



- ASTEROIDENEDSLAG PÅ JORDEN OG DINOSAURERNES ENDELIGT •
- BALLUT TIL BREMSNING AF RUMKAPSEL • DEN UNDVIGENDE NEUTRINO •
- EKSPERIMENTELLE FYSIKPROJEKTER I GYMNASIET • BREDDDEOPGAVER •
- ET EFTERÅR I MEDALJERNES TEGN • FYSIKHISTORIE • JAGTEN PÅ ET ØRSTED-RELIEF •
- FYSIK, FOREDRAG OG KARTOFFELMADDER • KVANT-NYHEDER • BOGANMELDELSER •

Løssalgspris: 50 kr.

# KVANT

## Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

Hjemmeside : [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk)  
E-mail : [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk)  
Facebook  : KVANT.fysiktidsskrift  
ISSN (trykt) : 0905-8893  
ISSN (web) : 2245-4942

### Udgives af

Astronomisk Selskab  
Dansk Fysisk Selskab  
Dansk Geofysisk Forening  
Selskabet for Naturlærens Udbredelse

### Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv. red.),  
DTU Space  
Michael Cramer Andersen,  
Christianshavns Gymnasium  
Christine Pepke Gunnarsson (nyheds-  
redaktør), DTU Health Technology  
Mogens Esrom Larsen,  
Institut for Matematiske Fag, KU  
Steen Lærke ([astro@kvant.dk](mailto:astro@kvant.dk)),  
Astronomisk Selskab  
John Rosendal Nielsen,  
Aurehøj Gymnasium  
Dorte Olesen (SNU),  
DTU Compute  
Finn Berg Rasmussen,  
Niels Bohr Institutet, KU  
Svend Erik Rugh  
Julie Søgaard (Facebookredaktør og AS)  
Sarah Pepke Pedersen (korrektur)

### Abonnementspris : 180 kr./år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber. Abonnement tegnes på [www.kvant.dk](http://www.kvant.dk). Øvrige henvendelser vedr. abonnement til Christine Pepke Gunnarsson: [christine@kvant.dk](mailto:christine@kvant.dk) (tlf. 27 51 01 76).

### 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 annoncer til redaktøren på: [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk) (tlf. 28 91 87 74).

### Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri A/S.  
Oplag: 2500.

### Produktionsplan

Nr. 4-19 udkommer ca. 15. december  
Nr. 1-20 udkommer ca. 1. marts  
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

## Indhold:

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Asteroidenedslag på Jorden og dinosaurernes endeligt – spor i Stevns Klint<br><i>Ane Elise Schrøder</i> . . . . .                                                      | 3  |
| Et efterår i medaljernes tegn<br><i>Dorte Olesen</i> . . . . .                                                                                                         | 7  |
| Eksperimentelle fysikprojekter i gymnasiet<br><i>Ole Bakander</i> . . . . .                                                                                            | 8  |
| Fysikhistorie – bogen “Historisk Fysik” og hjemmesiden <a href="http://www.fysikhistorie.dk">www.fysikhistorie.dk</a><br><i>Frank Nielsen og Else Høyrup</i> . . . . . | 11 |
| Ballut til bremsning af rumkapsel faldende fra 105 km<br><i>Sascha Stork</i> . . . . .                                                                                 | 13 |
| Den undvigende neutrino<br><i>Bernhard Lind Schistad</i> . . . . .                                                                                                     | 17 |
| Jagten på et Ørsted-relief<br><i>Finn Lindberg</i> . . . . .                                                                                                           | 23 |
| Nyt fra Dansk Fysisk Selskab . . . . .                                                                                                                                 | 26 |
| Gnidning, arbejde og varme: breddeopgave 81 med didaktisk kommentar<br><i>Jens Højgaard Jensen</i> . . . . .                                                           | 27 |
| Fysik, foredrag og kartoffelmadder i Köln<br><i>Emil Vyff Jørgensen</i> . . . . .                                                                                      | 29 |
| Kvant-nyheder<br><i>Christine Pepke Gunnarsson</i> . . . . .                                                                                                           | 31 |
| Kommende foredrag . . . . .                                                                                                                                            | 33 |
| Aktuelle bøger<br><i>John Rosendal Nielsen og Jens Olaf Pepke Pedersen</i> . . . . .                                                                                   | 34 |

**Billedet på forsiden** er tegnet af Niels Roland (f. 1958), der er medlem af tegnestuen Gimle. Blandt hans mange tegneserier kan nævnes “Danmark besat”, “Menigmands guide til dommedag” samt den videnskabelige stribe “Kloge Hoveder” i Weekendavisen/Ideer. Læs om dinosaurernes endeligt i Ane Elise Schrøders artikel side 3.

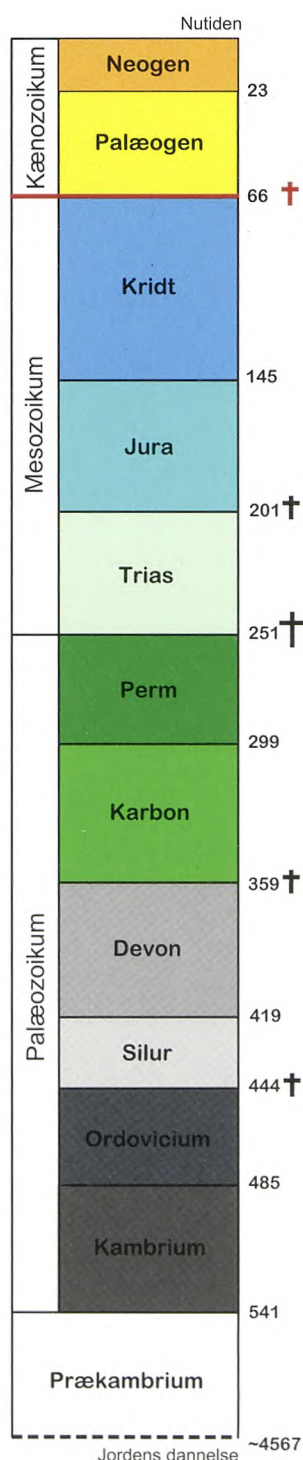


KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle gymnasier, seminarier og HTX-kurser i Danmark, på Færøerne og i Grønland med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik, Kemi og Farmaci (SDU), Institut for Materialer og Produktion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

# Asteroidenedslag på Jorden og dinosaurernes endeligt – spor i Stevns Klint

Af Ane Elise Schrøder, Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet

Et ganske tyndt lag af ler i Stevns Klint indeholder ekstraterrestriske spor fra dengang de landlevende dinosaurer og mere end halvdelen af alt liv på Jorden uddøde under en kæmpe naturkatastrofe. Dette lerlag, Fiskeleret, markerer slutningen på Kridttiden og begyndelsen på en ny æra. Sporene fortæller historien om, hvordan en asteroide kolliderede med Jorden for omkring 66 mio. år siden og var medvirkende til én af de største masseuddøener i livets historie. Stevns Klint er en klassisk lokalitet for studier af Kridt–Palæogen-grænsen og oplagt at besøge i forbindelse med feltundervisning i gymnasiet.



## Stevns Klint – grænsen mellem Kridt- og Palæogen-tiden

Grænsen, der markerer tidspunktet for den femte store massedød og de landlevende dinosaurers uddøen, benævnes i ældre litteratur Kridt–Tertiær-grænsen. Det er tilsvarende grænsen mellem de to æraer Mesozoikum og Kænozoikum. I nyere tid har man imidlertid opdelt perioden “Tertiær” i to nye perioder: det ældre Palæogen og yngre Neogen (figur 1). Mange anvender dog fortsat “Kridt–Tertiær-grænsen”. Stevns Klint indeholder et af verdens mest illustrative eksempler på denne grænse.

I Sen Kridt fra ca. 99–66 mio. år siden steg Jordens havniveau, og i slutningen af denne periode var store dele af det nordvestlige europæiske kontinent dækket af et dybt hav – Kridthavet – og havspejlet har formentlig været 100 meter højere end i dag (figur 2). I denne periode skete der en opblomstring af fotosyntetiserende, kokkolitoforide alger, der levede i de øverste vandmasser [1]. Kridtlagene nederst i Stevns Klint og Møns Klint er primært opbygget af skaller fra disse alger. En kokkolitoforid danner små cirkulære til ovale kalkplader, der opbygges til en sammenhængende sfære, der omgiver den encellede organisme. Disse kalkplader kaldes kokkolitter. En kokkolitoforid alge er normalt mindre end 30  $\mu\text{m}$  i diameter (figur 3). Da kokkolitoforiderne døde, sank kokkolitterne til oceanbunden og indgik i havbundens aflejringer, hvor de dannede kokkolitslam. Det er dette kalkslam, der sammen med andre kalk-nannofossiler, bliver til det “skrivekridt”, som netop kendetegner den geologiske periode Kridt [2]. Der skelnes imidlertid mellem tidsperioden Kridt og bjergarten kridt, da “kridt”, dvs. kalk =  $\text{CaCO}_3$ , også kendes fra andre geologiske tidsperioder. I slutningen af Kridt koloniserede bryozøer, eller mosdyr, som de også kaldes på dansk, havbunden og dannede små banker. Bryozøer er små kolonilevende invertebrater, der får næring ved at filtrere det omgivende vand [1].

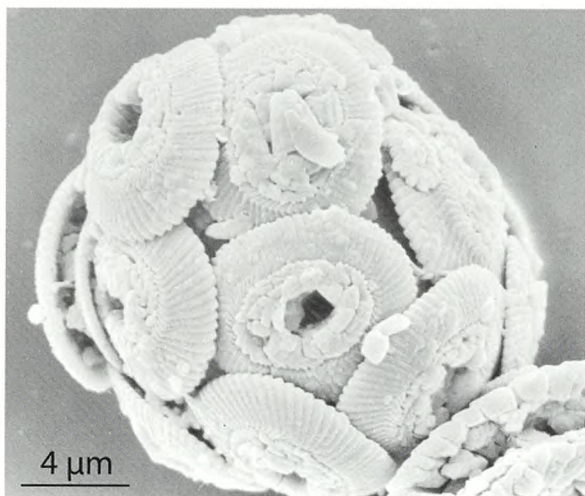
Kokkolitoforider og bryozøer var blandt de organismegrupper, der overlevede og krydsede K–Pg-grænsen, og aflejringer af kalk blev genoptaget i Palæogen efter

**Figur 1.** Geologisk tidsskala vist i mio. år. De fem største masseuddøener i livets historie er markeret med kors. Kridt–Palæogen-grænsen er markeret med rød linje samt rødt kors.



**Figur 2.** I Sen Kridt var det meste af det nordvestlige europæiske kontinent dækket af Kridthavet.

en relativt kort pause ved selve grænsen. Fiskeleret, det tynde, mørke lerlag, der markerer K–Pg-grænsen, ses aflejret i små trug mellem bryozobankerne fra Sen Kridt. Bryozoerne dannede prominente, store banker i begyndelsen af Palæogen, som ses i den øverste del af Stevns Klint. De sorte flintebånd i klintens udhæng markerer tydeligt bryozobankernes geometri og dimensioner (figur 4).



**Figur 3.** Nutidig kokkolitoforid [10].

På verdensplan kendes mere end 500 geologiske lokaliteter, der indeholder grænsen mellem Kridt og Palæogen. Gubbio i Italien, El Kef i Tunesien og Hell Creek i USA er blot nogle få af de kendte lokaliteter, som Stevns Klint er sammenlignelig med [2].

### Iridiumberigelse – spor fra asteroiden

I 1978 satte den amerikanske geolog Walter Alvarez sig for at finde ud af, hvor meget tid det tynde grænselag repræsenterer. Sammen med sin far, nobelpristager i fysik Luis Alvarez, målte de på det relative iridiumindhold i grænselagene ved Gubbio i det nordlige Italien. Denne lokalitet er ligesom Stevns Klint dybhavskalkaflejringer, og grænselaget er et tyndt lerlag. Grundstoffet iridium hører til platinmetallerne. I større mængder findes stoffet kun i Jordens indre og i nogle typer af asteroider. Stoffet er sjældent i Jordens skorpe. Hvis

man således har iridium afsat på Jordens overflade, skyldes den næsten udelukkende ekstraterrestrisk støv fra meteoror og meteoritter. Mængden af iridium, der afsættes på overfladen, er ekstremt lille og nogenlunde konstant. Ud fra antagelsen om, at Jorden modtager en konstant mængde ekstraterrestrisk støv fra rummet, var ræsonnementet, at de kunne måle på det relative indhold af platinmetallet og således beregne ændringer i aflejringshastigheden [3].

### Er der fisk i Fiskeleret?

I litteraturen er “Fiskeler” første gang anvendt i 1849. Det er Johan Georg Forchhammer, der refererer til grænselaget som et “Leerlag med talrige fiskefossiler” og “Fiskeleer”. I hans afhandling nævnes, at der er talrige uarticulerede fiskefossiler i laget, men at kun et enkelt næsten komplet fiskefossil kendes. Dette stykke er i dag udstillet på Østsjællands Museum. Undersøger man for eksempel fiskeleret i mikroskop, kan man være heldig at finde spredte samlinger af små fiskeknogler [9].

Da de målte på grænselaget i Gubbio, fandt de imidlertid en koncentration langt højere end forventet i det tynde grænselag. I grænselaget var iridiumberigelsen omkring 30 gange højere end baggrundsniveauet i lagene over og under (figur 5). Var iridiumberigelsen et lokalt udslag for området i Italien, eller kunne det påvises globalt for Kridt–Palæogen-grænsen? Walter Alvarez tog derfor til Stevns Klint ved Højerup i Danmark for at tage prøver af Fiskeleret. Da prøverne blev analyseret i laboratoriet, fandt Alvarez og hans kolleger en iridiumberigelse, der ikke blot var 30 gange, men 160 gange højere end baggrundsniveauet! Prøverne fra Stevns Klint bekræftede altså, at hele Jorden havde været udsat for en stor mængde ekstraterrestrisk input ved Kridt–Palæogen-grænsen [3]. Iridiumberigelsen i grænselaget dannede basis for hypotesen om, at et asteroidenedslag havde forårsaget massedøden på grænsen mellem de to perioder [4].

Teorien præsenterede Walter Alvarez første gang i 1979 på en konference i København, og resultaterne blev i 1980 udgivet i tidsskriftet Science [4, 5].

### En ny hypotese – et paradigmeskift

I 1980’erne affødte asteroidehypotesen en voldsom debat i de videnskabelige samfund. Inden hypotesen blev fremsat, mente man, at massedøden ved Kridt–Palæogen-grænsen var foregået gradvist over lang tid, og primært skyldtes ekstrem vulkansk aktivitet i det nordlige Indien. I slutningen af Kridttiden skete der et større fald i havniveau, og den indiske kontinentalplade bevægede sig mod Asien ind over et hotspot. Dette gav anledning til omfattende vulkanisme, Deccan Trapvulkanfeltet [5]. Udbruddene skete i form af såkaldte sprækkevulkaner, hvor lava flyder op i lange sprækker over enorme områder. Samtidig med, at lavaen strøm-



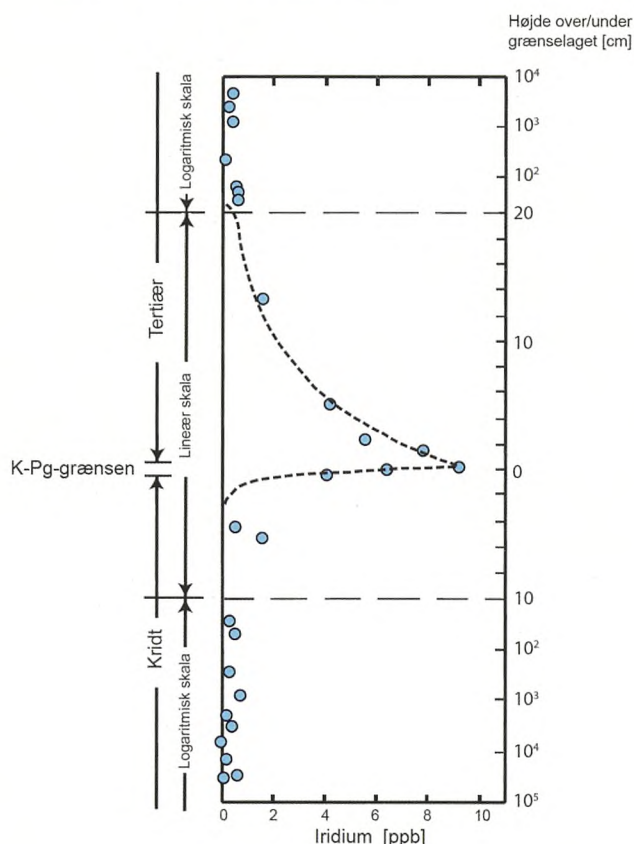
**Figur 4.** A. Stevns Klint, billedet er taget ved den kendte Højerup-lokalitet, nord for Højerup Gl. Kirke. Her ses grænselaget, Fiskeleret, i midten af klinten lige under udhænget. B. Den nederste del af klinten hører til den geologiske periode Kridt, hvorimod den øverste del (udhænget) hører til perioden Palæogen. De mørke, buede linjer i klintens udhæng er flintebånd og markerer bryozobankernes geometri.

mer ud over Jorden, vælter der mængder af støv, aske og gas op i atmosfæren. Sprækkevulkaner kendes i dag fra både Hawaii og Island. Deccan Trap-vulkanismen ville have haft stor indvirkning på klimaet, svækket globale økosystemer og forårsaget uddøen i mange organismegrupper [2]. Denne gradvise form for uddøen var fuldstændig i tråd med James Huttons idé og Charles Lyells teori om uniformitarisme. Denne teori havde gennemsyret forståelsen af geologi og biologi i det 19. og langt op i det 20. århundrede. Teorien tager udgangspunkt i, at de processer, som former Jorden i nutiden, var de samme i fortiden, og processerne og

dertilhørende ændringer sker gradvist over lang tid, og ikke hurtigere end det kan observeres i nutiden [6].

Asteroideteorien stod i direkte modsætning til den uniformitarisme og blev derfor betragtet som særdeles tvivlsom af geologer og palæontologer. Asteroidenedslaget ville, i et geologisk perspektiv, have forårsaget en øjeblikkelig massedød, gigantiske jordskælv og tsunamier. Resterne af den eksploderende asteroide og en stor del af jordskorpen ved nedslagspunktet ville være blevet slynget ud i stratosfæren og have indhyllet Jorden i fuldstændigt mørke. Fotosyntetiserende organismer, som udgør de basale led i fødenet, både terrestrisk og marint, ville hurtigt dø ud. Herefter ville

massedøden sprede sig, og fødenettene kollapse som et korthus, hvor bunden trækkes ud.



**Figur 5.** Det relative iridiumindhold vist i ppb [parts per billion], dvs. del per mia. i dybhavskalksten fra Gubbio i Italien. Grafen er baseret på Alvarez' oprindelige resultater udgivet i Science [4].

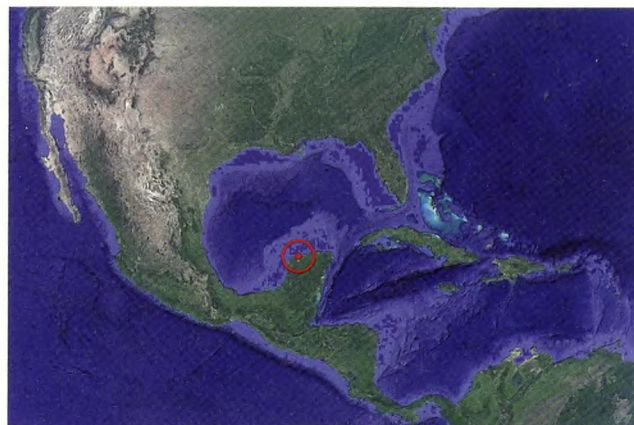
Alvarez' gruppe havde ud fra iridium-anomalien beregnet, at asteroiden ville have haft en størrelse på omkring 10 km i diameter og skabt et nedslagskrater på omtrent 150 km. Da hypotesen blev fremsat, kendte man imidlertid ikke til et nedslagskrater af denne størrelsesorden, der var samtidig med K-Pg-grænsen [4].

### Olieforskning ved Yucatan: Chicxulub-krateret

I 1991 fandt man imidlertid et krater, der var sammenfaldende med K-Pg-grænsen. Det skete i forbindelse med olieeftersøgning i den Mexicanske Golf via studiet af borekerner og geofysiske data. Den ene halvdel af krateret ligger under havbunden ud for Yucatan-halvøen, og den anden halvdel ligger under selve halvøen. Kraterets centrum ligger tæt ved byen Chicxulub og er opkaldt herefter [7] (figur 6).

I dag er det generelt accepteret, at den femte store massedød i livets historie kan knyttes til asteroide-nedslaget. Dette blev især understøttet, da man fandt og daterede Chicxulub-krateret og fandt kvarts med choklameller i grænselaget. Hvilken synergieffekt, nedslagstidspunktet har haft med Deccan Trapvulkanismen i Indien, diskuteres dog fortsat, ligesom nedslagsstedet menes at have haft afgørende betydning. Sedimenterne i undergrunden ved Yucatan var og er særdeles svovlholdige og rige på kulbrinter, og nyere studier indikerer, at dette har haft direkte betydning for katastrofens omfang. Et asteroide-nedslag i den type sedimenter vil

sende en katastrofal mængde sod og sulfat-aerosoler op i stratosfæren, hvilket ville forårsage ekstremt mørke, global nedkøling, voldsom tørke og syrerregn [8]. Asteroide-nedslaget i sig selv ville have udløst energi svarende til 100 mio. megatons TNT. Det er ca. en mia. gange atombomben, der blev kastet over Hiroshima under 2. verdenskrig [5].



**Figur 6.** Markering af Chicxulub-krateret under Yucatan-halvøen. Den yderste koncentriske ring i krateret har en diameter på ca. 200 km.

### UNESCO Verdensarv

Stevns Klint blev i 2014 netop optaget på UNESCOs liste over verdensarv, fordi den dramatiske nøglebegivenhed i Jordens historie gemmer sig i klintens geologi. Stevns Klint er med andre ord en exceptionel lokalitet, også selvom lokaliteten ligger langt fra nedslagsstedet. Klintens lagserie, iridium-anomalien i Fiskeleret og fossilindholdet i lagene viser tydeligt de globale ændringer, asteroide-nedslaget medførte: En skæbnesvanger naturkatastrofe og udryddelse af mange forskellige livsformer på Jorden. De landlevende dinosaurer, mange grupper af fugle, havøgler, flyveøgler, ammonitter (uddød gruppe af blæksprutter) og mange grupper af kokkolitoforider er blot nogle få af de mange organismegrupper, som uddøde. Den evolutionære, marine turn-over afspejles i klintens fossilindhold, bl.a. findes fossile ammonitter og fossile tænder fra havøgler i lagene under Fiskeleret, hvorimod grupperne er forsvundet over grænselaget.

