{gh}/k_B T) / \exp(-E_{gh}/k_B T) \\ &= [\exp(-E_{gh}/k_B T)]^4.\end{aligned}$$

Da $\exp(-E_{gh}/k_B T)$ ved stuetemperatur er mange størrelsesordener mindre end 1, ses det i endnu højere grad at være tilfældet for σ_i/σ_h . Ledningsevnernes eksponentielle afhængighed af båndgabenes størrelser gør, at små ændringer af størrelsen af et båndgab medfører store ændringer af den tilhørende ledningsevne.

109: Dampen over en væske er mættet, når damp og væske som samlet system er i termisk ligevægt. Vi simplificerer systemet til at bestå af to energiniveauer for dets molekyler. Et molekyle i dampfasen har energien E_D , medens et molekyle i væskefasen har energien E_V . Tætheden af molekyler i dampfasen, n_D , i forhold til tætheden af molekyler i væskefasen, n_V , vil da være givet ved Boltzmannfaktoren: $n_D/n_V = \exp(-(E_D - E_V)/k_B T)$. Ifølge idealgasloven er trykket i den mættede damp derfor: $P = n_D k_B T = n_V k_B T \exp(-(E_D - E_V)/k_B T)$. Her er n_V kun svagt afhængig af temperaturen medens faktoren $k_B T$ sammenlignet med Boltzmannfaktoren kun varierer langsomt med temperaturen. P øges derfor typisk med temperaturen proportionalt med $\exp(-T_0/T)$, hvor $T_0 = (E_D - E_V)/k_B$. $k_B T_0$ er den latente varme per molekyle ved faseovergangen fra væske til damp.

110: Væsker består af molekyler (eller atomer), der som i faste stoffer svinger om nogle ligevægtspunkter mellem nabomolekylerne. Når væsker i modsætning til faste stoffer kan flyde, skyldes det, at der i det molekyllære arrangement er plads nok til, at rearrangering af molekylerne ind imellem kan finde sted ved tilstrækkeligt store energifluktuationer. Den simpleste antagelse om hyppigheden af disse fluktuationer er, at den på en eller anden måde er fastlagt ved en karakteristisk aktiveringsenergi A og en dertil-hørende

Boltzmannfaktor $\exp(-A/k_B T)$. Derfor virker temperaturafhængigheden $\exp(-T_0/T)$ for letflydigheden og omvendt $\exp(+T_0/T)$ for viskositeten rimelig.

Kommentar

I et afgrænset system med konstant volumen og partikel-tal i termisk ligevægt med et stort varmereservoir med den absolutte temperatur T er sandsynligheden P_i for at finde systemet i den i 'te elementartilstand proportional med Boltzmannfaktoren $\exp(-E_i/k_B T)$, hvor E_i er systemets energi i elementartilstanden. Derfor er

$$P_i = \exp(-E_i/k_B T) / \sum_j \exp(-E_j/k_B T), \quad (1)$$

da $\sum_i P_i = 1$. Summationen i ligning (1) gælder, når der er tale om statistisk kvantemekanik. Er der tale om statistisk klassisk mekanik skal summationen erstattes af en integration. Bortset herfra er ligning (1) det fælles udgangspunkt for både statistisk klassisk mekanik og statistisk kvantemekanik for afgrænsede systemer med konstant volumen og partikel-tal i termisk ligevægt med et stort varmereservoir.

I opgave 107 er systemet en enkeltdomænepartikel i et magnetfelt, hvis mulige elementartilstande der skal tages stilling til. Udgangspunktet er, at partiklen er præpareret til at være i en elementartilstand med energien E_{langs} i magnetfeltet. Men da partiklen er påvirket af omgivelser med temperaturen T , vil den, som tiden går, blive bragt i andre elementartilstande. Hvis en af disse har energi $E_{\text{vinkelret}}$ eller større, er der risiko for, at partiklen flipper 180° hen over energibarrieren $E_{\text{vinkelret}} - E_{\text{langs}}$. Forholdet mellem sandsynligheden $P_{\text{vinkelret}}$ for at finde systemet i en elementartilstand med energien $E_{\text{vinkelret}}$ og sandsynligheden P_{langs} for at finde systemet i en elementartilstand med energien E_{langs} er ifølge ligning (1):

$$\frac{P_{\text{vinkelret}}}{P_{\text{langs}}} = \exp\left(-\frac{E_{\text{vinkelret}} - E_{\text{langs}}}{k_B T}\right) \quad (2)$$

For at finde risikoen P_{flip} for, at partiklen flipper, har vi brug for at finde summen af alle P_i for elementartilstande med E_i større end $E_{\text{vinkelret}}$. Det indebærer en integration fra $E_{\text{vinkelret}}$ til ∞ , og at vi tager højde for, at der kan være forskellige elementartilstande med samme energi. Det sidste kan vi, når $k_B T \ll E_{\text{vinkelret}} - E_{\text{langs}}$, overslagsmæssigt se bort fra, fordi det da som faktor kun bidrager med en langsomt varierende funktion af energien sammenlignet med eksponentialfunktionen. Vi har så, med $z = \frac{E_i}{k_B T}$:

$$\begin{aligned} P_{\text{flip}} &= \int_{\frac{E_{\text{vinkelret}}}{k_B T}}^{\infty} \exp\left(-\frac{E_i - E_{\text{langs}}}{k_B T}\right) dz \\ &= \exp\left(-\frac{E_{\text{vinkelret}} - E_{\text{langs}}}{k_B T}\right). \end{aligned}$$

Derfor er det med god tilnærmelse rimeligt at regne med, at risikoen, for at partiklen flipper efter en termisk fluktuation, er proportional med Boltzmannfaktoren på højre side af ligning (2). Og at der med faldende sandsynlighed skal gå tilsvarende lang tid, før det sker.



Figur 1. Ludwig Eduard Boltzmann (1844–1906).

I opgave 108 er Boltzmannfaktoren $\exp(-E_g/k_B T)$ strengt taget en tilnærmelse til en Fermi-Dirac-fordeling i grænsen $E_g \gg k_B T$. Fordelingen angiver antallet af elektroner i forskellige enkelt-elektron-tilstande. Ved udledningen af Fermi-Dirac-fordelingen ud fra ligning (1) er elektronerne antaget at kunne fordeles som ikke-vekselvirkende på enkelt-elektron-tilstandene, således at de forskellige elementartilstande af det samlede system udgøres af de forskellige elektronfordelinger. Men man kan også tænke på Boltzmannfaktoren som udtryk for den relative sandsynlighed for, at en elektron har henholdsvis den ene eller den anden energi i et system, som blot består af to energiniveauer med afstanden E_g .

