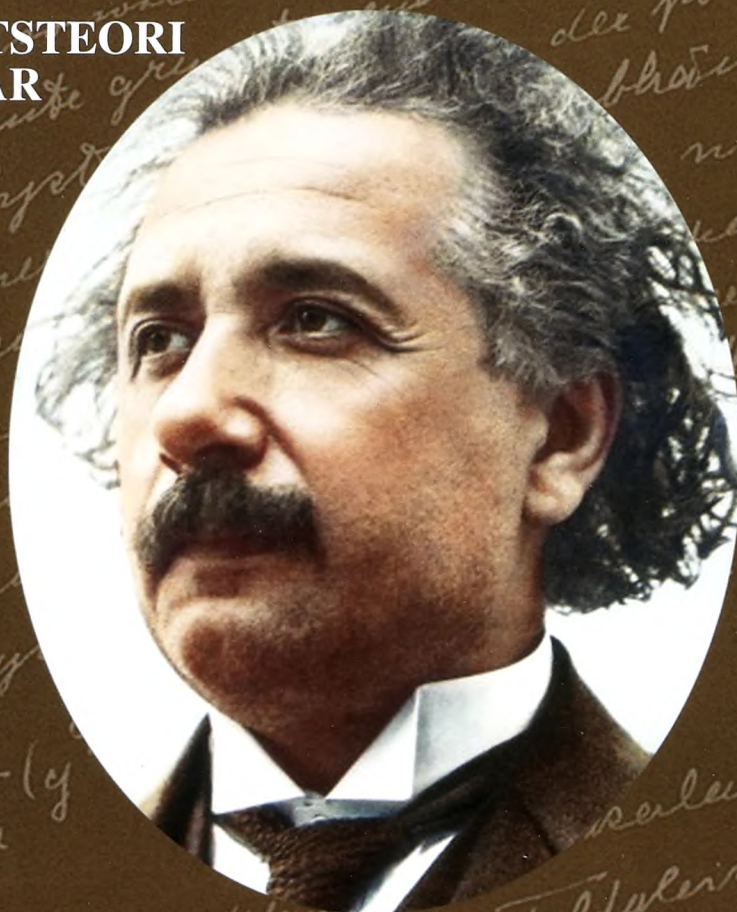


KVANT December 2015 4

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 26. årgang

ALMEN

RELATIVITETSTEORI
FYLDER 100 ÅR



- TIDENS RELATIVE GANG
- KOSMISKE FORSTØRRELSGLAS
- GENEREL RELATIVITET: TRÆK AF UDVIKLINGEN 1920-1970
- TYNGDEKRAFT OG KVANTETEORI
- SWARM-SATELLITTEN

Løssalgspris: 50 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

c/o Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

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

Udgives af

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

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),
Christianshavns Gymnasium
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Steen Lærke (astro@kvant.dk),
Astronomisk Selskab
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen,
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Niels Bohr Institutet, KU
Svend Erik Rugh
Emilie Gehl Skulberg
Julie Søgaard,
Astronomisk Selskab
Torben Westerberg (korrektur)

Abonnementspris : 180 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber. Henvendelser vedr. abonnement til Christine Pepke Pedersen: 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 (tlf. 22 67 26 42).

Tryk

Vestergaards Bogtrykkeri ApS.
Oplag: 2400.

Produktionsplan

Nr. 1-16 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-16 udkommer ca. 15. maj
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

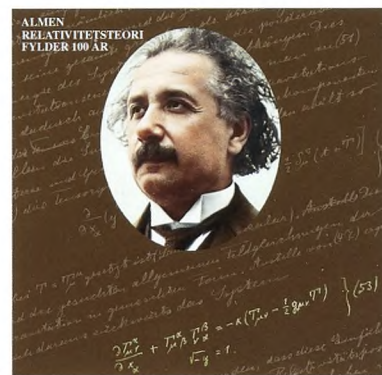
Indhold:

Almen relativitetsteori fylder 100 år <i>Michael Cramer Andersen</i>	3
Tidens relative gang <i>Ulrik Uggerhøj</i>	4
Generel relativitet: Træk af udviklingen 1920-1970 <i>Helge Kragh</i>	11
KVANT-nyheder <i>Sven Munk</i>	16
Foreningsnyt – foredrag i foråret 2016	18
Kosmiske forstørrelsesglas <i>Claudio Grillo, Lise Christensen og Jens Hjorth</i>	19
KVANT søger nye redaktører (annonce)	22
Tyngdekraft og kvanteteori <i>N. Emil J. Bjerrum-Bohr</i>	23
Aktuelle bøger <i>Anja Skaar Jacobsen og Michael Cramer Andersen</i>	27
Atlantehavsbølger – breddeopgave 67 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	29
Swarm-missionen og Jordens magnetfelt <i>Eigil Friis Christensen og Nils Olsen</i>	31
H.C. Ørsted Medalje til gymnasielærer Henrik Parbo <i>Selskabet for Naturlærens Udbredelse</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser Albert Einstein med en manuskriptside i baggrunden fra hans historiske artikel, der præsenterede grundlaget for den almene relativitetsteori.

Einsteins feltligninger for tyngdekraften, i deres oprindelige version, er fremhævet nedenunder portrættet af Einstein.

Einsteins teori er grundlaget for beskrivelsen af bl.a. Universets udvidelse, sorte huller og gravitationelle linser.



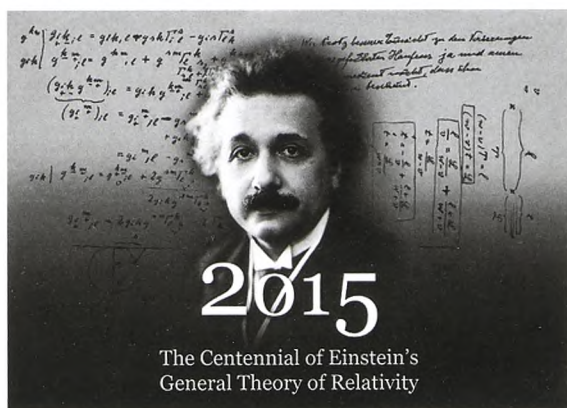
KVANT udsendes gratis, i ét eksemplar, til alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra Niels Bohr Institutet (KU), Institut for Fysik og Astronomi (AU), Institut for Fysik og Kemi (SDU), Institut for Fysik og Nanoteknologi (AAU), DTU Nanotech, DTU Fotonik og DTU Fysik.

Almen relativitetsteori fylder 100 år

Af Michael Cramer Andersen, KVANT

Med dette nummer markerer KVANT 100-året for Einsteins almene relativitetsteori. Vi bringer bl.a. artikler om tidens relative gang, kosmiske forstørrelsesglas, teoriens udvikling i perioden 1920-1970 og en artikel om tyngdekraft og kvanteteori.

I år er det 100 år siden, at Einstein fuldendte sin jagt på en relativistisk teori, der omfattede tyngdekraften. Med dette temanummer markerer vi dette og afrunder samtidig "Lysets År" 2015.



Figur 1. Forsiden af en kalender udgivet af American Institute of Physics [1].

Allerede for et år siden beskrev *Helge Kragh*, der er professor i videnskabshistorie, Einsteins arbejde med at formulere den almene relativitetsteori [2].

De grundlæggende ligninger i teorien er *Einsteins feltligninger*. De er skrevet i en kompakt tensor-notation i figur 2. Indholdet er også beskrevet enkelt og smukt i én sætning af fysikeren John Archibald Wheeler: "Rum-tiden fortæller stof, hvordan det skal bevæge sig; stof fortæller rum-tiden, hvordan den skal krumme" [3].



Figur 2. Einsteins feltligninger skrevet som graffiti på et gammelt tog i Bolivia. Det er nok tvivlsomt, om det er Albert Einstein selv, der er ophavsmand til kunstværket.

Et væsentligt element i den specielle relativitetsteori fra 1905 er, at tidens gang ændres ved bevægelse. I den almene eller generelle relativitetsteori fra 1915 ses det, at tiden også påvirkes af tyngdekraften. I GPS-satellitterne korrigeres der for begge disse effekter og

det faktum, at GPS-navigation virker, demonstrerer teoriens anvendelighed. Læs om "Tidens relative gang" i artiklen af *Ulrik Uggerhøj* fra Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet. Artiklen stammer fra bogen "25 Søforklaringer" udgivet af Aarhus Universitetsforlag 2014.

I dag anvendes den almene relativitetsteori som en integreret del af astrofysik og kosmologi. Neutronstjerner og sorte huller og deres omgivelser beskrives fx med nogle løsninger til Einsteins feltligninger, og Universets udvidelse beskrives med andre løsninger.

Teorien forudsiger bl.a., at lys afbøjes omkring massive himmellegemer, og det var ved observation af denne effekt under en total solformørkelse i 1919, at teorien blev anerkendt og Einstein blev verdensberømt.

Lysafbøjning ses også i gravitationelle linser, hvor det er galakser, der fungerer som linser. Læs mere om disse "Kosmiske forstørrelsesglas" i artiklen af *Claudio Grillo*, *Lise Christensen* og *Jens Hjorth* fra Dark Cosmology Centre ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Helge Kragh fra Niels Bohr Institutet beskriver i artiklen "Generel relativitet: Træk af udviklingen 1920-1979", hvordan Einsteins teori nærmest sygnede hen i midten af det 20. århundrede, men senere fik en renæssance.

Emil Bjerrum-Bohr beskriver hvordan tyngdekraft og kvanteteori godt kan kombineres, hvis almen relativitetsteori formuleres som en feltteori. Med denne formalisme har han beregnet lysafbøjning omkring Solen inklusiv de meget små kvanteeffekter.

Temaet afrundes med omtalen af en bog, der fejrer 100-året for Einsteins teori, med bl.a. en smuk gengivelse af Einsteins manuskript samt fyldige forklaringer.

Herudover kan man læse artiklen "Swarm-missionen og Jordens magnetfelt", skrevet af *Eigil Friis-Christensen*, forhenværende direktør for DTU Space, og *Nils Olsen*, DTU Space. Målingerne fra de tre Swarm-satellitter har mange anvendelser, bl.a. kortlægning af Jordens skorpe, test af modeller for Jordens dynamo og forudsigelse af rumvejret.

Litteratur

- [1] American Institute of Physics, 2015: The Centennial of Einstein's General Theory of Relativity; <https://www.aip.org/history-programs/einstein-centennial-2015>.
- [2] Helge Kragh (2014), Einsteins odysse: Fra speciel til almen relativitetsteori, KVANT 25, nr. 4.
- [3] Jens Ramskov (2015), Den generelle relativitetsteori fylder 100 år, Ingeniøren 27. november 2015; <http://ing.dk/180336>.

Tidens relative gang

Af Ulrik Uggerhøj, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

Tidens gang ændres ved bevægelse og under påvirkning af tyngdekraften. Det medfører en række forunderlige fænomener. Hvis man eksempelvis sender et ur rundt om jorden i et rutefly, vil det gå langsommere i forhold til et ur, der er blevet tilbage i lufthavnen. Og Jordens centrum er et par år yngre end overfladen. Sådanne fænomener – og mange andre, der strider mod intuitionen – behandles i denne artikel¹, hvor Einsteins relativitetsteori er det grundlæggende tema.

Et ur i bevægelse går langsomt

“Bang” siger det fra startpistolen, og løbet er i gang. Sprinterkongen Usain Bolt springer ud af startblokken, og hans atletiske krop yder maksimalt på vej mod mål. Efter 9,58 sekunder passerer han mållinjen, og han har dermed sat ny verdensrekord på 100 meterdistancen.

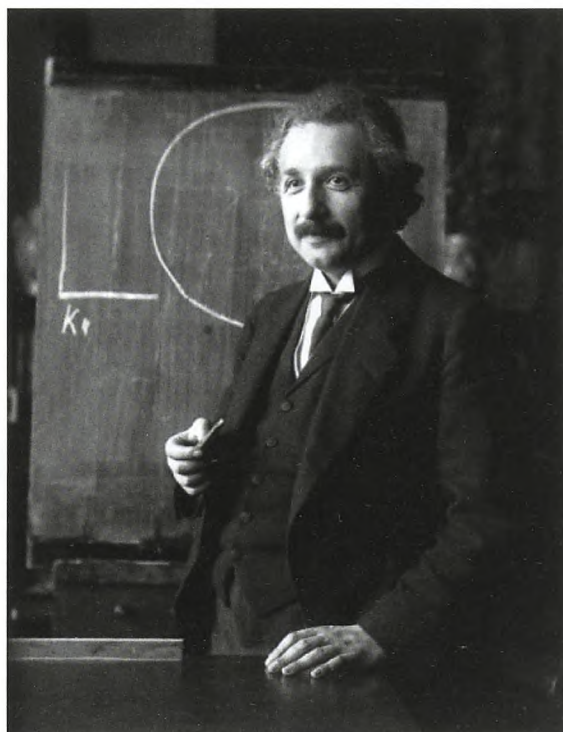
Man afgør altså sprintkonkurrencer med tidtagninger, der er præcise inden for hundrededele af et sekund. Omsat til distance, med *Lightning Bolts* fart, svarer en hundrededel sekund nogenlunde til halvdelen af hans fods længde, godt og vel 10 centimeter. Så der skal ikke meget til at afgøre konkurrencen.

Men hvis nu Usain Bolt havde armbåndsur på, mens han løb, ville det faktisk ikke vise præcist det samme som stadionuret.



Figur 1. Usain Bolt, verdensrekordholderen i 100 m sprint, løber med en topfart på ca. 44 km/t eller godt 12 meter i sekundet. Hans ur går langsomt – en effekt, der kan måles for tilstrækkeligt præcise ure med denne fart – set fra synspunktet for en tilskuer på stadion.

Det ville gå langsommere. Så hans rekordtid ville afhænge af, om det var hans eget ur, der målte, eller om det var et andet ur, fx stadionuret. Forskellen er ikke stor, men nok til at den kan måles med meget præcise ure, selv for hastigheder svarende til Usain Bolts løb. Hvorfor nu det? Det skyldes, at tid er en *relativ* størrelse. En tur over Atlanten med rutefly betyder eksempelvis, at du er ældet ca. 4 milliarddele sekund mindre end familien derhjemme. For ure om bord på rutefly blev forskellen målt for næsten 40 år siden (som diskuteres i detaljer nedenfor), og i dag kan man måle den for hastigheder, der er relevante for løbende mennesker.



Figur 2. Foto af Albert Einstein fra ca. 1921 – det år, hvor Einstein modtog Nobelprisen i fysik for opdagelsen af den fotoelektriske effekt (en af hans store opdagelser fra 1905) og for sine bidrag til den teoretiske fysik, underforstået relativitetsteorien. Foto: Ferdinand Schmutzer.

Uret måler nemlig ikke tiden som en fast størrelse, der altid er den samme. Tid kan ikke defineres endeligt og afhænger af faktorer som bevægelse og tyngdekraft. Hvis Usain kunne løbe med lysets hastighed – 300.000 km pr. sekund – ville uret ikke bare gå langsomt. Det ville gå helt i stå.

At tiden ikke går på absolut måde, men netop afhænger af bevægelse, var en af Albert Einsteins store opdagelser i den såkaldte specielle relativitetsteori, der blev publiceret i 1905.

Man kan spørge, hvad der ville ske, hvis nu Usain kunne løbe lidt hurtigere, end lyset bevæger sig? Men den går ikke: Et ur kan ikke gå langsommere end i stå (så ville det gå baglæns!), og det kan det ikke, fordi lysets hastighed ikke kan overskrides.

Det er dog en teoretisk mulighed, at der findes elementarpartikler, de såkaldte tachyoner, der er “født”

¹ Artiklen er oprindeligt skrevet til bogen “25 Søforklaringer – Naturvidenskabelige fortællinger fra Søauditorierne”, udgivet af Aarhus Universitetsforlag i 2014. Den er her gengivet med velvillig tilladelse fra forfatteren og forlaget.

med en hastighed større end lysets og altså ikke overskrider den. Hvis man kunne sende sådanne partikler af sted med en hastighed større end lysets, ville man ifølge den konventionelle udgave af relativitetsteorien i princippet kunne sende beskeder bagud i tid. Og kan man sende beskeder bagud i tid, åbner der sig et virvar af bizarre muligheder: Man kunne fx sende lørdagens Lotto-tal tilbage til onsdag, hvor man ville kunne nå at satse penge, der ville udløse den store gevinst.

Faktisk havde man en del spekulationer i den retning, da forskere fra det fælleseuropæiske partikelfysiklaboratorium, CERN, i efteråret 2011 annoncerede, at de havde målt såkaldte neutrinoer, der bevæger sig hurtigere end lyset. I tråd med min egen og mange andres skepsis viste det sig dog, at der var tale om en målefejl.

Er du bevæget?

Et ur i bevægelse går altså langsomt. Sådan ser det i det mindste ud for os, der står stille på stadion og betragter Usain komme susende forbi med uret siddende på armen. Men principielt kan vi ikke vide, hvem der er i bevægelse, og hvem der står stille (vi glemmer her forsætligt, at Usains muskler skal yde noget for at overvinde luftmodstand osv.). Det er nemlig umuligt at måle, at man er i jævn bevægelse, medmindre man sammenligner med noget, man bevæger sig i forhold – relativt – til. Og selv da kan man med fuld ret sige, at det er det andet, som man sammenligner med, der bevæger sig, mens man selv er i hvile.

Det siges om Albert Einstein, relativitetsteoriens "fader", at han under en togrejse spurgte konduktøren: "Standser Oxford ved dette tog?" Om anekdoten er sand, er ikke så vigtigt, men du kender sikkert selv fænomenet, når du sidder i toget ved perronen, og der holder et tog ved siden af. På et tidspunkt sætter toget i gang og kører jævnt fremad. Men er det nabotoget, der kører, eller er det dit? Hvis der kun var de to tog i hele verden, kunne man ikke afgøre, om det var det ene, der bevægede sig i forhold til det andet, eller det andet, der bevægede sig i forhold til det ene. Så man kan normalt afgøre det ved at sammenligne med en tredje ting, nemlig perronen, skinnerne eller Jordkloden.

Bevægelse sker altså altid i forhold (relativt) til noget andet, og hvis der kun er to togvogne i hele verden, kan man derfor ikke sige, hvem der bevæger sig. Kun at de to togvogne har indbyrdes bevægelse.

Man kan også tage et andet eksempel: Hvis piloten på charterflyet til Gran Canaria melder om "roligt flyvevejr uden turbulens", kan man roligt bestille en kop kaffe hos stewardessen, selvom flyet bevæger sig med en hastighed på over 800 km/t. Når man er i jævn bevægelse, kan man nemlig ikke se eller mærke kaffen anderledes, end hvis man holder stille på landingsbanen. Det er en helt anden sag med kaffen – og alt andet i flyet – hvis der er lufthuller.

Denne observation – at man ikke kan måle jævn bevægelse uden at "kigge udenfor" – kaldes relativitetsprincippet og blev fremført af bl.a. den italienske naturvidenskabsmand Galileo Galilei for knap 400 år siden. Begrebet jævn bevægelse giver altså ikke mening

i sig selv, men kun hvis man refererer, hvad det er i forhold til.



Figur 3. Galileo Galilei malet af Justus Sustermans i 1636. Galileo betragtes som en af den moderne naturvidenskabs grundlæggere. Han var en af de første, der med sikkerhed har tænkt over begrebet relativitet.

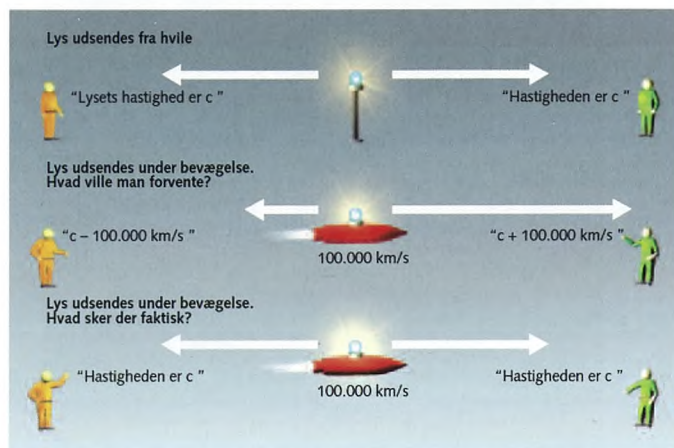
Lysets hastighed er altid den samme

Fundamentet i Einsteins specielle relativitetsteori er, at lysets hastighed altid er den samme. Det lyder måske ikke umiddelbart så mærkværdigt, men lad os se lidt nærmere på det. Vi begynder med noget mere håndgribeligt: En spydkaster løber med 10 km/t på et stadion og kaster sit spyd med 20 km/t i samme retning, som hun løber. Med hvilken fart bevæger spyddet sig i forhold til stadion? Det bevæger sig med summen af hastighederne, dvs. $10 \text{ km/t} + 20 \text{ km/t} = 30 \text{ km/t}$. Hun kan altså sætte ekstra fart på sit spyd ved at løbe, mens hun kaster.