### Hvad er UNESCO-verdensarv?

UNESCOs Verdensarvsliste er en udpegning af verdens mest værdifulde og unikke steder, der betragtes som hele menneskehedens fælles arv. UNESCO er FN's organisation for uddannelse, videnskab og kultur. Stevns Klint opfylder følgende af UNESCOs krav til geologiske steder på listen [5]:

- lagrækkefølger, der dokumenterer nøglebegivenheder i Jordens historie
- fysiske beviser for meteornedslag og de store ændringer, disse har medført, f.eks. masseuddøen

Den store videnskabelige betydning, som Stevns Klint har haft, var ét af argumenterne for UNESCO-nomineringen. Stevns Klint er vurderet til at være det bedste sted i verden at se og studere grænsen mellem Kridt og Palæogen – og man behøver ikke at være ekspert! Hvis man tager til Højerup er laget ganske tydeligt som det eneste mørke lerlag mellem det bløde, lyse skrivekridt og udhænget af bryozokalk (figur 3).

## Litteratur

- [1] G. Larsen, K. Sand-Jensen (2006) "Naturen i Danmark: Geologien", Gyldendal A/S, København, 2. udgave, 1. oplag, side 168–180.
- [2] A. E. Schrøder (2015) "Guidemanual og supplement. Stevns Klint. Undervisningskompendium", 1–12 og 1–2. Stevns Museum, Østsjællands Museum.
- [3] T. Damholt og F. Surlyk (2014) "Stevns Klint – ny dansk verdensarv", *Geoviden – geologi & geografi*, nr. 3, 19 sider.
- [4] L. Alvarez, W. Alvarez, F. Asaro og H. V. Michel (1980) "Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction", *Science*, bind 208, side 1095–1108.
- [5] T. Damholt og F. Surlyk (2012) "Nomination of Stevns Klint for inclusion in the World Heritage List", Østjællands Museum, 160 sider.
- [6] S. Stouge, D. A. T. Harper og L. Andersson (2010) "Darwin som palæontolog", *Geoviden – geologi & geografi*, nr. 1, 20 sider.
- [7] A. R. Hildebrand, G. T. Penfield, D. A. Kring, M. Pilkington, Z. Antonio-Camargo, S. B. Jacobsen og W. V. Boynton (1991) "Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico", *Geology*, bind 19, side 867–871.
- [8] K. Kaiho og N. Oshima (2017) "Site of asteroid impact changed the history of life on Earth: the low probability of mass extinction", *Scientific reports*, bind 7, artikelnummer 14855, 12 sider.
- [9] J. Milàn og W. Schwarzhans (2016) "Fisken i Fiskeleret – et gammel mysterium optrævles", *Aktuel Naturvidenskab*, nr. 6, side 2–28.
- [10] Wikimedia commons (2012), billedet er efterfølgende redigeret.



Ane Elise Schrøder er erhvervs-ph.d.-studerende ved Museum Mors og Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet. Hun har arbejdet med geologien og palæontologien på Stevns i forbindelse med forskningsprojekter og tidligere ansættelser ved Østsjællands Museum.

## Et efterår i medaljernes tegn

Af Dorte Olesen, Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU)

I efteråret 2019 vil der i SNU blive uddelt 3 medaljer, der alle ledsages af et legat sponsoreret af firmaet Ørsted.

Vi starter den 16. september med at høre et foredrag af prisvinderen og give en sølvmedalje for fremragende forskningsformidling til professor Thomas Bolander, DTU Compute. I indstillingen til medaljen står bl.a.:

"Thomas Bolander er en formidler helt i særklasse. Han forsker i kunstig intelligens (AI), i grænseområdet mellem logik, matematik og computer science – og han brænder for både forskning og formidling af sine fag.

Han har fået DTUs pris som årets underviser og skrevet et kapitel i en gymnasie matematikbog, hvor han trækker tråde til den nyeste forskning i AI, og han har i mere end 10 år holdt store offentlige foredrag om AI i mange sammenhænge og fora – det gælder bl.a. Folkemødet på Bornholm, Tech Fest, Science & Cocktails, BLOOM, og i SNU.

På Forskerzonen.dk skriver han tekster, laver podcasts og videoer, og han er med i SIRI-kommissionen, der skaber debat om brugen af AI i Danmark.

Hans evne til at engagere sit publikum er legendarisk, og han forstår at skabe en spændende og kon-

struktiv dialog med sit publikum – som fx når han afspiller et stykke musik komponeret i barokken og et stykke komponeret af en robot, der har lært noget om barokmusikkens regler, og sætter det til afstemning blandt publikum, hvad der er det ægte, og hvad der ikke er. Det giver anledning til muntre episoder, når mange gætter forkert, men bagefter virkelig begynder at forstå, hvad en robot kan og ikke kan."

Senere på efteråret uddeles guldmedaljen for første gang i 30 år, idet firmaet Ørsted i forbindelse med 200-året for Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen har sponsoreret to guldmedaljer, en til kemi og en til fysik. Udover selve medaljen får modtageren et medfølgende rejselegat på 75.000 kr. Guldmedaljevinderen vil også holde et offentligt foredrag den 28. oktober.

Og sidst på sæsonen uddeles den efterhånden traditionsrige bronzemedalje til en inspirerende gymnasie-lærer, denne gang ledsaget af både et rejselegat til modtageren og et beløb til et projekt på skolen, sponsoreret af Ørsted. Husk, at både rektorer, kollegaer og elever kan sende indstillinger til [snu@naturvidenskab.net](mailto:snu@naturvidenskab.net) senest den 29. oktober 2019.

# Eksperimentelle fysikprojekter i gymnasiet

Af Ole Bakander, Allerød Gymnasium

En række eksempler på fysikprojekter fra Allerød Gymnasium; flere af dem lidt anderledes end traditionelle projekter.

I forbindelse med min tildeling af Ørstedmedaljen 2018 er jeg blevet opfordret til at skrive lidt om de fysikprojekter, jeg i årenes løb har givet mine elever.

I 1980'erne havde vi på Allerød Gymnasium forsøgsundervisning i fysik: "Større eksperimentelle projekter". Senere blev de til "Større skriftlig opgave (SSO)" og sidenhen til "Studieretningsprojekt (SRP)", og fra disse har jeg valgt nogle eksempler.

I årenes løb har jeg forsøgt at finde på lidt skæve og anderledes projekter. Et gennemgående træk i mange af mine opgaver er:

Opstil hypoteser, planlæg og udfør forsøg som kan teste hypoteserne,

eller:

Opstil differentialligning til beskrivelse af fænomenet, løs ligningen (ofte numerisk) og sammenlign med forsøg.

I flere af mine eksempler er teksten taget direkte fra opgaveformuleringen, som eleverne har fået, andre er beskrevet ved mine overordnede bemærkninger.

Et par eksempler fra dagligdagens fysik:

## Frysning af vand

Historien fra de nordlige lande går således: "Stiller du en spand vand med varmt vand og en med koldt ud i frostvejret, fryser den varme først".

Er dette blot en ammestuehistorie, eller kan den bekræftes eksperimentelt?

Udfør en række eksperimenter for om muligt at bekræfte påstanden. Opstil en simpel model for afkøling og frysning af vand for derved at kunne udpege årsager til effekten. Planlæg og udfør en række eksperimenter, som enten kan udelukke eller sandsynliggøre de mulige årsager til effekten.

## Brusebadsforhæng

Det er et kendt problem, at badeforhænget i et brusebad har en irriterende tendens til at suge sig indad og klæbe til den badende.

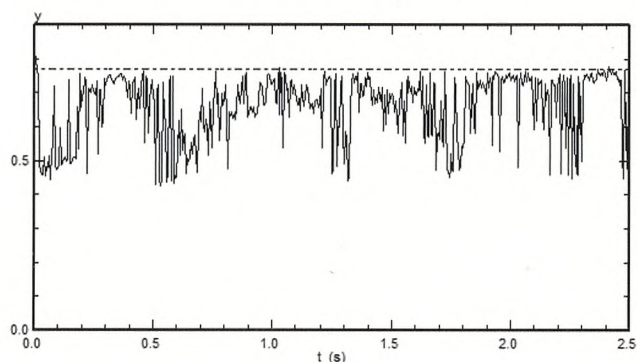
Opstil forskellige hypoteser til at forklare denne uønskede effekt. Planlæg og udfør en række eksperimenter, som enten kan udelukke eller sandsynliggøre de mulige årsager til effekten.

## Undersøgelse af turbulens i luft vha. ultralydsafstandsmåler

En CBR-ultralydsafstandsmåler opstilles i en fast afstand fra en væg. Mellem måleren og væggen stilles en tændt el-kogeplade. Da lydens hastighed er større i varm luft, ser det ud som om, at afstanden til væggen bliver mindre, og på grund af turbulensen får (tid,

afstand)-graf en karakteristisk "istap"-udseende (se figur 1).

Måles der med forskellige hastigheder (fx med 1 s og 10 s mellem målingerne), ser graferne ens ud (sammenlign med fraktale grafer), med store spring mellem de enkelte målinger. Men når tiden mellem målingerne bliver mindre end typiske tidskonstanter for turbulensen, ses det, at nabomålinger er korrelerede, dvs. ligger tæt på hinanden. Her ses det, at typiske tider for turbulenserne er 0.05–0.1 s (figur 1).



Figur 1. Tilsyneladende afstand til væg anbragt 0,77 m fra måleren.

## Kaosfænomen: Dryppende vandhane

Tiden mellem to dryp måles som funktion af dryphastigheden (målt fx i mL/min). Ved lave hastigheder fås dryp - - - - dryp - - - - dryp, og (vandhastighed, deltatid)-graf er en vandret linie.

Ved større hastighed fås dryp - dryp - - - - dryp - dryp, og grafen "bifurkerer".

Ved stigende vandhastighed fås flere bifurkationer, som til sidst ender i kaos. Ud fra bifurkationerne lykkes det at bestemme Feigenbaums konstant (dog kun med ét betydende ciffer).

## Bevægelse i et rutsjebane-loop

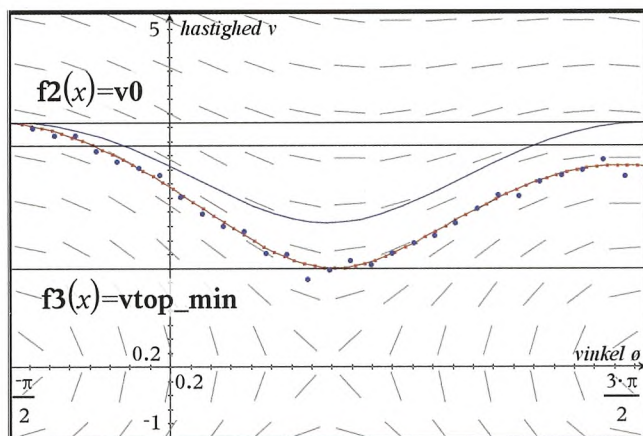
Beskriv energiforholdene i en rutsjebane-tur rundt i et cirkulært loop uden gnidning og luftmodstand, og bestem herfra minimumsværdien for forholdet mellem starthøjden på banen og loopets højde. Bestem dette forhold eksperimentelt.

Beskriv kræfterne på vognen i et cirkulært loop, og opstil en differentialligning til bestemmelse af farten  $v$  som funktion af vinkelpositionen  $\theta$  i loopet.

Udfør eksperimenter med bevægelse i et cirkulært loop, og sammenlign den målte hastighed  $v(\theta)$  med en løsning til ovenstående differentialligning.

Fortæl om "klotoiden", og gør rede for fordelene ved et klotoid-formet loop frem for et cirkulært.

Et resultat fra SRP-besvarelsen:

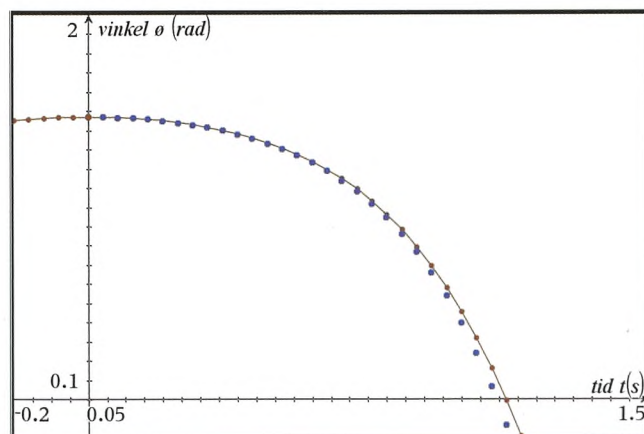


**Figur 2.** Hastighed som funktion af positionsvinklen i loopet.

Den blå graf er den teoretiske hastighed  $v(\theta)$  uden luft- og gnidningsmodstand, den røde er den numeriske løsning af differentialligningen med luftmodstand og gnidning. Blå punkter er målinger fra analyse af videooptagelse af en vogns bevægelse gennem loopet.

### Væltende stang

Opstil en differentialligning til beskrivelse af en stang, der vælter, og bestem vha. numerisk løsning en (tid, vinkel)-graf, der beskriver stangens bevægelse. Undersøg eksperimentelt stangens bevægelse, og sammenlign med teorien.



**Figur 3.** Positionsvinklen for stangen som funktion af tiden. De blå punkter er målinger fra analyse af videooptagelse.

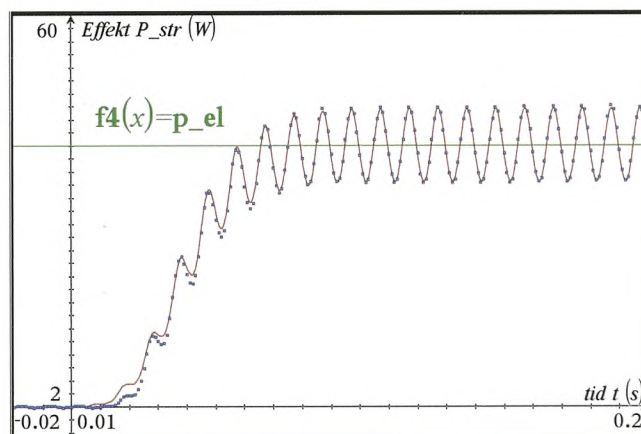
### Simulering af lysudsendelse fra glødepære

Udfør en teoretisk beregning af dimensionerne for glødetråden i en almindelig 230 V glødepære, samt en 12 V halogenpære. Udfør eksperimenter til målinger af lysudsendelsen som funktion af tiden for begge pærer for 50 Hz vekselspænding.

Opstil en differentialligning til modellering af lysudsendelsen fra en glødepære som funktion af tiden, og benyt denne til at foretage simuleringer, som kan sammenlignes med de målte. Sammenlign ligeledes den målte lysudsendelse ved tænding og slukning af pærerne med en simulering.

Min bemærkning:

Her er el-lære, varmelære og strålingsteori i sving. Lidt overraskende er det muligt at fastlægge både glødetrådens længde og diameter alene ud fra den nominelle spænding og effekt, idet temperaturen er givet ud fra lysets farve (2700–3000 K).



**Figur 4.** Lysintensitet for en 230 V, 40 W glødepære, rød graf er en numerisk løsning til differentialligningen, blå punkter er målte værdier.

Projekter med astronomi:

Simulering af kometbane ud fra filmen “Deep Impact”.

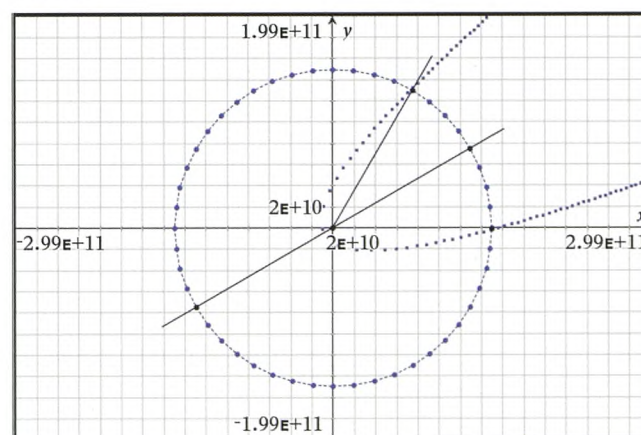
### Komet Wolf-Biederman

Bestem ud fra oplysninger i filmen “Deep Impact”, samt passende antagelser, banen for den fiktive komet “Wolf-Biederman”.

Gør rede for, at kometens indflyvningsretning ved nedslaget og klokkeslættet passer med din simulering af banen.

Min bemærkning:

Løsning af bevægelsesligningen (2. ordens differentialligning i to dimensioner) med forskellige indfaldsvinkler giver den eneste mulighed for kollision med Jorden ved anden krydsning af Jordens bane (den øverste på grafen, hvor kometen er på vej væk fra Solen).



**Figur 5.** Jordens og kometens bane (retrograd).

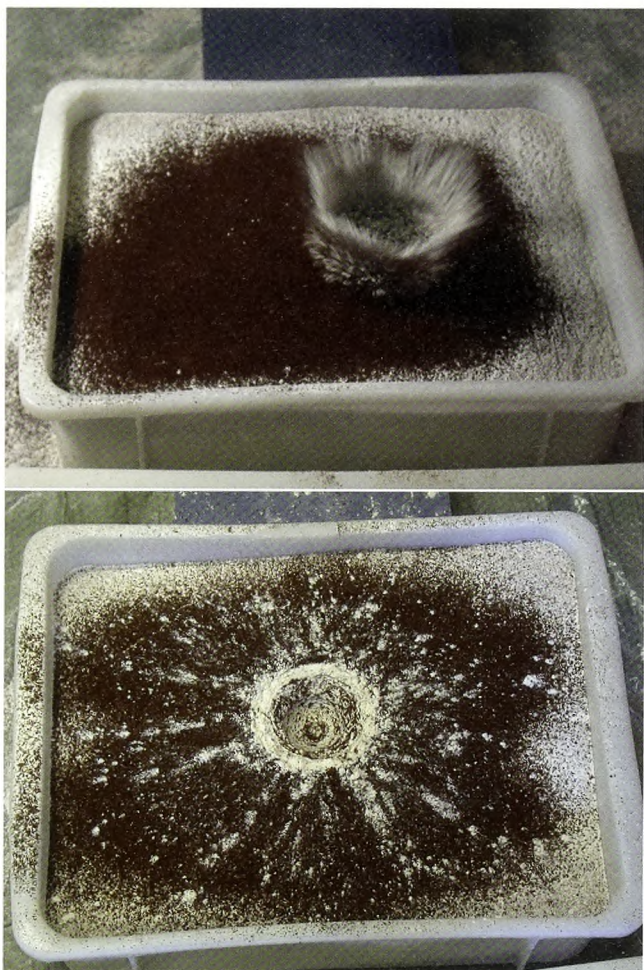
Afstanden mellem prikkerne i Jordens bane er ca. en uge og i kometens det halve. Det antages, at kometen kommer fra Oorts sky og derfor praktisk taget har undvigelseshastigheden fra Solen på 41,3 km/s.

## **Eksperimentel undersøgelse af nedslagskraterdannelse**

Gør rede for de væsentligste parametre, der kan være bestemmende for størrelsen af et nedslagskrater, og opstil en simpel teori for størrelsen af nedslagskratere. Udfør en række modelforsøg for at teste din teori for størrelsen af nedslagskratere. Sammenlign dine resultater med oplysninger om kendte nedslagskratere.

Min bemærkning:

Traditionelt har man i dette forsøg ladet forskellige kugler falde ned i en kasse med fugtigt sand, men det giver ofte et "krater", der blot er et aftryk af kuglen. Vi har fundet ud af, at et bedre materiale er en blanding af hvedemel og vaskepulver, her fås kraterer med diametre, der vokser med den kinetiske energi af kuglerne. Helt flot bliver det, når der strøs malet kaffe ud over overfladen, det giver tydelige "stråler" (såkaldte ejecta) ud fra krateret (figur 6).



**Figur 6.** Meteornedslag, modelforsøg.

## **Eksperimentel bestemmelse af krumningsradius for rumtiden på Jordens overflade**

Bestem, ud fra et tankeeksperiment med en lysstråles bevægelse i en accelereret elevator ("Einsteins elevator"), et udtryk for krumningsradius for rummet i et tyngdefelt med feltstyrken  $g$ .

Udfør forsøg til eksperimentelt at bestemme lysets hastighed og tyngdeaccelerationen, og benyt resultaterne herfra til at bestemme rummets krumningsradius

på Jordens overflade. Beregn den fejl, der ville opstå i positionsbestemmelsen vha. GPS-systemet, hvis der ikke var taget højde for relativistiske effekter.

Et par teoretiske opgaver:

## **Mørkt stof ud fra rotationskurver for Mælkevejen og Andromedagalaksen**

Udled udtryk for rotationskurven (dvs. rotationshastigheden som funktion af afstanden fra centrum) for forskellige relevante massefordelinger i en galakse (homogen kugle, homogen skive, punktmasse). Sammenlign den observerede rotationskurve for Mælkevejen med dine teoretiske udtryk.

Bestem, ud fra rådata, en rotationskurve for Andromedagalaksen, og sammenlign med dine teoretiske udtryk. Argumentér ud fra dette for eksistensen af såkaldt "mørkt stof".

## **Gravitationsstråling fra dobbeltstjernen PSR1913 +16**

Fortæl kort om dobbeltstjernen PSR1913 +16 og baggrunden for tildelingen af Nobelprisen i fysik 1993 til Taylor og Hulse.

Find i litteraturen et udtryk for den udstrålede effekt for gravitationsstrålingen for to punktmasser i kredsløb om hinanden, og omskriv om nødvendigt dette til brug på et dobbeltstjernesystem.

Udled et passende udtryk for den tidlige ændring af den mekaniske energi i et dobbeltstjernesystem. Gør i detaljer rede for, hvorledes man, ud fra kendte størrelser for dobbeltstjernen PSR1913 +16, indirekte kan påvise eksistensen af gravitationsstråling.

Gør i et eller flere tilfælde rede for, hvorledes man ud fra direkte observerede størrelser kan udlede værdier for væsentlige parametre for dobbeltstjerne-systemet PSR1913 +16.

SRP-Formidlingsopgave i fysik og dansk: Artikel til "Illustreret Videnskab" om kvarker og farvekraft.

## **Om kvarker og farver, en populærvidenskabelig artikel**

Gør rede for "Standardmodellens" billede af elementarpartikler og kræfter. Forklar, hvorfor det ikke er muligt at isolere enkelte kvarker. Gør rede for nukleonernes masse. Skriv en populærvidenskabelig artikel om indholdet i "Standardmodellen", og foretag en refleksion, hvor du bl.a. kommer ind på målgruppen samt brug af billedsproglige virkemidler.

En SSO-opgave i matematik:

## **Fordelingen af første ciffer**

Bestem fordelingen af første ciffer for forskellige eksempler på empirisk talmateriale, og angiv et matematisk udtryk som kan beskrive fordelingen.

Gør rede for forskellige modeller, der kan forklare/antyde en forklaring på den observerede fordeling af første ciffer.

Fortæl om mulige anvendelser af fænomenet.

Et hurtigt 1.g-forsøg som eksempel på ligefrem proportional sammenhæng:

### Vægten af vægte

#### 1. Formål

Formålet med dette eksperiment er at undersøge sammenhængen mellem den målte masse  $m$  og antallet  $n$  af vægte.