I løsningen af opgave 109 er systemet på tilsvarende måde simplificeret til blot at have to energiniveauer, hvor der er set bort fra molekylernes indbyrdes vekselvirkning på hvert niveau.

I løsningen af opgave 110 er der analogiseret til behandlingen af fx opgave 107's lidt mere håndterbare problem.

Ingen af løsningerne på de fire opgaver er eksakte. De fysikstuderende på RUC gennemfører ved siden af breddekurset et mere matematisk formelt kursus i statistisk mekanik. Arbejdet på breddekurset med opgaver, som de fire i artiklen her, er ment komplementerende i forhold hertil.

Uden sådanne opgaver kan der være en risiko for, at skoven ikke ses for bare træer, når fx de grundlæggende begreber risikerer at drukne i matematik ved eksakte udledninger af Fermi-Dirac-fordelingen og Bose-Einstein-fordelingen, med Boltzmannfordelingen som approksimativt grænsetilfælde ved høje temperaturer. Det kan give det generelt forkerte indtryk af Boltzmannfordelingen som approksimativ og Fermi-Dirac- og Bose-Einstein-partikelfordelingslovene som basale. Hvor sandheden jo er, at det er disse to fordelinger, der er approksimative, idet de går ud fra ikke-vekselvirkende enkeltpartikler, hvorimod Boltzmann-

fordelingen i form af ligning (1) er fundamental. Den grundlæggende antagelse bag den er, at sandsynligheden af en elementartilstand for et system er bestemt af dets energi i elementartilstanden. Elementartilstande med samme energi har samme sandsynlighed. Herefter kan vi tænke på et system bestående af to delsystemer i termisk ligevægt. Kalder vi sandsynligheden for at finde system 1 i elementartilstanden i med energien E_i for $P_i^1(E_i)$, sandsynligheden for at finde system 2 i elementartilstanden j med energien E_j for $P_j^2(E_j)$, og sandsynligheden for at finde det samlede system 1+2 i elementartilstanden i, j med energien $E_i + E_j$ for $P_{i,j}^{1+2}(E_i + E_j)$, gælder:

$$P_{i,j}^{1+2}(E_i + E_j) = P_i^1(E_i) \cdot P_j^2(E_j), \quad (3)$$

altså at sandsynligheden for samtidigt at finde delsystem 1 i tilstanden i og delsystem 2 i tilstanden j er lig med sandsynligheden for at finde delsystem 1 i tilstanden i gange sandsynligheden for at finde delsystem 2 i tilstanden j . Boltzmanns ligning (1) følger så matematisk af ligning (3). Eller sagt tilspidset: Boltzmannfaktoren skyldes, at energier adderes, medens sandsynligheder multipliceres. Fundamentalt!

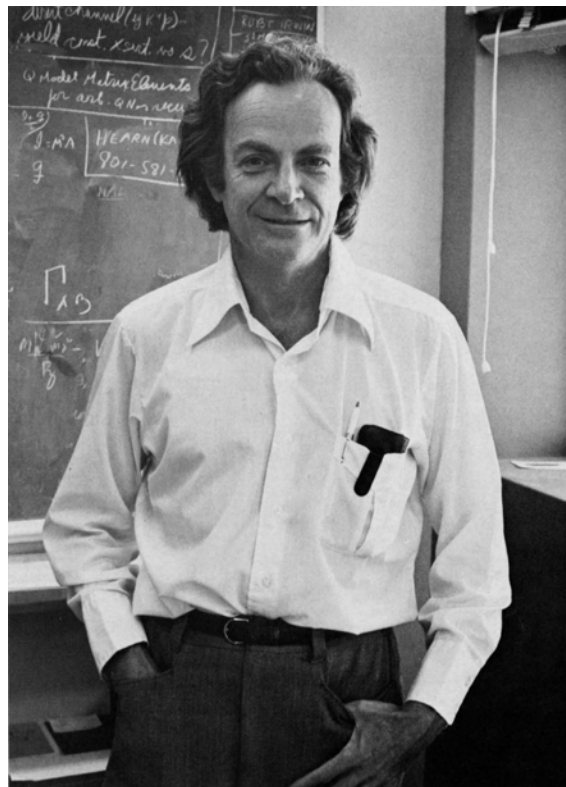
R.P. Feynman sammenfatter i indledningen til sine forelæsningsnoter i statistisk mekanik [1] den fundamentale betydning af ovenstående ligning (1) således:

“This fundamental law is the summit of statistical mechanics, and the entire subject is either the slide-down from this summit, as the principle is applied to various cases, or the climb-up to where the fundamental law is derived and the concepts of thermal equilibrium and temperature T clarified.”

Jeg synes, at det er vigtigt, ved hjælp af opgaverne, at gøre de studerende opmærksom på, at Boltzmannfaktoren er styrende for mange fysiske fænomener. Og at styringen rækker ud over de fænomener, der lader sig modellere med rimelig matematisk eksakthed. I mange tilfælde kan alene selve faktoren være en virksom heuristisk model, fordi eksponentialfunktioner dominerer over andre funktionelle faktorer. Jeg har ønsket at træne de studerende i kvalitativt at kunne få øje på, hvornår essensen i et fysisk fænomen er Boltzmannfaktoren i sammenhæng med en energibarriere. På samme måde som jeg komplementerende til den mere formelle undervisning i kvantemekanik har ønsket at træne de studerende i kvalitativt at kunne få øje på, hvornår essensen i andre fysiske fænomener er usikkerhedsrelationen. Jf fx [2].

Den opmærksomme læser vil måske have lagt mærke til, at opgave nr. 109, i modsætning til de øvrige tre i artiklen her, ikke har “Begrund svaret” i opgaveformuleringen. Opgaven er stillet af Tage Emil Christensen, da han var læreren på Breddekurset. Han synes, at det er en selvfølgelighed, at svaret skal begrundes. I modsætning hertil er jeg af den opfattelse, at mange studerende ikke nødvendigvis opfatter det sådan. Fra anden side

er de til en vis grad vænnet til opgaveudfordringer, hvor det afgørende er det rigtige svar, og ikke begrundelsen for svaret. Jeg er godt tilfreds med, at besværgelsen “Begrund svaret” blandt de fysikstuderende på RUC er så indarbejdet, at jeg hører den brugt jokende i andre sammenhænge end fysik.