Det samme kan man gøre med mange andre ting, fx bolde og sten, og hvad man nu ellers kan finde på at kaste med. Men hvad med lys? Kan man sætte ekstra fart på lys ved at bevæge sig hurtigt? Nej, det kan man ikke. Det er et mystisk, men meget velafprøvet faktum, at lys altid har samme fart, ca. 300.000 kilometer i sekundet, gennem det tomme rum.

Vi kan forestille os et rumskib, der passerer med en fart på 99 % af lysets hastighed. Når kaptajnen tænder forlygterne, mener han, at dette lys udbreder sig med... ja, lysets hastighed. Men eftersom han allerede bevæger sig i forhold til os – endda ret hastigt – vil vi så modtage lyset fra ham med en fart, der er summen af hans og lysets, dvs. 1,99 gange lysets "normale" hastighed? Nej, med lys forholder det sig anderledes end med spyd, sten og bolde: Vi modtager det lys, han med høj fart udsender, med præcist lysets normale hastighed.

Den slags ultrahurtige rumskibe kan man ikke konstruere, men man kan alligevel lave eksperimentet ved at tvinge elektroner med hastigheder uhyre tæt på lysets, 99,9999999998 %, til at udsende lys. Og man kan måle, at elektronerne udsender lyset med netop den normale lyshastighed. Jeg har også selv udført sådanne forsøg og kan bevidne, at det er korrekt. Man kan altså ikke forøge lysets fart. Omvendt kan man heller ikke bremse det – så længe vi taler om lys i det tomme rum. Man skulle jo ellers tro, at lys udsendt baglæns fra det førnævnte rumskib ville bevæge sig med kun 1 % af den normale fart, men det gør det altså ikke.



Figur 4. Figuren illustrerer det faktum, at lysets hastighed altid er den samme. Selvom lyset bliver sendt af sted fremad fra et rumskib, der flyver med en hastighed tæt på lysets, vil lyset ikke få mere fart på. Illustration: Troels Marstrand.

Det er et meget velafprøvet eksperimentelt faktum, at lys højst kan "overtage" en milliarddel af udsenderens hastighed, og teorien siger, at den virkelige andel, det kan arve, er lig med nul. Sat lidt på spidsen kan man sige, at dette faktum er det eneste mærkelige i relativitetsteorien – resten er logik. Det kan indimellem være kompliceret logik, helt bestemt, og specielt kan konsekvenserne være svære at forlige sig med, men det mystiske ligger altså blot i, at lysets fart altid er den samme. Og det ved vi med stor sikkerhed.

Hvilket ur går langsomt?

Lad os nu vende tilbage til Usain Bolt, hvis ur går langsommere end stadions, når han spurter af sted. Men så må Usain da mene, at stadionuret går hurtigt? Nej, den går ikke, for så kan man jo afgøre, hvem der er i bevægelse, og hvem der er i hvile – den, hvis ur går langsomt, er i bevægelse. Og det dur ikke, for Usain har ret til at sige, at det er ham, der er i hvile (vi glemmer her igen, at hans muskler skal yde noget), og stadion, der bevæger sig forbi. Samme ret som vi på stadion har til at sige, at vi er i hvile, og han bevæger sig jævnt forbi. Det fortæller eksemplet med kaffen på vej til Gran Canaria os: Jævn bevægelse kan ikke måles uden at sammenligne med noget "udenfor". Aha, så Usain må også mene, at stadionuret går langsomt, selvom vi på stadion mener, at det er Usains ur, der går langsomt.

Så hvis ur går langsomt?

Der er kun tre muligheder: Usains ur går langsomt i forhold til stadionuret, de går lige hurtigt, eller stadionuret går langsomt i forhold til Usains. Men hvis

vi forudsætter *jævn* bevægelse hele vejen, er det et spørgsmål, der ikke kan afgøres: To ure kan kun passere hinanden én gang, hvis de bevæger sig jævnt i forhold til hinanden. Og hvis man skal finde ud af, hvilket ur der går langsomt, er man nødt til at sammenligne dem to gange. Forestil dig, at du står ved stadionuret, og Usain med sit eget ur er klar til signal i startblokken lige ved siden af. Idet startskuddet affyres, nulstilles begge ure, og Usain sprinter fremad. Men hvis I skal afgøre jeres tvist om, hvis ur der går langsomt, er han nødt til at vende om – enten ved at standse op og løbe tilbage eller ved at løbe hele vejen rundt på stadion. Men så er hans bevægelse ikke længere jævn hele vejen – han vil kunne mærke kræfter, der påvirker ham, mens han ændrer hastighed (fart og/eller retning).

Det er den slags kræfter, der gør børnelegen æggeløb svær og sjov – når man løber med et æg på en ske frem og tilbage. For den, der løber, virker det, som om noget trækker i ægget, når hun vender om. Hvis du her får associationer til kaffen, der løber ud af koppen pga. lufthuller på vej til Gran Canaria, er du på rette spor.

Det er altså ikke muligt at sammenligne to ure to gange under betingelsen af jævn bevægelse hele vejen. Derfor fører det ikke til en modstrid, at begge parter mener, at det er modpartens ur, der går langsomt.

Foryngelseskur?

Begraver vi stridsøksen og holder fast i, at et ur i bevægelse, uanset hvis det er, går langsomt, dukker der nye, spændende spørgsmål op. Kan man så udnytte dette fænomen som en "foryngelseskur" – dvs. ved at lade ens ur gå langsomt ved at bevæge sig? Nej, man kan ikke på denne måde få sit eget ur, fx hjertets regelmæssige slag, til at gå langsomt. For man kan jo ikke bevæge sig i forhold til sig selv. Det er sådan set en ret trivial observation, men dens implikationer er alligevel vidtrækkende.

Man kan altså ikke få sit indre ur til at gå langsomt. Derimod får man, ved at bevæge sig jævnt i forhold til andre, deres ur – og deres hjerteslag, aldringsprocesser, antal fødselsdage osv. – til at gå langsomt. Dog skal man temmelig tæt på lysets hastighed, før det virkelig batter: Hvis man skal have vennerne til at fylde år halvt så tit, som man selv gør, skal man op på 87 % af lysets hastighed, svimlende 259.627.885 meter pr. sekund. Den højeste hastighed for objekter af størrelse sammenlignelig med mennesker, vi kender til tæt på os, er Jordens banehastighed omkring Solen. Den er ca. en titusindedel af lysets hastighed. Altså alt for lidt til at give betydelige justeringer, og i øvrigt irrelevant, da vi endnu ikke har fundet intelligent liv andre steder i universet, som vi kunne sammenligne fødselsdage med.

Men hvis den ene af de to rejsende vender om, må der være en løsning og måske en form for foryngelseskur. Det vender jeg tilbage til i afsnittet om tvillingeparadokset.

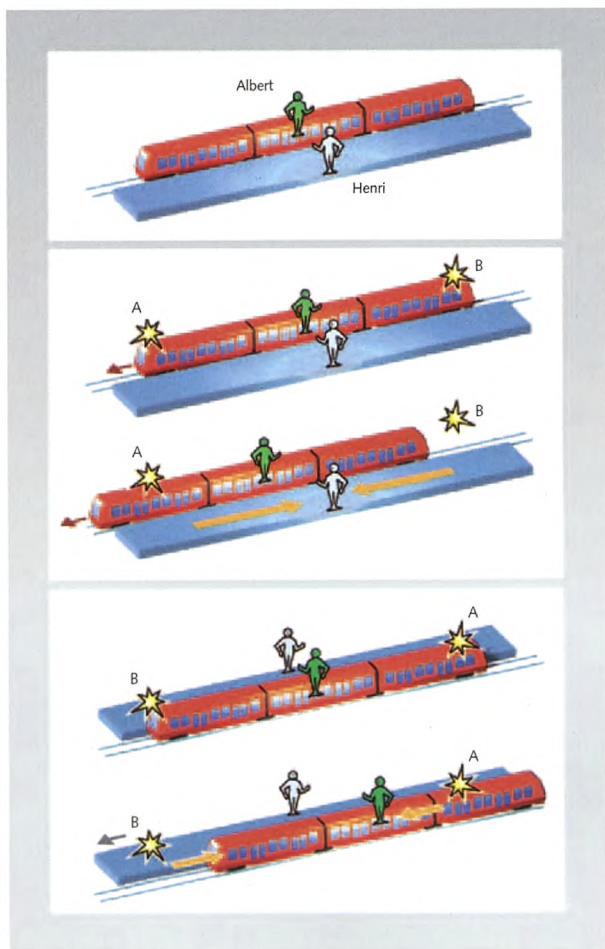
Samme tid, samme sted

Man kan strengt taget ikke sige noget om, hvad klokken er et andet sted, medmindre man angiver sin bevægelse i forhold dertil. Det har den behagelige konsekvens, at vi alle – du, jeg og Usain Bolt – har noget, der er helt vores

eget, nemlig “nu”. Vi deler det med alle dem, vi står stille i forhold til, men så snart vi bevæger os, adskiller vore opfattelser af begrebet sig.

Begivenheder, der sker samtidigt for den ene, gør det ikke nødvendigvis for den anden. Tid og rum hænger sammen i den såkaldte rumtid, og begge dele skal tænkes med, når vi vil sammenligne tidspunkter. Det bliver særlig tydeligt, når vi kommer op i så store skalaer, at lysets hastighed spiller ind.

Et lille tankeeksperiment kan vise, hvorfor samtidighed ikke er noget absolut, men afhænger af, hvem der spørger. Vi kigger på to personer, Albert og Henri: Albert placeret midt i et tog i hastig bevægelse, og Henri placeret på perronen udenfor, (se figur 5).



Figur 5. Henri og Albert passerer hinanden, den ene på perronen, den anden i tog. Ved passagen sendes der lysglimt ind mod Henri fra togets ender, og det samme lys kan registreres fra enderne af vognen i Alberts tog. Som forklaret i hovedteksten medfører det, at de er uenige om samtidigheden af lysglimtenes afsendelsestidspunkt. Den mellemste figur viser situationen set fra Henris synspunkt, og den nederste set fra Alberts, hvor – i begge tilfælde – de gule pile symboliserer lysets udbredelse. Illustration: Troels Marstrand.

Idet Henri og Albert passerer hinanden, sendes der lysglimt ind mod Henri fra togets ender, og det samme lys kan registreres i Alberts tog. Men i løbet af den tid, der går, fra lyset bliver sendt afsted, til lyspulserne krydser hinanden, har toget bevæget sig fremad. De mødes altså ikke i midten af toget, men tættere ved bagenden. Så selvom Henri mener, at de to lysglimt er afsendt samtidig, er Albert tvunget til at mene, at det fra forenden er afsendt først. Han kan jo ikke måle, at han

bevæger sig, og da han ser glimtet fra forenden først, og da glimtene har samme hastighed (nemlig lysets), må den forreste være afsendt først.

Hvis nu lysglimtene stammede fra ure, der viser kl. 12, vil Henri altså mene, at de to ure er synkroniserede, mens Albert vil mene, at det ur, der er bagest i Henris bevægelsesretning er foran: Albert ser det vise 12 før Henris forreste. Baseret på denne forskel i samtidighed, kan man altså konkludere, at et ur, der er bagved i bevægelsesretningen, er foran tidsmæssigt. Det kan man udtrykke kompakt: “Når man er bagud, er man foran”. Bare man er opmærksom på, at det ene refererer til en rumlig retning, det andet til tid. Taget for pålydende giver det jo ingen mening (og da slet ikke, hvis man benytter det i forbindelse med lektielæsning).

Faktisk kan to begivenheder, A og B, bytte rækkefølge, afhængigt af hvis ur der måler. Hvis de for den ene sker i rækkefølgen A derefter B, kan de ske i den omvendte orden, B fulgt af A, for den anden. Det kræver, at begivenhederne sker så tæt tidsmæssigt og så langt fra hinanden, at de umuligt kan være forbundne (intet, heller ikke lys, kan nå fra den ene til den anden). Det vender jeg tilbage til.

Tag fx spørgsmålet om, hvad klokken er i Andromeda-galaksen. Lad os sige, at klokken er 12 middag som på Jorden, hvilket vil sige, at Jorduret og Andromedauret er synkroniserede i hvile på Jorden (set for dig). Hvordan ser det ud for en, der går forbi dig, med retning mod Andromeda? For hende bevæger dit og Andromedas ur sig forbi med sidstnævnte bagest. Bevæbnet med “Når man er bagud, er man foran” kan hun konkludere, at uret i Andromeda er foran. Det viser altså noget andet, end du mener, fx kl. 15. Og da afstanden dertil gør effekten større, drejer det sig faktisk om fem dage ved almindelig gang, idet Andromeda ligger 2,5 millioner lysår herfra. Hvis der så sker noget ude i galaksen, fx en eksplosion, vil du mene, at det skete den 1. maj, mens den gående vil hævde, at det skete fem dage senere. Set fra dit synspunkt er hendes version af rækkefølgen fra fx 2. maj til eksplosionen forkert – og omvendt. Det er ikke (helt) kun af akademisk interesse: Forestiller vi os et ondsindet folk, der pønser på at udslutte Jorden med en uhyre kraftig laser, kan afsendelsen af laserstrålen være en realitet for hende, men stadig fremtid for dig. Det piller med andre ord ved forestillingen om, at en begivenhed, der har fundet sted langt herfra, må have fundet sted i absolut forstand – med andre ord, at alle vil mene, at den *er* sket. Det er ikke tilfældet. Dit “nu” er dit eget og falder kun sammen med andres, hvis I er i hvile i forhold til hinanden.

Tvillingeparadokset

Lad os vende tilbage til sammenligningen af to ure i indbyrdes bevægelse. Hvis de altid er i jævn bevægelse, kan de, som vi har set, ikke sammenlignes to gange. Derimod kan man nulstille urene samme sted, lade det ene ur forblive i hvile og lade det andet rejse ud, vende om (hvilket nødvendigvis er en ujævn bevægelse) og rejse tilbage til det første. I dette tilfælde kan de sammenlignes to gange, så hvilket går langsomt? Det gør det, der rejste ud og vendte tilbage. Det er på trods af,

at både på ud- og hjemturen vil den rejsende mene, at det tilbageværende ur går langsomt.

Her er kimen til det såkaldte "tvillingeparadoks", fordi tvillingerne Albert og Marie i princippet kunne opleve det samme: Mens Albert bliver hjemme i sin hængekøje, rejser Marie ud i Mælkevejen med 60 % af lysets hastighed, vender om i løbet af et øjeblik (hun hopper fra det udgående rumskib over på et hjemgående rumskib – det kan ikke lade sig gøre, men gør eksemplet nemmere og indeholder ikke afgørende ændringer) – rejser tilbage med samme fart og returnerer, efter at Albert er blevet 20 år ældre. Men Marie er kun blevet 16 år ældre! Alligevel mener hun under hele sin tur, at Alberts tid går langsomt, for han bevæger sig jo i forhold til hende. Hvorfor er det så ikke ham, der er yngre end hende, når de mødes igen? Hvad er galt?

Det er tilsyneladende et paradoks. Løsningen er basalt set, at det kun giver mening at sige, hvad klokken er et andet sted, hvis man specificerer sin bevægelse hen mod (eller væk fra) det pågældende sted. For alle dagligdags formål er dette fænomen helt uden betydning, men som vi så ovenfor, kan to personer, der passerer hinanden med almindelig ganghastighed, være uenige om tiden – med en difference på godt 10 dage – i Andromeda.

På samme måde som denne uenighed skyldes disse personers indbyrdes bevægelse, vil Maries opfattelse af, hvor gammel Albert er, også flytte med 7,2 år, lige idet hun vender om (svarende til, om man går den ene eller anden vej og tænker på Andromeda). Hun bevæger sig jo ret tæt på lysets hastighed, så man må regne med en betydelig effekt. Derfor vil hun i løbet af hele sin rejse ud og hjem se, at Albert bliver 12,8 år ældre. Det er betydeligt færre end hendes egne 16 år, men hun ved samtidig, at når hun skifter retning for at vende hjem, skifter hendes opfattelse af, hvor meget ældre Albert er blevet med 7,2 år. Så hun forventer, at han er $12,8 + 7,2 = 20$ år ældre, når de mødes igen, selvom hun selv kun er blevet 16 år ældre. Og de er enige om, hvor langsomt deres tvillings ur går: Albert mener, at Maries går langsomt med $20/16 = 1,25$, og Marie mener, at Alberts går langsomt med $16/12,8 = 1,25$. Så pengene passer. Et ur i bevægelse går langsomt – både set for Albert og for Marie. Men Maries ændring af bevægelsesretning (hendes "rumskibshop") medfører et skift i, hvad hun opfatter som "nu" et andet sted.

Albert Einstein var meget tidligt opmærksom på denne ejendommelige konsekvens, men mente ikke, at der var noget paradoksalt i det, hvad der også kun tilsyneladende er. I begyndelsen af 1970'erne efterviste fysikeren Joseph C. Hafele og astronomen Richard E. Keating netop dette fænomen (se figur 6): De havde fire meget præcise ure, som de lod gå synkront i et stykke tid for at bekræfte, at de gik lige hurtigt. Derefter sendte de to af urene med rutefly Jorden rundt og sammenlignede efterfølgende urene to og to. Inden for måleusikkerheden fik de præcist den værdi, der blev forudsagt fra relativitetsteorien. De ure, der blev sendt Jorden rundt, gik langsomt. I dag eftervises fænomenet dagligt gennem GPS-systemet, som vi vender tilbage til senere.



Figur 6. Amerikanerne Hafele og Keating sendte i oktober 1971 atomure rundt om Jorden med almindelige rutefly, både vestpå og østpå. De sammenlignede dem med identiske ure, der ikke havde bevæget sig i forhold til Jorden. Det viste sig, at de rejsende ure pga. bevægelsen havde tabt godt hundrede milliardde sekunder i forhold til de ure, der ikke havde flyttet sig. Resultatet var i god overensstemmelse med relativitetsteorien. Foto: AP.

Sekundernes vægt

Bevægelse har altså stor betydning for tidens gang. Men det har tyngden faktisk også: Klokken vil ikke være det samme i bunden og i toppen af et tårn. Et ur placeret i bunden vil set udefra gå langsommere end et anbragt i toppen. Sætter vi tingene lidt på spidsen, betyder det, at din fætter i La Paz i Bolivia – 3.600 m over havets overflade, hvor tyngdefeltet er en anelse svagere – i løbet af 80 år lever en tusindedel af et sekund kortere end dig, der bor ved havoverfladen i flade Danmark.

Har du prøvet at gå ind i en elevator med en badevægt, stille dig op på den og trykke på knappen, der sender dig op til øverste etage? Sikkert ikke, men du kan nok forestille dig, hvordan det er: Man føler sig lidt tungere, idet elevatorstolen øger farten, og lidt lettere, når den bremser ned igen. Det vil vægten også vise. At øge sin fart, en ujævn eller accelereret bevægelse, er altså nært forbundet med at veje noget, dvs. at have tyngde.

Desuden er acceleration (som jo er ændring af hastighed i løbet af et tidsrum) og tyngde næsten ikke til at skelne. Hvis elevatoren kunne accelerere opad hele tiden, og man ikke kunne kigge ud fra den, ville man ikke kunne afgøre, om det skyldtes, at man befandt sig ved overfladen af noget, der var tungere end Jorden, eller om det skyldtes acceleration. Altså om de kræfter, man kunne mærke, skyldtes en tyngdekraft nedad eller en acceleration af ens masse opad. Denne lighed udnytter man faktisk meget tit i praksis: Enhver tøjvaskendes drøm er at kunne hænge tøjet op et sted, hvor tyngdekraften er meget større end på Jorden, for så drypper vandet hurtigt af, og tøjet tørrer i en ruf. Og det er faktisk en sådan kunstig tyngdekraft, man skaber, når man centrifugerer tøjet i vaskemaskinen. Accelerationen af tøjet rundt i cirkelbevægelsen inde i maskinen bevirker en tilsvarende tyngdekraft, som er flere hundrede gange den på Jorden. Vandet løber af på få minutter i stedet for mange timer.