#### 2. Apparatur

Til forsøget benyttes: 6 stk. elektroniske køkkenvægte

#### 3. Udførelse

De seks køkkenvægte tændes, og det kontrolleres, at de alle er nulstillet. Nu stilles vægtene oven på hinanden, så de danner et tårn, og deres visninger  $m$  noteres. De sammenhørende værdier af  $n$  noteres således, at den øverste får nummeret 0 og den nederste nummeret 5.

#### 4. Databehandling

Tegn en  $(n, m)$ -graf. Hvad ligner grafen? Analysér

vha. en passende regression. Hvad viser det om sammenhængen mellem  $m$  og  $n$ ?

Ud fra denne graf kan du bestemme en relevant værdi, hvilken?

Dette var en lang liste af nogle af mine fysikprojekter, der er lidt anderledes end de traditionelle. Jeg håber, at de kan være til inspiration.



Ole Bakander er kandidat fra Københavns Universitet i 1976, med hovedfag i fysik og bifag i matematik samt speciale i eksperimentel kernefysik. Siden 1980 ansat på Allerød Gymnasium, hvor han underviser i fysik, matematik og astronomi. Fra 1986 til 2016 ansat som ekstern lektor på IMFUFA, Roskilde Universitet.

## Fysikhistorie – bogen “Historisk Fysik” og hjemmesiden [www.fysikhistorie.dk](http://www.fysikhistorie.dk)

Af Frank Nielsen og Else Høyrup

Omkring år 1900 udgav de to højskolelærere Poul La Cour og Jacob Appel værket *Historisk Fysik*. Værket var stort, to bind, hvert på 500 sider. La Cour og Appel arbejdede på Askov Højskole, ca. 10 km vest for Kolding. Højskolebevægelsen var dengang en meget vigtig del af den danske kultur, og den henvendte sig især til unge, der arbejdede i landbruget.



Figur 1. Poul La Cour (1846–1908).

Poul La Cour må have været hovedforfatter på værket, og ud over sit arbejde som højskolelærer arbejdede

han også som fysiker. Han var fx den første, der på samme tid kunne sende flere telegrafsignaler gennem samme ledning.

Det gjorde han ved at sende signaler med forskellige frekvenser. Frekvenserne blev skabt ved hjælp af stemmegaffler. La Cour byggede også i Askov den første danske vindmølle, der lavede strøm.

Jacob Appel var som helt ung elev af La Cour, og han blev senere ansat ved højskolen. Her underviste han, og han bidrog betydeligt til færdiggørelsen af bøgerne. Senere blev han minister for kirke og undervisning, nævnt i denne rækkefølge.

Da jeg (Frank) som ung blev ansat ved Matematisk Institut på Polyteknisk Lærestalt, gjorde professor Mogens Pihl mig opmærksom på bøgerne *Historisk Fysik* af Poul La Cour og Jacob Appel. Han anså disse bøger for klassiske værker i dansk litteratur; altså ikke blot i videnskabelig litteratur, men også betragtet som skønlitteratur. Jeg læste værket, og jeg blev enig med Mogens Pihl. *Historisk Fysik* beskriver fysikkens udvikling fra oldtiden til midten af 1800-tallet. Værket beskriver fysikerne som mennesker, og det indeholder beskrivelser af fysikernes faglige og menneskelige relationer til hinanden. I 1966 lykkedes det Mogens Pihl at få offentliggjort en ny udgave af bøgerne. Der var tale om et fotografisk genoptryk, så der blev ikke foretaget ændringer i forhold til den oprindelige udgave.

Mange år senere, omkring år 2000, var computeren og begrebet hjemmeside indført. Jeg fik så sammen med

cand.scient. Else Høyrup den idé at lave en hjemmeside inspireret af La Cours og Appels værk. Hvor *Historisk Fysik* henvendte sig til unge mennesker, der arbejdede i landbruget, henvender hjemmesiden sig til den interesserede elev i 2.g og i øvrigt til alle andre interesserede.

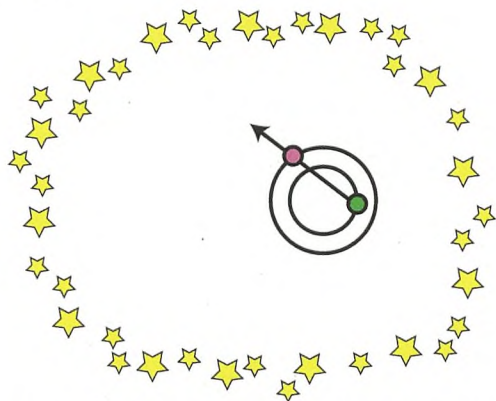


**Figur 2.** Jacob Appel (1866–1931).

Vi har så i ca. 15 år arbejdet med hjemmesiden [www.fysikhistorie.dk](http://www.fysikhistorie.dk).

Blandt de ting, som kan gøre en hjemmeside mere attraktiv end en bog med samme indhold, er, at søgning efter et bestemt emne kan gå meget hurtigere på en hjemmeside, end når man arbejder med en bog. La Cour og Appels bog var oven i købet helt uden register! Hos os skal man bare klikke på "Søgning" på forsiden af [fysikhistorie.dk](http://fysikhistorie.dk).

En anden ting, der er værdifuld på hjemmesiden, er animationerne. På forsiden er der vist et forsøg på at illustrere, hvordan de små sorte vandpartikler på vandoverfladen kan bevæge sig i cirkelbevægelser. Hvis dette er korrekt, kan man se, at en vandpartikel midt mellem to bølgetoppe bevæger sig baglæns i forhold til bølgetoppene. Vi har flere gange måttet anbefale tvivlere at gå ud på en badebro og smide et lille stykke træ i vandet!

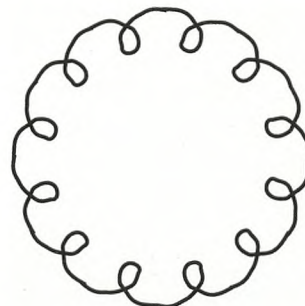


**Figur 3.** Synslinjen fra den grønne Jord mod den røde Mars peger på et bestemt sted på stjernehimlen. Se animationen på [www.fysikhistorie.dk/merer/retmer.html](http://www.fysikhistorie.dk/merer/retmer.html).

Tidligt i astronomiens historie blev man klar over, at en planets bevægelse på stjernehimlen er mærkelig.

Den skifter nemlig retning. Det har vi vist på den animation, som findes i vores omtale af retrograd bevægelse. På figur 3 viser vi en situation, hvor synslinjen fra den grønne Jord mod den røde Mars peger på et bestemt sted på stjernehimlen.

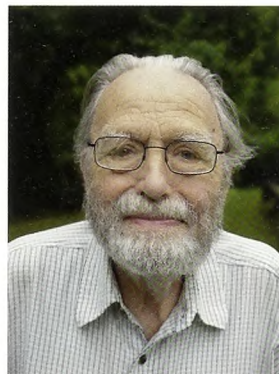
Men hvis man ser på animationen, bliver det indlysende, at bevægelsen af Mars undertiden skifter retning. Man siger, at bevægelsen er retrograd.



**Figur 4.** Sådan ser Månens bane omkring Solen ikke ud! Se animationen og den korrekte bane på [www.fysikhistorie.dk/merer2/maanemer.html](http://www.fysikhistorie.dk/merer2/maanemer.html).

En sjov ting skete for os, da vi fik den idé at finde ud af formen på Månens bane omkring Solen. Man kunne tro, at banen så ud som på figur 4, som vi selv har tegnet; men vores nærmere undersøgelse viser, at banen ser helt anderledes ud.

Se banen på hjemmesiden; den vender hele tiden den krumme side mod Solen. Det sjove er nu, at hvis man beder Google om et billede af Månens bane omkring Solen, så kommer Google med vores billede af, hvordan banen ikke ser ud!



*Frank Nielsen* er cand.mag. i matematik, fysik, astronomi og kemi. Han underviste i perioden 1963–1998 på DTU i matematiske emner, der spiller en rolle i ingeniørvidenskab. I undervisningen var der hele tiden eksempler på anvendelser.



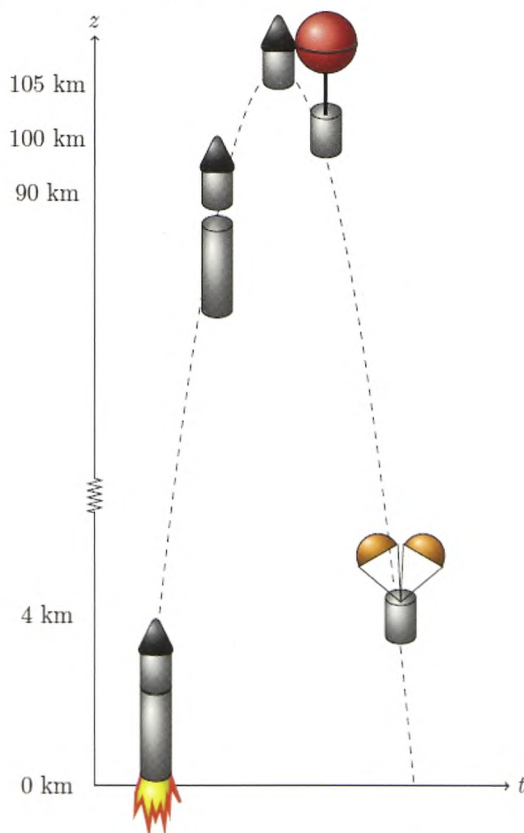
*Else Høyrup* er cand.scient. i matematik, tidligere stipendiat og forskningsbibliotekar. Hun har i mange år arbejdet med videnskabshistorie. Heraf kommer interessen for fysikhistorie. Hun har hovedansvaret for biografier og historiske sider på hjemmesiden [www.fysikhistorie.dk](http://www.fysikhistorie.dk). Hun har især arbejdet meget med Newton og med Tycho Brahe og hans søster, Sophie Brahe.

# Ballut til bremsning af rumkapsel faldende fra 105 km

Af Sascha Stork, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Amatørvirksomheden Copenhagen Suborbitals har en vision om at opsende en bemannet rumkapsel til en højde af 105 km på deres fremtidige mission. På turen tilbage til Jorden skal rumkapslen bremses af en ballut. Gennem computersimulering er radius af denne ballut fundet til at skulle have en størrelse på min. 1,25 m.<sup>1</sup>

Copenhagen Suborbitals (CS) vil på sin fremtidige mission, Spica, opsende en bemannet rumraket til sub-orbitale højder. Målet er at få rumkapslen op i en højde af 105 km, hvor den skal have vendepunkt. På turen tilbage mod Jorden vil rumkapslen i en højde af 100 km skyde sin næse af og derved udløse en ballut (se nedenfor), som har til opgave at bremse rumkapslen. Balluten skal bremse rumkapslen, således at den i en højde af 4 km har en hastighed på under 200 km/t, da der her skal udløses faldskærme til at bremse rumkapslen på den resterende strækning. Disse faldskærme har netop en øvre grænse, også kaldet operativ hastighed, på 200 km/t. Det er gennem computersimulering af rumkapslens hastighed undersøgt, hvilken størrelse denne ballut måtte have, således at grænsebetingelsen om en sluthastighed under 200 km/t er opfyldt. Projektet beskæftiger sig altså med rumkapslens nedfart på strækningen fra 105 km til 4 km over havet.



**Figur 1.** Skitse af Spicamissionens forløb. Opsendelsen starter i venstre side af figuren og følger i tid den stiplede kurve mod højre. Balluten er vist ved den røde kugle og faldskærmene ved de orange halvcirkler. Opsendelse sker ved 0 km, separation af raket og rumkapsel ved 90 km, vendepunkt ved 105 km, ballutudløsning ved 100 km og faldskærmsudløsning ved 4 km [1].

I en tidligere artikel [2] har Mads Stenfatt, som er ansvarlig for CS' faldskærmssystemer, beskrevet, hvorledes det totale bremsesystem for rumkapslen virker. Systemet er udviklet til tidligere missioner, men overføres til Spicamissionen med de dertilhørende dimensioner.

En ballut er en hybrid mellem en ballon og en faldskærm (engelsk: ballute, som kommer af **balloon** & **parachute** (*balloon* og *faldskærm*)). Balluten blev i 1958 udviklet til at deaccelerere legemer med overlydshastigheder, således at legemernes sluthastighed blev som ønsket. Det oprindelige design er siden blevet optimeret. Ballutens anvendelsesformål har bl.a. været at bremse luftfartøjer samt forsinke bomber og mortérer. En ballut har et såkaldt "ram-air"-luftindtag. Denne type luftindtag har til formål at omdanne dynamisk tryk omkring et legeme i bevægelse til statisk tryk på indersiden af luftindtaget. Ballutens design gør, at luften fra indtagene ikke kan ekskluderes. Balluten holder derfor sin form og kan betragtes som et rigtigt legeme. Luftindtagene er placeret under ballutens ringformede "burble fence" (se figur 2) for at sikre luftindtag hurtigt efter udløsning af balluten. Burble fence't genererer hvirvler i luften over sig, hvilket giver en uniform strømningsseparation, som har vist sig at være vigtigt for at holde en ballut stabil ved sub- og transsoniske hastigheder.



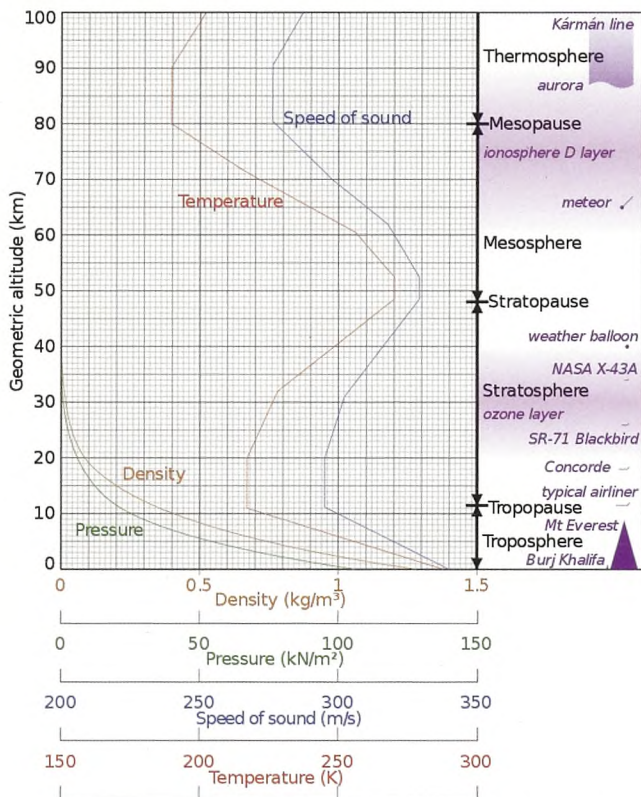
**Figur 2.** Demoballuter udviklet ved CS. Billedet her er fra tests på balluterne udført i vindtunnel.

På sin færd gennem atmosfæren vil rumkapslen passere forskellige atmosfærelag. Disse atmosfærelag er interessante, da luften i lagene har forskellige egenskaber. Rumkapslen vil passere gennem troposfæren, stratosfæren, mesosfæren samt termosfæren. Højdegrænser for atmosfærelagene varierer med Solens aktivitet. Derfor vil grænserne bl.a. være sæsonafhængige. Generelt gælder, at nær ækvator er lagene tykkere end nær

<sup>1</sup> Artiklen er et sammendrag af min bacheloropgave, og jeg takker Peter Ditlevsen for vejledning og gennemlæsning af artiklen.

polerne. Det er interessant at se på atmosfærelagene, da luftdensiteten omkring balluten har betydning for, hvor meget denne vil bremse rumkapslen.

I systemer indeholdende et stillestående legeme omsluttet af et fluid i bevægelse eller et stillestående fluid, som omgiver et legeme i bevægelse, vil der være en modstand tilstede. Denne modstand er en kraft (eng.: drag force), som har en bremsende effekt på hhv. fluidet eller legemet og virker modsatrettet bevægelsesretningen. Dvs. at et legeme påvirket af konstant acceleration, som bevæger sig gennem et stillestående fluid, vil miste hastighed grundet denne modstand. Dette gælder både aero- såvel som hydrodynamiske situationer. I aerodynamikken kaldes denne modstand for luftmodstand.



**Figur 3.** Atmosfærelag, som rumkapslen skal igennem. Som det ses af de grønne og orange grafer er både luftdensiteten og trykket forsvindende for højder over troposfæren, mens både temperaturen samt lydens hastighed i luft svinger lidt op og ned gennem Jordens atmosfære [3].

I projektet her vil rumkapslen med balluten udgøre legemet i bevægelse, mens den atmosfæriske luft omkring rumkapslen og balluten er fluidet. Fluidet betragtes som værende i ro. Luftmodstandskraften,  $F_D$ , er givet på følgende vis:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \rho(z) \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 C_D \pi r^2 \quad (2)$$

I ligning (1) er  $\rho$  luftdensiteten,  $v$  er hastigheden af rumkapslen og balluten,  $C_D$  er formkoefficienten (eng.: drag coefficient) for balluten, mens  $A$  er tværsnitsarealet af balluten. For denne simulering er både luftdensiteten samt hastigheden variable i dette udtryk, mens formkoefficienten og tværsnitsarealet er konstanter. Formkoefficienten er et enhedsløst udtryk, som hovedsageligt

afgøres af legemets form. I denne simulering er der ikke taget højde for, hvor meget rumkapslen bidrager til luftmodstanden. Det er altså udelukkende luftmodstanden på balluten, som indgår i beregningerne. Derved er  $C_D$ - og  $A$ -værdierne for balluten gældende for hele systemet.  $C_D$  for balluten er i simuleringen sat til at være 0,6, hvilket er fastsat eksperimentelt ved test i vindtunnel. Resultater for bestemmelse af formkoefficienten kan findes af [2]. Dermed er ligning (2) gældende for simuleringen, hvor  $r$  er radius af balluten.

Den anden kraft, som virker i systemet ud over luftmodstanden, er tyngdekraften. Grundet den store vertikale afstand, som rumkapslen vil bevæge sig over, kan tyngdekraften ikke antages konstant over denne strækning. For tyngdekraften gælder:

$$F_G = mg(z) \quad (3)$$

$$= m \frac{G m_E}{(R_E + z)^2} \quad (4)$$

Gravitationskonstanten,  $G$ , er  $6,67384 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$ , Jordens masse,  $m_E$ , er  $5,97 \cdot 10^{24}$  og Jordens radius  $R_E$  er  $6,37 \cdot 10^6$  m, mens  $z$  er rumkapslens højde over havet.

Hvis hverken luftdensiteten eller tyngdeaccelerationen havde været positionsafhængige, ville man ved at tage udgangspunkt i ligning (1), (3) samt Newtons 2. lov kunne finde hastigheden ved

$$F_T = F_G + F_D \quad (5)$$

$$ma = -mg + \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (6)$$

$$v(t) = -\sqrt{\frac{g}{\frac{1}{2m} \rho C_D A}} \tanh \left( t \sqrt{\frac{1}{2m} \rho C_D A g} \right) \quad (7)$$

I grænsetilfældet for tiden gående mod uendelig gælder, at rumkapslen vil opnå terminalhastighed, hvor luftmodstands- og tyngdekraften er lige store og modsatrettede. Når et legeme har opnået terminalhastighed, accelererer det ikke længere, men bevæger sig med konstant hastighed efter Newtons 1. lov. Terminalhastigheden indstiller sig over tid efter følgende udtryk:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = \sqrt{\frac{g}{\frac{1}{2m} \rho C_D A}} \quad (8)$$

Ved at isolere radius i ligning (8) har CS beregnet, at størrelsen af deres foreløbige ballut skal have en radius på 0,98 m. Begrænsninger i produktionen har dog medført en radius på 0,94 m. Yderligere information om disse beregninger samt ballut og faldskærme udviklet ved CS kan læses i [2].

Ligning (6) kan dog, grundet luftdensitetens samt tyngdeaccelerationens positionsafhængighed, ikke anses for at være en ordinær 1. ordens differentialligning, men er en koblet differentialligning af formen

$$\frac{dv}{dt} = -g(z) + \frac{1}{2m} \rho(z) \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 C_D \pi r^2. \quad (9)$$

Ovenstående udtryk er løst ved numerisk integration efter 4. ordens Runge-Kutta-metoden.

## Metode

Problemløsningen er holdt endimensionel langs en radial akse ud fra Jordens centrum med nulpunkt ved havoverfladen.

Bestemmelsen af værdierne for luftdensiteterne er fastsat ved at lave en modelfunktion til tabelværdierne for luftdensiteterne opgivet i den statistiske model, U.S. Standard Atmosfære, som gælder i området 0-80 km. Modelfunktionen er anvendt til at ekstrapolere værdier op til 105 km. Modelfunktionen er en lineær funktion til logaritmen af luftdensiteten:

$$\ln(\rho) = az + b \quad (10)$$

Rumkapslens position over havoverfladen er angivet som  $z$ .

De indgående parametre, den totale masse for ballut og rumkapsel,  $m$ , samt radius,  $r$ , som indgår i ligning (9), er diskrete værdier. Der gælder, at  $r \in [0,9; 1,55]$  m med 5 cm-intervaller og  $m \in [300; 350]$  kg med 2,5 kg-intervaller. Simuleringen finder løsninger for rumkapslens hastighed i en højde af 4 km over havet for samtlige kombinationer af masse og radius. Dette gøres ved numerisk integration af hastigheden,  $v$ , efter 4. ordens Runge-Kutta-metoden i et "for-loop":

$$\begin{aligned} k_1(t) &= -g(z_i) \cdot dt + \frac{1}{2m} \rho(z_i) v_i(t)^2 C_D A \cdot dt \\ v_{k_1}(t) &= v_i(t) + k_1 \frac{dt}{2} \\ k_2(t) &= -g(z_i) \cdot dt + \frac{1}{2m} \rho(z_i) v_{K_1}(t)^2 C_D A \cdot dt \\ v_{k_2}(t) &= v_i(t) + k_2 \frac{dt}{2} \\ k_3(t) &= -g(z_i) \cdot dt + \frac{1}{2m} \rho(z_i) v_{K_2}(t)^2 C_D A \cdot dt \\ v_{k_3}(t) &= v_i(t) + k_3 \\ k_4(t) &= -g(z_i) \cdot dt + \frac{1}{2m} \rho(z_i) v_{K_3}(t)^2 C_D A \cdot dt \\ v_{i+1}(t + dt) &= v_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (11) \end{aligned}$$

I samme loop er positionen,  $z$ , parallelt integreret:

$$z(t + dt)_{i+1} = z_i(t) + v_i(t) \cdot dt \quad (12)$$

I ovenstående ligninger beskriver  $i$  en iteration af integrationen, mens  $dt$  er tidsintervallet for integrationen, hvilket er sat til 0,1 s.