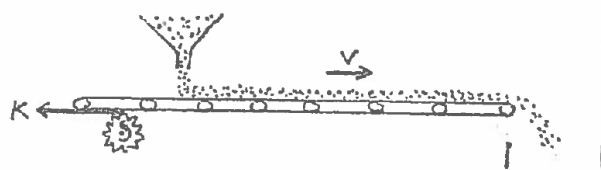


Figur 2. Richard Feynman (1918–1988).

Breddeopgave 111. Transportbånd

Inden næste nummer af Kvant udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 1977, nr. 111 i rækken her i Kvant):

Et transportbånd fungerer som vist på figuren.



Hvor stor en kraft skal båndet påvirkes med af motoren? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af Kvant.

Litteratur

- [1] R.P. Feynman (1972) “Statistical Mechanics: A Set of Lectures”, W.A. Benjamin, Reading, Mass.
- [2] J.H. Jensen (2018) “Usikkerhedsrelationen og Bohrradius – breddeopgave 74 og 75 med didaktisk kommentar”, *Kvant*, bind 28, nr. 1, side 25–26.

Om nøjagtighed og opløsningsevne

Erik Høg, Niels Bohr Institutet

I Kvants decembernummer (2023, nr. 4) kan man læse, at opløsningsevnen er den maksimale målenøjagtighed, der kan opnås med et optisk apparat til astrometri. Men det er forkert, og da det er en ret almindelig misforståelse, synes jeg, den bør rettes i Kvant.

I en breddeopgave af Jens Højgaard Jensen [1] forklares den nøjagtighed på et bueminut, som Tycho opnåede. Forfatteren skriver, at “Tycho Brahes målinger var i nærheden af det fysisk mulige med den målemetode han anvendte”, idet opløsningsevnen for det menneskelige øje er et bueminut. Han observerede jo uden kikkert, der først blev opfundet efter hans tid.

Men der har været andre fejlkilder i Tychos instrumenter som årsag. Jeg vil nu forklare de forskellige begreber nærmere, og hvad der sætter grænsen for astrometrisk nøjagtighed. Det er ikke opløsningsevnen, der sætter grænsen.

Lad mig angive nøjagtigheden for et moderne instrument og vise, at den er meget bedre end opløsningsevnen. Opløsningsevnen beregnes ofte som vinklen $R = \lambda/D$ radian, hvor λ er lysets bølgelængde, og D er objektivets diameter. Somme tider sættes en faktor 0,61 på dette udtryk, men det er småting i denne sammenhæng. Hvis to lige klare stjerner i kikkerten står tættere sammen end R , smelter de to lyspletter sammen og kan ikke længere skelnes som to stjerner – sådan bruges ordet opløsningsevne i astronomi.

Nøjagtigheden ved måling af en stjernes position, altså standardafvigelsen, kaldes s , og tages fra Tabel 1 i en stor artikel om fotoelektrisk astrometri af Lindegren [2], hvis rigtighed er bekræftet fx ved observationer med den astrometriske satellit Hipparcos.

Størrelsen s er i radianer givet ved:

$$s = \frac{\lambda}{\pi D \sqrt{N}}, \quad (1)$$

hvor N er antallet af registrerede fotoner i billedet af en stjerne.

Denne formel udtrykker, at billedets position/beliggenhed bestemmes mere sikkert ud fra et stort antal fotoner, og at denne forbedring sker proportionalt med kvadratroden af antallet.

Med fx $\lambda = 500$ nm, $D = 10$ mm og $N = 10000$ fotoner fås $s = 0,16 \times 10^{-6}$ rad = $0,033''$ (buesekunder), altså meget mindre end opløsningsevnen på $\lambda/D = 50 \times 10^{-6}$ rad = $10''$.

Lad os nu se på Ole Rømers observationer fra 1706. Ifølge Fabricius [3] har de en nøjagtighed på ca. $5''$ (5 buesekunder). Kikkerten på meridiankredsen havde en linse med en beskeden diameter, som vi ikke har nogen angivelse om, siger Claus Fabricius, som jeg også takker for en opmuntrende kommentar til dette indlæg. Måske

var $D = 10$ mm, så kikkerten havde en opløsningsevne på $10''$, hvis linsen var perfekt.

I et senere værk [4] angives den indre nøjagtighed eller “indre fejl” eller reproducerbarhed for en observation af en stjernes declination til $4,2''$. Det er den tilfældige del, som omfatter observatørens indstilling på stjernen, fejl fra aflæsning af mikroskoper, variation af den atmosfæriske refraktion fra nat til nat, og systematiske fejl fra inddelingerne på kredsen. Tilsvarende for stjernens anden koordinat, rektascension, angives en typisk fejl på $2''$, altså meget mindre end opløsningsevnen.

Ved meridiankredsen indstiller observatøren en tynd tråd i synsfeltet gennem midten af stjernen. Det er en erfaring fra astronomi, at man kan stille en tråd gennem midten af en rund plet med en reproducerbarhed på en hundrededel af plettens diameter.

Litteratur

- [1] J. Højgaard Jensen (2023) “Tycho Brahe – Breddeopgave 106 med didaktisk kommentar”, *Kvant*, bind 34, nr. 4, side 39–40.
- [2] L. Lindegren (1978) “Photoelectric Astrometry – a Comparison of Methods for Precise Image Location”. <https://zenodo.org/records/10493823>
- [3] C. Fabricius (2011) “Ole Rømer – I kongens og videnskabens tjeneste”, Aarhus Universitetsforlag, side 292–307.
- [4] C. Fabricius, N.T. Jørgensen og C.G. Tortzen (2023) “Ole Rømer’s Triduum”, Society for Danish Language and Literature.

Jens Højgaard Jensen svarer

Erik Høg har ret i sin kommentar. Der er forskel på bredden af en fordeling og nøjagtigheden, hvormed tyngdepunktet af fordelingen kan bestemmes. Jeg har i sin tid været for hurtig ved formuleringen af breddeopgaven om Tycho Brahe. Da bedømmelsen af de studerende i højere grad går efter, om de tænker som fysikere, end om de finder frem til rigtige besvarelser, har skaden for de studerende på breddekurset formentlig været begrænset.

Men, selvom det ikke er første gang, vi har vovet os ud på for dybt vand med en breddeeksamensopgave, forsøger vi, uden at skade genren, selvfølgelig at undgå det.

Nyt fra foreningerne

Nyt fra SNU

Cecilie Pedersen

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) har i anledning af sit 200-års jubilæum tildelt H.C. Ørsted Guldmedaljen i hhv. fysik og kemi til professor Jens Kehlet Nørskov og professor Morten Meldal for deres banebrydende bidrag inden for fysik og kemi.