Et andet eksempel er en ketchupflaske. Når flasken er ved at være tom, er der kun to ting, du kan gøre, efter at du har vendt bunden i vejret på den: Enten kan du væbne dig med tålmodighed og vente på, at Jordens tyngdekraft trækker den sidste sjat ketchup ud af flasken, eller du kan udnytte ligheden mellem acceleration og tyngde og ryste flasken i korte, bestemte ryk. Derved trækker den kunstige tyngdekraft, du skaber ved at ryste (som jo er en *ujævn* bevægelse), ketchuppen ud af flasken meget hurtigere. Ligheden mellem acceleration og tyngde kalder man også ækvivalensprincippet.

Lysets indre ur i tyngdefeltet

Tyngdens indflydelse på tidens gang har den konsekvens, at tiden går langsommere i et stærkt tyngdefelt end i et svagt. Man kan kort illustrere årsagen til dette fænomen ved at tænke på en person, der står med sin laserpegepind ved foden af Rundetårn og sender lyset op til toppen. Når lyset rejser opad, skal det, som alle andre objekter, tabe energi. Hvis der er tale om en bold, vil bolden vende om og falde ned igen fra det højeste punkt på dens bane, hvor den har tabt al sin bevægelsesenergi. Men da lys altid bevæger sig med lysets hastighed, kan det ikke tabe energi ved at ændre fart. Det må gøre det på anden vis: ved at ændre farve. Konkret bliver lyset mere rødt, idet rødt lys har en lavere frekvens og dermed en lavere energi end blåt lys. Fænomenet kaldes rødforskydning, og da rødt lys "vibrerer" langsommere end blåt, betyder det, at dets "indre ur" roterer langsommere set fra toppen.



Figur 7. Tilstanden "frit fald" kan betegne den situation, at centrifugalkraft (masse gange acceleration, målt af astronauten) og tyngdekraft ophæver hinanden. Da alle legemer falder med samme acceleration i det tomme rum – uafhængigt af hvad de vejer – kan man opfatte det som "hvile", når man er i frit fald. Alle objekter i nærheden af en selv falder jo med samme fart og er derfor i hvile i forhold til en selv (når man fraregner de såkaldte tidevandskræfter, der normalt er små). Foto: NASA.

Men den korte illustration viser ikke direkte forbindelsen til tidens gang, så her kommer en mere grundig og teknisk forklaring. Lad os for nemheds skyld antage, at der udsendes en lysbølge fra bunden af elevatorstolen, mens den er i hvile, og at elevatoren derefter øger

sin hastighed opad – at øge sin hastighed er jo netop acceleration. Så når lysbølgerne udsendt fra gulvet i elevatorstolen når frem til loftet, bevæger loftet sig væk fra lyset. Her indtræder den såkaldte Dopplereffekt, der blev opdaget i 1842 af den østrigske fysiker Christian Doppler (1803-1853). Doppler-effekten optræder for både lys og lyd, men er mest kendt i hverdagen fra lydfænomener, fx ambulancens sirene, der har en højere tone, når den nærmer sig, end når den fjerner sig. Forklaringen er, at man – så længe man bevæger sig hen imod lydkilden – modtager flere bølgetoppe pr. tidsenhed, end man gør, når man fjerner sig. Simpelthen fordi man i første tilfælde bevæger sig hen imod bølgetoppene i et tempo, der i nogen grad er sammenligneligt med deres udbredelsesfart. Det er antallet af bølgetoppe pr. tidsenhed, der afgør lydens tonehøjde – hvis man i løbet af et sekund modtager flere bølgetoppe, vil tonen være højere. For lys findes der et lignende fænomen, der kaldes henholdsvis rødforskydning (når kilde og modtager fjerner sig fra hinanden, farven tenderer mod det røde) og blåforskydning (når kilde og modtager nærmer sig hinanden, farven tenderer mod det blå). Idet den røde farve har en længere bølgelængde end blå, svarer rød og blå til henholdsvis færre og flere bølgetoppe pr. tidsenhed i lysbølgen.

I elevatoren måler man altså en rødforskydning, idet modtageren – toppen af elevatoren – fjerner sig fra kilden. Og da en acceleration opad svarer til en tyngdekraft nedad, bliver lys altså rødforskydet, dvs. trukket i retning af det røde, når det sendes opad i et tyngdefelt. Der kommer altså færre bølgetoppe pr. sekund frem til toppen af Rundetårn – målt med et ur i toppen – end der bliver afsendt pr. sekund fra bunden (målt med et identisk ur placeret i bunden).



Figur 8. Ure går forskelligt afhængigt af, hvor de er placeret i tyngdefeltet. Det betyder, at et ur ved foden af Rundetårn faktisk vil gå en smule langsommere end et ur placeret på toppen. Illustration: Troels Marstrand.

Lad os forestille os Marie i bunden af Rundetårn, der sender 9.192.631.770 bølgetoppe fra atomet Cs-137 (som er definitionen på et sekund) afsted mod toppen.

Da Rundetårn er stabilt, bevæger den ene del sig ikke i forhold til den anden, så alle bølgetoppene bevæger sig med samme fart fra bunden til toppen, og det afsendte antal bølgetoppe må være lig det, der bliver modtaget. Der forsvinder ikke noget undervejs. Da der er færre bølgetoppe pr. sekund i toppen af Rundetårn end i bunden, må forklaringen være, at tiden mellem hver bølgetop er længere i toppen end i bunden. Så Albert i toppen modtager også 9.192.631.770 bølgetoppe, som han ved er Maries sekund, men i løbet af et tidsrum som på hans eget ur er længere, fx to sekunder. Maries ur er altså kun gået ét sekund i den tid, hans eget er gået to, og da begge ure benytter den samme definition af ét sekund er konklusionen uundgåelig: hendes ur går langsomt.

Det ur, der ligger lavt i tyngdefeltet – svarende til det, der er på gulvet i elevatorstolen – må derfor gå langsommere end det, der ligger højt. Denne effekt har faktisk den morsomme konsekvens, at Jordens centrum er et par år yngre end overfladen!

Den hidtil mest præcise måling af tyngdens påvirkning af ures gang er ikke – som man skulle tro – foretaget over stor højdeforskel, men ved at lave en uhyre præcis måling over højdeforskelle på op til en millimeter, hvor man tager hensyn til afgørende, kvantemekaniske effekter på atomer. Faktisk er én af deltagerne i dette eksperiment den amerikanske nobelpristager og energiminister, Steven Chu, der ovenikøbet fandt tid til at skrive videnskabelige artikler, mens han var en del af regeringen i USA.

Den relativistiske stifinder

Al denne snak om tid, bevægelse og tyngde kan måske forekomme uden praktisk betydning for almindelige mennesker. Men det er ingenlunde tilfældet. De fleste mennesker i Danmark har formentlig stiftet bekendtskab med en GPS-modtager. Men det er nok de færreste, der er klar over, at systemet ikke virker, hvis man ikke tager hensyn til relativitetsteorien.

Hvis GPS skal virke, er to ting nødvendige: For det første skal fundamentet for relativitetsteorien være korrekt, nemlig at lysets hastighed er uafhængig af afsenderens hastighed. For det andet skal hver af GPS-satellitterne bære et ur med en relativ nøjagtighed svarende til højst et sekund pr. 300.000 år. Men det er forholdsvis uproblematisk at fremstille i dag.

For at kunne beregne en korrekt position må man yderligere tage hensyn til de to ovenfor nævnte, afgørende relativistiske effekter, nemlig at et ur i bevægelse går langsomt set fra et andet ur i hvile, og at et ur i et stærkt tyngdefelt går langsomt set fra et andet ur i et svagere tyngdefelt. GPS-satellitternes fart er ca. fire kilometer pr. sekund, og det svarer til, at deres ur (set fra Jorden) går *for langsomt* med omkring 1 sekund pr. 300 år. Det er mere end rigeligt til, at det kan måles. Effekten af tyngdekraften er, at satellittens ur går *for hurtigt* set fra Jordens overflade (hvor tyngdekraften er stærkere end oppe ved satellitten), en korrektion, der er større med ca. en faktor fem sammenlignet med den forårsaget af farten. De to effekter trækker altså hver sin vej, men er ikke lige store, så netto-effekten er, at satellitternes ure går for hurtigt med cirka 4 sekunder pr. 300 år, dvs. knapt en halv milliarddel.

Inden opsendelsen af GPS-satellitterne var der en del diskussion om, hvorvidt man havde så stor tillid til Einsteins teorier, at man turde indarbejde korrektionerne i systemet. Det blev dog besluttet, at satellittens ur skulle kunne nedjusteres fra at svinge 10,23 millioner gange i sekundet, til at svinge 10,22999999543 millioner gange – en korrektion på knapt en halv milliarddel af frekvensen. Det lyder jo ikke af meget, men det relevante tal, man skal bruge for at omsætte denne justering til noget, der er relevant for brugeren, er den afstand, lyset tilbagelægger pr. døgn. Da der er 24 timer i døgnet, 60 minutter pr. time og 60 sekunder pr. minut, bevæger lyset sig med $299.792.458 \text{ m/s}$ en afstand på $24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} \cdot 299.792 \text{ km/s} = 25,9$ milliarder kilometer pr. døgn. Og så er knap en halv milliarddel pludselig meget: Omsat til en afstand ville sådanne fejl tilsammen løbe op i 11,6 kilometer pr. døgn, eller 8 meter pr. minut, hvilket fx ville gøre systemet ubrugeligt for taxachaufføren – for ikke at nævne militæret, eftersøgningstjenester, skibsnavigation osv.

Det var altså godt, at GPS-konstruktørerne havde tiltro til Einsteins teorier. Man kan derfor med lidt god vilje sige, at når man benytter GPS, er det med Einstein bag rattet. Og det er da en behagelig tanke.



Figur 9. Princippet i det Globale Positionerings-System (GPS). De tre satellitter giver modtagerens præcise position i deres signalers fælles skæringspunkt med Jordkloden. Illustration: Troels Marstrand.

Litteratur

- [1] Gamow, G. (1942). Mr. Tompkins i drømmeland. Gyldendals Uglebøger.
- [2] Uggerhøj, U. (2005). Tid den relative virkelighed. Aarhus Universitetsforlag.
- [3] Uggerhøj, U. (2014). Tid. I serien Tænkepauser, Aarhus Universitetsforlag.
- [4] http://www.denstoredanske.dk/It_teknik_og_naturvidenskab/Fysik/Relativitetsteori_og_gravitation/relativitetsteori



Ulrik Uggerhøj er eksperimentalfysiker og beskæftiger sig med den måde, partikler med meget høj energi opfører sig på, når de gennemtrænger forskellige materialer samt intense elektriske og magnetiske felter. Han underviser bl.a. i relativitetsteori for studerende på første år på Aarhus Universitet. Foto: Lars Kruse.

Generel relativitet: Træk af udviklingen 1920-1970

Af Helge Kragh, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Med Einsteins generelle relativitetsteori fra 1915 startede et nyt kapitel i fysikkens historie. Men allerede 10 år senere forekom det, at teorien befandt sig i et dødvande. Først i 1950'erne oplevede den noget slumrende teori en genfødsel, og siden da er dens betydning stedse vokset.

I december-nummeret af KVANT fra 2014 beskrev jeg, hvordan Einstein nåede frem til sin almene eller generelle relativitetsteori [1]. Herværende artikel er en slags fortsættelse, idet den giver en episodisk oversigt over dele af teoriens udvikling og betydning indtil omkring 1970, da den havde opnået den paradigmatisk status, den stadig har.

En tvivlsom bekræftelse

Den generelle relativitetsteori var baseret på ækvivalensprincippet, der allerede i 1911 førte Einstein til at forudsige en gravitationel forårsaget formindskelse af en spektrallinjes frekvens ν . Hvis φ_1 er gravitationspotentialet for det sted, hvor lyset udsendes, og φ_2 den samme størrelse for stedet, hvor det modtages, viste Einstein, at rødforskydningen kan udtrykkes ved den simple formel

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{c^2} \quad (1)$$

Her er c lysets hastighed. Einstein opfattede en test af formelen som et "crucialt eksperiment" i den forstand, at hvis målinger klart stred imod forudsigelsen, måtte relativitetsteorien opgives. I slutningen af 1919 skrev han til Arthur Eddington: "Jeg er overbevist om, at spektrallinjernes rødforskydning er en aldeles uundgåelig konsekvens af relativitetsteorien. Hvis det skulle vise sig, at denne effekt ikke findes i naturen, må hele teorien skrottes."



Figur 1. Einstein ved Mount Wilson-observatoriets 100" kikkert i 1931. I midten er Hubble og til højre Adams (California Institute of Technology).

Eddington havde netop bekræftet en anden af Einsteins forudsigelser, nemlig lysets afbøjning omkring Solen, og i 1924 foreslog han, at den hvide dværgstjerne Sirius B var velegnet til at teste den gravitationelle rødforskydning. Sirius B var først blevet observeret i omløb om sin langt større og mere lysstærke partner Sirius A i 1862, og ifølge Eddington var der tale om et himmellegeme med ekstrem høj densitet, måske op

til 70 kg/cm³. Sirius B måtte derfor have et meget stærkt gravitationsfelt, hvis rødforskydning (på formen $c \cdot \Delta\nu/\nu$) han estimerede til 20-25 km/s. På opfordring fra Eddington undersøgte den ansete astronom Walter Adams fra Mount Wilson-observatoriet spektret fra Sirius B (se figur 1). Målingerne var vanskelige, da det var svært at skelne linjerne fra dværgstjernen fra dem, der stammede fra Sirius A, men i 1925 nåede Adams frem til en værdi på ca. 21 km/s, altså i nydelig overensstemmelse med den teoretiske værdi. Eddington var henrykt, og i sit klassiske værk *The Internal Constitution of the Stars* fra 1926 skrev han:

Professor Adams har slået to fluer med et smæk. Han har testet Einsteins generelle relativitetsteori på en ny måde og har vist ikke blot muligheden af stof, der er 2000 gange tættere end platin, men at det faktisk eksisterer i stjernernes verden.

Eddingtons optimisme var tilsyneladende velbegrunder, for to år senere blev Adams' resultat bekræftet af Joseph Moore ved Lick-observatoriet, der rapporterede en rødforskydning på 21 ± 5 km/s. En teoretisk forudsigelse, der stemmer med to uafhængige observationer – hvad mere kan man ønske sig?

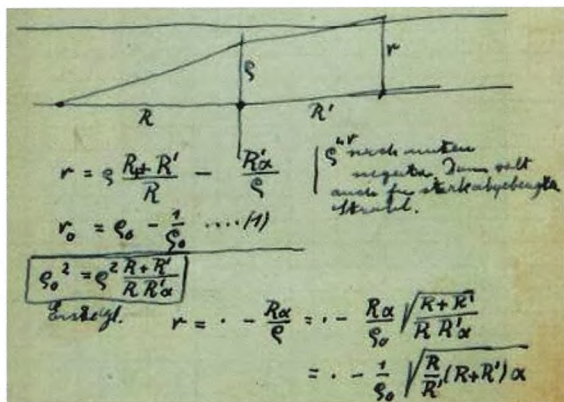
Men bekræftelsen var aldeles forkert, hvilket skyldtes fejl i såvel målingerne (især optisk forurening fra Sirius A) som i de data, Eddington byggede sin teori på. Mens Eddington vurderede dværgstjernen til at have en radius på 19.600 km og masse på 0,85 solmasser, ved vi i dag, at de korrekte værdier er 5840 km og 0,98 solmasser. De to typer af fejl ophævede hinanden. Den moderne observationsværdi for rødforskydningen fra Sirius B er $80,42 \pm 4,83$ km/s og helt i overensstemmelse med Einsteins teori. Først 1971 var man i stand til at måle rødforskydningen pålideligt, nemlig til 89 ± 16 km/s, men da var den endelige bekræftelse af den einsteinske effekt ikke længere af stor betydning. Den var nemlig allerede blevet bekræftet i laboratorieeksperimenter (se nedenfor). Hele historien om Sirius B og den gravitationelle rødforskydning er instruktiv som et videnskabsfilosofisk eksempel på det komplekse forhold mellem teori og målinger [2].

Gravitationsbølger og linseeffekt

Einsteins teori havde tre klassiske forudsigelser, hvoraf den tredje var forklaringen af Merkurs perihelbevægelse [1]. Men der var flere andre konsekvenser, hvoraf nogle i princippet – og måske endda i praksis – kunne testes via astronomiske observationer. Einstein indså i 1916, at der for svage gravitationsfelter findes løsninger svarende til udbredelsen af bølger med lysets hastighed,

men også at sådanne bølger måtte være af en ganske anden type end de elektromagnetiske bølger udsendt af accelererede elektriske ladninger. To år senere viste han, at selv om der ikke fandtes "gravitationelle dipoler", så var tilsvarende kvadrupoler mulige. Einstein var dog usikker på, om gravitationsbølger faktisk fandtes, og de få fysikere, der interesserede sig for spørgsmålet, delte hans skepsis. En af dem var Eddington, der i 1922 skrev, at bølgerne nok snarere udbredte sig "med tankens fart."

Først i 1936, efter at have bosat sig i Princeton i USA, vendte Einstein tilbage til det komplicerede emne. Med sin assistent Nathan Rosen – kendt fra EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) paradokset – skrev han til *Physical Review* en artikel med titlen "Do Gravitational Waves Exist?" De to forfattere var tilbøjelige til at svare nej. I øvrigt udkom artiklen aldrig i tidsskriftet, da Einstein blev fornærmet over, at den blev kritisk bedømt af en referent. I stedet udkom den i 1937 under en anden titel i det langt mindre kendte *Journal of the Franklin Institute*. Det matematisk komplekse spørgsmål om gravitationsbølger påkaldte sig først stor interesse efter Einsteins død i 1955. Og muligheden for at påvise disse umådeligt svage bølger hører til en endnu senere tid. I dag er de endnu ikke påvist, men fysikere er sikre på, at de eksisterer.



Figur 2. Udsnit af Einsteins noter fra 1912 med formler for den gravitationelle linseffekt.

Omkring samme tid som Einstein sammen med Rosen undersøgte spørgsmålet om gravitationsbølger, skrev han i *Science* en ganske kort artikel om, hvad der i dag kendes som den gravitationelle linseffekt, dvs. at en fjern lyskilde via gravitationel afbøjning af lyset viser sig som to eller flere billeder [3]. Faktisk havde Einstein så tidligt som 1912 indset denne konsekvens af relativitetsteorien (eller rettere af ækvivalensprincippet), men da uden at publicere sit resultat (se figur 2). Ja, han synes at have glemt det, for i sin artikel fra 1936 genopfandt han sine gamle argumenter. Einstein, der forestillede sig de himmelske linser som massive stjerner, tvivlede på, at effekten nogensinde ville blive observeret, hvorefter han mistede interessen for den. Hans lille artikel var dog ikke uden virkning. Den foranledigede astronomen Fritz Zwicky til at undersøge linseffekten nærmere og i 1937 at foreslå, at galakser var langt bedre kandidater end stjerner. Som tilfældet var med andre af Einsteins ideer, blev ideen om gravitationslinser først bekræftet efter hans død. Den første

linse blev påvist i 1979 – hundredåret for Einsteins fødsel – da astronomer viste, at et system af to kvasarer adskilt 6" i virkeligheden var et dobbelt billede af den samme kvasar.

Gravitationsbølger og -linser var hypotetiske fænomener, der udsprang af den generelle relativitetsteori og potentielt var af astrofysisk interesse – men kun potentielt. Til samme kategori hører de "sorte huller", der i en matematisk forstand går tilbage til 1916, da Karl Schwarzschild fandt løsninger til Einsteins feltligninger for en stationær og kuglesymmetrisk masse. Et vigtigt arbejde af J. Robert Oppenheimer og Hartland Snyder fra 1939 betragtes i dag som et gennembrud i forståelsen af sorte huller som resultatet af en imploderende stjerne, men i datiden vakte det ikke videre interesse. Samme år konkluderede Einstein, at et kollaps til en singularitet ganske vist var en matematisk mulighed, men at "en 'Schwarzschild singularitet' eksisterer ikke i den fysiske verden." Både datidens og eftertidens fysikere ignorerede dog Einsteins argumenter, der i dag vides at være forkerte. Indtil hans død i 1955 blev artiklen i *Annals of Mathematics* blot citeret to gange.