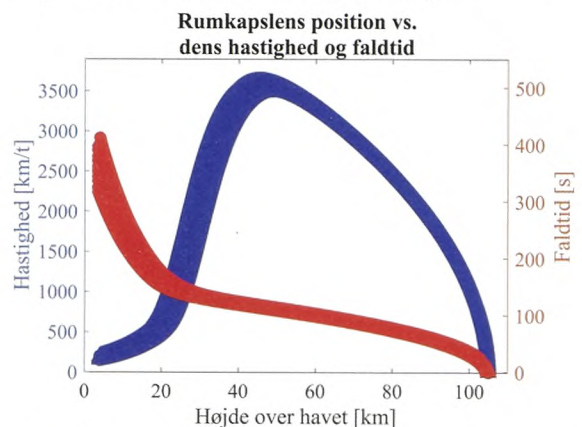
Grænsebetingelserne for integrationen fastsættes med "else"/"if"-betingelser og er som følger; starthastigheden er  $v_0 = 0$ , da rumkapslen er i et vendepunkt. Startpositionen er  $z_0 = 105.000$  m, da dette påtænkes at være højden for vendepunktet. Fra 105.000 m til 100.000 m vil kun tyngdeaccelerationen bidrage til hastighedsberegningerne, da balluten endnu ikke er udløst. Fra  $z < 100.000$  m vil luftmodstanden bidrage til beregningen, hvilken er af den form, som fremgår

af ligningerne (11). Første gang rumkapslen opnår en position, hvor  $z < 4.000$  m, stoppes integrationen. Hastigheden i den pågældende højde noteres som sluthastigheden  $v_f$ . Såfremt  $v_f < 200$  km/t, anses kombinationen af radius og masse for at være gyldig. Ellers er kombination ugyldig. Forløbet for gyldige løsninger vises grafisk i resultatafsnittet.

## Resultater

Ved at anvende Runge-Kutta-metoden til 4. orden opnås altså en simulering af hele rumkapslens hastighedsforløb gennem nedfarten. Simuleringen tillader rumkapslen at have en acceleration. Beregninger ud fra terminalhastigheden tillader derimod igen acceleration for rumkapslen i den pågældende position.

Af figur 4 fremgår hastighed og tid som funktion af position for samtlige gyldige kombinationer af ballutradius og total masse for ballut og rumkapsel.



**Figur 4.** Hastigheder og positioner regnet efter 4. ordens Runge-Kutta-metode for 171 gyldige kombinationer af ballutradius og rumkapsel samt ballutmasse, hvilket er kombinationer, som medfører en sluthastighed for rumkapslen på under 200 km/t. Blå grafer følger venstre 2. akse og indikerer hastigheden af rumkapslen. Røde grafer følger højre 2. akse og indikerer nedfaldstiden for rumkapslen.

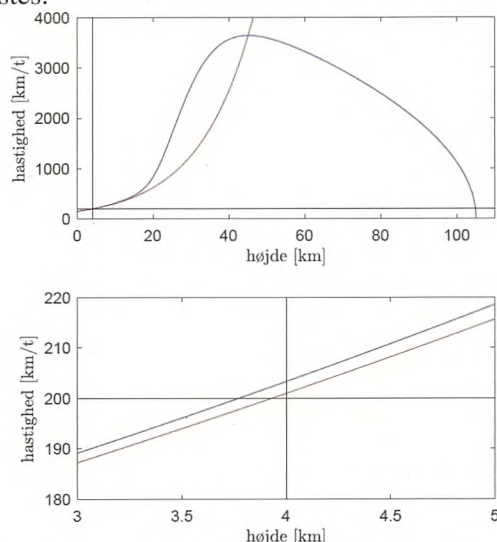
I løbet af nedfarten vil de masse/radius-kombinationer, som opfylder grænsebetingelserne, give rumkapslen en tophastighed på mellem 3494,1 og 3633,8 km/t. Nedfarten vil vare et sted mellem 319,8 og 414,1 s. For rumkapslen med en total masse på 350 kg og ballutradius på 1,25 m, hvilket er den mindste ballutradius, som kan opfylde betingelserne for den største masse af rumkapslen, vil nedfarten vare 327,5 s, mens tophastigheden vil være 3620,7 km/t.

Sammenholdes figur 3 og 4, ses det som forventet, at luftdensiteten har en afgørende betydning for ballutens bremsning af rumkapslen. Rumkapslen accelererer mod Jorden fra 105 km til ca. 50 km, uagtet ballutens størrelse. Ballutens bremseeffekt er altså mere eller mindre ubetydelig gennem rumkapslens færd i termo- og mesosfæren. Ved omkring 50 km rammer rumkapslen stratosfæren, hvor luftdensiteten kommer op på en størrelsesorden af  $10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup>. Lige før rumkapslen rammer stratosfæren, opnår den tophastighed. Herfra deaccelererer rumkapslen på resten af sin færd mod Jorden. Når rumkapslens position er omkring tropopause, sker en yderligere ændring i deacceleration.

Simuleringen er kørt én gang med en total masse for rumkapsel og ballut på  $m = 350$  kg og en radius på  $r$

= 0,94 m, som er de værdier, CS har anvendt for deres foreløbige ballut. Resten af værdierne og antagelserne er som ved den øvrige simulering. Dette resulterer i en sluthastighed på 259,8 km/t i højden 3997,5 m o.h. med en nedfartstid på 265,3 s.

Simuleringen er ligeledes kørt således, at hastigheden er regnet ud fra antagelsen om terminalhastighed (ligning (8)). Det fremgår af denne udregning, at de to beregninger (ligning (8) og (9)) har skæringspunkt og dermed ens hastigheder i omkring 45 km, hvilket er vist i figur 5. Før dette ligger terminalhastigheden højere end den tids- og positionsafhængige hastighed. Efter skæringspunktet ligger den højere. Afvigelseerne er så signifikante, at teorien om terminalhastighed må forkastes.



**Figur 5.** Figurene viser nedfartshastigheden som funktion af rumkapslens højde. Blå grafer er hastigheder regnet ved simulering efter 4. ordens Runge-Kutta-metoden (ligning (11)), mens røde grafer er regnet efter udtrykket for terminalhastighed (ligning (8)). Øverste figur viser hastighederne for de to metoder over hele nedfarten, mens nederste figur er et udsnit for sluthøjde  $\pm 1$  km. Til udregningerne her er anvendt en masse på  $m = 300$  kg og en ballutradius på  $r = 1,2$  m.

## Diskussion

Det er antaget, at U. S. Standard Atmosfæremodellen kan anvendes til at beskrive luftdensiteten omkring rumkapslen. Den forventelige lokation for raketopsendelsen vil være akkurat ud for dansk territorium, hvilket ligger inde for de breddegrader, hvor modellen er gældende. Dog tager modellen ikke højde for evt. lokale vejrforhold eller lignende.

I simuleringen er ikke medregnet rumkapslens egen bremseeffekt, hvilket vil bevirke højere sluthastigheder for simuleringen end under de faktiske forhold. CS har dog medregnet denne ved deres beregning ud fra teorien om terminalhastighed.

Problemet er holdt endimensionelt. Dog vil opsendelsen finde sted i det virkelige, tredimensionelle rum, hvor bl.a. effekter som Corioliskraften spiller ind. Den øvre grænse for ballutens størrelse af radius er valgt arbitrært, da  $r = 1,55$  m medfører en sluthastighed, som ligger 22-28 % lavere end 200 km/t, hvilket synes passende. Større radius medfører lavere sluthastigheder.

Af figur 5 fremgår det, at hastighedskurven fundet ved udregninger af terminalhastigheden divergerer, når

rumkapslen befinder sig i højder over stratosfæren. Modellen er altså slet ikke gældende herover. I troposfæren forløber udregningerne simuleret ved Runge-Kutta 4. ordens-metoden og ved terminalhastigheden mere lig hinanden. Beregninger med terminalhastigheden hviler på en antagelse om, at rumkapslen har opnået konstant hastighed, hvilket ikke synes at være tilfældet. Simulering efter Runge-Kutta 4. ordens-metoden viser, at rumkapslen *ikke* har opnået terminalhastighed ved 4 km, hvorfor metoden med at regne efter terminalhastighed må anses for at være utilstrækkelig. Simuleringen viser ligeledes, at rumkapslen vil fare ind i stratosfæren med en hastighed, som ca. er 295-435 km/t hurtigere end tidligere antaget [2].

Den foreløbig ballut fra CS har en radius, som er 31 cm mindre, end denne simulering angiver, at den bør være. Jf. simuleringen vil deres foreløbige ballut derfor være for lille til at overholde faldskærmenes operative hastighed.

Sammenholdes kurverne over hastighedsforløbene i denne artikel med g-load-illustrationen i den tidligere artikel, findes det, at der er behov for en ny gennemregning af g-kræften ud fra den nye information, som dette projekt har givet. G-påvirkningen er størst, når accelerationen har ekstremapunkter, hvilket den har, når hastighedskurverne er stejle. Ved aflæsning af graferne i figur 4 er dette omkring 25 km og 105 km, mens de tidligere resultater angiver, at det skulle være omkring 45 km [2]. Der opfordres derfor til, at de tidligere resultater for g-påvirkningen ses igennem.

## Konklusion

Balluten for CS' Spicamission skal have en radius på min. 1,25 m for at opnå hastigheder under 200 km/t, hvis den totale masse for rumkapsel og ballut ønskes at være 350 kg. Derfor opfordres CS til at designe en større ballut til Spicamissionen end deres foreløbige.

## Litteratur

- [1] Copenhagen Suborbitals, [copenhagensuborbitals.com/missions/spica](http://copenhagensuborbitals.com/missions/spica).
- [2] M. Stenfatt (2016) "At bringe en bemandet rumkapsel til sikker landing", *Kvant*, bind 27, nr. 1, side 24-29.
- [3] [en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere\\_of\\_Earth#Stratification](http://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth#Stratification).
- [4] Engineering ToolBox (2003) U. S. Standard Atmosphere, [www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d\\_604.html](http://www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d_604.html)



Sascha Stork er BSc i fysik. Hun interesserer sig for ekstremsport og springer bl.a. faldskærm i sin fritid. Ønsker at anvende fysik til at fremme ekstremsportatleters performance i fremtiden gennem designoptimering af diverse udstyr.

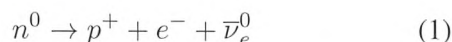
# Den undvigende neutrino

Af Bernhard Lind Schistad, Viborg Tekniske Gymnasium

Neutrinoen er den elementarpartikel, der vekselvirker mindst med andre partikler. Den adskiller sig fra alle andre partikler ved, at den ikke opfylder højre/venstre-symmetri. Ifølge partikelfysikkens standardmodel skulle den ikke have masse, men det viser det sig, at den alligevel har det. Selvom hver kvadratmeter på Jorden rammes af 1000 billioner neutrinoer pr. sekund, ser det ud til, at halvdelen af dem, der bliver udsendt af Solen, på mystisk vis mangler, når de rammer Jorden. Dette viser sig at skyldes, at neutrinoen har evnen til at skifte type i flugt, så når Solen udsender en elektronneutrino, kan den ramme Jorden som en anden type.

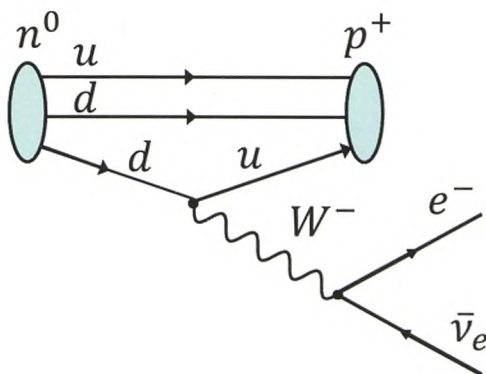
Neutrinoer udsendes i forbindelse med betahenfald, det vil sige processer, hvor en neutron forvandler sig til en proton eller omvendt. En fri neutron er ikke stabil, men henfalder med en levetid på ca. 15 min. At en fri neutron ikke er stabil, mens en neutron i en kerne kan være stabil, skyldes, at neutronerne er stærkere bundet i kernen, da de ikke frastøder hinanden elektrostatiske ligesom protonerne. En kerne med en ekstra proton vil derfor kunne have en højere energi end massedifferencen mellem neutroner og protoner.

Den fri neutron henfalder til en proton, en elektron og en antineutrino på følgende måde:



Vi ved nu, at neutronen består af en  $u$ -kvarke og to  $d$ -kvarker ( $udd$ ). Det, der sker, når neutronen henfalder, er, at én af dens  $d$ -kvarker forvandler sig til en  $u$ -kvarke via den svage vekselvirkning ved at udsende en  $W$ -boson, som henfalder til en elektron og en elektron-antineutrino som vist på figur 1.

Neutrinoen er en lepton ligesom elektronen (en neutrino har leptontallet +1, mens en antineutrino har leptontallet -1). Den er en fermion, dvs. en partikel, der adlyder Fermi-Dirac-statistik, og den har halvtalligt spin:  $s = \frac{1}{2}$ . Den har ingen elektrisk ladning og mærker ikke den stærke vekselvirkning.

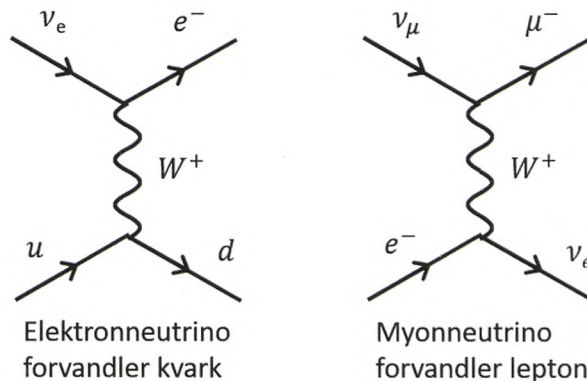


Figur 1. Neutronhenfald.

Neutrinoen er den kendte elementarpartikel, der vekselvirker mindst med omverdenen. Dette skyldes, at den hverken har elektrisk ladning eller farveladning. Den eneste mulighed, den har, er at "ramme" en kvarke og få den til at skifte type (flavour) ved at udveksle en tung vektorboson eller forvandle en lepton til en anden

lepton ved at "smide" en vektorboson i hovedet på den (figur 1).

Da vektorbosonen ( $W^+$  i dette tilfælde) har ekstremt høj masse, mens neutrinoen er (næsten) masseløs, sker disse reaktioner meget sjældent. Faktisk kan en neutrino passere igennem Solen uden at vekselvirke med noget som helst.



Figur 2. En neutrino forvandler en kvarke eller en elektron ved at udveksle en vektorboson.

## Neutrinoens helicitet

I 1957 gennemførte Maurice Goldhaber et eksperiment ved Alternating Gradient-synkrotronen i Brookhaven for at bestemme neutrinoernes helicitet [1]. Helicitet kan oversættes til "håndethed".

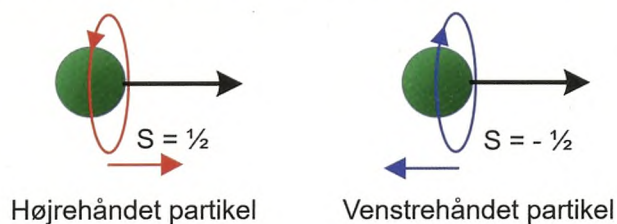
Eksperimentet viste, at neutrinoen har en meget mærkelig egenskab:

*Alle neutrinoer er venstrehåndede, og alle antineutrinoer er højrehåndede!*

Lad os se, hvad dette betyder. Hvis en partikel har elektrisk ladning, og den har spin forskelligt fra nul, har den også et magnetisk moment. Vi ved, at spinnen er kvantiseret i kvantemekanikken. Leptoner og kvarker har spin  $s = \frac{1}{2}$ . Dette medfører, at disse partikler har to mulige spintilstande:  $s = +\frac{1}{2}$ , svarende til, at spin og magnetisk moment peger i partiklens bevægelsesretning, og  $s = -\frac{1}{2}$ , svarende til, at de peger modsat bevægelsesretningen. Spinnets orientering i forhold til bevægelsesretningen kaldes partiklens helicitet.

Dette kan let konstateres ved partikler med ladning (og magnetisk moment), men for en partikel som neutrinoen, kan det kun observeres indirekte. Vi ved nemlig, at ved alle fysiske processer er det totale spin bevaret (ligesom energien og bevægelsesmængdemomentet), så

man summerer spinnet for alle partikler før og efter en reaktion. Dette vil afgøre, hvilket spin neutrinoen havde, og svaret er altid det samme: Alle neutrinoer er "kejthåndede", og alle antineutrinoer er højrehåndede. Neutrinoen er den eneste kendte partikel med denne egenskab. Kvarkerne, elektronen, myonen og taupartiklen kan have begge værdier af heliciteten.



**Figur 3.** Neutrinoens og antineutrinoens heliciteter er modsatte af hinanden. De sorte pile angiver partiklernes bevægelsesretning. De røde og blå pile angiver deres spin.

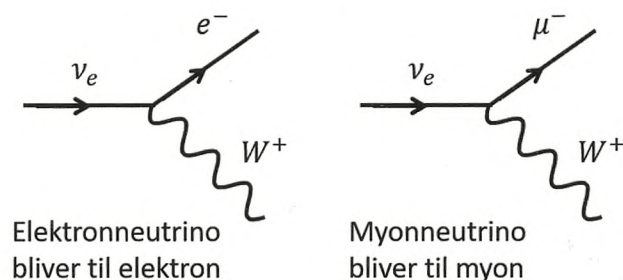
### Flere slags neutrinoer

I starten kendte man kun én slags neutrino. Men efter opdagelsen af myonen, elektronens tunge storebror, viste det sig, at de neutrinoer, der opstår, når myonen henfalder, ikke alle er af samme slags som dem, der dannes ved normal radioaktivitet. En myon henfalder til en elektron, en elektron-antineutrino og en myonneutrino:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (2)$$

I 1962 kunne Leon Lederman, Melvin Schwartz og Jack Steinberger påvise, at de neutrinoer, der skabes ved henfald af myoner, danner nye myoner, når de vekselvirker med andre partikler [2]. For denne opdagelse fik de Nobelprisen i fysik i 1988.

Når neutrinoer danner elektroner eller myoner, sker det ved, at de udsender en vektorboson (figur 4).



**Figur 4.** Elektron- og myonneutrino.

I 1975 kunne Martin Perl og hans gruppe ved Stanford Linear Accelerator annoncere, at de havde opdaget en ny storebror til elektronen og myonen [3]. Den fik navnet tau-leptonen. Da elektronen og myonen har hver sin tilknyttede lepton, var det en oplagt tanke at lede efter en tilsvarende neutrino. Den blev fundet i år 2000 af Donut-gruppen ved Fermilab [4].

Ifølge standardmodellen er der tre generationer af elementarpartikler med hver deres neutrino, associeret med klassens lepton.

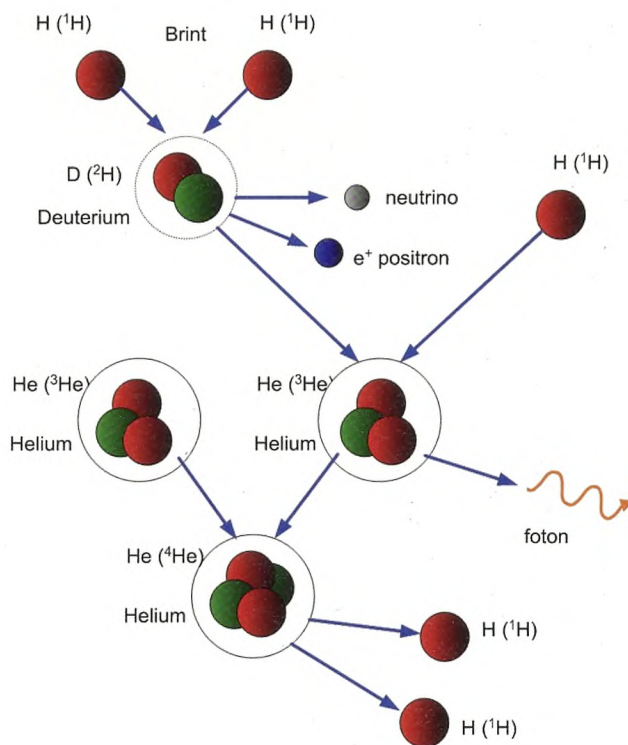
Forskellen på de tre neutrinoer er, at de kun kobler til deres associerede lepton ved den svage vekselvirkning:

*En neutrino kan kun forvandle sig til en lepton af samme generation (ved at udsende en tung vektorboson).*

| Gene-ration | Kvarker          | Lepton         | Neutrino                     |
|-------------|------------------|----------------|------------------------------|
| 1           | Up<br>Down       | Elektron (e)   | Elektronneutrino ( $\nu_e$ ) |
| 2           | Charm<br>Strange | Myon ( $\mu$ ) | Myonneutrino ( $\nu_\mu$ )   |
| 3           | Top<br>Bottom    | Tau ( $\tau$ ) | Tauneutrino ( $\nu_\tau$ )   |

### Neutrinooscillationer

I 1960'erne begyndte man at lede efter neutrinoer fra Solen. Inde i Solen (og alle stjerner) foregår der en kædeproces, hvorved protoner fusionerer og til sidst danner helium. Processen kan foregå på grund af den voldsomme temperatur og det voldsomme tryk i Solens indre (15,7 millioner K). Denne reaktion danner også en neutrino (figur 5).



**Figur 5.** Neutrinoproduktion i Solens indre.

Neutrinoer fra denne reaktion samt andre, mere komplicerede reaktioner i Solen vil bombardere Jorden med et gigantisk antal neutrinoer. Teoretisk kan vi beregne denne neutrinostrøm til ca. 1000 billioner neutrinoer pr. m<sup>2</sup> pr. sekund. Selv om neutrinoer er svære at påvise, burde det være muligt at måle en så kraftig strøm.

På grund af neutrinoens uvilje mod at vekselvirke med andre partikler, er det ikke nogen nem sag at

måle neutrinostrømmen fra Solen. I årenes løb har man anvendt forskellige effekter til at påvise neutrinoerne:

- Når en neutrino vekselvirker med en nukleon, omdanner den en proton til en neutron eller omvendt. Dette gør, at en neutrinoreaktion vil ændre atomnummeret og altså skabe en transmutation til et andet grundstof. Man kan kalde det "omvendt" radioaktivitet. Antallet af neutrinoer kan derved måles indirekte ved at tage en stor beholder med en kendt koncentration af et grundstof, og så se om denne koncentration ændrer sig over tid på grund af neutrinoreaktioner. Sådanne forsøg har været udført med fx klor (Cl), som forvandles til argon (Ar), når en neutron bliver til en proton.

- En neutrino kan "skubbe" til en elektron ved at udveksle en neutral, tung vektorboson ( $Z^0$ ). Denne effekt kan påvises ved fx at have en stor tank med vand (der vil være masser af elektroner i denne) og se efter Cherenkovlys<sup>1</sup> fra elektroner, som rammes af neutrinoer. Ved at måle vinklen på lyskeglen, kan energien i elektronen bestemmes, og det kan sandsynliggøres, om neutrinoen kom fra Solen.