SNU's H.C. Ørsted-guldmedalje gives for fremragende videnskabelige arbejder inden for fysikkens og kemiens områder. Medaljen kan gives til forskere, der arbejder i Danmark, og er hidtil tildelt 19 forskere siden 1909, heriblandt to Nobelpristagere, Niels Bohr (1924) og Aage Bohr (1970).

Medaljerne blev overrakt af Hans Majestæt Kongen i Den Sorte Diamant den 22. marts 2024.

H.C. Ørsted-guldmedalje i fysik: Professor Jens Kehlet Nørskov

Professor Jens Kehlet Nørskov fra Danmarks Tekniske Universitet har haft en enorm indflydelse på vores forståelse af fænomener på grænsefladen mellem faste stoffer og gas- eller væskefasen. Som teoretisk fysiker har han været pioner inden for udviklingen og anvendelsen af kvantemekaniske beregninger til forståelse af adsorption og kemiske reaktioner på overflader. Han har udviklet, hvad der i dag er standardmodellen til forståelsen af kemiske bindinger ved metaloverflader, og hans forskning har skabt grundlaget for en forståelse af heterogen katalyse.



Figur 1. Jens Kehlet Nørskov med guldmedaljen sammen med H.M. Kong Frederik, SNU's præsident Anja C. Andersen (t.v.) og formand for nomineringsudvalget professor Anja Boisen på talerstolen. Foto: Rochelle Coote Photography.

Jens Kehlet Nørskov har de seneste år fokuseret sin forskning på at forstå og udvikle processer til grøn energiomdannelse – Power2X. Et afgørende gennembrud inden for de seneste fem år er det teoretiske grundlag for en proces til elektrokemisk reduktion af N_2 til ammoniak. Hans bidrag har været helt centralt og først og fremmest været påvisningen af, at kontrol af proton og

elektronoverførsel er nøglen til kontrol af selektiviteten til ammoniak. Perspektiverne er enorme og kan spille en afgørende rolle for den nødvendige globale omlægning til grøn energi.

H.C. Ørsted-guldmedalje i kemi: Professor Morten Meldal

Morten Meldal har i årevis været en toneangivende forsker og har blandt andet stået i spidsen for flere betydningsfulde opdagelser og teknologier inden for sine forskningsområder. Morten Meldal modtog i 2022 Nobelprisen for sit arbejde, der bl.a. omfatter "klikke-mi", hvor molekyler bygges hurtigt og effektivt klikket sammen i en særlig form for kemisk reaktion. Klikkemi bruges både i industrien og den akademiske verden til at danne nye molekyler, og til at klikke håndtag på eksisterende molekyler, uden at ændre deres biologiske funktion.



Figur 2. Phaedria Marie St Hilaire modtog guldmedaljen på vegne af Morten Meldal. Foto: Rochelle Coote Photography.

Inden for de sidste år har Morten Meldal designet peptidreceptorer, de såkaldte P-bodies, der kan genkende molekyler specifikt i vand. Der er store forventninger til, at disse relativt små syntetiske peptider kan erstatte antistoffer, som nu udgør op mod 30% af drugmarkedet, men som pga. deres makromolekylære natur giver medicinske og immunologiske begrænsninger.

Det er grønt at gå i skole på Sluseholmen

SNU har fra 2019 sat nyt fokus på den vigtige formidling i grundskolen ved en årlig uddeling af en H.C. Ørsted-medalje i bronze til inspirerende grundskolelærere inden for Selskabets fagkreds

I år gik medaljen til Lærer Louise Ibsen fra Sluseholmen Skole. I sin tale sagde formand for bedømmelsesudvalget, Stefan Holm fra Danmarks Naturfagslærerforening:

"Louise er en ildsjæl med stort I. Hun har en meget kreativ tilgang til undervisningen om naturfag og er god til at få meget ud af lidt, når ressourcerne er knappe.

Under Coronaepidemien formåede Louise også at holde sine elever til ilden med alt lige fra biologikalender til de store elever og N/T-forsøg til de mindste. Hun

dissekerede hjerter i sit køkken, så de ældste elever ikke skulle gå glip af det, tog de yngste elever med på videotur til Søndermarken, hvor hun filmede pattedyr fra Zoologisk Have, løb rundt med paraply i sin lejlighed og filmede og forklarede om global opvarmning, samtidig med at hun havde alle skolens dyr med hjemme og passede dem under hele skolenedlukningen.



Figur 3. Fra venstre ses SNU's præsident Anja C. Andersen, Ole Stahl fra Topsoe, medaljemodtager Louise Ibsen fra Sluseholmen Skole og Henning Haack fra SNU's direktion. Foto: Cecilie Pedersen.

Louise er idékvinden bag "Wasteland", et lokale med genbrugsmaterialer, hvor eleverne kan gå ind og "shoppe" ting til forskellige projekter. Louise allierede sig med en pædagog, så også Københavns Kommunes Fritidsordning var med inde over og pga. det samarbejde blev tingene hurtigt sat i værk. På nuværende tidspunkt er lokalet allerede et vidnesbyrd om at ødelagte brædspil, plastposer, hullede bongotrommer og papkasser er glimrende materialer at bruge til at bygge fx byer i natur-teknologi. Der er også indgået et samarbejde med firmaet Lekolar med planer om, at elever skal indsamle hård plast og lave møbler ud af det til skolen. Ligeledes har Louise og hendes kollega planer for, hvordan skolen på sigt kan organisere indsamling og sortering af papir, så skolen kan lave deres eget genbrugspapir og minimere både papirforbrug og -affald på skolen.

Med medaljen følger et rejselegat på 25.000 kr. samt et legat til medaljemodtagerens institution på 25.000 kr. til brug for et naturfagligt projekt. Begge legater er sponsoreret af firmaet Topsoe.



Foredrag i Rundetaarn

Man kan allerede nu kan købe billetter til Liselotte Højgaards foredrag "Fra fortidens forskere til nutidens nuklearmedicin" på Rundetaarn.dk (se foredragslisten andetsteds i bladet). SNU's medlemmer har fået tilsendt en særlig rabatkode på mail.

Nyt fra DFS

Maren Malling



Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Årsmødet og generalforsamlingen 2024/2025

Efter i nogle år at have afholdt årsmødet i efteråret, har bestyrelsen for Dansk Fysisk Selskab besluttet at rykke mødet tilbage til forårssæsonen, og planen er at afholde det næste årsmøde 14.-15. maj 2025 i Hovedstadsområdet. Nærmere info følger, men sæt allerede nu kryds i kalenderen!