Relativistisk kosmologi

Den generelle relativitetsteoris største betydning i mellemkrigstiden var, at den skabte grundlaget for en helt ny og frugtbar teori for Universet i dets helhed. I 1917 formulerede Einstein sine kosmologiske feltligninger på formen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R - \lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu} \quad (2)$$

De adskilte sig fra de oprindelige ligninger ved leddet $\lambda g_{\mu\nu}$, hvis væsentligste funktion var at sørge for et statisk, positivt krummet og derfor endeligt univers. Den nye konstant λ blev snart kendt som den "kosmologiske konstant."

Opdagelsen af Universets ekspansion medførte ikke en krise for den relativistiske kosmologi, men tværtimod en styrkelse af den, da det viste sig, at ekspanderende og andre dynamiske modeller var indeholdt i feltligningerne. Den belgiske fysiker Georges Lemaître havde forudsagt det ekspanderende univers to år før, det fik observationel støtte i form af Edwin Hubbles relation mellem galaksernes afstande og deres rødforskydning. Efter 1930 besluttede Einstein og flertallet af de få fysikere og astronomer, der bidrog til kosmologien, at den kosmologiske konstant var overflødig, dvs. $\lambda = 0$. Andre holdt dog fast ved den, bl.a. Eddington og Lemaître.

Kosmologien i perioden 1920-1960 er et alt for omfattende emne til at kunne behandles her. Det afgørende er, at dette forskningsområde var en af de få vedvarende succeser – måske den eneste – for den generelle relativitetsteori. I en oversigtsartikel fra 1957 vurderede den ledende teoretiker Valentine Bargmann, der i en periode var assistent for Einstein, situationen således: "Kosmologien er det område, hvor generel relativitetsteori har haft langt den mest frugtbare og stimulerende indflydelse. ... Hvis vi ser bort fra kosmologien, har generel relativitetsteori ikke haft nær samme betydning for fysikken som den specielle relativitetsteori."

Selv om der i perioden var flere alternative teorier for Universet, havde relativistisk kosmologi status som en bredt anerkendt standardteori. Et paradigme, som man kan tale om i dag, var der dog langt fra tale om. På trods af den autoritet, generel relativitetsteori havde i kosmologien, var der ikke tale om, at den kosmologiske videnskab var en test af Einsteins teori på samme måde, som fx påvisningen af lysets gravitationelle afbøjning om Solen var det. Indtil 1960'erne var der ingen observationer, der utvetydigt kunne skelne mellem relativistisk kosmologi og alternative teorier som fx steady-state-teorien.

Desuden var området ganske lille og afsondret fra, hvad det store flertal af fysikere og astronomer beskæftigede sig med. Data fra *Physics Abstracts* taler deres eget sprog: I starten af 1950'erne omfattede den fysiske forskningslitteratur omkring 10.000 publikationer per år, hvoraf blot ca. 30 hørte til generel relativitetsteori og et tilsvarende antal til kosmologi.

En teori på sidelinjen

I en 30-årig periode havde generel relativitetsteori lavstatus i fysikken og førte en skyggetilværelse i astronomien. Einsteins teori blev ganske vist beundret for sin matematiske skønhed og sublime tankeverden, men de færreste fysikere fandt det nødvendigt at sætte sig ind i dens matematiske og begrebsmæssige mysterier. De havde ikke brug for teorien, der af mange blev opfattet som irrelevant matematik snarere end egentlig fysik, der kunne testes i laboratoriet. Der var en verden til forskel mellem den prestigefyldte kvantemekanik og Einsteins teori for tyngdekraften. Begge teorier var fundamentale, men det var også det eneste, de havde til fælles. Så sent som 1961 undrede George Gamow sig over misforholdet mellem de to teorier:

Mens hundreder, ja tusinder af videnskabsmænd studerer kvantemekanikkens forskellige grene og udnytter den i masser af eksperimentelle undersøgelser, er det kun ganske få, der helliger deres tid og interesse til studiet af tyngdekraftens videre udvikling... Fuldførte Einsteins geni alt, hvad der i vor tid kan gøres ved tyngdekraften, og berøvede derved en generation håbet om videre udvikling?

Gamow betegnede den generelle relativitetsteori som "et videnskabernes Taj Mahal, der kun har lidt om overhovedet noget at gøre med den hurtige udvikling af fysikkens andre grene." De ret få fysikere, der alligevel undersøgte og udviklede Einsteins teori, var afsondret fra fysikersamfundet i både en videnskabelig og social henseende. Da den polske fysiker Leopold Infeld kom til Princeton for at arbejde med Einstein, bemærkede han at antallet af fysikere, der var interesseret i relativitetsteorien, kunne tælles på én hånd.

Situationen ændredes ikke efter 2. Verdenskrig, hvor fysikken i især USA oplevede en eksplosiv vækst. Relativitets- og gravitationsfysik var dog ikke en del af væksten og glimrede ved sit fravær i undervisningen ved selv de bedste europæiske og amerikanske universiteter. Lærebøger var der næsten ingen af. I Princeton kunne studerende ganske vist følge et kursus i generel

relativitetsteori, men indtil 1954, da John Wheeler overtog det, var kurset henlagt til matematik og ikke fysik. Først i 1967 blev et kursus i relativitetsteori tilbudt de fysikstuderende ved Harvard University. Robert Dicke var blandt de få fysikere, der i 1950'erne tog springet fra kvantefysik til gravitationsfysik. Som specialestuderende ved Princeton University i starten af 1940'erne fik han af sin professor at vide, "at jeg ikke skulle bekymre mig om Einsteins generelle relativitetsteori." Professorens argument var, at "den gravitationelle vekselvirkning var alt for svag til at have nogen betydning inden i atomet, der var hjemstedet for fysikkens store mysterier."

Relativitetsteoriens isolation fra den fysiske frontforskning, og den skepsis som mange fysikere nærede med hensyn til teorien, illustreres af en episode fra midten af 1950'erne. *Physical Review* var da verdens ubestridt vigtigste tidsskrift for fysik og dets indhold nærmest definerede, hvad der var ny og spændende forskning i fysik. Dets chefredaktør var den prominente hollandsk-amerikanske fysiker Samuel Goudsmit, der i 1925 sammen med George Uhlenbeck havde opdaget elektronens spin. Goudsmit overvejede seriøst at forbyde artikler i *Physical Review*, der vedrørte "gravitation eller andre fundamentale teorier", hvilket i praksis betød generel relativitetsteori! Det var jo et emne, der hørte hjemme i den matematiske litteratur og ikke i den fysiske. Når det påtænkte forbud ikke blev til noget, skyldtes det hovedsageligt indvendinger og energisk lobbyarbejde fra Wheeler, der netop på den tid var begyndt at koncentrere sig om udviklingen af Einsteins teori.

Gravitational Research Foundation

Goudsmit ville bitterligt have fortrudt, hvis hans planlagte forbud mod generel relativitetsteori i *Physical Review* var blevet iværksat, for i løbet af 1960'erne skete en dramatisk ændring i teoriens status og fysikernes interesse for den. Den genoplivede interesse for gravitationsfysik havde mange rødder, hvoraf en er mindre kendt og mere bizar end andre [4].



Figur 3. Mindesten for Babson og GRF ved Gordon College, Massachusetts. Stenen minder de studerende om "de velsignelser der vil komme, når videnskaben finder ud af, hvad tyngdekraften er, hvordan den virker og hvordan den kan kontrolleres." (Wikimedia Commons).

Den velhavende og excentriske amerikanske forretningsmand Roger Babson (se figur 3) brød sig slet ikke

om tyngdekraften, der for ham at se var menneskenes fjende nr. 1 og ansvarlig for drukneulykker, nedstyrtning af fly og mange andre kalamiteter. Så hvorfor ikke gøre noget ved det? Det oprindelige formål med den *Gravitational Research Foundation* (GRF) han stiftede i 1948, var at udforske tyngdekraften med henblik på at tæmme den – gøre den til menneskehedens ven i stedet for fjende. Blandt de forskningsprojekter GRF rundhåndet sponserede, var udvikling af materialer, der kunne absorbere tyngdekraften og teknologier til at skabe en frastødende “anti-gravitation”. For at stimulere interessen for den slags uortodokse gravitationsstudier organiserede GRF konferencer og indstiftede en årlig pris til det bedste essay om tyngdekraften. Det lyder unægteligt som fantasi og pseudovidenskab, hvad det da også var.

Men kun for en stund, for efter nogle år fik GRF en mere videnskabelig drejning og blev stueren, ja ligefrem eftertragtet blandt fysikere og astronomer med en interesse i gravitationsstudier. I 1954 vandt Bryce DeWitt prisen for et essay, hvor han slog fast, at gravitationsfysik betød generel relativitetsteori og at man kunne glemme alt om anti-gravitation og gravitationsisolatorer. Blandt de tidlige vindere af GRF-prisen var kapaciteter som Wheeler, Thomas Gold, Roger Penrose, Hermann Bondi og Stephen Hawking. I 1950'erne var GRF en mindre men ikke uvæsentlig faktor i den voksende interesse, der snart gjorde generel relativitetsteori til et af fysikkens varme forskningsområder. Prisen fra GRF, der økonomisk set er beskeden (blot \$4.000), har stadig stor prestige. I 2015 gik den til den hollandske fysiker Gerard 't Hooft, som i 1999 blev tildelt Nobelprisen for sine vigtige bidrag til kvantefeltteorien.

Renæssance

Hvad den canadisk-amerikanske veteran i gravitationsfysik Clifford Will i 1986 kaldte “den generelle relativitets renæssance” gav sig udtryk i en række vigtige konferencer og institutionelle tiltag. Anledningen for den første store conference, der fandt sted i Bern i 1955, var 50-året for den specielle relativitetsteori og uofficielt også Einsteins død tidligere på året. Blandt deltagerne var Peter Bergmann, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan og Felix Pirani. Mens Bern-konferencen var domineret af europæiske fysikere, var en videnskabeligt set vigtigere conference om gravitationsfysik i Chapel Hill, North Carolina, primært en workshop for amerikanske fysikere. Initiativet til konferencen, der fandt sted i 1957, kom fra Bryce og Cécile DeWitt med indirekte støtte fra GRF. Blandt deltagerne var ikke blot eksperter i generel relativitet som Wheeler, Bondi og Dicke, men også kvantefysikere som Richard Feynman. De fleste af bidragene blev publiceret i et særnummer af *Reviews of Modern Physics*, der i dag er en vigtig kilde til den relativistiske renæssances historie [5].

Andre vigtige konferencer fra samme periode fandt sted i Royamont uden for Paris (1959), Warszawa (1962) og Dallas (1963). Som resultat af mødet i Royamont blev der oprettet en *International Commission on General Relativity and Gravitation* (ICGRG) og senere et

tilsvarende selskab med omkring 200 medlemmer. Af særlig betydning var det prestigefyldte Solvaymøde (se figur 4), der for 11. gang blev afholdt i Bruxelles i 1958. For første gang i Solvayinstitutionens historie var et møde dedikeret til astrofysik, gravitation og kosmologi. Mødet var forberedt af bl.a. Lemaître, Pauli, Oppenheimer og Christian Møller, der alle var overbeviste om, at Einsteins gravitationsteori stod over for en gylden fremtid. Selv om den generelle relativitetsteori stod højt på dagsordenen i Bruxelles, var der også plads til steady-state teorien, der på mødet blev forsvaret af Gold, Bondi og Fred Hoyle.



Figur 4. Deltagere i Solvaymødet fra 1958. På første række ses bl.a. G. Lemaître, W. Pauli, R. Oppenheimer og C. Møller, og på anden række O. Klein, F. Hoyle, W. Baade, J. Wheeler, H. Bondi og L. Rosenfeld.

Konferencerne blev fulgt op af et væld af videnskabelige publikationer, der igen skabte et behov for et specialiseret tidsskrift, der henvendte sig til det nye og blomstrende forskningsområde. Resultatet blev *General Relativity and Gravitation*, der på initiativ af ICGRG blev søsat i 1970 og hurtigt udviklede sig til det foretrukne tidsskrift for eksperter i området. Også på universiteterne slog renæssancen igennem i form af nye kurser i gravitationsfysik og særskilte forskningsafdelinger, der fokuserede på emnet. Behovet for undervisningsmateriale resulterede i en række nye lærebøger, hvor den massive *Gravitation* fra 1973, skrevet af Wheeler, Charles Misner og Kip Thorne, satte nye standarder for både omfang og indhold. Kontrasten til tidligere lærebøger, som fx Møllers *The Theory of Relativity* fra 1952, er slående.

Den vigtigste grund til renæssancen var, at Einsteins abstrakte teori nu endeligt blev forbundet med eksperimentel fysik og astrofysiske observationer [6]. Men nye teorier spillede også en rolle, især forsøg på alternative gravitationsteorier der gik ud over Einsteins kanoniske feltligninger fra 1915. Den vigtigste af disse var en “skalar-tensor-teori” foreslået af Carl Brans og Dicke i 1961, der dog i det væsentlige allerede var formuleret af Jordan nogle år tidligere. Brans-Dicke-teorien var i 1960'erne og 1970'erne et seriøst alternativ til Einsteins teori og tiltrak sig stor opmærksomhed, fordi dens astronomiske og geofysiske forudsigelser kunne testes. For eksempel gav den for Merkurs anomale præcession et lidt anderledes resultat end Einsteins. Resultatet af mange års eksperimenter og målinger var dog, at Einsteins teori var bedre end både Brans-Dicke-teorien og andre alternativer.

Eksperimenter og observationer

For fysikere i 1930'erne ville begrebet “eksperimentel generel relativitet” knap nok have givet nogen mening.



Figur 5. Jefferson Physics Laboratory ved Harvard University, hvor Pound og Rebka udførte deres eksperiment i den tårnlignende bygning til venstre.

Hvordan skulle man dog kunne teste Einsteins teori i laboratoriet? Det var netop hvad Robert Pound og hans studerende Glen Rebka fra Harvard University (se figur 5) gjorde i 1960, da de målte “fotoners relative vægt” ved at sammenligne frekvensen af gammastråler over en forskel i Jordens gravitationsfelt på blot $h = 22,6$ meter [7]:

$$\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_1} = \frac{2hg}{c^2} \approx 4,9 \cdot 10^{-15}. \quad (3)$$

Den relative frekvensændring er blot af størrelsesordenen 10^{-15} , hvorfor det kræver fotoner med meget høj energi til at påvise ændringen. Pound og Rebka brugte 14keV-fotoner fra gammakilden Fe-57 og målte frekvensen ved at anvende den nye Mössbauereffekt, der netop var blevet opdaget af den tyske fysiker Rudolf Mössbauer (som i 1961 blev tildelt Nobelprisen for sin opdagelse). Resultatet af de to fysikers omhyggelige målinger var en frekvensændring $\Delta\nu_e$, der forholdt sig til den teoretisk forudsagte $\Delta\nu_t$ som

$$\Delta\nu_e/\Delta\nu_t = 1,05 \pm 0,1 \quad (4)$$

Allerede tre år senere var denne 10 % usikkerhed blevet reduceret til 1 % og i dag er den blot 0,01 %. Pound-Rebka-eksperimentet har en klassisk status i eksperimentalfysikkens historie, men dets betydning for den generelle relativitetsteori var begrænset, da Einsteins forudsigelse for længst var anerkendt. Alligevel er det bemærkelsesværdigt, at man i 1960 i et relativt simpelt laboratorieeksperiment kunne verificere den effekt, der havde voldt Eddington, Adams og deres samtidige så store problemer.

Langt vigtigere end Pound-Rebka-eksperimentet var de nye astronomiske opdagelser, der for alvor gjorde Einsteins gravitationsteori til et uundværligt redskab i astrofysikken. I 1963 opdagede Maarten Schmidt og andre astronomer en helt ny slags “radiostjerner”, der snart blev kendt som kvasarer og hvis enorme udstråling af energi det var vanskeligt at forklare. Ifølge Hoyle og William Fowler skyldtes energien ikke kernereaktioner, men snarere et gravitationelt kollaps af en kæmpestjerne. Kunne der være tale om de samme objekter, som Oppenheimer havde studeret i slutningen af 1930’erne, altså sorte huller?

Naturen af de mystiske kvasarer var et hovedtema på den nævnte konference i Dallas i slutningen af 1963, der er kendt som det første “Texas Symposium om Relativistisk Astrofysik.” Selve termen “relativistisk astrofysik” stammer fra dette symposium, hvor fysikere og astronomer enedes om, at generel relativitet var nøglen til at forstå kvasarer og flere andre ekstragalaktiske fænomener. I en tale ved symposiet udtrykte Gold astrofysikernes nye tillid til den generelle relativitetsteori, der ikke længere blot var “et storslået kulturelt ornament”, men faktisk havde vist sig nyttig:

Vi er alle tilfredse: Relativisterne fordi de bliver værdsat og pludseligt anses som eksperter i et felt, de knap nok var klar over fandtes; og astrofysikerne fordi de har udvidet deres imperium ved at annektere den generelle relativitetsteori. Det er alt sammen meget godt, så lad os håbe, at det også er sandt. Sikken en skam det ville være, hvis vi igen måtte afvise relativisterne.

Men det skete ikke. Tværtimod, relativistisk astrofysik var kommet for at blive, og med Jocelyn Bells opdagelse af pulsarer i 1967 blev forbindelsen mellem astrofysik og generel relativitetsteori endnu tættere. Mens omkring 300 fysikere og astronomer var samlet ved det første Texas symposium, tiltrak det niende symposium i 1974 mere end 800 deltagere.

Ønsker man yderligere indsigt i den massive indflydelse, Einsteins 100 år gamle teori har på den nutidige fysik og astronomi, kan man få den i septembernummeret af *Scientific American*, der indeholder en imponerende visuel og interaktiv dokumentation baseret på bibliometriske data.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2014), Einsteins odysse: Fra speciel til almen relativitetsteori, KVANT **25** nr. 4, 20-25 (2014).
- [2] N. Hetherington (1988), *Science and Objectivity*, Ames: Iowa State University Press.
- [3] T. Sauer (2010), A brief history of gravitational lensing, http://www.einstein-online.info/spotlights/grav_lensing_history
- [4] Gravity Research Foundation, <http://www.gravityresearchfoundation.org>
- [5] The Role of Gravitation in Physics. Report from the 1957 Chapel Hill Conference, <http://edition-open-access.de/sources/5/index.html>
- [6] C. Will (1993), *Was Einstein Right?*, New York: Basic Books.
- [7] R.V. Pound, G.A. Rebka, Apparent weight of photons, *Phys. Rev. Lett.* **4**, 337-341, (1960).

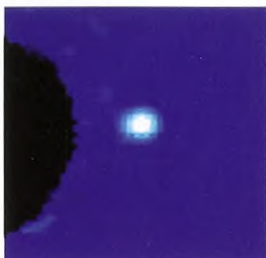


Helge Kragh er professor i videnskabshistorie ved Niels Bohr Institutet, og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie.

Af Sven Munk, KVANT

Exoplanet i bevægelse

ASTRONOMI. Med "Gemini Planetary Imagers"-udstyret ved det 8 m store Gemini-syd-teleskop i Chile, er det lykkedes at lave en serie optagelser af en exoplanet i bevægelse. Objektet var Beta Pictoris B, som er en exoplanet. Stjernesystemet befinder sig 60 lysår borte og det tilhørende planetsystem anses for at være under dannelse.



Udover at kunne bestemme exoplanetens omløbstid ret præcist, forventer forskerne at kunne undersøge vekselvirkningen med stoffet i resten af materiskiven omkring stjernen. Den sorte skygge til venstre i billedet markerer undertrykkelse af det kraftige lys fra stjernen.

Den her omtalte exoplanet blev opdaget i 2008 og den har vist sig at være en gaskæmpe med en masse, som er 10-12 gange større end Jupiters. Omløbstiden om stjernen er 22 år, hvilket passer med en afstand som mellem Solen og Saturn.