Sidst i 1960'erne udførte Raymond Davis Jr. og John N. Bahcall [5] målinger af strømmen af neutrinoer fra Solen. Det lykkedes at påvise neutrinoer, men der var meget stor uoverensstemmelse mellem den teoretiske beregning og de praktiske målinger. Generelt viste alle målinger kun ca. det halve antal neutrinoer af, hvad de burde vise. Dette er i fysikken blevet kaldet "Solneutrino problemet".

Der har været flere forslag til forklaring af Solneutrino problemet. En af de mest originale var fra den italiensk-russiske fysiker Bruno Pontecorvo, som i 1969 foreslog, at en elektronneutrino kunne skifte type til en myonneutrino på sin vej fra Solen til Jorden [6]. Dette ville forklare, hvorfor der var underskud af neutrinoer, da myonneutrinoer ikke vekselvirker med elektroner og heller ikke skaber "omvendt radioaktivitet".

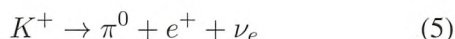
Den næste indikation på, at neutrinoer kan forvandle sig, kom fra analyse af neutrinoer fra Jordens atmosfære. I atmosfæren dannes  $K$ -mesoner og  $\pi$ -mesoner, når protoner og neutroner i atomkernerne rammes af kosmisk stråling. Disse mesoner er ustabile og henfalder til leptoner og neutrinoer. Eksempler på sådanne henfald er:



og



eller



Der findes en række tilsvarende henfald, som alle giver en eller flere neutrinoer i slutttilstanden.

Når man summerer de forskellige mesoner, der produceres i atmosfæren, og deres forskellige henfaldskanaler, kommer man til, at der vil dannes ca. dobbelt så mange myonneutrinoer som elektronneutrinoer. Da man i 1992 offentliggjorde de første nøjagtige målinger af dette forhold [7], var der helt andre resultater. Man fandt, at:

<sup>1</sup>Cherenkovlys udsendes af ladede partikler, der bevæger sig hurtigere end lyshastigheden i det aktuelle medium.

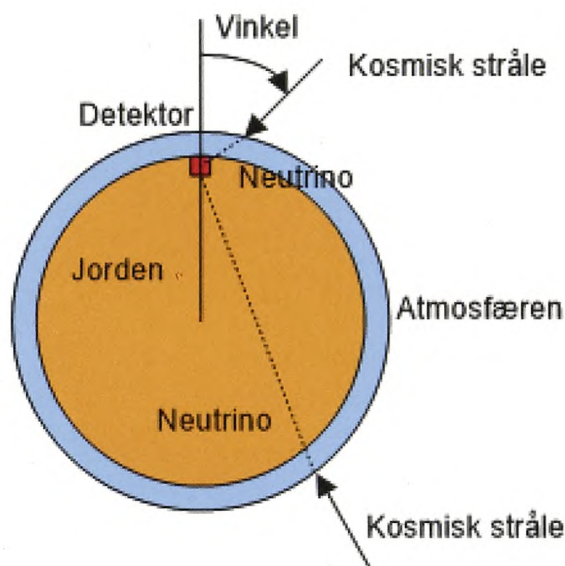
- Der måles ca. lige så mange elektronneutrinoer som myonneutrinoer i atmosfæren.

- Forholdet mellem elektronneutrinoer og myonneutrinoer er stærkt afhængigt af vinklen, hvormed den kosmiske stråling rammer atmosfæren.

- Sandsynligheden for at detektere en neutrino falder, desto længere den har bevæget sig, fra den blev skabt, til den rammer detektoren. Denne effekt er meget stærkere, end hvad neutrinoens sandsynlighed for absorption skulle tilsi.

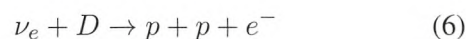
Alt dette tyder på, at der sker et eller andet med neutrinoer, når de bevæger sig, og at dette noget gør, at neutrinoen bliver sværere at detektere. Dette er konsistent med, at den ændrer type til én, der har meget mindre vekselvirkning med almindelige detektorer.

Årsagen til, at effekten afhænger af vinklen, er, at vejlængden fra neutrinoens skabelse til detektoren er afhængig af denne. Neutrinoer, som er skabt i atmosfæren lige over detektoren, vil have tilbagelagt en kort vejlængde (nogle få km). Det samme gælder neutrinoer fra kosmiske stråler i vinkler på mindre end  $90^\circ$  (fra lodret), mens større vinkler medfører, at neutrinoen har passeret gennem jordkloden (op til 13.000 km). På grund af vejlængden kan den nå at skifte type, se figur 6. Det skal lige nævnes, at den frie vejlængde for en atmosfærisk neutrino i Jordens indre er ca.  $10^{12}$  m, så effekten har intet med absorption af neutrinoer at gøre.



Figur 6. Detektion af neutrinoer i atmosfæren.

Det endelige bevis for neutrinooscillationer kom i 2002, da SNO-forskningssamarbejdet (Sudbury Neutrino Observatory) kunne rapportere direkte målinger af forholdet mellem strømmen af elektronneutrinoer og andre neutrinoer fra Solen [8]. De anvendte en detektor fyldt med 1000 tons tungt vand ( $D_2O$ ) begravet dybt i en gammel mine for at skærme mod kosmisk stråling. Deuterium er "blind" over for hvilken neutrino type, der anvendes. De reaktioner, man observerede, var ladet-strøm-reaktionen:

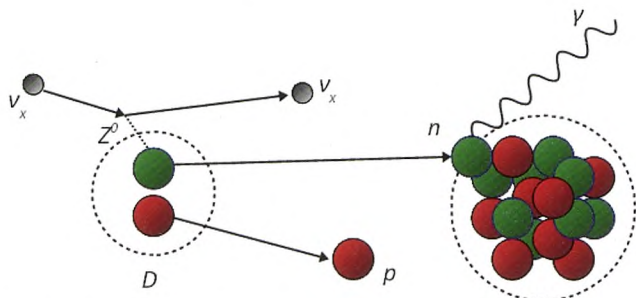


og neutral-strøm-reaktionen:

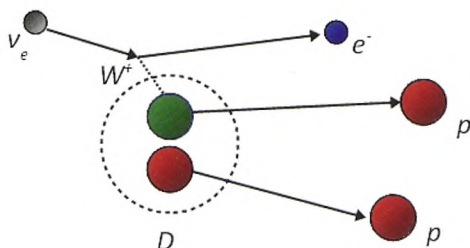
$$\nu_x + D \rightarrow p + p + \nu_x, \quad (7)$$

hvor  $x$  angiver neutrinentypen, som kan være elektron-, myon-  $\mu$  eller tau-  $\tau$ .

Her vekselvirker neutrinoen med en af nukleonerne ved at udveksle en neutral vektorboson ( $Z^0$ ), hvorved neutrinoen undslipper, eller ved at udveksle en ladet vektorboson ( $W^+$ ), hvorved neutrinoen bliver til en elektron. De to reaktioner er vist her på figur 7 og 8.



Figur 7. Neutral-strøm-reaktionen.



Figur 8. Ladet-strøm-reaktionen.

Reaktionen i figur 7 slår en neutron ud af deuteriumkernen, og denne vil udsende en foton (gammastråling), når den indfanges af en anden kerne i detektoren. Denne foton registreres i detektoren.

Reaktionen i figur 8 skaber en elektron, som bevæger sig hurtigere end lyshastigheden i vand og derfor udsender Cherenkovlys, som kan observeres af en detektor, og mængden af lys er et direkte mål for neutrinoens energi.

SNO-observatoriet kunne måle den totale strøm af neutrinoer fra Solen. Deres måling viste nøjagtigt det totale antal neutrinoer, som man teoretisk forventer. Men ved at sammenligne forholdet mellem de to reaktioner, kunne man måle forholdet mellem elektronneutrinoer og de to andre slags neutrinoer. Vi ved, at Solen kun udsender elektronneutrinoer. Men målingerne viste hinsides al tvivl, at:

- Kun ca. 34% af de detekterede neutrinoer er elektronneutrinoer (figur 8).
- Der ser ud til at være ca. 1/3 af hver slags neutrino.
- Neutrinoerne har forvandlet sig, så efter rejsen fra Solen er der lige mange af hver slags.

Konklusionen er derfor klar:

- Neutrinoer oscillerer mellem de tre typer.

Resultaterne fra SNO-forskningssamarbejdet er senere bekræftet af en række eksperimenter.

Takaaki Kajita fra Japan og Arthur B. McDonald fra Canada fik i 2015 Nobelprisen i fysik for opdagelsen af, at neutrinoerne skifter type.

## Neutrinoens masse

Ifølge standardmodellen har neutrinoen ingen hvile-masse. Som følge af det, bevæger den sig altid med lyshastigheden. Dette passer fint, hvis alle neutrinoer har samme helicitet. En partikel, der bevæger sig med lyshastigheden, kan nemlig ikke overhales af en observatør. Hvis den kunne overhales, kunne vi vælge et referencesystem, hvor den havde modsat helicitet, da hastigheden så ville skifte retning, mens spinnets retning ville beholdes. Dette ville medføre, at vi kunne forvente at finde både højrehåndede og venstrehåndede neutrinoer.

Opdagelsen af neutrinooscillationerne rokkede ved antagelsen om, at neutrinoen ikke har nogen masse. Lad os se lidt på, hvorfor dette er tilfældet.

Hvis neutrinoen oscillerer mellem tre typer, må den være i en form for superposition af tre tilstande, eller med andre ord, den "egentlige" neutrino er en blanding af en elektron-, en myon- og en tauneutrino-komponent. Sådanne tilstande er der masser af eksempler på i kvantemekanikken, for eksempel er en fri elektron en blanding af de to mulige spintilstande. Men, hvis alle tre komponenter er masseløse, vil de ikke oscillere, men der vil blot være 33% sandsynlighed for, at neutrinoen observeres i hver tilstand. Hvis derimod de tre komponenter har masse, og denne er en lille smule forskellig for hver type, vil de bevæge sig med en lille smule forskellig hastighed. Dette vil medføre, at faserne skifter i løbet af neutrinoernes flugt, og neutrinoerne vil ændre type i løbet af flugten.

I den almindeligt accepterede teori for neutrinomasser er de fysiske neutrinoer (dem, der vekselvirker i eksperimenter) en blanding af tre tilstande med forskellig masse. Disse tre tilstande svarer ikke til de tre neutrinoer, men er egentilstande for masse (analogt med, at der findes bestemte spintilstande, isospintilstande osv.). Når en neutrino skabes, er den i en tilstand af en bestemt type (elektron-, myon- eller taunetype). Når den bevæger sig, splittes den op i de tre massetilstande. Den relative fase af disse komponenter skifter i løbet af flugten, og neutrinoens type vil oscillere, ligesom frekvensen gør, når tre toner interfererer med hinanden. Når neutrinoen detekteres, er den ikke længere i en tilstand af entydig type, men en blanding, hvor sandsynligheden for hver af typerne afhænger af faserne på observationstidspunktet.

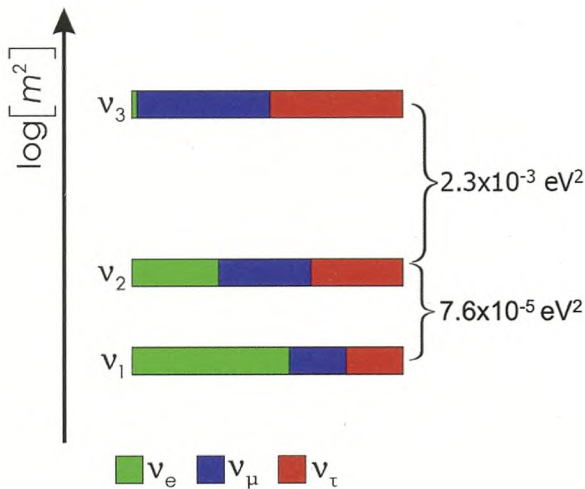
Frekvensen af oscillationerne vil være proportional med forskellen på massen imellem de tre tilstande. Observation af neutrinoer fra forskellige kilder (Solen, kosmisk stråling, accelerators, atomreaktorer) gør det muligt at bestemme forholdet mellem de tre masser. For eksempel er oscillationslængden i vakuum lig med nogle hundrede kilometer. De data, vi har i dag, giver følgende blandingsforhold mellem neutrinentyperne i de tre masseegentilstande kaldet  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  og  $\nu_3$ :

$$\nu_1 = \sqrt{\frac{3}{4}}\nu_e - \sqrt{\frac{1}{8}}(\nu_\mu - \nu_\tau), \quad (8)$$

$$\nu_2 = \sqrt{\frac{1}{4}}\nu_e + \sqrt{\frac{3}{8}}(\nu_\mu - \nu_\tau), \quad (9)$$

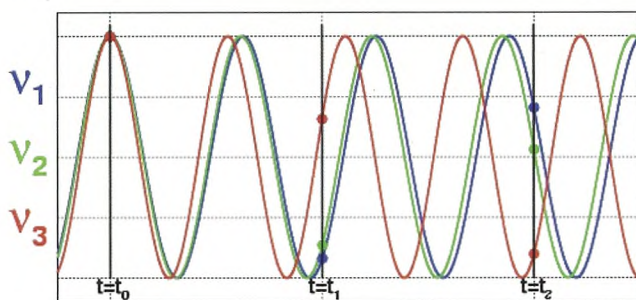
$$\nu_3 = \sqrt{\frac{1}{2}}(\nu_\mu + \nu_\tau). \quad (10)$$

Forholdet mellem masserne er illustreret i figur 9.



**Figur 9.** Illustration af blandingen af neutrino typer og massetilstande. De horisontale bjælker repræsenterer bidraget fra de tre neutrino typer i de tre massetilstande  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  og  $\nu_3$ . Den vertikale akse er logaritmen til kvadratet på massen.

De tilsvarende oscillationer er vist på figur 10. Ved  $t = t_0$  udsendes neutrinoen som en elektronneutrino med lige meget af hver massekomponent. Ved senere tidspunkter vil der være varierende blandingsforhold mellem de tre massekomponenter og følgelig tilsvarende variationer i fordelingen af sandsynligheden for at observere neutrinoen i henholdsvis elektron-, myon- og tauneutrino type-tilstanden.



**Figur 10.** Neutrinooscillationer.

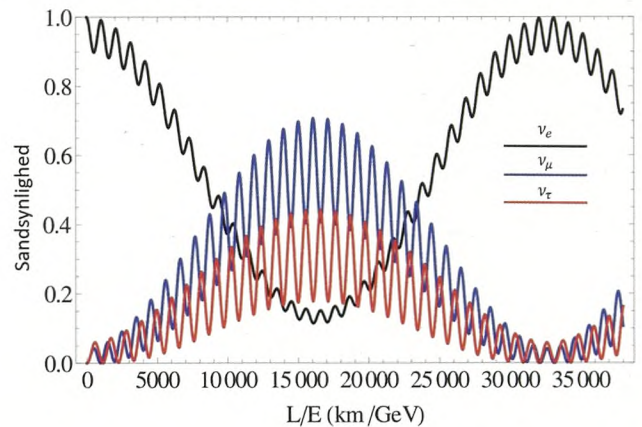
Vi kan bestemme forholdet mellem masserne ved at måle oscillationerne. Derimod er det meget sværere at måle den absolutte masse, da den er meget lille, og da neutrinoen ekstremt sjældent vekselvirker med andre partikler. Den bedste indikation får vi fra kosmologien, da en neutrinomasse vil skabe en tyngdekraft, som vil få universet til at kollapse, hvis den er for stor, da der findes et ekstremt højt antal neutrinoer. Den nuværende øvre grænse er, at summen af de tre masser er:

$$m_1 + m_2 + m_3 \leq 0,28 \text{ eV}^2 \quad (11)$$

svarende til ca.  $5 \times 10^{-37}$  kg.

Dette gør neutrinoen til suverænt den mindste, kendte masse i universet. Den næstmindste partikel, elektronen, er ca. 2 millioner gange tungere.

For at se, hvad disse oscillationer konkret betyder for neutrinoer fra Solen, kan vi betragte figur 11. Her ser vi oscillationerne for en elektronneutrino fra Solen over store afstande. På grund af dispersion vil oscillationerne udtværes over kosmologiske afstande, og vi vil observere ca. samme sandsynlighed for alle tre neutrino typer.



**Figur 11.** Sandsynligheden for, at en solneutrino observeres som en af de tre neutrino typer i forskellige afstande.

Inden emnet om neutrinoens masse slippes helt, skal der gøres opmærksom på, at standardmodellen her kommer fuldstændig til kort. Ifølge standardmodellen får partikler masse ved at vekselvirke med Higgs-feltet. Men neutrinoen (ligesom fotonen) vekselvirker slet ikke med Higgs-feltet (den kobler ikke til Higgs-bosonen i kvantefeltteorien) og har derfor ingen hvilemasse.

### Sterile neutrinoer

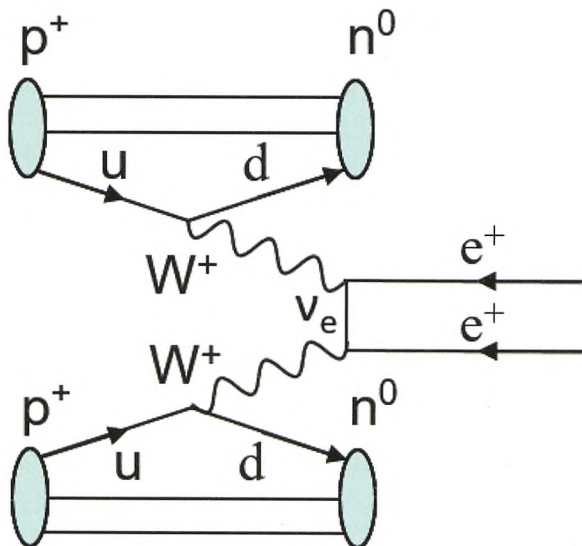
Vi har set, at alle neutrinoer er venstrehåndede, mens alle antineutrinoer er højrehåndede. Dette er i hvert fald den accepterede forklaring af observerbare neutrinoers helicitet. Men der findes en anden fortolkning af observationerne:

Måske eksisterer der også neutrinoer med "forkert" helicitet, men sådanne neutrinoer kan ikke deltage i den svage vekselvirkning ved at udsende og absorbere vektorbosoner. De kaldes derfor sterile neutrinoer. For at forklare, hvad der sker med sterile neutrinoer, må begrebet kiralitet introduceres. En partikels kiralitet angiver, hvorledes heliciteten opfører sig under en koordinatransformation. For masseløse partikler som fotonen er kiraliteten det samme som heliciteten, da den ikke kan overhales. Men hvis neutrinoer har masse, vil deres hastighed altid være lidt mindre end lyshastigheden, og vi kan vælge et referencesystem, hvor neutrinoen bevæger sig baglæns. Set fra dette koordinatsystem, vil neutrinoen se ud til at være venstrehåndet. Den har nu skiftet kiralitet. I modsætning til helicitet er kiralitet ikke bevaret for partikler med masse. Faktisk vil kiraliteten for en partikel i hvile oscillere mellem  $L$  (venstrehåndethed) og  $R$  (højrehåndethed) kontinuert. Kiraliteten er tæt forbundet med vekselvirkning med Higgs-feltet, som giver partikler masse.

Dette vil i så fald kunne være med til at forklare, hvorfor neutrinoer har masse. Standardmodellen forklarer, at partikler får masse ved at vekselvirke med Higgs-feltet ved at absorbere og udsende Higgs-bosoner. Når en partikel gør dette, skifter den kiralitet. Man er gået

ud fra, at siden neutrinoer ikke skifter kiralitet, så vekselvirker de ikke med Higgs-feltet. Men hvis der findes sterile neutrinoer, vil neutrinoens helicitet kunne oscillere, og den kan vekselvirke med Higgs-feltet.

Der findes en tilsvarende analogi med myonen. Myoner med  $R$ -kiralitet er sterile og kan ikke henfalde, da de ikke mærker den svage vekselvirkning. Hvis neutrinoen opfører sig på samme måde, vil vi ikke kunne observere neutrinoer med  $R$ -kiralitet.



Figur 12. Neutrinoløst dobbelt betahenfald.

### Majorana-neutrinoer

I 1937 foreslog den italienske fysiker Ettore Majorana, at der findes fermioner, som er deres egen antipartikel [9]. Majoranas udgangspunkt var en alternativ bølgligning for fermioner. I standardmodellen er fermioner løsninger af Dirac-ligningen, som beskriver partikler med halvtalligt spin og elektrisk ladning ved hjælp af komplekse firekomponents-bølgefunktioner, kaldet Dirac-spinorer. Majorana foreslog en alternativ bølgligning, hvor løsningerne er reelle funktioner. I en sådan teori er partikler og antipartikler identiske.

Majoranas bølgligning beskriver ikke elektroner eller kvarker, da de har antipartikler med modsat ladning. Men det er foreslået, at den kunne beskrive neutrinoerne, da de ikke har elektrisk ladning. Det ville så give en alternativ forklaring på neutrinoernes masse, da masse opfører sig anderledes for majorana-partikler. For eksempel er massen af partikler med  $L$ - og  $R$ -kiralitet totalt uafhængige. Vi kan derfor forestille os, at den ene masse er meget lille (som de observerede neutrinomasser), mens den anden er meget stor.

Hvis neutrinoerne er majorana-partikler, vil dette kunne observeres ved dobbelt betahenfald. Dette er en proces, hvor en tung kerne transformerer to protoner til neutroner eller vice versa. Kernen udsender to positroner (eller elektroner) og to neutrinoer. Men hvis neutrinoen er sin egen antipartikel, vil de to neutrinoer kunne annihilere, og der udsendes kun to positroner (figur 12).

Der pågår flere eksperimenter, som forsøger at opdage neutrinoløst dobbelt betahenfald. En påvisning af denne proces ville være et bevis på, at neutrinoerne er majorana-partikler.

### Litteratur

- [1] M. Goldhaber, L. Grodzins og A. W. Sunyar (1958) "Helicity of Neutrinos", *Physical Review*, bind **109**, side 1015–1017.
- [2] G. Danby, J.-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. B. Mistry, M. Schwartz og J. Steinberger (1962) "Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos", *Physical Review Letters*, bind **9**, side 36.
- [3] M. L. Perl m.fl. (1975) "Evidence for Anomalous Lepton Production in  $e^+ - e^-$  Annihilation", *Physical Review Letters*, bind **35**, side 1489.
- [4] K. Kodama m.fl. (2001) "Observation of tau neutrino interactions", *Physics Letters B*, bind **504**.
- [5] B. T. Cleveland m.fl. (1998) "Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector", *Astrophysical Journal*, bind **496**, side 505–526.
- [6] V. Gribov og B. Pontecorvo (1969) "Neutrino astronomy and lepton charge", *Physics Letters B*, bind **28**, side 493–496.
- [7] R. Becker-Szendy m.fl. (1992) "Electron- and muon-neutrino content of the atmospheric flux", *Phys. Rev. D*, bind **46**, side 3720–3724.
- [8] R. Ahmad m. fl. (2002) "Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory", *Phys. Rev. Lett.*, bind **89**, side 011301.
- [9] E. Majorana (1937) "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone", *Il Nuovo Cimento*, bind **14**, side 171.