Årets generalforsamling vil derfor blive afholdt som et selvstændigt arrangement, som vil foregå fredag den 4. oktober 2024 kl. 13:30 på Niels Bohr Institutet i København. Det vil være muligt at deltage virtuelt, så medlemmer fra hele landet kan være med.

Inden generalforsamlingen vil der være et spændende foredrag (på engelsk), og efterfølgende afholdes fredagsbar med favorable priser for medlemmer og mulighed for at melde sig ind i foreningen. Hold øje med vores hjemmeside, hvor foredragsholderen vil blive annonceret!

Et vigtigt punkt på generalforsamlingen vil være opdatering af selskabets valgregler, og vi håber, at mange af vores medlemmer vil deltage.

EPS Council i København til maj 2025

DFS er Danmarks landsdækkende forening for fysik og repræsenterer Danmark i European Physical Society (EPS). Vi er derfor stolte af at kunne fortælle, at vi bliver værter for EPS Council, som afholdes i København den 16.-17. maj 2025. EPS Council er et årligt møde, som samler EPS' præsident, Forretningsudvalget, lederne for de 42 nationale fysiksselskaber, samt lederne for de forskellige divisioner og grupper under EPS.

Sektionsnyt

Sektionen for Kvinder i Fysik har afholdt årsmøde tirsdag den 4. juni 2024 i Aud. A på Niels Bohr Institutet. Temaet for mødet var "Mentorship and Career advancement", hvor hovedtaleren, professor Anja Boisen fra DTU, fortalte om sin forskning og karrierevej. Desuden blev den årlige KIF-pris til en kvindelig rollemodel inden for fysik uddelt, og denne gang var der hele tre vindere, som vi præsenterer i næste nummer af Kvant.

Find os her

Følg selskabets aktiviteter her:

danskfysiksselskab.dk

www.linkedin.com/company/dansk-fysisk-selskab

kvinderifysik.dk

Nyt fra AS

Lars Occhionero



Den 27. april havde Astronomisk Selskab generalforsamling i København. I den forbindelse er der sket rokader og ændringer i bestyrelsen:

- Formand: Jophiel Wiis
- Næstformand: Christina Toldbo

- Kasserer: Ayan Sophia Reimann
- Menigt medlem: Johan Fynbo
- Menigt medlem: Lars Occhionero
- Menigt medlem: Leif Lønsmann
- Suppleant: Bertil Dorch
- Suppleant: Mads Fredslund Andersen

Dermed udtrådte Peter Stub Jørgensen og Ole Berg Nielsen ud af bestyrelsen efter eget ønske. Vi er meget glade og taknemmelige for det store arbejde, de har bidraget med til selskabet.

Siden generalforsamlingen har Christina Toldbo desværre måtte trække sig fra bestyrelsen. Vi er også utroligt glade og taknemmelige for Christinas store arbejde i selskabet. Ved redaktionens deadline har der endnu ikke været et nyt møde, hvor en ny næstformand kunne udpeges.

Yderligere information om generalforsamlingen, kan findes i referatet på vores hjemmeside astronomisk.dk

Kvant-nyheder

Christine Pepke Gunnarsson, KVANT

Kvantetrommen

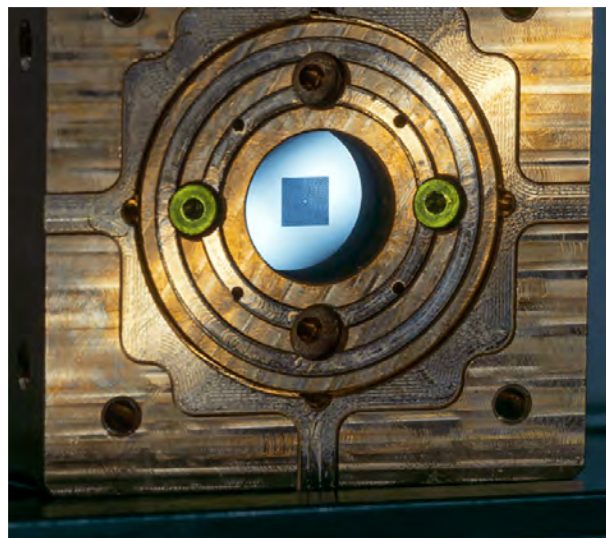
KVANTEFYSIK. Vi har hørt meget om kvantecomputere med data gemt i lyspartikler, fotoner. Men det er også muligt at gemme kvanteinformation i lydpartikler, de såkaldte fononer. Forskere fra Niels Bohr Institutet har udviklet en lille tromme, som fungerer som en kvantehukommelse, der kan gemme kvanteinformation i lydvibrationer dvs. i fononer. I en ny artikel har forskerne demonstreret, at data i lyssignaler kan gemmes som vibrationer i trommen og senere blive videresendt. En kvantehukommelse er nødvendig for at kunne sende og modtage kvanteinformation i et fremtidigt kvantenetværk.

Kvantetrommen er en lille membran, der er 5,5 mm lang og 20 nm tynd. Membranen er lavet af et keramisk glaslignende materiale med huller langs kanten. Når der sendes laserlys på trommen, begynder den at vibrere, og det er i vibrationerne, at forskerne kan gemme data. En laser sender lys med data på trommen, hvor det omdannes til lydvibration i trommen. Data kan blive gemt i lydvibrationerne, der således udgør en hukommelse, og senere blive sendt videre som data i lys, når der er brug for det.

Kvantetrommens fordel er, at den kan blive i kvantetilstanden i lang tid, uden at den mister kvanteegenskaberne ved dekohærens. Det er vigtigt, at komponenterne i et kvantenetværk er stabile og kan holde i længere tid, for at netværket kan fungere.

Det er også vigtigt, at der ikke er for meget støj på signalet, når det sendes over store afstande. I optiske

fibre (som vi bruger til internettet i dag) stiger støjen eksponentielt med fiberens længde. Dette problem løses ved at forstærke signalet i små stationer langs fiberen. Men i kvantemekanikken kan man ikke så let forstærke et signal. Desværre er det ikke en løsning at lave kvantesignalet om til et klassisk signal for at kunne forstærke det, for så ville det klassiske signal være særligt udsat for aflytning. Denne risiko minimeres ved kvantekryptografi.



Figur 1. Kvantetromme. Billede fra kilde.