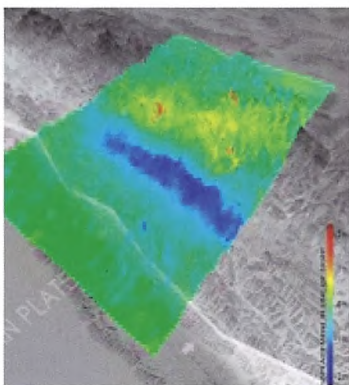
Billedet viser området omkring HOPS 383, som det kunne registreres i 2004 og 2008. Her er tale om optagelser af IR-stråling, og der er ingen tvivl om, at noget er sket. Der er også fundet optagelser fra 2012, som viser noget lignende som i 2008. Forskerne finder det årelange forløb bemærkelsesværdigt – noget der ikke er set før. Måske er en meget stor, massefyldt gas/støvsky blevet indfanget af gravitationsfeltet fra HOPS 383.

Kilder: M.A. Millar-Blanchaer et al., β Pictoris' inner disk in polarized light and new orbital parameters for β Pictoris b, *Astrophysical Journal* 2015, <http://arxiv.org/abs/1508.04787> ; Gemini Observatory, <http://www.gemini.edu/>; Forfatteren, Max Millar-Blanchaers hjemmeside, <http://www.dunlap.utoronto.ca/dunlap-people/max-millar-blanchaer/>.

Himalaya-jordskælv

GEOLOGI. Et større jordskælv ramte Himalaya den 25. april 2015. Tv-reportagerne viste ødelagte bygninger, uforenelige veje og lignende, men fælles for disse beretninger er, at de fortæller lokale historier. Billedet herunder, frembragt med ESA's radarsatellit "Sentinel-1", giver som supplement et nærmest globalt perspektiv på jordskælvets virkning.

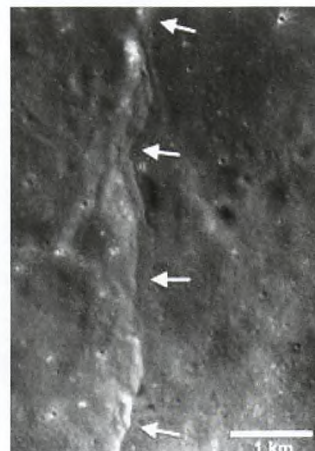
Til højre i billedet ses en farveskala, som angiver, hvor meget landskabet har flyttet sig. Afstanden er bestemt med sigtelinjer fra satellitten til punkter på jordoverfladen. Skalaen dækker forskydning fra +2 m (rød) til -2 m (blå). Da sigtelinjerne ikke er lodrette, må det antages, at de vertikale forskydninger er større, end skalaen antyder.



Kilde: DLR/ESA.

Jorden påvirker Månens overflade

ASTRONOMI. Det, der kunne betegnes som "aldrig-srynker", er en meget udbredt landskabsform på Månen. Den amerikanske sonde "Lunar Reconnaissance Orbiter" har registreret mere end 3200 af den slags. Folderne er typisk op til 10 km lange og sjældent mere end 100 m i højden. Forskerne mener at kunne fastslå, at disse folder geologisk set er unge, og fordelingen er ikke uden en vis orden. Det observerede mønster forklarer forskerne med "tidevandskræfterne" fra Jorden.



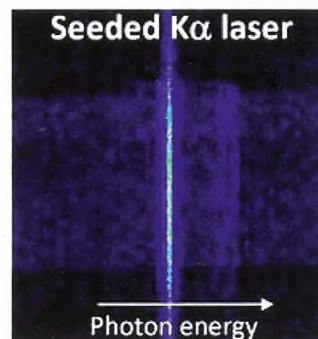
Foldernes pæne udseende, dog med indslagskratere, får forskerne til at bedømme foldernes alder til under 50 mio. år. Måske dannes de stadig, fordi Månens indre bliver koldere og dermed får Månen til at krympe.

Kilder: T.R. Watters et al., Global thrust faulting on the Moon and the influence of tidal stresses, *Geology* 2015; Lunar Reconnaissance Orbiter, NASA.

Røntgenlaser baseret på kobber

FYSIK. Det er næsten altid af interesse at have lyskilder med stor spektral renhed. Dette gælder også, når "lyset" er røntgenstråling med en bølgelængde på 0,15 nm. Lasere er kendt for at kunne frembringe monokromatisk lys. Overvejelser af den art har ført til udviklingen af en kobber-laser.

For at fremkalde en laservirkning, skal der fx med pumpe-lys etableres en inversion, hvor antallet af elektroner i det høje energiniveau overstiger antallet i det lave energiniveau. Lasermediet er altså kobber, og "pumpelyset" kommer som røntgenstråling fra en fri-elektron-laser (FEL).



En fri-elektron-laser er konstrueret sådan, at en elektronstråle sendes forbi en række magneter, der er placeret, så elektronerne foretager en slangebevægelse. Herved kan der frembringes en forholdsvis bredbåndet røntgenstråling (pumpelys). Denne rettes mod et kobberfolie med en tykkelse på 20 μ m. Fotonenergien er tilstrækkelig stor til at løfte de inderste elektroner i kobberatomerne op til et meget højere energiniveau og således skabe inversion. Laservirkningen initieres ved at sende pulserende røntgenstråling med en fotonenergi, som netop passer til forskellen mellem højeste og laveste energiniveau i kobberatomerne. Billedet ovenfor illustrerer det spektrum, som kobberlaseren har frembragt. Forsøgene er udført på det japanske forskningscenter RIKEN.

Kilder: Hitoki Yoneda et al., Atomic inner-shell laser at 1.5 Ångström wavelength pumped by an X-ray free-electron laser, *Nature* 2015, <http://dx.doi.org/10.1038/nature14894>; RIKEN Spring-8-Center, Hyogo, Japan, <http://www.riken.jp/en/research/labs/rsc/>.

Superleder ved $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller 203 K

KRYOTEKNIK. Drømmen om en superleder, der virker ved stuetemperatur, eksisterer fortsat. Det er nu lykkedes forskere at komme dette mål 39 grader nærmere i forhold til den hidtidige rekord, som indehaves af specielle kobberoxider. Stoffet, som har denne egenskab, er en svovlhydrid-forbindelse. I stedet for at vælge et metal, startede forskerne med svovlbrinte (der lugter fælt)



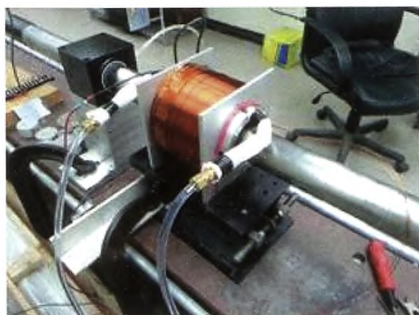
formodentlig fordi det er demonstreret, at brint udsat for et enormt tryk får metalliske egenskaber. Svovlbrinten blev anbragt i en diamant-tryk-celle, hvor der kan frembringes et tryk på 200 GPa, svarende til ca. 2 mio. atm. Ved 96 GPa blev svovlbrinten metallisk. Ved $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ gik stoffet over i en superledende tilstand. Dette sker også hvis trykket er lavere end 200 GPa. Forskerne tror ikke, at det er svovlbrinten ($1\text{S}+2\text{H}$) som molekyler, som blev superledende. De vurderer, at en svovlhydrid ($1\text{S}+3\text{H}$) er forklaringen.

Kilder: A.P. Drozdov et al., Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system, *Nature* 2015, <http://dx.doi.org/10.1038/nature14964>

Kraftige EM-pulser

FYSIK. Begynder nogen at tale om elektrisk effekt i megawatt, falder tanken naturligt på noget med kraftværker. Indsnævrer man emnet til elektromagnetiske pulser, behøver udstyret ikke at have så store fysiske dimensioner. Mange radaranlæg frembringer pulser med en spidseffekt på et par MW. Amerikanske forskere har udviklet en generator, som omformer kraftige mekaniske stød til strømpulser, som måles i hundreder af kA.

Kernen i den nye generator er en stang af jern, som er doteret med grundstoffet gallium. Denne legering optræder under navnet galfenol. Materialet kan klassificeres som et magnetoelastisk materiale, hvilket betyder, at tryk påvirker de magnetiske egenskaber. Man kan også udtrykke det sådan, at mekanisk energi omformes til magnetisk energi – og omvendt.

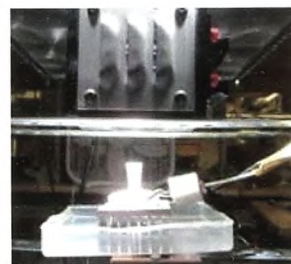


I de udførte forsøg har man benyttet et pneumatisk system, som kunne frembringe tryk på 275 MPa med en frekvens på 30 Hz. Forskerne anfører, at systemet er robust nok til at klare en sådan påvirkning. Omkring galfenolstangen er der, som billedet viser, anbragt en spole, hvori der induceres en spænding, når magnetfeltet forandres. Når den elektriske modstand i spolen er meget lille, kan den afgivne strøm blive meget stor.

Kilder: J.P. Domann et al., High strain-rate magnetoelasticity in Galfenol, *J. of Appl. Phys.* 2015, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4930891>; John Domann, University of California, http://aml.seas.ucla.edu/people/domann_john.htm.

Lagring af solenergi

ELEKTROKEMI. Nogle bruger betegnelsen syntesegas (eller "syngas") for en blanding af brint og kulmonoxid. Denne gas har stor betydning for den kemiske industri til fremstilling af fx methanol og ammoniak. Produktion af gassen er i stor udstrækning baseret på de "sorte" energikilder, kul og naturgas.



Processen ledsages af en biproduktion i form af kuldioxid i store mængder. Dette har inspireret forskere til at overveje, om gassen ikke mere direkte kunne dannes med sollys. At dette nok er muligt, afslører den videnskabelige artikels første ord, nemlig SUNGAS. Konverteringen af solenergi til kemisk energi har en større virkningsgrad end det, solceller kan præstere. Den nye metode er baseret på to elektrolyseprocesser. Den første spalter vand i ilt og brint – den anden spalter kuldioxid i ilt og kulmonoxid.

Den nødvendige elektriske strøm hentes fra en, som det beskrives, højeffektiv solcelle anbragt i en lys-koncentrator. For at opnå en høj virkningsgrad i det samlede system valgte forskerne smeltede salte som elektrolyse-medium.

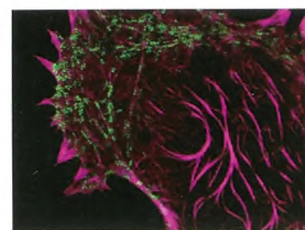
I det ene elektrolyse-kammer opvarmes lithiumkarbonat til $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvorefter der påtrykkes en spænding på 1,25 V mellem de to elektroder. Herved frigøres ilt og kulmonoxid (i gasfase). Det andet kammer blev fyldt med en blanding af LiOH og NaOH. Efter opvarmning til $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ og påtrykning af en elektrodespænding på 1,42 V blev vand spaltet i brint og ilt. Tilbage står blot at blande brint og kulmonoxid, så har man SUNGAS.

Kilder: Fang-Fang Li et al., Sungas Instead of Syngas: Efficient Coproduction of CO and H₂ with a Single Beam of Sunlight, *Advanced Science* 2015, <http://dx.doi.org/10.1002/advs.201500260>;

Forfatter: <http://chemistry.columbia.gwu.edu/stuart-licht>.

Film af processer i levende celler

MIKROSKOPI. Strukturer, som typisk er mindre end 100 nm, fx membraner, cytoskeletter og organeller, kan nu filmes i bevægelse. Den nye form for fluorescensmikroskopi er en videreudvikling af STEDmetoden, der i 2014 gav nobelprisen i kemi.



Nu betegnes metoden SIM (Structured Illumination Microscopy). I stedet for at excitationslyset rammer hele billedfeltet samtidig, opdeler man billedfeltet i mindre dele. Disse bliver belyst successivt, så man ender med, at hele billedfeltet er indfanget. Fordelen er bl.a., at varmeudviklingen, på grund af stærk belysning, bliver reduceret. En anden fordel er, at fluorescensmolekylerne kan deaktiveres med en anden lyspuls. Ved at udnytte de to egenskaber lykkedes det forskerne med computere at fremstille en billedsekvens på 25 billeder dækkende et tidsrum på 300 ms. Den rumlige opløsning angives at nærmere sig 60 nm. Blandt de optagelser forskerne har lavet, er der en, som viser proteins bevægelse gennem en cellemembran.

Kilder: Dong Li et al., Extended-resolution structured illumination imaging of endocytic and cytoskeletal dynamics, *Science* 2015, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aab3500>; Eric Betzig, Howard Hughes Medical Institute, <https://www.hhmi.org/scientists/eric-betzig>.

Foreningsnyt – foredrag i foråret 2016

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Jan.				
25/1	19.15	Astronomisk Selskabs historie og Videnskabelige Gennembrud	<i>Knud Strandbæk</i> (forhenv. formand) og <i>Johan Fynbo</i> (formand)	AS (Kbh)
Feb.				
1/2	19.45	Astronomisk Selskabs historie og Videnskabelige Gennembrud	<i>Knud Strandbæk</i> (forhenv. formand) og <i>Johan Fynbo</i> (formand)	AS (Aarh)
8/2	19.30	Nye resultater fra iskerneboringer	<i>Dorthe Dahl-Jensen</i>	SNU
22/2	19.15	Galakser	<i>Lise Christensen</i>	AS (Kbh)
29/2	19.30	Se SNU's facebookside: www.facebook.com/SNU1824		SNU
29/2	19.45	Galakser	<i>Lise Christensen</i>	AS (Aarh)
Mar.				
14/3	19.15	Tyngdekraften og kosmologien	<i>Helge Kragh</i>	AS (Kbh)
21/3	19.30	Indlandsisen smelter – har den altid gjort det?	<i>Anders Bjørk</i>	SNU
Apr.				
4/4	19.45	Tyngdekraften og kosmologien	<i>Helge Kragh</i>	AS (Aarh)
11/4	19.15	Det mørke univers	<i>Ole Bjælde</i>	AS (Kbh)
18/4	19.30	Er gassen ved at slippe ud af Urtidens super-drivhus?	<i>Christian Mac Ørum Rasmussen</i>	SNU
18/4	19.45	Det mørke univers	<i>Ole Bjælde</i>	AS (Aarh)
Maj				
2/5	19.15	Sorte huller	<i>Marianne Vestergaard</i>	AS (Kbh)
9/5	19.30	Wake-up call for klimaet – klimarapporter, klimakonventioner og klimamodeller: Hvad bliver vores klimafremtid?	<i>Jens Hesselbjerg Christensen</i>	SNU
9/5	19.45	Sorte huller	<i>Marianne Vestergaard</i>	AS (Aarh)

AS (Kbh): Astron. Selskab (Kbh), Aud. 2, H.C. Ørsted Institutet, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Aarh): Astron. Selskab (Aarh), Matematisk Inst., Aarhus Univ., Ny Munkegade 118, Bygn. 1530, lokale G122, 8000 Aarhus C.

SNU: Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350 København K (www.naturvidenskab.net).

Selskabet for Naturlærers Udbredelse

Temaet for foredragsrækken i foråret 2016 er "Den nyeste klimaforskning". Man behøver ikke at være medlem af SNU for at komme til foredragene. Alle er hjertelig velkomne! Se omtale af modtageren af H.C. Ørsted Medaljen på bagsiden.

Kontingentindbetaling for 2016 til SNU

Kære medlemmer af SNU. Det er nu blevet tid at betale kontingent for at fortsætte dit medlemskab. Kontingentsatserne for 2016 er uændret:

- Ordinært medlemskab: 250 kr
- Studentermedlemskab: 125 kr
- Virksomhedsmedlemskab: 750 kr.

Det relevante kontingentbeløb bedes indbetalt via netbank til SNU's konto i Danske Bank: reg.nr. 1551, konto nr. 9032363, senest den 18. januar 2016, eller på indbetalingskort +01< +9032363.

Skulle du have brug for et girokort, kan du sende en mail til snu@naturvidenskab.net, eller ring 29926300.

Husk i netbank at oplyse navn og adresse i kommentarfeltet, ellers kan kassereren ikke altid se, hvem der er betalt for. Betaler du kontingent på posthus eller i pengeinstitut skal du oplyse Selskabets adresse: Selskabet for Naturlærers Udbredelse, c/o Dorte Olesen, DTU Compute, Matematiktorvet 303b, 2800 Kongens Lyngby.

Astronomisk Selskab

Temaet for forårets foredragsrække er "Astronomiske gennembrud gennem tiden". I 2016 fejrer vi 100-årsjubilæet for Astronomisk Selskab, der blev grundlagt i oktober 1916. I denne række af fem foredrag i foråret 2016, og efterfølgende i fem foredrag i efteråret 2016, tager vi et blik tilbage på de største gennembrud i den astronomiske forskning i dette tidsrum fra 1916 til 2016.

Tilrettelæggere: Cand. scient., ph.d. Jens Jessen-Hansen og stud. scient. Rand Tuma, Astronomisk Selskab.

Kontingentindbetaling for 2016 til Astronomisk Selskab

Kære medlemmer af Astronomisk Selskab. Det er nu blevet tid til at betale kontingent for at fortsætte dit medlemskab. Kontingentsatser for kalenderåret 2016 er uændret:

- Almindeligt medlemskab: 350 kr.
- Ungdomsmedlemskab (18-26 år): 150 kr.
- Børn og unge under 18 år: gratis

Det relevante kontingentbeløb bedes indbetalt via netbank til Astronomisk Selskabs konto i **Danske Bank: reg. 1551, konto 8001081, senest mandag d. 11. januar 2016.**

Betaler du kontingent via netbank så husk at oplyse Navn(e) og Adresse(r) i kommentarfeltet, ellers kan kassereren ikke se, hvem der er betalt for. Betaler du kontingent på posthus eller i et pengeinstitut, skal du oplyse foreningens adresse:

Astronomisk Selskab, c/o Steen Traberg-Borup, Nørrebrogade 7A, 3.tv, DK-2200 København N.

Husk, betaling via netbank er gebyrfrit. På posthuset eller i pengeinstituttet koster det 40 kr i gebyr. Ønsker du ikke at fortsætte dit medlemskab bedes du oplyse dette til foreningens medlemskontakt (undertegnede).

Medlemmer og familier ønskes en god jul og et godt nytår.

Steen Traberg-Borup, kasserer/medlemskontakt
steen@traberg-borup.dk (mobil: 2144 0612)

Kosmiske forstørrelsesglas

Af Claudio Grillo, Lise Christensen og Jens Hjorth, Dark Cosmology Centre, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

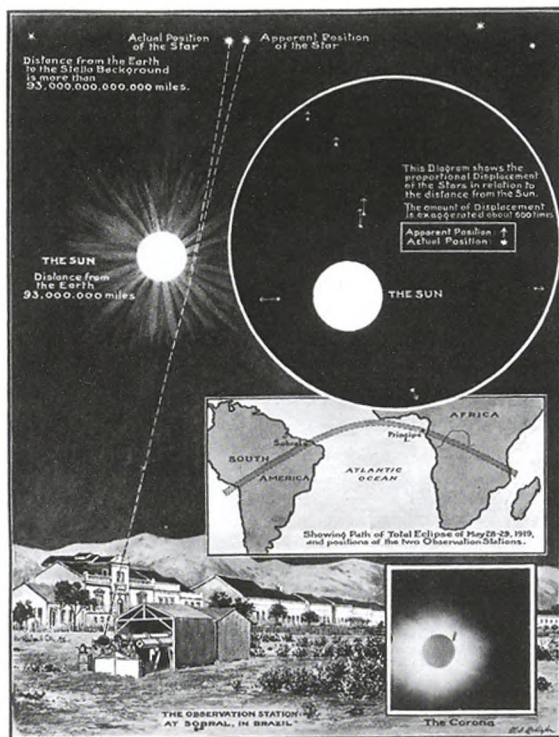
Einsteins almene relativitetsteori brød fundamentalt med Newtons teori for tyngdekraften. I Einsteins formulering giver masse anledning til krumning af rummet og rummets krumning bestemmer, hvordan partikler bevæger sig. Dette gælder også de masseløse lyspartikler, fotonerne. I anledning af 100-året for Einsteins teori og i anledning af Lysets År 2015 beskriver vi her nogle bemærkelsesværdige konsekvenser af den almene relativitetsteori for lysets passage gennem Universet og en unik test af teoriens rigtighed, som vi vil kende resultatet af omkring årsskiftet 2015/2016.