Bernhard Lind Schistad er cand.real. fra Universitetet i Oslo. Han har været forsker i partikelfysik ved Niels Bohr Institutet og CERN og senere arbejdet med udvikling af grafiske systemer og radar. Han har i de sidste fem år undervist i fysik og matematik på Viborg Tekniske Gymnasium.

# Jagten på et Ørsted-relief

Af Finn Lindberg

Kvants december 2018-nummer bragte et billede af et relief, som viser H. C. Ørsted udføre sit banebrydende 1820-forsøg, der afslørede en sammenhæng imellem elektricitet og magnetisme, og samtidig fortæller, at han grundlagde Den Polytekniske Læreanstalt i 1829. Her gennemgås et arbejde med henblik på at afdække dette reliefs historie.<sup>1</sup>

Kvant bragte i december 2018-nummeret artiklen "Historien om elektromagnetismen" af Laila Zwisler, Teknologihistorie, DTU [1]. I artiklen var vist et billede af et relief over H. C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen i 1820 med en bemærkning om, at pladen var blevet sat op i Nørregade. Min første tanke om denne placering var, at der formodentlig mere specifikt var tale om Telefonhuset med adressen Nørregade 21, København, hvor først KTAS og siden TDC havde haft til huse. På adressen lå nemlig i 1820 den bygning under Københavns Universitet (KU), hvori Ørsted udførte sit berømte eksperiment. Et opslag i DTU's database, hvorfra billedet stammer, bekræftede denne antagelse. Denne database viser ikke, hvornår relieffet er fra, men det fremgår af dets tekst i venstre side, at Ørsted grundlagde DTU i 1829. Jeg formodede derfor, at det var fremstillet i 1929 i 100-året for denne begivenhed.

Jeg arbejdede med mobiltelefoni i TDC i godt 22 år, og jeg kom derfor jævnligt i Telefonhuset, men kunne ikke huske nogensinde at have set det pågældende relief. Kontakt til tidligere kollegaer førte til det samme resultat. Ingen af dem havde set det, endsige hørt om det!

Som fysiker og matematiker er jeg jo ikke historiker, men jeg tog mod til mig og besluttede at begynde en udredning af relieffets historie. Det lød jo nemt nok, men jeg anede ikke, hvad jeg havde givet mig i kast med, og jeg havde slet ingen fornemmelse af hvor mange kilder og mennesker, jeg blev nødt til at involvere for at gennemføre beslutningen. For at advare læseren, så vil jeg straks sige, at jeg kun delvist fik opfyldt beslutningens mål.

## Ét relief bliver til tre

Det Kgl. Bibliotek (KB) har en meget stor billedsamling, som er tilgængelig via internettet, og det viste sig hurtigt, at denne indeholder to billeder af Ørsted-relieffer fra 1929 – ét med engelsk tekst [2] og ét med tysk tekst [3]. Men ejendommeligt nok ikke et billede af det med dansk tekst. Selve billedfelterne på de tre er identiske, men indramningerne af disse er forskellige og med forskellige sprog. Som jeg senere fandt ud af, så indeholder alle tre den samme signatur. Det fremgår af bagsiden af det tyske billede, at dimensionerne er 84 cm × 96 cm og endvidere, at dette er skænket som en gave fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) til Deutsches Museum (DM) i München i 1931. Det fremgår også, at kunstneren er billedhuggeren Anders

Jensen Bundgaard (1864–1937), hvis mest kendte arbejde er Gefionspringvandet i København. Dette er naturligvis i overensstemmelse med den viste signatur.



Figur 1. Signaturen på Ørsted-reliefferne.

På dette stadium i undersøgelsen vidste jeg altså, at Bundgaard havde fremstillet tre relieffer med fælles billedfelt. I hvilken rækkefølge Bundgaard havde ladet de tre varianter støbe, det vidste jeg ikke, men jeg formodede naturligvis, at den danske variant var den først fremstillede. Jeg vidste heller ikke, om de fortsat eksisterede.

## Hvad aviser og blade viste og ikke viste

Det er i dag muligt på KB at få digital adgang med søgemulighed til gamle udgaver af de fleste af dagbladene i Mediestream [4]. Dette gør, at hvis en begivenhed, der har offentlighedens interesse, påstås at have fundet sted, og den ikke kan findes omtalt via Mediestream, så er der en høj sandsynlighed for, at påstanden er fejlagtig. Dagbladet Politiken kan dog ikke nås via Mediestream, men dette blev afhjulpet på anden vis. Min bror og jeg foretog en omfattende avissøgning, som sammen med det, jeg allerede vidste, afslørede en mængde ting om de tre relieffer, bl.a. at de er støbt i bronze og alle har samme dimensioner.

I november 1929 bringer mange danske aviser en artikel om, at en DTU-alumne, nemlig dansk-amerikaneren og ingeniør Niels Christian Orved tidligt på sommeren dette år har bestilt et relief hos Bundgaard med engelsk tekst til opstilling i Detroit, og at dette nu er klar til at blive afskibet over Atlanten. Ifølge oplysninger givet af en anden dansk-amerikaner, Max Henius, skulle initiativet være taget af Henry Ford, som ville benytte det i forbindelse med en markering af 50-året for Thomas Edisons opfindelse af glødelampen [5]. I april 1930 meddeler aviserne, at relieffet nu er bragt til

<sup>1</sup>I artiklen benyttes DTU som fælles betegnelse for Den Polytekniske Læreanstalt (1829–1933), Danmarks Tekniske Højskole (1933–1994) og Den Polytekniske Læreanstalt Danmarks Tekniske Universitet (1994–).

Amerika, hvor det vil blive opstillet i et særligt Ørsted-hjørne på et industrimuseum, som senere viser sig at være Museum of Science and Industry i Chicago (MSI) [6].

I august 1931 bringer et par aviser artikler om et Ørsted-relief med tysk tekst, der af SNU gives som gave til DM, men der anføres ikke noget om årsagen til dette [7].



Figur 2. DTU's Ørsted-relief.

Nogle få aviser bringer artikler om åbningen af Den frie Udstilling lørdag den 5. marts 1932, og det meddeles lakonisk, at billedhugger Bundgaard sammen med andre værker udstiller: "Et Relief i Bronze, udført til Teknisk Læreanstalt, viser H. C. Ørsted, demonstrerende sin store Opdagelse" [8]. Det er værd at lægge mærke til, at dette indikerer, at relieffet på det pågældende tidspunkt næppe har haft nogen permanent opsætning nogetsteds.

Denne meget sparsomme information er alt, hvad aviserne skriver om relieffet med dansk tekst. Den store fest, der afholdes i Forum den 30. august 1929 i anledning af DTU's 100-årsjubilæum, omtales flittigt i aviserne, men artiklerne nævner ikke noget om et Ørsted-relief fremstillet til lejligheden. Heller ikke fejringen af KTAS' 50-årsjubilæum i 1931 giver anledning til avisartikler, der siger noget om et Ørsted-relief sat op ved fx Telefonhuset.

End ikke fagbladet Ingeniøren og tilsvarende blade, som på forbilledlig vis er blevet gjort tilgængelige på internettet, nævner det danske relief [9].

I det hele taget synes dette relief at leve en tilværelse i det skjulte. Denne ejendommelige omstændighed vil vise sig at være et gennemgående træk ved undersøgelsesarbejdet.

### Billedhugger Bundgaards arkiv i KB's Håndskriftssamling

Et arkiv "Anders Bundgaard: Efterladte papirer" indeholdende 39 æsker findes i KB's Håndskriftssamling, og udvalgte dele heraf blev gennemgået [10].

Under arkivemnet *Notesbøger og regnskabsbøger* (æske 28–29) ligger en Notesbog, forfattet af A. J. Bundgaards søn dr.phil. J. A. Bundgaard. I denne står

under marts 1931: "Ørsted Relieffet til München", og videre under april 1931: "Ørsted Relieffet til München støbt" samt "Ogsaa eet her til Lærestalten".

Den sidste indførsel er kryptisk. Betyder den, at Bundgaard får støbt to Ørsted-relieffer i april 1931, eller stod der allerede ét, nemlig det danske, i hans atelier i forvejen? Set ud fra sammenhængen, og hvad jeg i øvrigt finder ud af, så kan den anden mulighed udelukkes.

Under februar 1933 er indført: "Ørsted Relieffet ude paa Øregaard Gymnasium".

Se dét er interessant, da det kun kan betyde, at det danske relief har fået et længere ophold i Bundgaards hus på Svanemøllevej 11 i Hellerup. Dette stemmer også med, at Bundgaard tager relieffet med på Den frie Udstilling i marts 1932.

Det er ikke lykkedes mig at finde ud af med hvilket formål, relieffet sendes ud på Øregård Gymnasium.

### SNU's arkiv i Niels Bohr Arkivet

SNU's ganske omfattende arkiv befinder sig i Niels Bohr Arkivet, og det er glimrende registreret [11]. En undersøgelse af dette giver nogle interessante oplysninger i en kasse-dagbog i pakke 28, idet der under H. C. Ørsteds 100-Års Fond, der blev administreret af SNU's direktion, er noteret følgende udgifter:

4. maj 1931 O. Haugsted Transp. af Relief 40,50

3. sept. 1931 Billedhugger Bundgaard 1200,-

Sammenholdt med oplysningerne i Bundgaards arkiv, så er udgiften på 40,50 kr. uden tvivl gået til transporten til München. A/S Ove Haugsted er på daværende tidspunkt et kendt speditørfirma i København. Udgiften på 1200 kr. er honoraret til Bundgaard, måske kun for det tyske relief eller måske for både det tyske og det danske relief.



Figur 3. Deutsches Museums Ørsted-relief.

### Kontakt til modtagerinstitutionerne

DTU ved i dag ikke, hvornår det danske relief blev leveret, og ej heller hvad dets formål og omkostning var. Laila Zwisler oplyser, at i DTU's årsberetninger, som er meget udførlige, er der intet spor af det, bortset fra, at relieffet indgår i en liste over Ørsted-effekter fra 1951.

Dette får mig til at undersøge DTU-journalregistret B220 i [12], og her finder jeg under den 18/5 1931 nr. 667 følgende indførsel:

“Bundgaard, A. J., Billedhugger sender Tilbud paa Fremstilling af Relief med Tekst over dPLs Udvidelse paa Sølvgr.’s Kasserne.” (Der er uden tvivl tale om den udvidelse, der skal blive til Østervoldkomplekset.) I DTU-journalsager B-457 under nr. 667 ligger imidlertid et håndskrevet brev fra DTU til Billedhugger A. J. Bundgaard og underskrevet af R. Jespersen, inspektør. Brevet er en instruks til Bundgaard om, hvilken tekst, der skal stå på relieffet, og denne svarer i et og alt til det, der rent faktisk kom til at stå. Det er ikke på nogen måde angivet, om brevet er en kopi, og det skal tilføjes, at det ikke har været muligt at identificere dette brev i Bundgaards efterladte papirer.

Journalregistre fra 1924 til 1963 er blevet gennemgået under B for Bundgaard, og der er ikke fundet yderligere om hverken Anders Bundgaard eller hans søn.



Figur 4. Museum of Science and Industrys Ørsted-relief.

Diskrepansen imellem det, der står de to steder, ser mærkelig ud, men i det mindste kan jeg nu slå fast, at Bundgaard fremstiller det engelske relief i 1929, det tyske i 1931 og det danske senere i 1931 eller først i 1932.

En almindelig søgning på internettet afslører, at det danske relief i en periode omkring 2012 har været hængt op hos DTU Fotonik [13], og både Laila Zwisler, DTU, og Dorte Olesen, SNU, meddeler i slutningen af marts 2019, at de begge har set relieffet på et møde om den snarlige fejring af 200-årsjubilæet for Ørsteds opdagelse. Det var hentet op fra et kælderrum. Jeg får det forevist af Birgitte Lydik, DTU, i midten af juni, og jeg kan bekræfte, at det eksisterer i bedste velgående.

MSI i Chicago er den institution, der på min forespørgsel giver det hurtigste og mest præcise svar, idet museet oplyser, at det er i besiddelse af det engelske relief. Relieffet blev doneret af Niels C. Ortved, præsident for Detroit Motorbus Company, og overrakt til museet den 20. maj 1931. Relieffet blev sat op i museets udstillingsområde i det mindste frem til 1939, og det blev derefter sat på lageret, hvor det stadigvæk står.

Museet har ingen viden om, at Henry Ford skulle være involveret, men museet vurderede på modtagelsestidspunktet relieffets værdi til 500 \$, hvilket svarer til ca. 1870 kr.

At Ford alligevel skulle have haft en finger med i spillet, kan naturligvis ikke afvises, idet Ford Motor Company altid har ligget i Detroit, og Ortved og Ford uden tvivl har kendt hinanden personligt.

Sammenlignes H. C. Ørsteds 100-Års Fonds betaling til Bundgaard med værdien af den engelske original, så er det klart, at der er tale om en god rabat, som bliver endog klækkelig, hvis betalingen er for to relieffer.

DM i München oplyser tilsvarende, at museet er i besiddelse af det tyske relief, og at dette står på museets lager. Dette var en lettelse, idet jeg frygtede, at det var gået til grunde under de 71 luftbombardementer, som USAAF og RAF gennemførte over München under 2. verdenskrig, og hvor ca. 80% af museet blev ødelagt. DM kan ikke oplyse om en speciel grund til SNU's donation af relieffet, men fortæller, at det kun var ét blandt 45 objekter givet som gave til museet af SNU i årene 1906 til 1931. Mange af disse blev formidlet af radiopioneren Valdemar Poulsen, som sad i SNU's direktion. De mange gaver hang sammen med, at DM ved sin oprettelse i 1903 udsendte en ønskeseddel til relevante institutioner. Mærkeligt nok omtaler M. C. Harding ikke SNU's generøsitet i sin bog fra 1924, som udgives i anledning af selskabets 100-årsjubilæum [14], selvom han må have kendt til denne, idet han var selskabets sekretær og kasserer fra 1908.

### Kontakt til en billedhugger

På et relativt tidligt tidspunkt i forløbet kontaktede jeg formanden for Dansk Billedhuggersamfund, Henning Elving, og sendte ham de tre billeder, som er gengivet på figurerne 2–4.

Henning Elving, som ikke havde set nogle af reliefferne, men kun deres billeder, svarede tilbage, at det engelske relief var af den fineste kvalitet, mens de to øvrige måtte karakteriseres som kopier og af ringere kvalitet. Alle undersøgelserne beskrevet ovenfor taget i betragtning, skulle jeg måske have taget hans tilbagesvar mere alvorligt, men på den anden side var det jo rart at få hans vurdering bekræftet via disse undersøgelser.

### Afslutning

Selvom de historiske forløb for de tre relieffer må siges at være afklarede, så er der stadigvæk dunkle punkter omkring det danske. Dette har tydeligvis været tildelt en rolle på DTU's Østervoldkompleks, men fik det her en mere permanent placering eller blev det, som det er tilfældet i dag, gemt væk for kun at blive taget frem ved særlige lejligheder?

Skulle nogle af Kvants læsere være i stand til at besvare dette spørgsmål ved at have set det i eller ved Østervoldkomplekset eller andetsteds, så hører jeg meget gerne om det. En gipskopi af det danske relief kan beses på Bundgaards Museum i Thingbæk Kalkminer nær Rebild [15].

## Litteratur

- [1] L. Zwisler (2018) "Historien om elektromagnetismen", *Kvant*, bind 30, nr. 4, side 3.
- [2] [www.kb.dk/images/billed/2010/okt/billeder/object51681/da/](http://www.kb.dk/images/billed/2010/okt/billeder/object51681/da/)
- [3] [www.kb.dk/images/billed/2010/okt/billeder/object51679/da/](http://www.kb.dk/images/billed/2010/okt/billeder/object51679/da/)
- [4] [www2.statsbiblioteket.dk/mediestream/avis](http://www2.statsbiblioteket.dk/mediestream/avis)
- [5] Se side 8 i Socialdemokraten den 9. november 1929.
- [6] Se side 2 i Jydske Tidende den 22. april 1930.
- [7] Se side 3 i Politiken den 14. august 1931.
- [8] Se side 3 i Frederiksborg Amts Avis den 6. marts 1932.
- [9] [ing.dk/danmarkshistorie/browse](http://ing.dk/danmarkshistorie/browse)
- [10] [www.kb.dk/da/](http://www.kb.dk/da/). Findes via REX.
- [11] [nbafiles.nbi.dk/open/SNU-reg.pdf](http://nbafiles.nbi.dk/open/SNU-reg.pdf)
- [12] [www.sa.dk/daisy/daisy\\_forside](http://www.sa.dk/daisy/daisy_forside)
- [13] [www.fotonik.dtu.dk/nyheder/Nyhed?id={49403BB5-52A4-46F8-ADBF-23C814EE21D2}](http://www.fotonik.dtu.dk/nyheder/Nyhed?id={49403BB5-52A4-46F8-ADBF-23C814EE21D2})
- [14] M. C. Harding, "Selskabet for Naturlærens Udbredelse, H.C. Ørstedes Virksomhed i Selskabet og dettes Historie gennem Hundrede Aar"; København 1924; Bekostet af Carlsbergfondet og i kommission hos Jul. Gjellerups Forlag.
- [15] L. Rigborg, "Og dagen rinder, et opdateret portræt af billedhuggeren Anders Bundgaard"; Rebildcentrets Forlag 2016.

For gennemførslen af ovenstående undersøgelse rettes en speciel tak til Felicity Pors, Niels Bohr Arkivet, for hendes hjælp med SNU's arkiv, samt til min bror Svend-Erik Lindberg for hans hjælp med RA og Bundgaard Arkivet i KB og gode idéer i øvrigt. Endvidere vil jeg takke Dorte Olesen, SNU; Christian Joas, Niels Bohr Arkivet; Laila Zwisler og Birgitte Lydik, DTU; Benny Dam og Peter Aarby, KTAS; Henning Elving, Dansk Billedhugger Samfund; Lars Rigborg, Bundgaards Museum i Thingbæk Kalkminer; Tracey Ann Pavitt, Roskilde Bibliotek; Steve Rosengard, MSI Chicago, samt Daniela Schneevoigt, DM München.



Finn Lindberg er kandidat i fysik med matematik som bifag 1970 fra KU. Gymnasielærer 1970–1986. TDC 1986–2008: Projektleder på etableringerne af GSM og UMTS. Systemchef. Kandidatgrad matematik 2011 fra KU. Hovedinteresse: Generel relativitetsteori. E-mail: [lindberg.finn@gmail.com](mailto:lindberg.finn@gmail.com).

## Nyt fra Dansk Fysisk Selskab



Figur 1. Postersession under DFS-årsmødet 2019.

### Årsmøde 2020

Dansk Fysisk Selskabs Årsmøde afholdes i 2020 på dagene 8.–9. juni. Medlemmer og andre interesserede opfordres til allerede nu at sætte kryds i kalenderen! Der vil desuden være et "Nordic Meeting in Physics" den 19.–21. august i Uppsala i anledning af Det Svenske Fysiske Selskabs 100-årsjubileum.

**PFEIFFER**  **VACUUM**

## Vacuum pumper



**To-trins olielamelpumper**  
**Promotionpris fra DKK 8.000**

Tlf. 3166 8708  
[Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk](mailto:Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk)  
[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

# Gnidning, arbejde og varme

## – breddeopgave 81 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, INM, RUC.

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave (nr. 81 i rækken her i KVANT):

### Breddeopgave 81. Gnidning, arbejde og varme

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

#### Løsning

Vi kalder positionen af postsækken  $x$  og positionen af kælken  $y$ , begge målt fra det sted postsæk og kælk var, da postsækken til en start landede på ladet. Gnidningskraften imellem postsæk og kælk under deres relative bevægelse er  $\mu mg$ , hvis vi kalder gnidningskoefficienten  $\mu$ , postsækkens masse  $m$  og tyngdefeltstyrken for  $g$ .

Bevægelsesligningen for postsækkens bevægelse i forhold til isen er da:

$$m\ddot{x} = -\mu mg, \quad (1)$$

idet gnidningskraften fra slæden på postsækken er rettet modsat postsækkens bevægelse. Med  $v_0$  for postsækkens fart før den lander på slæden, fås heraf:

$$\dot{x} = v_0 - \mu gt, \quad (2)$$

og

$$x = v_0 t - \frac{1}{2} \mu gt^2. \quad (3)$$

Bevægelsesligningen for slædens bevægelse i forhold til isen er, med  $M$  for slædens masse:

$$M\ddot{y} = \mu mg, \quad (4)$$

idet gnidningskraften fra postsækken på slæden er rettet i samme retning som slædens bevægelse. Idet slæden starter med at være i hvile i forhold til isen, fås heraf:

$$\dot{y} = \mu gtm/M, \quad (5)$$

og

$$y = \frac{1}{2} \mu gt^2 m/M. \quad (6)$$

Postsækken ligger stille i forhold til slæden, når den har mistet fart og slæden vundet fart, så de to hastigheder i forhold til isen er ens.

Ifølge ligningerne (2) og (5) er tidspunktet  $t_s$ , hvor det sker, givet ved  $v_0 - \mu gt_s = (m/M)\mu gt_s$  eller  $t_s = (v_0/\mu g)M/(M + m)$ . Svaret på opgaven fås herefter ved at indsætte denne værdi af  $t$  i ligning (6), med resultatet:

$$y(t_s) = \frac{mMv_0^2}{2\mu g(M + m)^2}. \quad (7)$$

Så langt flytter slæden sig, før postsækken ligger stille på slæden.

Vi kan tilsvarende finde, hvor langt postsækken bevæger sig i forhold til isen, medens den bremses op på slæden, ved at indsætte værdien af  $t_s$  i ligning (3), med resultatet:

$$x(t_s) = \frac{(M + 2m)Mv_0^2}{2\mu g(M + m)^2}. \quad (8)$$

Ved at trække udtrykket for  $y(t_s)$  i ligning (7) fra udtrykket for  $x(t_s)$  i ligning (8) kan vi finde, hvor langt postsækken glider henad slædens lad, før den ligger stille på slæden:

$$x(t_s) - y(t_s) = \frac{Mv_0^2}{2\mu g(M + m)}. \quad (9)$$

Ved at lade  $m/M \rightarrow 0$  i ligningerne (7) og (8) fås:

$$y(t_s) \rightarrow 0 \quad \text{og} \quad \mu mgx(t_s) \rightarrow \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (10)$$

for  $M/m \rightarrow \infty$ .

Når slæden er meget tungere end postsækken, bevæger postsækken således ikke slæden. Samtidig ses det, at bremselængden for postsækken i denne grænse direkte kan findes ved at sætte størrelsen af gnidningskraftens negative arbejde på postsækken lig med sækkens tab af kinetisk energi.