Derfor satser forskerne på, at kvantetrommen er stabil nok til at holde støjen nede, hvilket ser ud til at

være tilfældet. Målet er at forlænge forbindelsen mellem kvantecomputere gennem stationer, hvor kvantetrommen modtager og sender signaler, og derved undgå støj, mens systemet bevarer data i en kvantetilstand. Forskerne mener, at de kan gøre det ved at bruge kvanteegenskaberne superposition og sammenfiltring (entanglement). Superposition er den egenskab, at en kvantetilstand kan være i flere tilstande på samme tid, og betyder, at en kvantecomputer kan udføre flere beregninger samtidig. Sammenfiltring er den egenskab, at kvantetilstande kan være indbyrdes forbundne, og at målinger på én tilstand påvirker en anden tilstand instantant, selv over store afstande.

Dette kan illustreres ved følgende eksempel: Hvis vi måler på en kvantetilstand på Jorden, hvilket betyder, at dens bølgefunktion kollapse til en bestemt værdi, vil bølgefunktionen af dens sammenfildrede kvantetilstand fx på Månen også kollapse instantant til en anden bestemt værdi. En efterfølgende måling på Måne-kvantetilstanden vil derfor være forbundet med målingen af Jord-kvantetilstanden. Denne egenskab kan bruges til at lave en nøgle til at sikre, at kvantekrypterede forbindelser ikke kan brydes, samt til kvanteteleportation.

I forhold til et kvantenetværk bygget op af atomer, som har bestemte frekvenser, er trommen mere fleksibel, da den kan designes til at tilpasse sig den ønskede frekvens. Trommen har desuden et lavt signaltab, den kan vekselvirke med lys på alle frekvenser, og dermed også den bølgelængde, som de nuværende optiske fiberkabler bruger til internettet, som er 1550 nm. Kvantetrommen er praktisk, da data kan gemmes og læses, når der er brug for det. Kvantetrommen har en hukommelsestid på 23 millisekunder, hvilket er en rekord inden for feltet, og forskerne håber, at kvantetrommen en dag kan blive brugt som kvante-RAM for kvanteinformation.

Kilde: Niels Bohr Institutet og M.B. Kristensen m.fl. (2024) "Long-lived and Efficient Optomechanical Memory for Light", *Physical Review Letters*, bind 132, side 100802–100808.

Universets allertidligste galakser

ASTROFYSIK. Forskere fra bl.a. Københavns Universitet har ved hjælp af James Webb-rumteleskopet (JWST) observeret dannelsen af tre af de tidligste galakser i universet for mere end 13 milliarder år siden. Der er før observeret galaksedannelse i senere stadier af galakseudviklingen, men det nye er, at med JWST har de kunnet observeret den helt tidlige dannelse – selve fødslen af galakserne. Det er første gang, at vi kan se dannelsen af så tidlige galakser efter Big Bang. De tre galakser er mellem 13,3 og 13,4 milliarder år gamle, hvilket vil sige, at de blev dannet kort tid efter Big Bang, som var for 13,8 milliarder år siden.

De første hundrede millioner år efter Big Bang gik som bekendt med dannelsen af stjerner fra en uigennemsigtig gas af atomkerner og elektroner, hvor lys blev spredt. Efter ca. 380.000 år var universet afkølet

nok til, at atomkernerne kunne indfange elektronerne og danne atomer. Lys blev ikke længere spredt og kunne bevæge sig længere, og universet blev efterhånden synligt. Desuden kunne atomerne absorbere og udsende lys. Det lys er det, vi kender som den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling, og det er det ældste lys, vi kan se i universet. Herefter begyndte atomerne at danne stjerner, og stjerner og hydrogengas satte sig sammen til galakser. Det er det tidspunkt, vi skal tilbage til, som forskerne har observeret galakserne i. Dette tidspunkt kaldes i Big Bang-teorien for "re-ioniseringen", og det er her, hvor lyset fra de første galakser kunne gennemtrænge den omkringliggende hydrogengas. Det er netop denne hydrogengas, som er de tidlige galakseres byggesten, som JWST har observeret. JWST er så følsomt, at det kunne detektere en stor mængde gas omkring galakserne og kunne se, at galakserne stadig bruger gassen til at danne nye stjerner til galaksen. JWST har desuden bestemt gassen til at bestå af primært hydrogen og lidt helium.



Figur 2. Fødslen af de tre tidligste galakser. Illustration fra NASA.

Forskerne studerede dannelsen af de første galakser med absorptionsspektra, hvor de måler, hvordan lyset fra galakserne bliver absorberet af hydrogengassen omkring dem. Den relevante atomare absorptionsovergang i hydrogen hedder Lyman- α -overgangen. JWST er det kraftigste infrarøde observatorium, vi har, og er bygget til at måle fjerne infrarøde signaler, så vi kan "se tilbage i tiden". Lyman- α -overgangen er på Jorden en ultraviolet overgang i hydrogen, men som bekendt bliver lyset fra fjerne galakser rødforskudt, og derfor er Lyman- α -overgangen fra galakserne infrarød og kan netop måles af JWST. JWST kan i øvrigt måle de tidligste signaler fra ca. 180 millioner år efter Big Bang, hvilket svarer til dannelsen af de allertidligste stjerner.

Forskerne håber at kunne se endnu længere tilbage i tiden, og med de observationer, vi indtil nu har fået fra JWST, ser vi frem til at lære endnu mere om universet og Big Bang.

Kilde: NASA, Københavns Universitet og K.E. Heintz m.fl. (2024) "Strong damped Lyman- α absorption in young star-forming galaxies at redshifts 9 to 11", *Science*, bind 384, side 890–894.