Einsteins teori

Albert Einsteins almene relativitetsteori fra 1915 er den teori, der bedst beskriver vores viden om tyngdekraften (gravitation). Med teorien kan man på enkel vis forudsige afbøjningsvinklen α af en lysstråle, som passerer gennem tyngdefeltet af en punktkilde med massen M inden for en vinkelafstand ξ

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2\xi}, \quad (1)$$

hvor G er Newtons gravitationskonstant og c er lysets hastighed. Den første måling af denne afbøjning blev udført af Sir Arthur Eddington i 1919. Ved en total solformørkelse kunne han måle en tilsyneladende positionsændring af baggrundsstjerner tæt ved solens overflade, som illustreret i figur 1. Afbøjningen af lys som følge af tyngdekraften kaldes *gravitationslinseeffekten*.



Figur 1. Original illustration af den første måling af gravitationsafbøjningen af lyset fra en stjerne ved den totale solformørkelse i 1919. Fra: *The Illustrated London News*, 22. november 1919.

I 1936 publicerede Einstein en artikel, hvori han beskrev flere aspekter af gravitationslinseeffekten for fjerne stjerner. I artiklen diskuterede han muligheden for at observere flere billeder af *den samme baggrundsstjerne*, hvis denne ligger direkte langs synslinien mod en stjerne i forgrunden. På grund af den meget lille vinkelafbøjning (nogle tusindele buesekunder¹) konkluderede Einstein, at der var en "meget lille sandsynlighed for at observere dette fænomen". Det efterfølgende år foreslog astronomen Fritz Zwicky, at man i stedet for stjerner kunne se på ekstragalaktiske "tåger" (hvad der senere viste sig at være fjerne galakser), hvorved den forventede vinkelafstand mellem to billeder af den samme kilde ville blive stor nok til at man kunne observere den med teleskoper. Zwicky mente, at sådanne observationer kunne teste den almene relativitetsteori. Han estimerede, at 1 ud af 400 fjerne kilder ville blive udsat for en gravitationslinseeffekt fra en forgrundsgalakse, og forudså at man snart ville begynde at observere gravitationslinser ved at studere galakser.

Det varede dog næsten 40 år før Zwickys forudsigelse blev gjort til virkelighed. I 1979 fandt og identificerede man den første gravitationslinse. Astronomen Dennis Walsh brugte radio-teleskoper til at studere en "dobbelt kvasar", hvis to billeder tilsyneladende ligger 6 buesekunder fra hinanden. Han fandt, at deres farver og spektre var ens, og at kvasarerne havde den samme afstand fra os. Samtlige observationer ved forskellige bølgelængder viste, at de to kvasarer havde nøjagtigt de samme egenskaber. Den bedste forklaring på dette fænomen var, at de to kvasarer rent faktisk var to billeder af én og samme fjerne kvasar. Man fandt efterfølgende en meget tung galakse imellem de to kvasarbilleder. Dette var begyndelsen til et hurtigt voksende forskningsfelt inden for astronomien, som omhandler gravitationslinser.

Afbøjningen af lys fra en fjern kilde omkring en tung massekoncentration (dvs. linsen) giver astronomer en spændende mulighed for at undersøge både den fjerne kilde samt selve linsen. Gravitationslinseeffekten kan undersøges ved alle bølgelængder fra radiobølger, synligt lys, infrarødt lys til røntgenstråling. Effekten giver astronomer et redskab til at undersøge forskellige typer objekter med vidt forskellige størrelser: fra planeter, over stjerner og galakser til hobe af galakser. For

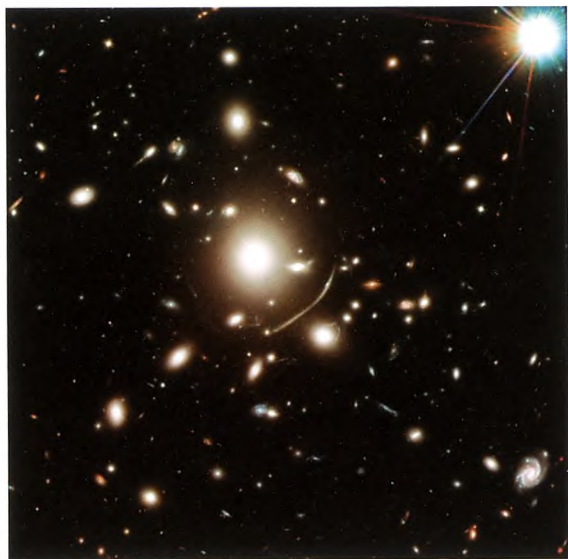
¹Et buesekund er 1/3600 af en grad. Månens udstrækning på himlen er ca. en halv grad.

eksempel har astronomer kunnet finde planeter omkring fjerne stjerner ved at studere stjernelinser. Man har også kunnet måle, hvor tunge enkelte stjerner egentlig er, samt bestemt massen af både spiral- og elliptiske galakser. Nedenfor beskriver vi, hvordan man på endnu større skalaer kan bestemme massefordelingen af lysende og såkaldt "mørkt" stof.

Massebestemmelse

Galakser befinder sig sjældent i et isoleret område af Universet. Vores egen Mælkevej ligger i en gruppe af galakser som også omfatter Andromeda-galaksen og de mindre dværggalakser, De Magellanske Skyer. Ved endnu større afstande fra vores lokale gruppe finder man områder som kan indeholde tusinder af galakser – de såkaldte galaksehobe.

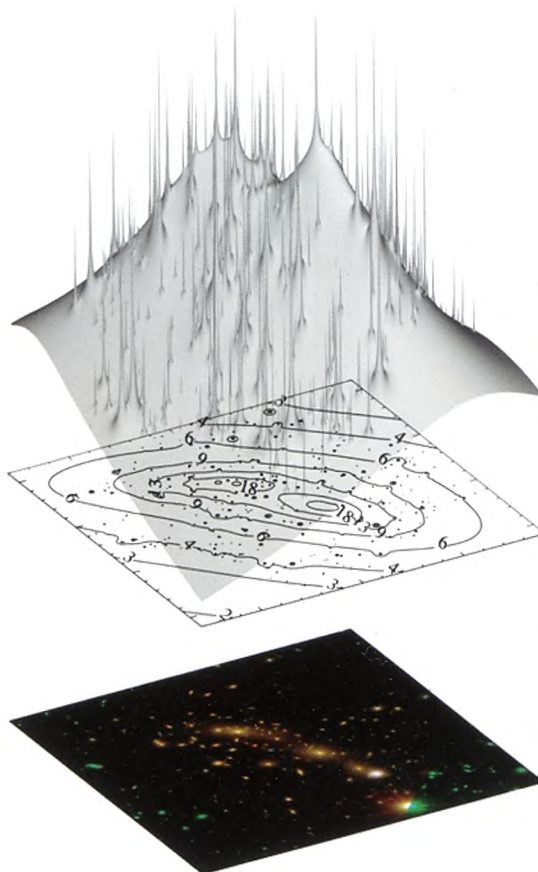
Galaksehobe fungerer som effektive gravitationslinser (for fjerne bagvedliggende galakser), fordi de er meget tunge. I 1990'erne kom der fart på udforskningen af gravitationslinser, som kræver observationer fra store teleskoper og instrumenter, som benytter sig af lysfølsomme chips. Nu til dags benytter astronomer de allerstørste teleskoper fra Jorden til at måle hastighederne af galakserne i en hob, samt superskarpe billeder fra Hubble Rumteleskopet til at se detaljer i de fjerne gravitationelt linsede galakser, som illustreret i figur 2.



Figur 2. Billede fra Hubble Rumteleskopet af galaksehoben Abell 383. Omkring den store centrale hvid-gule galakse kan man se andre galakser der har den samme karakteristiske farve. Galakserne befinder sig i samme afstand fra os og er en del af den tunge galaksehob. På billedet ser man også galakser med forskellige farver, og nogle er udstrakt i kæmpebuer som et synligt tegn på gravitationslinseeffekten. Disse linsede galakser ligger meget længere væk end galaksehoben, og nogle af galakserne kan endda vise sig at være nogle af de allerførste galakser, der blev dannet i Universet (NASA/ESA).

Man kan bruge Einsteins ligning til at 'veje' en galaksehob (se figur 3). Når man har fundet en linset galakse og kender afstanden til både hoben samt den linsede galakse, kan man ved at måle afbøjningsvinklen (ligning 1) bestemme den totale masse i galaksehoben. Man kan også måle den totale mængde af lys som hoben udsender og dermed bestemme den totale masse

af stjerner i hoben. Når man sammenligner med den totale vægt af hoben finder man, at stjernerne kun udgør en lille brøkdel. Derfor er vi sikre på, at der er stof til stede som vejer noget, men som ikke udsender lys. Vi ved altså, at rummet mellem galakserne ikke bare er tomt, det er fyldt med usynligt stof. Fordi ingen endnu ved hvad det består af, kalder vi det for mørkt stof. Mørkt stof kan ikke ses, for det hverken udsender, reflekterer eller absorberer lys. Faktisk udgør de synlige himmellegemer – planeter, stjerner og galakser – kun omkring fem procent af Universet. Resten består af mørkt stof og mørk energi.



Figur 3. Rekonstrueret model af massen i galaksehoben MACS J0416.1-2403. Øverst: massefordeling og konturplot; nederst: Hubble billede. Modellen bygger på observationer af 10 multipelt linsede baggrundsgalakser og mere end 100 galakser i hoben. Det mørke stof ligger blandt alle galakserne og bidrager i meget stor grad til gravitationslinseeffekten for hoben.

Fjerne forstærkede galakser

Lyset fra en linset galakse bliver forstærket gennem afbøjningen og fokuseringen. Galaksehobe fungerer derfor som naturens egne gigantiske teleskoper og kan bruges til at finde nogle af de allerfjerneste galakser i Universet. Lyset fra dem kan i nogle tilfælde blive forstærket med op til 100 gange. Det vil sige, at vi kan bruge gravitationslinser til at finde fjerne galakser som ellers ville have været alt for svage til at kunne detekteres selv med de allerstørste teleskoper på Jorden. Vi kan også bruge billedrekonstruktionsteknikker til at bestemme, hvordan galaksen så ud før dens lys blev afbøjet, som illustreret i figur 4.

Da lysets hastighed er konstant, ser vi samtidig tilbage i tid, når vi undersøger de fjerne galakser. Den allerfjerneste galakse observeret til dato er blevet fundet via gravitationslinser. Galaksen er så fjern, at lyset fra den blev udsendt, da Universet kun var omkring 450 millioner år gammelt (Universet er i dag 13,8 milliarder år gammelt). Gravitationslinser kan derfor bruges i vores udforskning af dannelsen af de allerførste galakser og deres udvikling gennem Universet.



Figur 4. Det øverste billede viser et billede af en galakse, der har gennemgået gravitationel linsning. Det nederste billede viser hvordan galaksen ville se ud, hvis den ikke var linset. Detaljerigheden i billedet er langt større end i andre billeder af fjerne galakser.

Tidsforsinkelse og supernova Refsdal

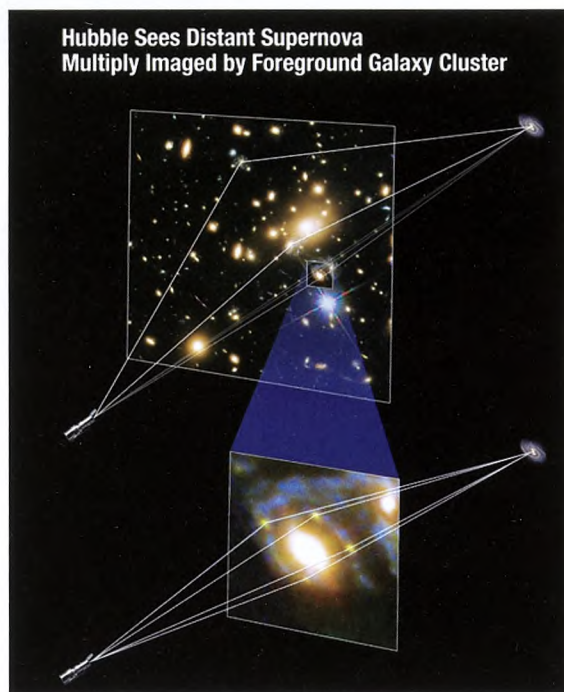
De forskellige billeder, der dannes af en gravitationslinse kommer fra det samme objekt. Men da lyset passerer lidt forskellige veje rundt om gravitationslinsen, tilbagelægger det lidt forskellige afstande, og det påvirkes også forskelligt af linsens tyngdepotentiale. Da lysets hastighed er konstant, betyder det, at et linset lysglimt udsendt fra en kilde vil ankomme til Jorden på lidt forskellige tidspunkter i de forskellige billeder.

I 1962 viste den 26-årige norske astronomistuderende Sjur Refsdal i den ene halvdel af sin specieleafhandling, at hvis man kunne måle på en gravitationelt linset supernova ville man se den eksplodere på forskellige tidspunkter i de forskellige billeder. Ved bestemmelse af

forskellen i disse tidspunkter (tidsforsinkelsen) kunne man bestemme afstanden til supernovaen. Dette var en så revolutionær tanke på det tidspunkt, at censor ikke ville godkende den del af specialet! Men i 1964 publicerede han ikke desto mindre sine resultater i *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* [1].

Få år efter Sjur Refsdals artikel opdagede man kvasarerne (kraftige lyskilder fra aktive galaksekerner), og det blev klart, at man også kunne bestemme afstande ved at måle tidsforsinkelser for variable kvasarer. Det var dog først i 1990'erne, at det lykkedes at måle den første tidsforsinkelse, netop i den førnævnte "dobbelkvasar".

I slutningen af 2014 opdagede vi så for første gang en *multipelt linset supernova* [2]. Til ære for Sjur Refsdal opkaldte vi den SN Refsdal. Supernovaen ligger bag en enorm galaksehob, hvoraf en af galakserne er en stor ellipseformet galakse, som har afbøjet lyset fra den bagvedliggende supernova, så lyset ses i fire gengivelser, der er formet som et kors omkring den ellipseformede galakse. Det kaldes et "Einstein Kors" efter Albert Einsteins forudsigelse. De fire lys-stråler fra supernovaen er dukket frem én efter én med få dages mellemrum indenfor et par uger, omend vi først opdagede dem efter, at alle fire billeder var blevet synlige (figur 5).



Figur 5. Lyset fra den bagvedliggende supernova bliver afbøjet af tyngdekraften fra en galaksehob og en elliptisk galakse, der derved virker som et forstørrelsesglas, og forstærker lyset fra den fjerne supernova. Det særlige fænomen virker som naturens eget gigantiske teleskop, og supernovaen fremstår 20 gange mere lysstærk end dens normale lysstyrke. Det er den første multipelt linsede supernova, man nogensinde har observeret, og supernovaen er opkaldt efter den norske astronom Sjur Refsdal, som teoretisk forudsagde dette fænomen for 50 år siden. Den midterste synslinie, der passerer tæt gennem hobens centrum illustrerer, hvor vi forudsiger SN Refsdal vil 'eksplodere igen' omkring december 2015 (NASA/ESA/GLASS).

Galaksehoben ligger fem milliarder lysår fra Jorden, og supernovaen ligger ni milliarder lysår væk. En supernova i den afstand ville normalt være meget lyssvag, men på grund af den særligt gunstige beliggenhed forstærkes dens lys. Supernovaen fremstår faktisk 20 gange mere lysstærk end dens normale lysstyrke. Det skyldes den kombinerede effekt af to overlappende 'linser' (figur 5). Den massive galaksehob fokuserer lyset fra supernovaen langs mindst tre separate veje, og én af disse lysveje rammer tilfældigvis præcist sammen med en stor elliptisk galakse i hoben, og det bevirker, at der opstår endnu en linse-effekt, der splitter lyset i fire.

Supernovaer kommer i forskellige typer. Hvad var SN Refsdal? Pga. forstærkningen af lyset lykkedes det os at tage et spektrum af supernovaen, både med Hubble Rumteleskopet og med X-shooter og MUSE-spektrograferne på ESOs Very Large Telescope. Sjovt nok viser disse observationer, at SN Refsdal er en meget fjern analog til den nærmeste supernova vi har observeret i vores levetid, den usædvanlige SN 1987A i den Store Magellanske Sky – den bedst observerede supernova nogensinde.

Når de fire lys-gengivelser aftager i styrke, vil vi desuden få en sjælden mulighed for at få et tilbageblik på supernovaen, for det nuværende mønster med fire billeder er kun den ene del af det gravitationelle linsefænomen. For 20 år siden har man formentligt kunnet se supernovaen i et enkelt billede et andet sted i galaksehoben, og beregninger viser, at det vil fremkomme igen i en tredje afbildning af galaksen nogenlunde samtidig med udgivelsen af denne artikel (figur 5). Hubble Rumteleskopet kigger derfor mod det forudsagte sted jævnligt for at se, hvornår vi ser endnu et da capo af SN Refsdal [3, 4], og denne gang er vi parat til at følge den forudsagte eksplosion. Hvis SN Refsdal ikke kommer til syne skal vi være parate til at skrotte Einsteins almene relativitetsteori. Men mon ikke Refsdal dukker op? Hold øje med DARK's og ESA's facebooksider [5, 6] hvor vi vil sige til, når det sker!



Claudio Grillo er lektor og Villum Foundation Young Investigator med henblik på at studere mørkt stof i galaksehobe.



Lise Christensen er lektor og leder af YDUN-programmet til at studere dværggalakser ved høj rødforskydning, bl.a. gennem gravitationel linsning.



Jens Hjorth er professor og leder af DARK. Han har målt mange tidsforsinkelser for linsede kvasarer, bl.a. sammen med Sjur Refsdal.

Litteratur

- [1] Refsdal, S. (1964), On the possibility of determining Hubble's parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. **128**, p. 307; <http://adsabs.harvard.edu/abs/1964MNRAS.128..307R>
- [2] Kelly, Patrick L. et al (2015), Multiple images of a highly magnified supernova formed by an early-type cluster galaxy lens, *Science*, Volume **347**, Issue 6226, pp. 1123-1126 (2015); <http://adsabs.harvard.edu/abs/2015Sci...347.1123K>
- [3] ESA/Hubble 13. nov. 2015, Astronomers get once-in-a-lifetime opportunity to predict supernova; <https://www.spacetelescope.org/announcements/ann1526/>
- [4] ESA 25. nov. 2015, MUSE Observations Enable Prediction of Once-in-a-lifetime Supernova Replay; <http://www.eso.org/public/announcements/ann15088/>
- [5] ESA/Hubble vil følge SN Refsdals re-appearance på: twitter, https://twitter.com/hubble_space facebook, <https://www.facebook.com/hubbleESA/>
- [6] DARK's websider, <http://dark-cosmology.dk>, <https://www.facebook.com/darkcosmologycentre>

KVANT søger nye redaktører

Redaktionen af KVANT stræber mod at skabe et blad af høj kvalitet. Manuskripterne læses først igennem med henblik på faglige og pædagogiske forbedringer og derefter læses der korrektur på sproget. Dette arbejde udføres for en stor del af frivillige kræfter.

Der er plads til flere redaktører. Hvis du har lyst til at bidrage til én eller flere af følgende opgaver, så skriv til kvant@kvant.dk og hør nærmere.

- Ideer til kommende artikler og temanumre
- Fagkorrektur og sprogkorrektur
- Sælge annoncer
- Anmelde fysikfaglige bøger

Det er en fordel, hvis du er fysikstuderende, forsker eller fysiklærer i gymnasiet. Redaktionen holder møder i København, men man kan evt. deltage via Skype eller få refunderet rejseudgifterne.

Tyngdekraft og kvanteteori

Af N. Emil J. Bjerrum-Bohr, Niels Bohr Internationale Akademi & Discovery Center, Niels Bohr Institutet

Den almene relativitetsteori kan formuleres som en effektiv feltteori. Hermed opnås en perturbativ kvantemekanisk partikelfysisk beskrivelse af tyngdekraften i princippet op til energier i nærheden af Planck-skalaen. Det giver nye muligheder for anvendelser i højenergifysikken, herunder præcise teoretiske forudsigelser af kvantegravitationelle effekter.

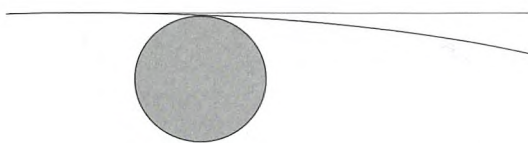
Tyngdekraften har til alle tider fascineret og stimuleret videnskabelig tænkning. Observationer og kvalitativ, empirisk forståelse af både tyngdekraft og kraftprincipper går langt tilbage, men et præcist matematisk fundament for tyngdekraften og mekaniske love blev først etableret af Isaac Newton i hovedværket *Principia* i 1687. Newton gjorde det her klart, at tyngdekraften er en *universel naturkraft*, og gennem hans ligninger for kraftbeskrivelse fulgte kvantitativt ækvivalensen af træghed (inerti) og gravitationel masse. Newtons love er den dag i dag basis for fysikken i mekaniske systemer.