#### Kommentar

Spørger vi om, hvor meget varme, der er udviklet under opbremsningen, lader det sig besvare ud fra impuls- og energibevarelse for det isolerede system postsæk plus slæde. For hastigheden af tyngdepunktet af systemet, som også er sluthastigheden af postsæk og slæde, når de

til sidst følges ad,  $v_{\text{cm}}$ , gælder ifølge impulsbevarelsen:  $mv_0 = (m + M)v_{\text{cm}}$ , så vi har

$$v_{\text{cm}} = \frac{mv_0}{M + m} \quad (11)$$

Ifølge energibevarelsen for det isolerede system postsæk plus slæde har vi da for varmeudviklingen  $Q$ :

$$Q = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}(M + m)v_{\text{cm}}^2 = \frac{Mmv_0^2}{2(M + m)} \quad (12)$$

Dette resultat kan også opnås ved at betragte gnidningskræfternes arbejde under opbremsningen.

Arbejdet udført af gnidningskraften på postsækken er negativt, da kraft og vej er modsatrettede. Det svarer til, at postsækken taber kinetisk energi. Ifølge mekanikkens arbejde-kinetisk energi-teorem har vi:

$$\mu mgx(t_s) = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2}mv_{\text{cm}}^2 = \frac{Mm(M + 2m)v_0^2}{2(M + m)^2} \quad (13)$$

Ved at anvende arbejde-kinetisk energi-teoremet finder vi det samme resultat for  $x(t_s)$  som i ligning (8) mere umiddelbart end ved løsningen af bevægelsesligningerne. Tilsvarende fås det positive arbejde udført af gnidningskraften på slæden, ifølge arbejde-kinetisk energi-teoremet, og indsættelse af ligning (11), til at være:

$$\mu mgy(t_s) = \frac{1}{2}Mv_{\text{cm}}^2 = \frac{Mm^2v_0^2}{2(M + m)^2}, \quad (14)$$

som umiddelbart giver svaret på opgaven i overensstemmelse med ligning (7).

Det er hurtigere at løse opgaven ved brug af mekanikkens arbejde-kinetisk energi-teorem end ved løsningen af bevægelsesligningerne som først gjort ovenfor. At det kan lade sig gøre, skyldes, at arbejde-kinetisk energi-teoremet, uanset om der er tale om konservative kræfter eller fx gnidningskræfter, er matematisk ækvivalent med Newtons anden lov for bevægelsen af et tyngdepunkt. At det er hurtigere, skyldes bl.a., at der allerede er foretaget en integration ved udledningen af arbejde-kinetisk energi-teoremet fra Newtons anden lov.

Ved at sammenholde ligningerne (12), (13) og (14), kan vi finde:

$$Q + \mu mgy(t_s) - \mu mgx(t_s) = 0. \quad (15)$$

Her står, at summen af den udviklede varme ved opbremsningen og gnidningskræfternes resulterende arbejde er nul. Er det en udgave af termodynamikkens første hovedsætning?

Nej! Ligning (15) udsiger ganske vist formelt set, at summen af den udviklede varme og gnidningskræfternes arbejde er nul for det isolerede system postsæk plus slæde. Men ligning (15) er ikke et udtryk for energibevarelse som overordnet princip. Den fremkommer

via de kinetiske energier, som både optræder i arbejde-kinetisk energi-teoremet i ligningerne (13) og (14) og i den egentlige energibevarelse i ligning (12).

Begrebet "arbejde" bruges forskelligt i forbindelse med arbejde-kinetisk energi-teoremet og i forbindelse med termodynamikkens første hovedsætning. I mekanikken kan vi udtale os om arbejdet udført på postsæk og slæde hver for sig. Det første er negativt. Det andet er positivt. Men der er ikke tale om varmetilførsel til postsækken og varmeafgivelse fra slæden. Koblingen af arbejde og varme kan kun gøres for det samlede, isolerede system postsæk plus slæde.

For det samlede system gælder der termodynamisk set, at dets energi er bevaret, da der ikke bliver udført arbejde på det udefra og heller ikke bliver tilført varme udefra. Systemets energi består af den, på grund af impulsbevarelsen, konstante tyngdepunktsenergi  $\frac{1}{2}(m + M)v_{\text{cm}}^2$  plus en, derfor også, konstant indre energi. Til en start er systemet i termodynamisk uligevægt med indre energi – energien i tyngdepunktsystemet – i form af makroskopisk kinetisk energi. Gnidningskræfterne bringer herefter systemet i ligevægt ved at omdanne den indre kinetiske energi til termisk energi.

Det er ikke kun begrebet "arbejde", der sædvanligvis benyttes forskelligt i termodynamik og mekanik. Begrebet "varme" er i den termodynamiske tradition udtryk for energitransport ud og ind af et system. I mere daglig tale bruger vi ordet om fx den termiske energi udviklet på grund af gnidning.

Måden hvorpå ligning (15) blev udledt via de kinetiske energier gør, at den ikke kun gælder for tidspunktet  $t_s$ , men for ethvert tidspunkt  $t$  fra 0 til  $t_s$ . Differentieres ligningen, med  $t_s$  udskiftet med  $t$ , fås:

$$\dot{Q} = \mu mg(\dot{x} - \dot{y}) \quad (16)$$

For studerende, som endnu ikke er blevet forvirrede af den forskellige brug af begreberne arbejde og varme i mekanik og termodynamik, er denne ligning formentlig umiddelbart forståelig: tempoet, hvormed der udvikles gnidningsvarme mellem postsæk og kælke, er givet ved gnidningskraften imellem dem gange deres relative hastighed. Hvad andet kan tænkes?

## Breddeopgave 82. Fugle

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen januar 2018, nr. 82 i rækken her i KVANT):

*Lad os antage, at alle fugle, der er i stand til i vindstille at holde sig svævende over samme punkt af landskabet ved at baske med vingerne, kun varierer i størrelse: Deres form og måden, de bevæger vingerne på, antages at være ens. Hvordan afhænger frekvensen de basker med da af deres størrelse? Begrund svaret.*

Løsning og kommentar bringes i næste nummer af KVANT.

# Fysik, foredrag og kartoffelmadder i Köln

Af Emil Vyff Jørgensen, Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Syddansk Universitet



**Figur 1.** Deltagerne i den XXXIV. Internationale Konference for Fysikstuderende i Köln. Foto: Stefano Ugliano.

Det er sommer i Danmark, men 13 danske fysikstuderende har begivet sig mod Köln for at deltage i ICPS 2019, den Internationale Konference for Fysikstuderende. Med over 400 deltagere fra mere end halvtreds lande er ICPS et af de største tilbud for fysikstuderende verden over. Konferencen kombinerer prominente foredragsholdere med de studerendes egne bidrag, mens de internationale forbindelser styrkes af både sociale og faglige events.

ICPS er organiseret af IAPS, det Internationale Forbund af Fysikstuderende. Foreningen eksisterer med det formål, at fysikstuderende verden over kan skabe relationer og dele deres viden. Foruden ICPS står IAPS også for flere andre arrangementer, som fysikkonkurrencen PLANCKS (Physics League Across Numerous Countries for Kick-ass Students), som i år blev afholdt i Odense.

Jeg ankom til konferencen med en gruppe af mine kammerater fra Odense. Det var lørdag formiddag, og registreringen var endnu ikke startet, så vi begav os ud for at opleve byen og finde noget frokost. Da vi kom tilbage, var køen lang, og vi fandt resten af de danske deltagere fra København. Efter en vellykket registrering, indlogering og aftenmad, tog vi til konferencen på Kölns Universitet. Her blev der afholdt velkomstceremoni, som bl.a. bød på et foredrag ved Thomas Klinger fra Max Planck Institutet for Plasmafysik i Greifswald om projektet Wendelstein 7-X, som er verdens største stellarator – en type fusionsreaktor.

Til den efterfølgende reception blev bred interaktion motiveret af en omgang menneskeligt bingo, hvor man skulle finde folk med forskellige videnskabelige og sociale bedrifter.

Den næste morgen startede dagen med oplæg fra deltagerne. I parallelle sessioner fremlagde studerende deres arbejde, om alt fra forsimplede, magnetdrevne tog til substrukturerne af galaksehober. Som en del af konferencen havde man mulighed for at stemme på de bedste oplæg, som blev præmierede. Efterfølgende var der foredrag ved Nobelprismodtager Klaus von Klitzing, som fortalte både om sin opdagelse af kvante-Hall-effekten og om den nye definition af SI-enhederne, der blev accepteret i maj. Nu er de fysiske konstanter endelig konstante.

Bagefter blev vi ledt til Kölns historiske rådhus, hvor byens borgmester bød os velkommen. Hen på eftermiddagen var der arrangeret byløb, så konferencen blev splittet op i hold og spredt ud over Köln, hvor vi fik mulighed for at lære om byens historiske bygninger og kulturelle baggrund. Om aftenen var der arrangeret to aktiviteter: En danseworkshop for de festglade og en konstruktionsaften for dem, der mente, at de havde evnerne til at bygge det næste vidunder. Med begrænsede materialer (papir, kork, lim og lidt snor) skulle vi designe den mest holdbare bro eller båd. Bådene blev testet med marmorkugler, og broerne blev vægttestet på midten.

Mandag var udflugtsdag. Nogle af deltagerne var

inviteret indenfor på en af Fords fabrikker, mens andre skulle besøge byens observatorium. Jeg tog med en gruppe til Fraunhofer Institut for Lasertechnologi, hvor de arbejder med anvendelse og udvikling af laser-systemer i alt fra kvanteoptik til celledsortering. Min gruppe var efterfølgende på egen hånd i Aachen, hvor vi benyttede muligheden for at se det nærliggende “tre-grænsepunkt” mellem Holland, Belgien og Tyskland. Om aftenen var der kostumefest for at fejre Kölns tradition for karneval.

Tirsdag startede med endnu en runde studenteroplæg, hvor de studerende har 15 minutter til at præsentere deres projekter. Danmark bidrog med to studenteroplæg (fra Mikkel Eriksen og Philip Sørensen) samt to posters (fra Mogens From og Philip Sørensen). Herefter var der foredrag ved Claus Kiefer fra Universitetet i Köln om de mange facetter ved kvantetyngdekraft og efterfølgende workshops i bl.a. videnskabelig skrivning og stresshåndtering for akademikere, inden konferencens første plakatsession blev skudt i gang.



**Figur 2.** Overrækkelse af priser fra konferencens posterkonkurrence, hvor Philip Sørensen fra Syddansk Universitet vandt 2. pladsen (efter en delt førsteplads) for hans poster med titlen “BBN Constraints on Universally Coupled Ultralight Dark Matter” Foto: Jannis Schaeper.

Sideløbende med det hele afholdtes IAPS’s årlige generalforsamling, hvor hver medlemsforening sender en repræsentant. Medlemsforeninger kan være enten landsdækkende eller kun repræsentere enkelte byer. I Danmark har vi to IAPS-foreninger: København og Odense. Repræsentanterne står for beslutninger om nye medlemmer, foreningens udvikling og for mange måske det vigtigste: Hvem der får lov at afholde de næste års events. Beslutningerne bliver taget med to års varsel, så lokationerne for 2020 var allerede afgjort. PLANCKS 2020 skal være i London, mens ICPS 2020 i Puebla, Mexico, bliver den første ICPS uden for Europa siden 1986. Afgørelsen for 2021 falder dog mere lokalt, for mens PLANCKS 2021 bliver i Portugal, har en dansk delegation vundet ICPS 2021 til København!

Onsdag fortsatte med flere studenteroplæg samt et foredrag ved Marc Timme om, hvorfor det er vigtigt ikke bare at reagere på klimaforandringer, men også at gøre det hurtigt, samt hvordan ikke-lineær dynamik spiller ind overalt. Det kan bl.a. skabe udfordringer for fremtidens energinet, når flere små energikilder kræver

mere komplicerede netværk, som kan skabe uforudsigelig dynamik. Dagens højdepunkt var laboratorierundvisninger. Universitet i Köln har flere spændende afdelinger; min personlige favorit er deres kerneafdeling, hvor vi blandt andet så en tandemaccelerator. Efter rundvisningerne var der sport og dans på plænerne omkring universitet, så deltagerne kunne komme lidt udenfor.

I løbet af sportsaktiviteterne begyndte folk fra de forskellige lande at finde deres landsmænd og trække hvert til sit. Der var nemlig lagt op til en national aften, hvor alle lande kunne præsentere lokal mad og drikke, så folk skulle have de sidste forberedelser på plads. Fra Danmark blev der serveret kartoffelmadder og Gammel Dansk. En klassisk gammeldags æblekage havde også været på vej, men efter adskillige køkkenuheld lod vi som om, at det aldrig havde været planen. Den danske stand er til ICPS også berømt for vores mange flag, da vi typisk dækker op som var det en børnefødselsdag.

Torsdag morgen var for de mere festglade en meget hård tid. Efter den nationale aften skulle vi nemlig på udflugt til Bonn. Idéen var, at alle skulle på én videnskabelig og én kulturel tur. I et hastigt øjeblik, hvor jeg missede en alarm, kom jeg dog med den forkerte bus, hvorfor jeg i stedet fik lov at opleve to videnskabelige rundture. Først et besøg på CAESAR-forskningsinstituttet, som arbejder med neuroteknologi. Her så vi bl.a. et elektronmikroskop, som arbejder med 91 simultane stråler. Efter frokost så jeg partikelacceleratoren ELSA, hvor de har flere eksperimenter, der konverterer accelererede elektroner til fotoner, som så bruges til at observere baryoners substruktur. Eftermiddagen bød også på foredrag ved Gisela Anton, som fortalte om IceCube Neutrino-observatoriet på Antarktis, som har observeret kosmiske neutrinoer fra hinsides solsystemet. Da aftenen kom, og sulten begyndte at melde sig, stod den hverken på restaurant i Bonn eller hjemtransport til Köln. I stede blev vi guidet til Rhinen, hvor tre skibe ventede på os. Så mens vi mageligt flød ned ad floden, kunne vi nyde vores aftenmad til søs og lade Bonn glide væk i horisonten.



**Figur 3.** Ekskursion til verdens 2. største bevægelige radioteleskop ved MPI Effelsberg. En blandt de elleve mulige ekskursioner, som deltagerne kunne vælge imellem.

Fredag stod vi op til konferencens sidste dag. Den

blev indledt med sidste runde af studenteroplæg og et efterfølgende foredrag om det ydre rum og de anvendelser, det kan bibringe os. Foredraget blev holdt af Johann-Dietrich Wörner, som er generaldirektør for ESA, Det Europæiske Rumagentur. Efter en sidste plakatsession var der spænding om stemmerne for de bedste postere, men før vinderne blev afsløret, var der workshops om foreningsdrift: PR, fondsøgning, og hvordan man starter en lokal forening for fysikstuderende. Bagefter fik vi konferencens sidste foredrag ved Petra Rudolf, der handlede om nogle af verdens mindste maskiner: molekylære motorer.

Efter foredraget blev der afholdt afskedsceremoni. Resultaterne af alle ugens events og konkurrencer blev annonceret. Og her fik vi en dansker på podiet: Philip Sørensen vandt andenpladsen i plakatkonkurrencen for sit arbejde med ultralet mørkt stof. Tillykke, Philip! Efter konferencen var der aftensmad og afskedsfest.

For mange var den sidste morgen travl. Der var fly, der skulle nås, og værelser, der skulle rømmes. Men da vi, en flok trætte fysikere fra Odense, kravlede ombord på toget, vidste vi, at der heldigvis ville være en konference igen næste år.



Emil Vyff Jørgensen er kandidatstuderende i fysik med tilvalg i matematik på Syddansk Universitet. Han har deltaget i ICPS fire gange og været til PLANCKS tre gange, senest i Odense, hvor han selv var arrangør. Hans interesser i fysikken hælder til kvanteoptik og topologiske systemer.

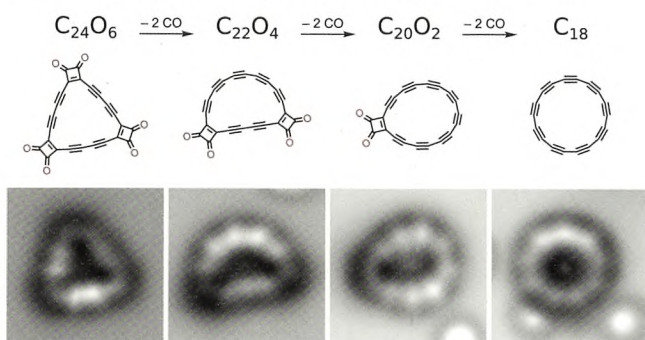
## Kvant-nyheder

Af Christine Pepke Gunnarsson, Kvant

### Ringformet kulstofmolekyle

**KEMI.** Forskere fra Oxford University og IBM Research har for første gang dannet et ringformet kulstofmolekyle, cyclokulstof  $C_{18}$ .

Kulstof er et af de hyppigst forekommende grundstoffer og forekommer bl.a. i diamanter, hvor hvert kulstofatom er bundet til fire andre kulstofatomer i en tetraederstruktur. I grafit er hvert kulstofatom bundet til tre andre kulstofatomer i samme plan. Teoretisk er det blevet foreslået, at der kunne eksistere kulstofmolekyler, hvor hvert kulstofatom kun er bundet til to andre kulstofatomer. Ringformede kulstofmolekyler har længe været interessante for forskerne. En ring bestående af 18 kulstofatomer er teoretisk set den mindste ring, som er stabil. Forskerne har især været interesserede i, hvorvidt kulstofatomerne i  $C_{18}$ -ringen binder sig til hinanden med dobbeltbindinger eller skiftevis med enkelt- og triplbindinger, da begge dele er muligt.



**Figur 1.** Fremstilling af cyclokulstof  $C_{18}$  ved gradvis fjernelse af CO-grupper fra molekylet  $C_{26}O_6$ . Nederst ses AFM billeder af processen. Figur fra kilde.

Forskerne dannede cyclokulstof  $C_{18}$  ved først at

danne molekylet  $C_{26}O_6$  på overfladen af et kobber substrat dækket med NaCl (salt), for at undgå, at kulstofatomerne ville binde sig til overfladen. De trekantede  $C_{26}O_6$ -molekyler blev studeret med et atomart kraftmikroskop (også kaldet atomic force microscope, AFM) ved en temperatur på 5 K. Ved at tilføje spændingspulser med høj spændingsforskel over deres AFM, kunne de gradvist fjerne CO-grupper (hjørnerne af trekanten) fra molekylerne, således at de endte med en ring,  $C_{18}$ . Forskerne sammenlignede AFM-billederne af  $C_{18}$  med simulationer af, hvordan henholdsvis dobbeltbindinger og skiftevis enkelt- og triplbindinger i  $C_{18}$  ville se ud, og fandt, at bindingerne i  $C_{18}$  var skiftevis enkelt- og triplbindinger. Forskerne fortæller, at metoden til at danne  $C_{18}$  med AFM også kan bruges til at syntetisere andre kulstofmolekyler.

Kilde: K. Kaiser m.fl. (2019) "An sp-hybridized molecular carbon allotrope, cyclo[18]carbon", *Science*, eaay1914.

### Sort hul sluger neutronstjerne

**ASTROFYSIK.** For første gang har forskere observeret et sort hul sluge en neutronstjerne. Det er de tre tyngdebølgeobservatorier, LIGO (et i Washington og et i Louisiana, USA) og VIRGO (i Italien), der har målt tyngdebølger (krusninger i rumtiden) fra en hændelse, der skete for 900 millioner år siden.

Sorte huller og neutronstjerner dannes af resterne af døde stjerner efter supernovaeksplosioner. En stjerne fusionerer hydrogen til helium, og når den løber tør for hydrogen, begynder den at fusionere helium til kulstof. Når stjernens helium er brugt op, kan den, hvis den har en masse større end Solens, fusionere kulstof til tungere grundstoffer som bl.a. oxygen, magnesium og jern. Når stjernens kerne er fusioneret til jern, kan den ikke fusio-

nere længere (uden at få tilføjet energi), og stjernen kolliderer under sin egen tyngdekraft. Jernkernen varmes op og bliver så kompakt, at elektroner og protoner kolliderer og bliver til neutroner (og neutrinoer). Stjernens ydre lag kolliderer og falder ind mod neutronkernen, som varmes endnu mere op og til sidst eksploderer i en supernova, der som bekendt sender stof og energi ud i rummet til ny stjernedannelse. Resterne af stjernen kan blive til et sort hul eller en neutronstjerne, afhængig af stjernens masse før supernovaeksplosionen.



**Figur 2.** En kunstners fortolkning af et sort hul der skal til at sluge en neutronstjerne. Figur fra kilde.

Lige efter målingen af tyngdebølgerne den 14. august skannede Australian National University SkyMapper Telescope rummet, hvor hændelsen kom fra. Det var et område på ca. 7 gange Månens størrelse, men teleskopet kunne ikke finde noget elektromagnetisk stråling fra begivenheden. Der er altså ingen visuelle billeder af hændelsen, hvilket kan skyldes, at det sorte hul har slugt neutronstjernen i en mundfuld uden at efterlade noget stråling. Forskerne analyserer stadig data for at bekræfte størrelsen af de to objekter, men kunne lige efter hændelsen sige, at det lille objekt havde en masse mindre end 3 Sol-masser. Der er derfor størst sandsynlighed for, at det sorte hul har slugt en neutronstjerne, og da forskerne aldrig har detekteret et sort hul mindre end 5 Sol-masser eller en neutronstjerne større end 2,5 Sol-masser, er de meget sikre på, at det er tilfældet. Der er dog en lille sandsynlighed for, at det var et sort hul, der slugte et lille, let sort hul, men det ville i så fald have været et sort hul, der er meget lettere end alle andre sorte huller, vi kender, hvilket i sig selv også ville være en interessant observation.

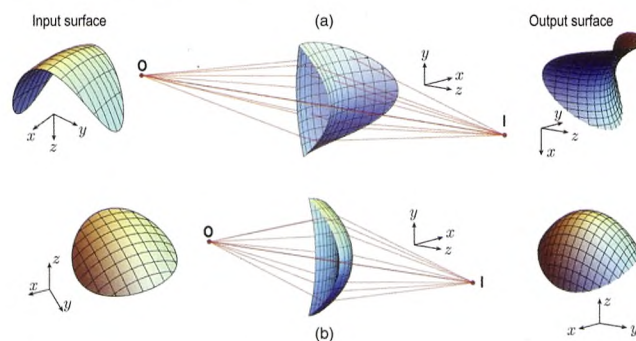
Kilde: [www.phys.org](http://www.phys.org), <https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/25333.gcn3>

## Fysikere løser 2000 år gammelt problem

**OPTIK.** For over 2000 år siden fandt den græske matematiker Diokles et problem med de linser, han arbejdede med. I en perfekt linse vil alle lysstråler fokuseres i samme punkt, fokuspunktet, lige meget hvor på linsen, de rammer. Diokles' linser var sfæriske, så lys, der rammer linsen på et andet sted end i linsens centrum, bliver afbøjet og fokuseret i et andet punkt end i linsens

fokuspunkt. Kun lysstråler, der rammer linsens centrum, bliver fokuseret i linsens fokuspunkt. Diokles opdagede, at afhængigt af hvor på linsen og med hvilken vinkel, lysstrålerne ramte, blev de alle fokuseret i forskellige punkter. Billedet blev derfor mere uskarpt i linsens kanter i forhold til i linsens centrum. Dette kaldes for sfærisk aberration, da det kun forekommer i sfæriske linser. Asfæriske linser med form som en ellipse eller hyperbel er ideelle linser, da de ikke har problemet med sfærisk aberration, men asfæriske linser er meget dyre at producere. Både Newton og Leibniz forsøgte at løse problemet med sfærisk aberration, men uden held.