Kommende foredrag

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Aug 2024				
19/8	20.00	Fra fortidens forskere til nutidens nuklearmedicin	Liselotte Højgaard	SNU (Rundet.)
26/8	20.00	Fra Ole Rømer til Andreas Mogensen	Anja C. Andersen	SNU (Rundet.)
Sep 2024				
2/9	20.00	Poulsen, Pedersen og buesenderen	Hans Buhl	SNU (Rundet.)
9/9	20.00	Danmark som udviklingscentrum for fremtidens kvanteteknologier	Asbjørn Drachmann	SNU (Rundet.)
10/9	17.30	Hamskiftende og variable aktive galaksekerner	Marianne Vestergaard	AS (Aarh.)
10/9	18.15	Hvordan opdager vi kvasarer på himlen	Johan Fynbo	AS (Kbh.)
16/9	20.00	Martin Knudsen: Danmarks berømte pioner i vakuumfysik	Jørgen Schou	SNU (Rundet.)
17/9	17.30	Teoretiske undersøgelser af sorte huller	Troels Harmark	AS (Aarh.)
17/9	18.15	Hamskiftende og variable aktive galaksekerner	Marianne Vestergaard	AS (Kbh.)
24/9	17.30	Hvordan opdager vi kvasarer på himlen	Johan Fynbo	AS (Aarh.)
24/9	18.15	Status for Event Horizon Telescope	Thomas Greve	AS (Kbh.)
30/9	19.30	Kunstig intelligens og perspektiverne ved disse teknologier	Morten Mørup	SNU (HCØ)
Okt 2024				
1/10	17.30	Status for Event Horizon Telescope	Thomas Greve	AS (Aarh.)
1/10	18.15	Små Røde Prikker / Little Red Dots	Kasper Heintz	AS (Kbh.)
4/10	13.30	Generalforsamling i Dansk Fysisk Selskab Afholdes på Niels Bohr Institutet		DFS
7/10	20.00	Alt omkring os er kemi – efterfulgt af uddeling af Kirstine Meyers Mindelegat	Morten Meldal	SNU (Rundet.)
8/10	17.30	Små Røde Prikker / Little Red Dots	Kasper Heintz	AS (Aarh.)
8/10	18.15	Teoretiske undersøgelser af sorte huller	Troels Harmark	AS (Kbh.)
28/10	18.15	Stjernekrig – om den militære anvendelse af rummet	Michael Linden-Vørnle	AS (Kbh.)
28/10	19.30	En rejse i moderne geometri	Nathalie Wahl	SNU (HCØ)
Nov 2024				
4/11	18.15	Danmark i Rummet: Stormagtspolitikens betydning for dansk rumforskning	Niels Lund	AS (Kbh.)
11/11	18.15	Rumjura: Juridiske aspekter af udnyttelsen af Rummet	Danny Johansen	AS (Kbh.)
12/11	17.30	Lise Meitner – Her Life and the Discovery of Fission	Anthea Coster	KIF & NBA
18/11	18.15	Rumovervågning – fra supermagter til kommercielle aktører	Nicolai Birkholm	AS (Kbh.)
18/11	19.30	Stamceller – også et fremtidigt værktøj i sygdoms-bekæmpelse?	Kim Bak Jensen	SNU (HCØ)
25/11	18.15	Videnskabelige rummissioner – kapløb og internationalt samarbejde	Hans Kjeldsen	AS (Kbh.)
Dec 2024				
9/12	19.30	Den mikrobielle verden indeni os – efterfulgt af uddeling af H.C. Ørsted gymnasie-lærermedaljen	Tine Rask Licht	SNU (HCØ)

AS (Kbh.): CSS, Gammeltoftsgade 15, 1355 København K. Lokale: 35.-1.05 (astronomisk.dk).

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

Medlemmer af AS får tilsendt et nyhedsbrev, før foredragsrækken går i gang med information om tilmelding. Andre interesserede kan tilmelde sig via Folkeuniversitetet i hhv. København og Aarhus.

KIF & NBA: Kvinder i Fysik og Niels Bohr Arkivet. Se mere side 20.

SNU (Rundet.): Rundetaarn, Købmagergade 52A, 1150 København (snu.dk, facebook.com/SNU1824).

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

OBS: Der må ikke parkeres ved hovedindgangen til Universitetsparken 5, og kun med særlig p-tilladelse andre steder i Universitetsparken eller på Ole Maaløes Vej 5. Der kan parkeres med Easypark på Nørre Allé.

Helten Arkimedes

John Rosendal Nielsen, KVANT

Det kan måske forekomme lidt sent, at bringe en nyhed om Syrakus' belejring i 213–212 f.Kr. Men indimellem dukker der fantastiske ting op, når man forsker i videnskabshistorie. Da jeg arbejder med forskning tilknyttet den berømte matematiker og fysiker Arkimedes (287–212 f.Kr.) fra Syrakus, fandt jeg en italiensk film og en amerikansk filmplakat for den. Denne filmplakat er en guldgrube af (videnskabs)historisk vrøvl. Mere herom lidt senere.

Arkimedes fra Syrakus (hvilket var hele hans navn) var måske den største matematiker, fysiker, ingeniør og opfinder i antikken. Vi er så heldige, at nogle af hans tekster er overleveret til os via araberne og via lidt heldige fund. Hans arbejde indenfor matematik bidrog til approksimation af pi, bestemmelse af arealer og rumfang af geometriske objekter såsom en ellipse, en sfære og en omdrejningshyperboloide. I fysik gjorde han sig bemærket med ligevægtsloven, bestemmelse af massemidtpunktet og Arkimedes' princip. Det sidstnævnte giver anledning til Arkimedes' lov, som vi underviser om i gymnasiet den dag i dag. Han er desuden kendt for at have konstrueret flere maskiner, hvor hans våben til forsvaret af Syrakus er de mest kendte.

Filmen "Siege of Syracuse", som filmplakaten henviser til, hed oprindeligt på italiensk *L'assedio di Siracusa*, og den havde premiere i de italienske biografer i 1960. Det er et historisk drama, som allerede tidligt blev kendt for dens historiske unøjagtigheder. Filmens hovedrolle blev spillet af Rossano Brazzi (1916–1994), der portrætterede en ung og viril Arkimedes. Ifølge filmen var Arkimedes forlovet med datteren af kong Hieron II (308–215 f.Kr.), men han blev forelsket i en ung danserinde. Vi ved forsvindende lidt om personen Arkimedes udover, at ifølge den antikke historiker Plutarch var Arkimedes i familie med kong Hieron og fra Arkimedes selv får vi at vide, at hans far var en astronom ved navn Phidias, som er helt ukendt for os. Så filmen har frie muligheder for at fantasere om Arkimedes' liv. Et af de fantasifulde tiltag er, at Arkimedes efterfølger Hieron som konge af Syrakus, hvilket passer dårligt med historiebøgerne, hvor Hieron blev efterfulgt af sit barnebarn kong Hieronymus (231–214 f.Kr.) (som bliver helt ignoreret i filmen). Men hvorfor lade historiske fakta stå i vejen for en historisk film?

Hollywood er ellers kendt for unøjagtigheder i historiske dramaer, men italienerne kan også begå sig indenfor denne genre. Det kan være derfor grunden til, at filmen måtte ud i de amerikanske biografer. Der blev lavet en filmplakat til de amerikanske biografer, som levede op til filmens historiske nøjagtigheder eller mangel på samme. Hvis man er tvivl om hvem der er Arkimedes, så er det den sorthårede mand i midten, hvilket er imponerende, da de historiske kilder mente, at Arkimedes var i 70'erne, da Syrakus var under belejring. Vi fysikere holder os unge, da vi spiser vores grønsager.