Einsteins almene relativitetsteori

Einsteins forskning i tyngdekraften [1] tog udgangspunkt i Newtons beskrivelse, men udvidede stofbeskrivelsen, til også at omfatte relativistisk stof, ved at kombinere den specielle relativitetsteori med et nyt ækvivalensprincip. Einstein kaldte sin teori: den *almene relativitetsteori*.

Einsteins ækvivalensprincip kan formuleres simpelt på følgende vis: *I et givet tyngdefelt er det altid muligt at vælge et referencesystem, således at fysikken er den samme, som i den specielle relativitetsteori.*

Den klassiske illustration af Einsteins ækvivalensprincip er *den frit faldende elevator*: Hvor observatøren indeni (referencesystemet) ikke har mulighed for at afgøre, om han er i frit fald i et homogent tyngdefelt, eller om der i virkeligheden intet tyngdefelt er.



Figur 1. Illustration af lysets afbøjning rundt om Solen.

Kigger man på tiltrækningen af lys fra et tyngdefelt, som eksempelvis Solen, finder man til ledende approksimation, ved at bruge Einsteins almene relativitetsteori, en afbøjning af lyset fra fjerne stjerner

$$\Delta\theta = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}}, \quad (1)$$

hvor G er Newtons konstant, $M_{\odot}$ og $R_{\odot}$ er henholdsvis masse og radius af Solen og c er lysets hastighed.

Selvom denne afbøjning er lille ($\Delta\theta \approx 1,75'' \approx 0,00049^\circ$), er den stor nok til, at Einsteins forudsigelse

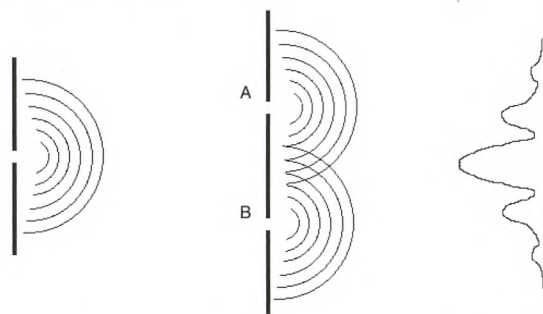
¹Heisenberg boede i 1920'erne som assistent for Niels Bohr i en lejlighed over biblioteket på Niels Bohr Institutet med udsigt over indgangen til Fælledparken. Det var her mange af de berømte diskussioner fandt sted.

blev bekræftet ved Eddingtons observation af effekten ved en total solformørkelse i 1919. Det gjorde med et slag Einstein og hans almene relativitetsteori berømt i offentligheden, og bragte ham på forsiden af New York Times.

Einsteins almene teori er den dag i dag fundamentet for vores beskrivelse af tyngdekraften. Den har mange praktiske anvendelser; blandt andet er det nødvendigt at korrigere satellitters ure for tyngdekraftens indvirkning ved brug af den almene relativitetsteori. GPS-navigation ville fx ikke være mulig uden Einsteins teori.

Kvantemekanikken

I den almene relativitetsteori er stoffets bevægelse og tilstedeværelse til alle tider en præcis deterministisk konsekvens af bevægelsesligninger. Det står i skarp kontrast til kvantemekanikkens beskrivelse af mikroskopiske systemer såsom atomer og atomkerner. I kvantemekanikken er det fundamentalt, at beskrivelsen af stoffet involverer observationer, som kan være indbyrdes komplementære. Det klassiske eksempel er bølge-partikel dualitet, hvor partikler kan forstås både som bølger (med en bestemt de Broglie-bølgelængde) eller som partikler.



Figur 2. Dobbeltspalteeksperimentet, som bruges til at illustrere kvantemekanikkens fascinerende dualitet mellem bølger og partikler.

Det var Werner Heisenberg, der i 1927 i diskussioner med Niels Bohr¹, matematisk formulerede denne grundlæggende kvantemekaniske realitet i sin berømte ubestemthedsrelation [2].

$$\frac{\hbar}{2} \leq \Delta(\text{sted}) \times \Delta(\text{impuls}). \quad (2)$$

Her er $\hbar$ Plancks (reducerede) konstant, og $\Delta(\text{sted})$ og $\Delta(\text{impuls})$ er henholdsvis ubestemtheden i 'sted'

og 'impuls' (eller bevægelsesmængde) i det kvantemekaniske system. Fra Heisenbergs ligning er det klart, at hvis for eksempel $\Delta(\text{sted})$ er stor, kan $\Delta(\text{impuls})$ være tilsvarende lille. Det svarer kvantemekanisk til en bølgetilstand. Tilsvarende kan man tænke på partikler som tilstande med $\Delta(\text{sted})$ lille.

Det er klart, at det logiske udgangspunkt for kvantemekanikken og den almene relativitetsteori er forskelligt. Det kom blandt andet til udtryk i de talrige og historiske diskussioner mellem Albert Einstein og Niels Bohr. Einstein havde især svært ved at acceptere kvantemekanikkens ubestemthedsrelationer og komplementaritet som fundamentale fysiske egenskaber.

Vi skal i det følgende se, at man kan nærme sig en beskrivelse, der kan kombinere logikken bag både den almene relativitetsteori og kvantefysikken. Dette er muligt, hvis man betragter den almene relativitetsteori som en klassisk feltteori.

Den almene relativitetsteori som feltteori

I en klassisk feltteori begynder man med at nedskrive en virkning S , som man kan tænke på som summen af alle kræfter der virker på en given bevægelse igennem systemet,

$$S = \int \mathcal{L}(x(\tau), \tau) d\tau. \quad (3)$$

I denne ligning er $x(\tau)$ en bevægelse parametriseret som funktion af tiden τ . I et givet punkt er kræfterne, som påvirker bevægelsen, bestemt af funktionen $\mathcal{L}(x(\tau), \tau)$, der kaldes Lagrange-tætheden. Den klassiske beskrivelse af systemet følger nu princippet: bevægelsen skal altid svare til et stationært punkt for virkningen. Matematisk svarer det til, at variationen af virkningen er nul ($\delta S = 0$). Herfra følger smukt de klassiske Euler-Lagrange-bevægelsesligninger for systemet:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x(\tau)} - \frac{d}{d\tau} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau}\right)} = 0. \quad (4)$$

For den almene relativitetsteori (uden kosmologisk konstant) kan man nedskrive at Lagrange-tætheden er

$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} \left[\frac{Rc^4}{16\pi G} + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right]. \quad (5)$$

Det leder til Einstein-ligningen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}. \quad (6)$$

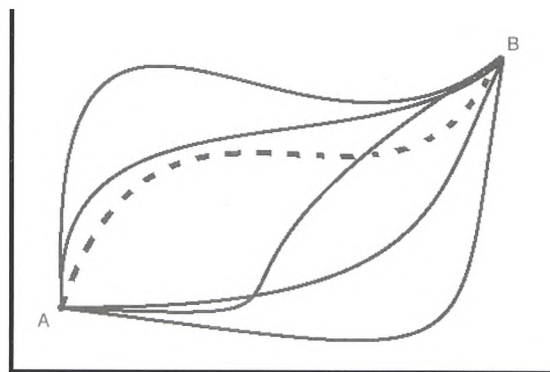
I denne ligning er *metrikken*, $g_{\mu\nu}$, en karakteristisk størrelse for det valgte referencesystem, $R_{\mu\nu}$ er Ricci-tensoren, som udtrykker rummets krumning og $T_{\mu\nu}$ angiver rummets energitæthed². Einstein-ligningen er den grundlæggende ligning for al bevægelse i det gravitationelle system. Konstanten G er Newtons universelle *gravitationskonstant*. Som feltteori er metrikken $g_{\mu\nu}$ den afgørende feltvariabel. Klassiske tyngdebølger,

som man leder efter (med LIGO), er (klassiske) bølgelignende løsninger i metrikken.

Tyngdekraft og Feynmans vejintegral

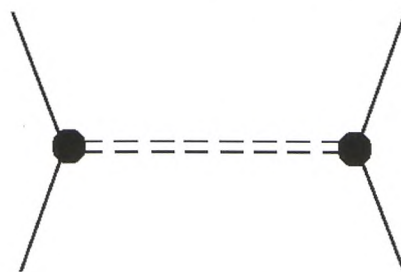
Det har været kendt siden 1960'erne [3], at det er muligt at lave en *kvantefeltteoretisk* beskrivelse af gravitationen ved at tage udgangspunkt i at kvantisere *metrikken* $g_{\mu\nu}$.

Ved at gøre det bryder man med princippet om, at virkningen skal være stationær $\delta S = 0$. Det er fuldstændig på linje med kvantiseringen af andre teorier, fx elektromagnetismen, og i stedet udregner man nu den *kvantemekaniske amplitude*, der er defineret som resultatet af, at summere over virkningen S over det totale system af veje (parametriseringer) $x(\tau)$. Denne sum er også kendt som Feynmans *vejintegral* eller "Path integral".



Figur 3. Illustration af Feynmans vejintegral. Den stiplede vej er den stationære og klassiske vej, som opfylder $\delta S = 0$. De andre veje er eksempler på veje, der skal summeres over i Feynmans vejintegral.

Feynman angav en måde at opskrive resultatet af vejintegraler i termer af såkaldte Feynman-diagrammer. I Feynman-diagrammet komponeres resultaterne af vejintegraler vha. 'vertex-punkter' for de indkommende og udgående partikler og 'propagatorer', som beskriver, hvordan partikelfelterne udvikler sig i rum-tiden. Feynman-diagrammer kan klassificeres i forskellige (topologiske) bidrag, som har vidt forskellig fysisk fortolkning. Til første approksimation inkluderer vi for eksempel kun de simpleste forbundne bidrag, det vil sige alle diagrammer, som ikke vekselvirker med sig selv. Sådanne diagrammer kaldes *trædiagrammer*.



Figur 4. Et såkaldt Feynman *træ*-diagram, der svarer til en vekselvirkning mellem to partikler (angivet med fuldtoptrukne linjer). I midten af diagrammet udveksles en graviton (angivet med en dobbeltstiplet linje).

²Metrikken $g_{\mu\nu}$ er et mål, som definerer længden af vektorer i det givne referencesystem. $R_{\mu\nu} = R^\lambda_{\mu\nu\lambda}$, hvor $R^\lambda_{\mu\nu\kappa}$ er Riemann-tensoren.

Et selvvekselvirkende diagram har typisk et integral af typen

$$\int_0^\infty \frac{1}{\ell^2} \frac{1}{(\ell + K)^2} d\ell, \quad (7)$$

hvor ℓ er en bestemt parametrisering af den impuls (eller bevægelsesmængde), der løber i selvvekselvirkningen og K er en funktion af de impulser (eller bevægelsesmængder), som løber ind og ud af diagrammet. Det er klart, at et sådant integrale ikke er veldefineret, når $|\ell|^2$ eller $|\ell + K|^2$ er tæt på 0 eller når $|\ell| \rightarrow \infty$. Man taler om henholdsvis *infrarøde* IR- ($|\ell| \sim 0$) og *ultraviolette* UV- ($|\ell| \sim \infty$) effekter eller sågar *katastrofer*.



Figur 5. Eksempel på et selvvekselvirkende Feynman ét-loop-diagram. Sådanne diagrammer kan indeholde et vilkårligt antal selvvekselvirkninger. Har man for eksempel to selvvekselvirkninger taler man om et to-loop-diagram.

Det er en konsekvens af Feynmans metode, at *ægte kvanteeffekter*, som er karakteriseret ved at være proportionale med $\hbar$ kun fremkommer i diagrammer, som indeholder selvvekselvirkninger. Hver selvvekselvirkning giver en faktor af $\hbar$.

Gravitionen

Vores beskrivelse af tyngdekraften som en feltteori, leder til en ny partikel, et feltkvant for metrikken. Den kaldes *gravitionen*. Gravitionen må vekselvirke *universelt* med alt stof, via dets energitæthed, og lede til en *altid tiltrækkende kraft*. Gravitionen må også have en meget lang eller uendelig rækkevidde. Derved må en graviton enten have en *meget lille* masse eller være masseløs.

En *direkte observation* af en graviton ville bekræfte eksistensen af kvantiseringen af tyngdekraften, men indtil videre har ingen observeret gravitionen eksperimentelt.

Det er nemt at vise, at til orden af trædiagrammer (dvs. uden selvvekselvirkning), giver den kvantiserede teori de samme resultater som den klassiske feltteori. Problemet med en kvanteteori for tyngdekraften, ligger dermed *kun* i de selvvekselvirkende loop-diagrammer.

Kvantetyngdekraft og UV-effekter

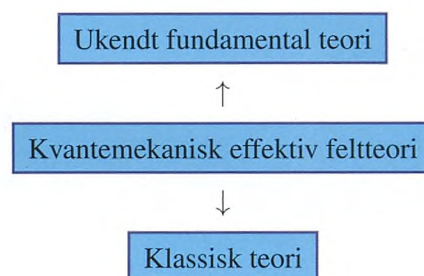
I mange teorier (for eksempel i elektrodynamikken) kan man vise, at teorien har den egenskab, at både IR- og UV-effekter fra udregnede loop-diagrammer kan absorberes på en sådan måde, at man kan lave en entydig fortolkning af effekterne. Man taler her om, at sådanne teorier er renormaliserbare. Men i den feltteori for gravitationen, som vi netop har argumenteret for, leder selvvekselvirkningerne, trods forsøg på at regularisere dem, i sidste ende ikke til en entydig fortolkning. Det blev vist soleklart af de to berømte nobelprismodtagere

't Hooft og Veltman i 1970'erne [4]. Kvantiseret almen relativitetsteori, *har dermed ikke noget håb om at være renormaliserbar!*

Det var selvfølgelig et stort tilbageskridt at løbe hovedet imod en mur efter sådan en flyvende start, og det tog nogle år før nogen havde lyst til at gøre et nyt forsøg på at få en kvantisering af almen relativitetsteori til at give mening.

Det blev en anden berømt nobelpristager, Steven Weinberg, som havde overblikket til at bibringe den nye forståelse, som var nødvendig for at løse den gordiske knude, som ikke-renormaliserbarheden af tyngdekraften udgjorde. Weinberg foreslog at tænke på almen relativitetsteori, som en *effektiv feltteori*, i stedet for som en renormaliserbar teori [5].

Forskellen mellem en effektiv feltteori og en renormaliserbar teori er, at man i den *effektive* tilgang *kun* søger en regularisering orden for orden i de selvvekselvirkende diagrammer, i stedet for til alle ordener på en gang, som i en renormaliserbar teori. Det gav for første gang en mulighed for at fortolke udregnede kvanteeffekter i gravitationsteorien på en entydig måde. Diagrammatisk kan vi demonstrere ideen bag en sådan effektiv kvanteteori:



Pointen er, at selvom den fundamentale teori er ukendt, kan man godt udregne meningsfulde kvantemekaniske korrektioner til den effektive teori, orden for orden. Disse korrektioner er *unikke*, da de nødvendigvis må optræde i den mere fundamentale beskrivelse. Vi har således *endelig* en entydig mulighed for at udforske konkrete *kvantemekaniske konsekvenser* af tyngdekraften uden at kende til den grundlæggende formulering af en sådan kvanteteori. Det giver en forening af alle naturkræfter, som kvanteteorier, ved tilpas lave energier for vekselvirkningerne.

Nye effektive feldtigninger for tyngdekraften

Formulerer vi Einsteins almene relativitetsteori via *Einstein-Hilbert virkningen*, udtrykt ved Lagrange-tætheden

$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} \left[\frac{R c^4}{16 \pi G} + \mathcal{L}_{\text{matter}} \right], \quad (8)$$

svarer den effektive beskrivelse til, at vi nu har

$$\mathcal{L} = \sqrt{-g} \left[\frac{R c^4}{16 \pi G} + c_1 R^2 + c_2 R^{\mu\nu} R_{\mu\nu} + \dots + \mathcal{L}_{\text{matter, effektiv}} \right]. \quad (9)$$

³I den effektive teori for tyngdekraften, tillades alle led, som kan opskrives uafhængigt af det valgte referencesystem.

Den effektive beskrivelse introducerer nye led $+c_1 R^2 + c_2 R^{\mu\nu} R_{\mu\nu} + \dots + c_{k_i} R^3 + \dots + c_{k_j} R^{\dots} + \dots$, defineret som summen over *alle* tilladte led i ligning (9)³. Hvert nyt led skal tilknyttes en *effektiv koblingskonstant* c_i , der skal forstås som eksperimentelt bestemt.

Den effektive formulering vil selvfølgelig ikke lede til præcis den samme feltligning som Einsteins almene relativitetsteori, men derimod til en ny effektiv feltligning, en slags generaliseret Einstein-ligning, der også involverer de nye koblingskonstanter c_i . Man kan vise, at en sådan beskrivelse kun afviger markant fra den sædvanlige Einstein-ligning, såfremt de nye koblingskonstanter er ekstremt store.

Det smarte ved den effektive beskrivelse er, at den generaliserede effektive virkning har led, der hver især *modsvares* divergenserne fra loop-diagrammerne. Dermed kan vi i en effektiv feltteori, ved at reskalere koblingskonstanterne c_i , fjerne problemet med *divergenser*, når selvvekselvirkningerne bliver for stærke.

Tyngdekræfter og unikke kvanteeffekter

Newtons *gravitationelle potential* udtrykker tiltrækningsenergien mellem to masser, m_1 og m_2 , i den *ikke-relativistiske* grænse,

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r}, \quad (10)$$

$V(r)$ er her den potentielle energi mellem de to masser, og r er deres indbyrdes afstand. Som vi har indset, giver effektiv feltteori en *konsistent* kvantebeskrivelse af tyngdekraften, og i 1994 beregnede Donoghue [6], som den første, konkrete effektive kvantemekaniske gravitationelle *ét-loop* selvvekselvirkninger i teorien. Hermed var det muligt at udregne *eksakte* kvanteeffekter til tyngdefelter [7]. Beregningen af et-loop effekten giver for store afstande mellem de to masser i det ledende bidrag til spredningsamplituden

$$-\frac{Gm_1m_2}{r} \left[1 + 3 \frac{G(m_1+m_2)}{c^2 r} + \frac{41}{10} \frac{G\hbar}{c^3 r^2} \right]. \quad (11)$$

Her genkender vi de første to led som de analoge til et klassisk tyngdepotential i den almene relativitetsteori. Det første led svarer til Newton-grænsen, det andet er den post-Newtonske korrektion fra den almene relativitetsteori. Som kvanteteori skal disse led dog nu forstås som forskellige perturbative bidrag, dvs. det første som en træ- og det andet som en loop-effekt. Det tredje led er en kvanteeffekt (da det er proportionalt med $\hbar$) og dette led har ingen klassisk analog. Det kræver dermed en fuld kvantemekanisk behandling, og er således en unik kvanteeffekt i den nye effektive kvanteteori for tyngdekraften. Det er overraskende, at dette led slet ikke afhænger af de to ledende effektive koblingskonstanter c_1 og c_2 . Tilsvarende kan man udregne de klassiske bidrag til lysets afbøjning i Solens tyngdefelt i den effektive teori [9], disse giver anledning til afbøjningsvinklen

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{4 G M_\odot}{c^2 R_\odot} + \frac{15 \pi G^2 M_\odot^2}{4 c^4 R_\odot^2} + \dots \\ &= 0,00049^\circ + 3 \cdot 10^{-9}^\circ + \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Afbøjningen kommer også her ud som forventet i den almene relativitetsteori. Igen kan de to led fortolkes, som henholdsvis en træ- og en loop-effekt. Også her indeholder den beregnede amplitude unikke kvanteeffekter, som ikke har en klassisk analog. I beregningen for lysafbøjning omkring Solen er disse for eksempel proportionale med $\hbar \times \frac{G}{c^3 R_\odot^2} \approx 10^{-87}$, hvor $R_\odot$ er Solens radius.

Sådanne bidrag er helt normale i forbindelse med kvantemekaniske beregninger af spredningstværsnit, der ikke kan behandles klassisk, men kræver en fuldstændig kvantemekanisk fortolkning. Størrelsesordenen af bidragene er dog, som man ser, *ufatteligt små*, så trods den teoretiske triumf, at sådanne kvanteberegninger er mulige, er det svært, at forestille sig egentlige eksperimentelle bekræftelser af de teoretiske resultater.