I 1949 blev problemet beskrevet af matematikeren Gerhard D. Wassermann og fysikeren Emil Wolf (sidstnævnte er nok mest kendt for bogen "Principle of Optics", som han skrev sammen med Max Born). Problemet blev derfor sidenhen kendt som Wassermann-Wolf-problemet, og de foreslog, at en løsning kunne være at bruge to asfæriske overflader ved siden af hinanden efter den sfæriske linse for at korrigere for lysets brydning i linsen. Dette forbedrede billedet og er sidenhen blevet brugt i mange forskellige anvendelser fx i kameraer og i teleskoper. Men det er en dyr og ofte utilstrækkelig løsning.



**Figur 3.** Linser med konvex (a) og konkav (b) input-overflade. Formlen udregner den optimale output-overflade, som eliminerer sfærisk aberration, der opstår som følge af linsens input-overflade. Bemærk, at kun et stykke af linsen er vist, og at linsen er vist som værende hul for at illustrere lysstrålernes vej gennem den. Figur fra kilde.

Nu har mexicanske fysikere løst problemet analytisk med en lang matematisk formel, som beskriver præcist, hvordan formen af en efterfølgende asfærisk overflade skal være for at korrigere for sfærisk aberration i en given sfærisk linse. Løsningen er uafhængig af materiale, størrelse og anvendelse af linsen og bruger som input kun den sfæriske linses form og objekt-billed afstand. Formlen eliminerer sfærisk aberration og er blevet testet i simulationer, som viser, at den kan producere linser, der er 99,999999999% præcise. Forskerne fortæller, at formelen vil kunne bruges til at producere knivskarpe linser af høj kvalitet til bl.a. teleskoper, mikroskoper, kameraer og – måske mere relevant for nogle af Kvants læsere – briller og kontaklinser.

Kilde: R. G. González-Acuña, H. A. Chaparro-Romo og J. C. Gutiérrez-Vega (2019) "General formula to design a freeform singlet free of spherical aberration and astigmatism", *Appl. Opt.*, bind 58, side 1010–1015.

# Kommende foredrag

| Dato             | Tid   | Foredragstitel                                                                                                                    | Foredragsholder        | Forening        |
|------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|
| <b>Sep 2019</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 16/9             | 19.30 | Socialt intelligente robotter<br>I tilknytning til foredraget uddeles Ørsted-medaljen i sølv                                      | Thomas Bolander        | SNU             |
| 23/9             | 19.15 | Månens dannelse (på engelsk)                                                                                                      | Sanna Alwmark          | AS (Kbh)        |
| 30/9             | 19.15 | Månens dannelse (på engelsk)                                                                                                      | Sanna Alwmark          | AS (Aarh)       |
| <b>Okt 2019</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 7/10             | 15-17 | Rundvisning på udstillingen "Rundt om Månen"<br>Kun for medlemmer af SNU (se nedenfor)                                            | Christina Toldbo       | SNU / Rundetårn |
| 14/10            | 19.15 | Andre måner i solsystemet (tentativ dato)                                                                                         | Morten Bo Madsen       | AS (Kbh)        |
| 21/10            | 19.15 | Andre måner i solsystemet                                                                                                         | Morten Bo Madsen       | AS (Aarh)       |
| 28/10            | 19.30 | Molekyler og deres spejlbillede – og dit spejlbillede                                                                             | Karl Anker Jørgensen   | SNU             |
| <b>Nov 2019</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 11/11            | 19.15 | Månens betydning for Jorden                                                                                                       | Ib Lundgaard Rasmussen | AS (Kbh)        |
| 18/11            | 19.15 | Månens betydning for Jorden                                                                                                       | Ib Lundgaard Rasmussen | AS (Aarh)       |
| 18/11            | 19.30 | Første mand på Månen – 50 år efter                                                                                                | Michael Linden-Vørnle  | SNU             |
| 25/11            | 19.15 | Exomåner                                                                                                                          | Simon Albrecht         | AS (Kbh)        |
| <b>Dec 2019</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 2/12             | 19.15 | Exomåner                                                                                                                          | Simon Albrecht         | AS (Aarh)       |
| 9/12             | 19.30 | H. C. Ørsted: forskning, almindendannelse og æstetik<br>Efter foredraget uddeles Ørstedmedaljen til en inspirerende gymnasielærer | Dan Charly Christensen | SNU             |
| <b>Jan 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 27/1             | 19.30 | H. C. Ørsted-introduktion                                                                                                         | Helge Kragh            | SNU             |
| <b>Feb 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 17/2             | 19.30 | SWARM-satellitter, der måler Jordens magnetfelt                                                                                   | Nils Olsen             | SNU             |
| <b>Mar 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 9/3              | 19.30 | Ørsteds rejsebreve                                                                                                                | Andrew Jackson         | SNU             |
| 30/3             | 19.30 | Ørsted og farmacihistorien                                                                                                        | Poul Kruse             | SNU             |
| <b>Apr 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 20/4             | 19.30 | De 2000 ord, som Ørsted indførte i det danske sprog                                                                               | Frans Gregersen        | SNU             |
| <b>Juni 2020</b> |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 8-9/6            |       | Dansk Fysisk Selskabs Årsmøde                                                                                                     |                        | DFS             |
| <b>Sep 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 21/9             | 19.30 | Hvad er magnetisme, og hvad er elektromagnetisme                                                                                  | Steen H. Hansen        | SNU             |
| <b>Okt 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 19/10            | 19.30 | Foredrag ved guldmedaljemodtager i fysik (tentativt)<br>Alternativt "Ørsted og lyset"                                             | NN<br>Anja C. Andersen | SNU<br>SNU      |
| <b>Nov 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 2/11             | 19.30 | Om magnetometer                                                                                                                   | Chris Finlay           | SNU             |
| 23/11            | 19.30 | Ørsteds erkendelsesteori og metafysiske erindringer                                                                               | Anja Skaar Jacobsen    | SNU             |
| <b>Dec 2020</b>  |       |                                                                                                                                   |                        |                 |
| 14/12            | 19.30 | Ørsted, Tesla og Faraday                                                                                                          | Hans Buhl              | SNU             |

**AS (Kbh):** Astron. Selskab (Kbh), Aud. 1, H. C. Ørsted Instituttet, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (astronomisk.dk).

**AS (Aarh):** Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Institut, AU, Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, 8000 Aarhus C.

Astronomisk Selskab har også arrangementer i Kosmosklubben (astronomi for børn mellem 4 og 12 år), se kosmosklubben.dk, samt i Astronomisk Ungdom (astronomi for unge mellem 12 og 18 år), se astronomisk-ungdom.dk.

**Wieth-Knudsen Observatoriet**, Margot Nyholms Vej 1, 3220 Tisvildeleje, har åbent hus-arrangementer med gratis adgang to lørdage om måneden, se astronomisk.dk/wieth-knudsen-observatoriet.

**DFS:** dfs.nbi.dk

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

**SNU / Rundetårn:** Bemærk, at rundvisningen foregår i Rundetårn, mødested Købmagergade 52A, København. Arrangementet er kun for medlemmer af SNU, og tilmelding skal ske til [snu@naturlæren.dk](mailto:snu@naturlæren.dk).

# Aktuelle bøger

Af John Rosendal Nielsen og Jens Olaf Pepke Pedersen



## På udflugt i matematisk fysik

Jesper Møller Grimstrup, "Shell Beach", 2019, Montagne, 260 sider, 249 kr.

Er der en teori for alting? Kan man finde denne teori? Hvilken påvirkning vil fundet af en teori for alting have på samfundet? Dette er nogle af de spørgsmål, som Jesper Møller Grimstrup stiller og giver sine bud på i bogen "Shell Beach". Den engelske titel har sin reference fra en film fra 1998 – Dark City – hvor hovedpersonen leder en kystby, Shell Beach, som skal forløse hovedpersonens problemer og drømme. Filmen er ifølge Grimstrup et billede på den naturvidenskabelige søgen efter en endelig teori, hvilket man får forklaret cirka halvvejs igennem bogen.

Forskeres søgen efter en teori for alting har en længere historie. Forenede teorier som eksempelvis Newtons love, der har givet en fælles beskrivelse af tyngdekraftens påvirkning af legemer på Jorden såvel som i rummet, er blevet opstillet, og disse teorier, der forbinder tilsyneladende uafhængige fysiske fænomener, har givet os en tro på, at der findes en teori for alting – Theory of Everything. Grimstrup advokerer også for en sådan teori, der kan forbinde de to kernekrafter og den elektromagnetiske kraft med tyngdekraften. Han har sammen med matematikeren Johannes Aastrup udviklet en mulig teori for alting. Deres forslag kalder de for kvanteholonomi-teori, og jeg vil allerede nu sige, at dette ikke er en anmeldelse af deres teori. Jeg mener således ikke, at bogen giver et tilstrækkeligt indblik i deres teori til, at jeg kan sige noget fornuftigt herom.

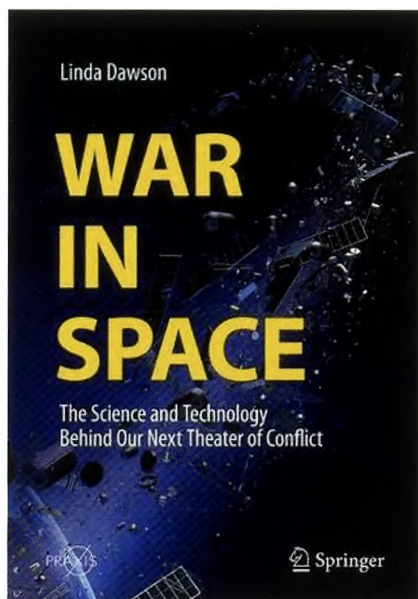
Grimstrup giver i bogen en kort introduktion til både Einsteins relativitetsteori og kvantefeltteorien, og det kan godt lyde noget ambitiøst. Og det er det også. Der er for meget *name-dropping*. Begreber som *topologisk rum* og *metrisk felt* (omtales kun på side 66) bliver introduceret, men jeg tvivler på, at læsere uden en baggrund i fysik vil få ret meget ud af hans korte

forklaringer af begreberne. Men bogen er ikke alene en bog om fysik; det er også Grimstrups personlige bog om deres (Grimstrup og Aastrups) kamp for at overbevise resten af forskningsverden om deres teoris fortræffeligheder. Som der står på omslaget af bogen: "En bog af en banebrydende teoretisk fysiker om hans rejse gennem den akademiske verden, hans kamp for sine egne idéer og en ny metode til at gennemføre forskning i matematisk fysik."

Grimstrup tager os ikke bare med på en rejse ind i den akademiske verden – det er også en rejse rundt omkring i den virkelige verden. Han bringer os med til Tibet, Island, Østrig og mange andre lande, og det er ikke kun af den grund, at vi skal høre om hans akademiske jobs og de mange konferencer, som han har deltaget i. Vi skal ligeledes med på Grimstrups vandreture og kajakture. Det er her, at vi får Grimstrups personlige udviklingshistorie, og den samt kampen for deres teori fylder meget i bogen. Jeg kan ikke lade være med at sammenligne Grimstrups egen metafor for en fysikers arbejde med selve bogens indhold. I Kafkas roman "Slottet" skal hovedpersonen – landmåleren K – komme frem til et slot for at udføre noget arbejde, men så snart K ankommer til landsbyen ved slottet, befinder han sig i en uendelig labyrinth af veje, forhindringer og trivialiteter, som forhindrer ham i at komme frem til sit mål. Det nærmeste, K kommer, er et telefonopkald til slottet, hvor han ikke kan høre andet end støj. K's vej til slottet er, ifølge Grimstrup, en metafor for fysikerens forskning, men den kan også ses som et billede på Grimstrups egen bog, hvor man har svært ved at nå frem til selve fysikken. Der er simpelthen for meget støj i "Shell Beach" i form af fortællinger om personlige rejser og afholdelse af foredrag. Jeg ved ikke, hvad jeg skal bruge Grimstrups beskrivelse af sin tilskadekomst ved et spring fra en klippe ned i Malawisøen og senere redningsaktion til, eller hvad stiller jeg op med en oplysning om, at han er meget nervøs før sine foredrag?

Grimstrups karakteristik af forskningsmiljøet er desværre meget korrekt. Han beskriver de forskellige forskningsmiljøer som stammesamfund, hvor der ikke er megen plads til afvigere som Grimstrup og Aastrup. Det har betydet, at Grimstrup har måttet lave en Crowdfunding-kampagne for at få støtte til sin forskning. De mennesker, som har støttet Grimstrup økonomisk, skulle have noget for pengene, hvilket bogen så er et resultat af. Derfor er bogens sprog også lettilgængeligt med undtagelse af de fysiske begreber, hvor han taler hen over læseren. Flere gange er Grimstrup godt klar over sværhedsgraden af fysikken, og han beder læseren om at springe en side eller to over. Det er bare ikke godt nok. En forfatter skal føre sine læsere igennem hele bogen uden at springe dele af teksten over.

JRN



## Star wars?

Linda Dawson, "War in Space: The Science and Technology Behind Our Next Theater of Conflict", 2018, Springer Praxis Books, 216 sider, 31,24 euro (bog) og 20,22 euro (e-bog).

Den 19. februar underskrev præsident Donald Trump et direktiv, der beordrer Pentagon til at etablere en særlig "rumstyrke", der skal fungere som USA's væbnede styrkers sjette gren sammen med hæren, flåden, luftvåbnet, marinekorpsen og kystbevogtningen.

Det er kun Kongressen, som kan oprette et nyt værn, og indtil videre har Trumps idé om et rumkorps ikke mødt større opbakning hverken i Kongressen eller i Forsvarsministeriet, hvor i hvert fald Trumps tidligere forsvarsminister, James Mattis, var modstander af nye organisatoriske og administrative byrder for Pentagon (Mattis trådte tilbage i slutningen af 2018 efter uenigheder med Trump om tilbagetrækningen fra Syrien). I sidste måned afsatte Kongressen dog en mindre bevilling til at undersøge, hvordan man kan øge USA's rumforsvar, men understregede samtidig, at pengene ikke må bruges til at oprette et egentligt rumkorps.

Desværre er krigshandlinger i rummet ikke utænkelige, og det er derfor meget aktuelt, at Springerforlaget nu udgiver en lille bog, der undersøger emnet. Uden at røbe for meget, kan det godt afsløres, at scenarierne ikke har meget med scenerne fra filmen Star Wars at gøre.

Satellitesystemer til kommunikation, positionering og overvågning er blevet en helt vital del af et moderne samfunds infrastruktur, og det er efterhånden svært at se, hvordan samfundet skal kunne fungere uden alle disse systemer.

I det indledende kapitel forsøger forfatteren alligevel at forestille sig, hvad der ville ske, hvis denne infrastruktur blev ødelagt, og hvordan vi ville reagere, hvis

vi stod over for et totalt blackout af satellitkommunikation og -navigation.

Herefter er der kapitler om militære rumaktiviteter, rumskrot, rumhistorie og -politik samt missilforsvar.

Rumskrot kan fx få stor betydning, hvis satellitter bliver ødelagt, og tusindvis af fragmenter kommer i kredsløb om Jorden og rammer andre satellitter. Der er også en diskussion af, hvordan de store nationer ville reagere, hvis deres satellitter blev angrebet, og hvilke teknologier de kan udnytte til at indlede en krig i det ydre rum. Heldigvis har bogen også optimistiske vurderinger af de teknologier, der kan forhindre ødelæggelsen af vitale satellitsystemer.

Der er mange interessante detaljer, men også lange afsnit, som er mindre relevante for emnet, fx en lang gennemgang af NASAs historie og mulighederne for minedrift i rummet. Generelt savner jeg en dybere analyse af emnerne, og indtrykket af en noget overfladisk tilgang til emnet bestyrkes af, at mange af kilderne er nyhedsartikler, hvor indholdet gengives uden særlig perspektivering.

Det er også lidt underligt, at forslaget om et særligt rumkorps slet ikke behandles. Selvom forslaget er blevet aktualiseret af Trump, har spørgsmålet tidligere været fremme i Kongressen. Et rumkorps kan tænkes både at forbedre rumsikkerheden eller destabilisere den, afhængigt af korpsets aktiviteter og reaktionerne fra især Kina og Rusland, men der er ingen analyse af fordele og ulemper ved et rumkorps, og hvordan det ville påvirke sikkerheden i rummet eller blot en gennemgang af debatten.

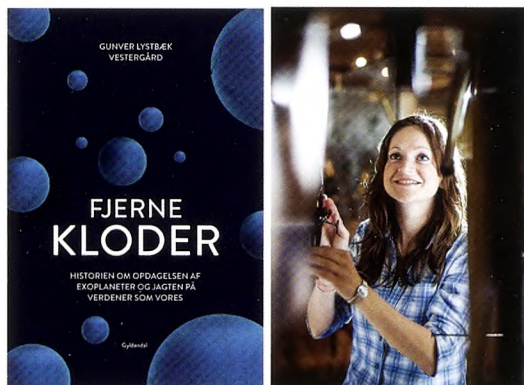
Forfatteren Linda Dawson har en kandidatgrad i astronautik fra George Washington University på NASA Langley Research Center, og hun har arbejdet ved "Mission Control Center Ascent" og "Entry Flight Control Teams" under de første missioner med det amerikanske rumfærgeprogram.

I betragtning af forfatterens baggrund, kan man også undre sig over flere fejl i bogen. Det var således ikke Sovjetunionen, der foretog den første sammenkobling i rummet, men USA i 1966 med Gemini-8 og Neil Armstrong ombord (Sovjet foretog en ubemandet sammenkobling mellem Cosmos 186 and Cosmos 188 i 1967). Det var heller ikke Sovjetunionen, men USA, der sendte den første kommercielle satellit i kredsløb, og det amerikanske Explorer-program var ikke et svar på Sputnik, men allerede under udvikling, da Sputnik-1 blev sendt op, og forresten var Explorer-1 ikke den første satellit med et instrument (det var Sputnik-2).

Der er klart et behov for en bog, der undersøger, hvordan en konflikt i rummet kan manifestere sig. Desværre bliver min anbefaling af bogen, som det fremgår af det ovenstående, noget forbeholden, og medmindre man har et aktuelt behov, vil jeg faktisk foreslå at vente, til der kommer et alternativ eller måske en ny udgave.

JOPP

# Jagten på fjerne kloder



*Gunver Lystbæk Vestergård (billedet t.h.), "Fjerne kloder – Historien om opdagelsen af exoplaneter og jagten på verdener som vores", 2019, Gyldendal, 293 sider, 300 kr.*

Opdagelsen af exoplaneter hører til et af de moderne videnskabelige gennembrud. Det er mindre end 25 år siden, at den første exoplanet blev opdaget, og i dag kender vi over 4.000. Flere af exoplaneterne har vist sig at være meget eksotiske, og derfor har opdagelsen ændret og udvidet vores forståelse af planeter og deres dannelse.

Kvants læsere vil være bekendte med exoplaneternes opdagelse og udforskning fra en række artikler, bl.a. af Lars Buchhave og Hans Kjeldsen, og det er glædeligt, at der nu også er udkommet en populærfaglig bog om emnet. Med en baggrund som videnskabsjournalist og en ph.d.-grad i videnskabshistorie har forfatteren samtidig gode forudsætninger for at skrive om emnet, og resultatet er heldigvis en fornøjelse at læse.

Vestergårds begejstring for videnskabs-historie fornægter sig ikke, og derfor følger vi exoplaneternes historie tilbage fra grundlæggerne af atomismen i det antikke Grækenland i 400-tallet f.Kr. Her skrev allerede Leukippos, Demokrit og Epikur om muligheden for at finde andre verdener, både med flere sole og måner eller helt uden nogle af delene. Denne debat fik Aristoteles dog lagt effektivt låg på i næsten 2.000 år, da han fastslog, at der ikke kunne være mere end én verden, og den stod urokkeligt fast med Jorden i centrum.

Med Kopernikus og Bruno begyndte der dog at komme sprækker i det aristoteliske verdensbillede, og selvom Brunos spekulationer om exoplaneter med et myldrende liv fik en brat afslutning på bålet som kætter, udråber Vestergård ham som exoplaneternes fader. Herefter følger vi udviklingen via den "italienske storcharmør og astronom" Galilei og en lang række andre pionerer i udforskningen, hvoraf flere med urette er gået i glemme-

bogen.

Det gælder således den danske astronom Kaj Aage Strand (1907-2000), der læste astronomi på Københavns Universitet i 1920'erne. Han blev dog forhindret i at få en karriere i Danmark på grund af, at Elis Strömngren, der var leder af universitetets observatorium, ville sikre sig, at hans søn, Bengt Strömngren, ikke fik konkurrence som efterfølger til faderens professorat. Det lykkedes i øvrigt, og Strand endte i stedet i USA. Her udgav han i 1943 en artikel om en slingren i stjernen 61 Cygni, som han havde observeret, og, som han mente, kun kunne forklares med tilstedeværelsen af en planet med en masse på 16 gange Jupiters.

Opdagelsen vakte berettiget opsigt, og i 1957 udgav Strand nye målinger, hvor han nedjusterede massen til 8 gange Jupiters. Desværre viste det sig langt senere i 1970'erne, at der var fejl i måleudstyret, og at det var teleskopet, der slingrede og ikke 61 Cygni. Strand fik dog en glimrende karriere i USA og var fra 1963 til 1977 videnskabelig direktør for den amerikanske flådes hæderkronede observatorium.

Gennembruddet kom i 1995, hvor Michel Mayor og Didier Queloz fra universitetet i Geneve annoncerede, at de havde fundet en planet omkring stjernen 51 Pegasi, ca. 50 lysår borte. Denne gang var observationerne overbevisende, og det overraskende var, at planeten – der var halvt så tung som Jupiter – havde en omløbstid på kun 4,2 dage, for sådan en planet passede ikke med nogen teorier. Et halvt år senere blev de næste to planeter fundet, og så begyndte de nærmest at myldre frem.

Vestergaard har interviewet en lang række forskere til bogen, heraf også mange danske, og hun har besøgt laboratorier og deltaget i konferencer. Bogen er også behageligt fri for de myter og misforståelser omkring fx Bruno og Galilei, som præger mange historiske gennemgange. Hun skriver veloplagt (og efter denne anmelders smag til tider også for veloplagt), men hun skriver også med den solide indsigt i emnet, der sætter hende i stand til at skrive med overskud og overblik.

Den næste fase i jagten på de fjerne kloder er at finde liv på en af dem. Jagten er gået ind, og selvom et flertal af planetjægerne mener, at vi skal om på den anden side af 2040, før vi får solide beviser, er Vestergård ikke i tvivl om, at vi finder liv, og at "himlen er fuld af vidunderlige verdener".

JOPP