Ekstra smukke detaljer er kvinden, der holder om hans bare ben, hvor hans romerske uniform ikke dækker. Det er interessant, at han bærer en romersk uniform, da romerne var fjenden, der belejrede Syrakus.



Øverst i højre hjørne har grafikerens sørget for et kort til de geografisk hængende amerikanere, så de ved, hvor Syrakus, Rom og Karthago er placeret i Middelhavsområdet. Hvis man ikke kan sin "Det forsømte forår", fra 1940 af Hans Scherfig (1905–1979), var Karthago byen, hvor Hannibal boede, før han følte et behov for at gå over Alperne og angribe Rom i den anden puniske krig (218–201 f.Kr.). Erobringen af Syrakus var en del af denne krig, da Hieronymus valgte side med Karthago og Hannibal.

Lektor Blomme ville nok ikke være tilfreds med grafikerens arbejde, idet han har placeret Karthago på Malta i stedet for i Tunesien, og Syrakus er ifølge grafikerens ikke længere en kystby.

På plakaten står Arkimedes med et spejl, som vi får at vide høster Solens energi for at ødelægge den romerske armada, hvilket vi ikke kan være i tvivl om, når vi ser de romerske skibe i flammer nede under overskriften. Historien om Arkimedes' spejl har vi fra den byzantinske forfatter John Tzetzes (ca. 1110–1180), der skrev om den anden puniske krig, som belejringen af Syrakus var en del af. Det interessante her er ikke, at fjernsynsprogrammer som Mythbusters har afvist det som en mulig måde at brænde skibe af, men at Tzetzes skrev det over 1300 år efter Syrakus' belejring, og ingen andre af de tidligere historikere fra antikken følte noget behov for at nævne spejlene.

Disse historikere, der levede meget tættere på de historiske begivenheder end Tzetzes, burde have nævnt en så vanvittig måde at forsvare en by på. Vi får dog at vide fra filmplakaten, at det var en fantastisk hemmelig videnskab fra Arkimedes, hvilket måske kan undskylde for antikkens historikeres uvidenhed. Til sidst bør man nok påpege, at der ikke er tvivl om, at Arkimedes var forud for sin tid, men ifølge plakaten var han 2500 år forud for sin tid, så vi må hellere tage os sammen og indhente ham.

Man kan nyde filmen på YouTube med engelske undertekster, <https://www.youtube.com/watch?v=dIQ7YMnQd6k>.

Kvant-nyheder: Turbulensen i en kop kaffe

Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

FLUIDMEKANIK. Tilbage i 1883 observerede fysikeren Osborne Reynolds, at når han sprøjtede blæk ned i et vandrør og øgede vandhastigheden, så ændrede strømmingen sig fra laminært til turbulent gennem udviklingen af små lokaliserede elementer af turbulens kaldet "pust" (eng. *puffs*).

Laminær strømning er en glat og forudsigelig strømning, mens turbulent strømning er ustabil og uforudsigelig. Reynolds forskning grundlagde feltet *fluidmekanik*, men kunne ikke svare på spørgsmålet om, hvorfor den observerede overgang mellem laminær og turbulent strømning opstår.

Nu har et forskerhold fundet svaret på dette spørgsmål ved hjælp af statistisk mekanik. Det nye er, at de har undersøgt problemet, ikke kun ud fra fluidmekanik, men også ved hjælp af statistisk mekanik. Det er interessant forskning, da statistisk mekanik normalt beskriver systemer i ligevægt, hvilket turbulens ikke er, da energi konstant bevæger sig ind og ud af væsken.



Forskerne viste, at væsker bevæger sig gennem et rør i en ikke-ligevægtsfaseovergang kendt som "retningsbestemt nedsivning" (eng. *directed percolation*) ved overgangspunktet mellem laminær og turbulent strømning.

Denne proces sammenligner forskerne med at lave kaffe. Når man brygger kaffe, bevæger vand sig nedad gennem de maledede kaffebønner med en bestemt hastighed. Denne kaffestrøm er et eksempel på retningsbestemt nedsivning. Hvis strømmen bevæger sig for hurtigt, bliver kaffen for svag, og hvis strømmen bevæger sig for langsomt, opsamles det i filteret og spildes. Den bedste kop kaffe er én, hvor vandet løber med en hastighed så langsom, at den kan absorbere mest mulig smag fra bønnerne, men samtidig så hurtig,

at den kan passere gennem filteret uden at spildes. Dette sker præcis ved den såkaldte retningsbestemte nedsivningsovergang.

Og hvad har det så med forskningen at gøre, tænker læseren nok? Jo, forskerne har observeret, at den retningsbestemte nedsivningsovergang har samme statistiske egenskaber som overgangen mellem laminær og turbulent strømning.

Forskerne var nødt til at tænke kreativt for at løse Reynolds gamle problem, og de brugte lang tid på det, nogle af dem arbejdede på det i over et årti. Det er særlig svært at forstå, hvad der sker i en åben geometri som fx et rør. For at forstå det brugte forskerne tryksensorer til at observere turbulenspust i rørene, og de målte præcis, hvordan hvert pust påvirkede hinandens bevægelser. De kørte herefter computersimuleringer for at simulere molekyledynamikken og kunne vise, at statistisk nær den laminære til turbulente overgang opfører pust sig helt i overensstemmelse med den retningsbestemte nedsivningsovergang. Derefter brugte de statistisk mekanik til matematisk at beskrive disse pust ved at bruge teknikker fra faseovergangsfysik. Igen kunne de bekræfte hypotesen om en retningsbestemt nedsivningsovergang.

I deres undersøgelser opdagede forskerne noget uventet – nemlig, at pust ligesom biler er tilbøjelige til at danne trafikpropper. Hvis ét pust fylder hele vandrørets bredde, kan intet bevæge sig forbi, hvilket betyder, at andre pust hober sig op bag det første pust. Pustpropper kan dannes og forsvinde på en måde, som statistisk mekanik kan beskrive. Pustpropper har tendens til at forsvinde ved det kritiske overgangspunkt fra laminært til turbulent strømning, hvor vi har den retningsbestemte nedsivningsovergang.

Forskerne forklarer, at dette arbejde demonstrerer, hvordan forståelse fra forskellige områder inden for fysik kan bruges til at forklare et kompliceret problem. Uden statistisk mekanik kunne de ikke have løst Reynolds næsten 150 år gamle problemstilling.

Kilde : phys.org og G. Lemoult m.fl. (2024) "Directed percolation and puff jamming near the transition to pipe turbulence", *Nature Physics*, <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02513-0>.