Konklusion

Den almene relativitetsteori formuleret som en effektiv feltteori gør det muligt at skabe en konsistent kvantebeskrivelse af tyngdekraften helt op til vekselvirkningsenergi nær *Planck-skalaen*: $\sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \sim 10^{16}$ TeV. Det er ca. 15 størrelsesordner højere end hvad vi på nuværende tidspunkt kan opnå i CERN via Large Hadron Collider (LHC). Dermed har vi, med den effektive kvantebeskrivelse af tyngdekraften, en måde at lave præcise teoretiske forudsigelser i højenergifysikken.

Det er klart, at man tæt på Planck-skalaen må forestille sig omfattende ændringer af de perturbative feltteorier, som vi kender til, og her vil også den effektive beskrivelse bryde sammen. Det er forventeligt, at alle kendte vekselvirkninger her vil have samme størrelsesorden, og en fundamental teori for kvantegravitationen meget vel kunne være en strengteori. Strengteorier er karakteriseret ved naturligt at indeholde tilstande, der kan forstås som gravitoner, og desuden har de ikke problemer med UV-divergenser.

Til trods for, at vi endnu ikke har formuleret en endelig sammenfattende teori for tyngdekraften, der er gyldig for alle energiskalaer, er det dog spektakulært, at vi gennem den effektive behandling af den almene relativitetsteori allerede har adgang til en kvantefeltteoretisk beskrivelse af mange tyngdevekselvirkninger.

Det er nemt at udvide den effektive feltteori for tyngdekraften til at indeholde diverse partikler, som optræder i forskellige fænomenologiske modeller fx neutrinoer. Det giver os en praktisk værktøjskasse for en kvantemekanisk beskrivelse af Einsteins almene relativitetsteori; herunder præcise og unikke teoretiske forudsigelser af kvanteeffekter i højenergifysikken.

Man kunne for eksempel tænke sig, gennem sådanne beregninger, at opnå en ny kvantitativ forståelse af kvanteeffekter ved sorte huller og Big Bang.

Det er klart, at sådanne effekter er meget små, men ikke desto mindre er det stadigvæk bydende nødvendigt, at beregne og forstå dem, hvis vi i sidste ende ønsker at opnå en klar forståelse af, hvordan kvante-tyngdekraft virker. Man må også håbe, at vi ad den vej kan skabe et mere optimalt fundament for fremtidige tyngdekvanteeksperimenter og -målinger.

Litteratur

- [1] A. Einstein (1916), The Foundation of the General Theory of Relativity, *Annalen Phys.* **49**, 769 [Annalen Phys. **14**, 517 (2005)].
- [2] W. Heisenberg (1927), Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Z. Phys.* **43**, 172.
- [3] R.P. Feynman, F.B. Morinigo and W. G. Wagner, Feynman Lectures on Gravitation, Edited by B. Hatfield, Penguin books 1999.
- [4] G. 't Hooft and M.J.G. Veltman (1974), One Loop Divergencies In The Theory Of Gravitation, *Annales Poincare Phys. Theor. A* **20** 69.
- [5] S. Weinberg (1979), Phenomenological Lagrangians, *Physica A* **96**, 327.
- [6] J.F. Donoghue (1994), General Relativity As An Effective Field Theory: The Leading Quantum Corrections, *Phys. Rev. D* **50**, 3874.
- [7] N.E.J. Bjerrum-Bohr, J.F. Donoghue and B.R. Holstein (2003), Quantum gravitational corrections to the nonrelativistic scattering potential of two masses, *Phys. Rev. D* **67**, 084033; <http://xxx.lanl.gov/abs/hep-th/0211072>.

- [8] N.E.J. Bjerrum-Bohr (2005), Effektiv feltteori og kvantegravitation, *KVANT* **16**, nr. 2, marts 2005.
- [9] N.E.J. Bjerrum-Bohr, J.F. Donoghue, B.R. Holstein, L. Planté and P. Vanhove (2015), Quantum bending of light, *Phys. Rev. Lett.* **114**, no. 6, 061301; <http://xxx.lanl.gov/abs/1410.7590>.



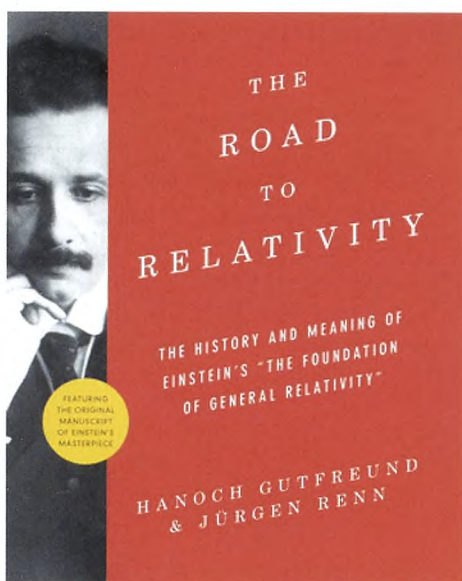
N. Emil J. Bjerrum-Bohr leder "Computations of Amplitudes Group" (CAMP) ved Niels Bohr Institutet, der er støttet af Lundbeckfonden med et Junior Group Leader Fellowship. Hans forskning omhandler de forskellige aspekter af højenergifeltet, specielt amplitudeberegninger, herunder praktiske anvendelser af amplitudeberegninger ved LHC ved CERN, samt mere teoretiske emner såsom kvantegravitation og strengteori.

Aktuelle bøger

Af Anja Skaar Jacobsen og Michael Cramer Andersen

Einsteins mesterværk

Hanoch Gutfreund og Jürgen Renn, "The Road to Relativity: The History and Meaning of Einstein's 'The Foundation of General Relativity' Featuring the Original Manuscript of Einstein's Masterpiece". Princeton University Press 2015, 237 sider, \$ 29 (ca. 200 kr).



Det var i november i år 100 år siden, at Einstein færdiggjorde og publicerede den generelle relativitetsteori, uden tvivl en af de største intellektuelle bedrifter

nogensinde udført af et enkelt individ. I den anledning udgives her Einsteins kanoniske artikel "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" (Foundation of General Relativity) i en annoteret faksimile-udgave af det oprindelige manuskript, som Einstein indsendte til "Annalen der Physik" i marts 1916. Artiklen er hans stadig læseværdige introduktion til den almene relativitetsteori.

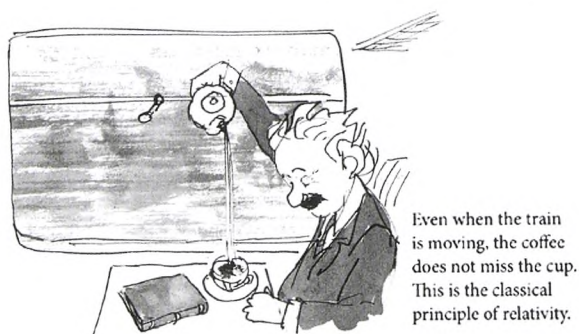
I artiklen samlede Einstein trådene fra de artikler, han skrev i den intense periode i november 1915, hvor han holdt fire foredrag i Det Kongelige Preussiske Videnskabernes Akademi, institutionen der gav ham medlemskab og ansættelse det foregående år. I den nu genoptrykte artikel gav Einstein for første gang en samlet og systematisk introduktion til den almene relativitetsteori.

Et kort indledende afsnit fortæller den kuriøse historie om, hvordan manuskriptet ad omveje endte på Hebrew Universitetet i Jerusalem. Oprindeligt gav Einstein manuskriptet til venen Erwin Freundlich med henblik på fundraising ved salg af manuskriptet, men Einstein forlangte senere manuskriptet tilbage. Ved oprettelsen af Hebrew Universitetet i 1925 donerede Einsteins kone Elsa manuskriptet til universitetet. I 1950 donerede Einstein alle sine papirer til universitetet, der altså siden har huset Albert Einstein Arkivet.

I et meget interessant oversigtskapitel beskrives "Einsteins intellektuelle odysse til den almene relativitetsteori". Forfatterne formår at bringe både teorien og Einsteins arbejde med den til live, ved bl.a. at

inddrage Einsteins notesbøger og brevveksling med kolleger og venner. Hanoch Gutfreund er akademisk direktør for Einstein Arkiverne ved Hebrew University i Jerusalem, hvor Einsteins efterladte papirer er bevaret. Jürgen Renn er direktør for Max Planck Institute for the History of Science i Berlin og har specialiseret sig i historien om skabelsen af den almene relativitetsteori. Han har bl.a. redigeret firebindsværket "The Genesis of General Relativity". Begge forfattere var med til at arrangere en stor udstilling i 2005 med titlen "Albert Einstein: Chief Engineer of the Universe", der også findes som udstillingskatalog.

Tegneren Laurent Taudin har fanget essensen af stoffet på en indlevende og sympatisk måde. De ofte humoristiske tegninger gør det underholdende at læse.

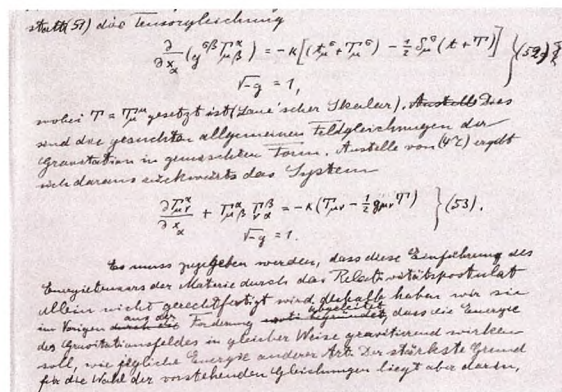


Persongalleriet i historien er uddybende beskrevet i en række korte biografier bagerst i bogen. Her findes også en tidslinje med begivenheder, der ledte op til formuleringen af den almene relativitetsteori.

I hovedparten af bogen præsenteres manuskriptet side for side (45 sider i alt). Til hver side i manuskriptet er der tilknyttet små tekststykker, der leder ikke-specialisten gennem Einsteins argumenter og giver den matematiske kontekst, der er nødvendig for at rekonstruere Einsteins vej til den endelige teori. Hvert tekststykke indledes med et spørgsmål såsom "Hvad var Einsteins lykkeligste tanke?", "Hvornår gik det op for Einstein, at han havde brug for mere sofistikerede matematiske metoder?", "Hvordan bevæger en partikel sig i et tyngdefelt?" eller "Hvad er den matematiske formulering af energi- og impulsbevarelse i generel relativitetsteori?" Spørgsmålene fanger læserens opmærksomhed og gør hende eller ham nysgerrig på, hvad svaret mon er. Samtidig gør spørgsmålene det svære stof mere fordøjeligt, fordi de gør det mere klart for læseren, hvor Einstein er på vej hen og hvilke sammenhænge, fx med eksisterende teorier og med empiriske observationer, der er vigtige for ham at få etableret, når han skal dokumentere validiteten af sin nye teori overfor kollegerne. Det er en anderledes forfriskende måde at skrive videnskabshistorie på, som kan give denne slags finstrukturstudier af legendariske videnskabsmænds intense kreative processer mere appel til en bredere læserskare.

Manuskriptet er smukt gengivet i Einsteins håndskrift på tysk. Det kan også læses i engelsk oversættelse sidst i bogen. Man skal nok være lidt inde i teorien i forvejen for at få det fulde udbytte af de mange formler.

De to udgaver af manuskriptet og ikke mindst kommentarerne supplerer hinanden godt, og der er således noget for enhver læser.



Håndskrevne manuskripter er charmerende og fascinerende og et stærkt vidnesbyrd om en svunden tid. Vi får et nostalgisk, intimt og spændende indblik i skriveprocessen og de beslutninger, og omskrivninger der blev foretaget undervejs, en proces det er svært at følge med nutidens tekstbehandlingssoftware.

Den Einstein vi møder, er den private Einstein opslugt af sit arbejde. Kun i små glimt bliver vi gjort opmærksom på, at kulminationen på gravitationsteorien skete midt i en tumultarisk og tragisk tid mens 1. Verdenskrig rasede, og Einstein boede alene i Berlin efter bruddet med sin familie.

Bogen er elegant og godt skrevet, og det er en god julegaveidé. Den får en varm anbefaling ikke blot til læsere med interesse for videnskabshistorie, men til alle, der vil lære Einsteins teori bedre at kende. Der er stof til mange timers godt selskab med én af historiens største fysikere og den teori, der var hans mesterværk.

Tegn abonnement på KVANT

KVANT – Tidsskrift for Fysik og Astronomi er medlemsblad (med fire årlige numre) for foreningerne:

- **Astronomisk Selskab** (www.astronomisk.dk).
Kontingent: 350 kr. Ungdomsmedlem (18-26 år): 150 kr.
- **Dansk Fysisk Selskab** (www.dfs.nbi.dk).
Kontingent: 400 kr. Studerende og pensionister: 150 kr.
- **Dansk Geofysisk Forening** (www.geofysiskforening.dk).
Kontingent: 200 kr. Studerende: 75 kr.
- **Selskabet for Naturlærens Udbredelse** (www.naturvidenskab.net).
Kontingent: 250 kr. Studerende: 125 kr.

Man kan også abonnere på KVANT uden at være medlem af en forening – det koster 180 kr om året for abonnenter i Danmark og lidt mere for abonnenter udenfor Danmark. Tegn abonnement på:

www.kvant.dk

Er du medlem af *Ungdommens Naturvidenskabelige Forening* (www.unf.dk) koster abonnement 125 kr.

Atlantehavsbølger

– breddeopgave 67 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, 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. 67 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 67. Atlantehavsbølger

Hvordan er sammenhængen mellem bølgehastighed og bølgelængde for bølgerne på Atlantehavet? Begrund svaret ud fra en dimensionsanalyse.

Løsning

I atlantehavsbølger bevæger vandmasserne sig i tyngdefeltet. Tyngdefeltstyrken g må derfor være bestemmende for bølgenes hastighed. Hvis der var vand på Månen, ville tilsvarende tyngdebølger dér bevæge sig med en anden hastighed end på Jorden. Vi må også antage, at bølgehastigheden varierer med bølgelængden λ . Det kan også tænkes, at bølgehastigheden afhænger af bølgehøjden a . Men den eventuelle afhængighed kan vi se bort fra, når a er lille i forhold til λ , da vi ved, at bølgehastigheden ikke går mod nul for a/λ gående imod nul. Derfor kan vi se bort fra a som bestemmende størrelse, når vi begrænser os til at udtale os om ikke for skræppe bølger. Havdybden ser vi bort fra som noget, der har indflydelse på bølgerne, i betragtning af den store afstand til bunden af Atlantehavet sammenlignet med størrelsesordenen af de bølgelængder, vi vil finde bølgehastigheder for. Endelig kunne vi måske også umiddelbart tænke os, at vandets massefylde ρ har indflydelse på vandbevægelserne. Altså, at bølgehastigheden for bølger i et kviksvølvhav ville have andre bølgehastigheder end tilsvarende bølger i Atlantehavet.

Med disse udgangspunkter er bølgehastigheden af bølgerne på Atlantehavet, v , en funktion alene af g , λ og ρ , $v(g, \lambda, \rho)$. Da g , λ og ρ ikke kan kombineres til en dimensionsløs størrelse og kun kombinationen $\sqrt{g\lambda}$ af g , λ og ρ , har dimensionen hastighed har vi følgelig med nødvendighed:

$$v(g, \lambda, \rho) = b\sqrt{g\lambda}, \quad (1)$$

hvor b er et dimensionsløst tal. Hastigheden af bølgerne på Atlantehavet er derfor proportional med kvadratroden af deres bølgelængder, og den er uafhængig af ρ i overensstemmelse med, at alle legemer falder lige hurtigt.

Kommentar

Dimensionsanalyse med det formål at udtrykke en fysisk størrelse Q_1 som funktion af en række andre bestemmende fysiske størrelser, $Q_2, Q_3, Q_4, \dots$, altså

at finde en formel for $Q_1(Q_2, Q_3, Q_4, \dots)$, består i almindelighed af to skridt.

Fysiske størrelser med forskellig dimension, f.eks. en længde og en masse, kan ikke meningsfuldt lægges sammen. Derimod kan de ganges sammen og divideres med hinanden til en ny størrelse med en ny dimension, f.eks. massefylde med dimensionen masse divideret med længde i tredje potens. Derfor skal de dimensionsmæssigt mulige formler søges blandt:

$$Q_1(Q_2, Q_3, Q_4, \dots) = p Q_2^\alpha Q_3^\beta Q_4^\gamma \dots, \quad (2)$$

hvor p er et dimensionsløst tal eller en dimensionsløs funktion af dimensionsløse bestemmende fysiske størrelser eller dimensionsløse kombinationer af bestemmende fysiske størrelser.

Det andet skridt i dimensionsanalyse består derfor i, dels at finde ud af hvilke værdier af $\alpha, \beta, \gamma, \dots$, der giver ligning (2) samme dimension på begge sider af lighedstegnet, dels at finde ud af om der findes dimensionsløse kombinationer af $Q_2, Q_3, Q_4, \dots$, og i givet fald hvilke, som p da kan afhænge af. I den næste artikel i rækken vil jeg uddybe dette. Her vil jeg kommentere det første skridt.

Det første skridt i dimensionsanalyse er valget af de bestemmende fysiske størrelser, $Q_2, Q_3, Q_4, \dots$, for den størrelse Q_1 , der ønskes udviklet en formel for. Oftest er det dette skridt, der volder mine studerende størst vanskeligheder. Til en start vil de typisk mene, at man kun kan vælge de bestemmende fysiske størrelser, hvis man ad anden vej kender det resultat, man vil udlede. Så hvilke fysiske størrelser kan en utrænet, uden at kende svaret på forhånd, tænke, at bølgehastigheden af bølgerne i Atlantehavet afhænger af?

Alt inkluderet, har jeg oplevet følgende anførte forslag til bestemmende fysiske størrelser for bølgehastigheden:

$$v = v(g, \lambda, \rho, \eta, \gamma, a, h, f, x, y, t) \quad (3)$$

Her står g for tyngdefeltstyrke, λ for bølgelængde, ρ for massefylde, η for viskositet, γ for overfladespænding, a for bølgeamplitude, h for havdybde, f for bølgefrequens, x og y for rumkoordinater, t for tid. Hvilke er da argumenterne for blandt disse fysiske størrelser at nøjes med g, λ og ρ , som gjort ved løsningen af opgaven?

Argument 1. Resultatet af en modelberegning afhænger af modellens parametre, ikke af dens variable. Dimensionsanalyse er en metaanalyse af, hvilken art resultater forestillede modelberegninger er begrænset

til at kunne føre til, uden at foretage beregningerne, afhængig af de antagelser, som modellerne er baserede på. De fysiske størrelser x , y og t indgår i modelberegning af bølger. Men de indgår ikke i det resultat vi efterspørger. Det er givet ved modellens parametre og ikke dens variable x , y , og t . På samme måde som, hvis vi skulle modellere en bygningskonstruktion ved hjælp af en ret linje, $y = ax$, og en cirkel, $x^2 + y^2 = r^2$, for at finde højden h af deres skæringspunkt. Her har a og r rolle af parameter, x og y rolle af variable i modellen. Resultatet, $h = ar/\sqrt{a^2 + 1}$, afhænger af parametrene a og r , ikke af variablene x og y . Tilsvarende er det misforstået (og meningsløst) at medtage x , y og t som bestemmende for v .

Argument 2. De bestemmende fysiske størrelser skal repræsentere indbyrdes uafhængige fysiske forhold. For frekvensen f gælder det, at den matematisk er bundet sammen med v og λ , idet $v = f\lambda$. Vi kan derfor ikke vælge f og λ uafhængigt af hinanden som bestemmen-
de for v . Indsættes $\lambda = v/f$ i ligning (1), fås

$$v(g, f, \varrho) = b^2 g / f \quad (4)$$

Ligningerne (1) og (4) er begge fysiske ligninger. De viser en sammenhæng i naturen. Derimod er $v = f\lambda$ en matematisk ligning. Den viser en logisk konsekvens af, at vi taler om periodiske bølger. Fysisk set fortæller ligningerne (1) og (4) det samme. Forskellen imellem dem har alene med en matematisk reformulering at gøre. Ved dimensionsanalysen kan vi vælge at regne f for bestemmende input parameter. I så fald vil vi nå frem til ligning (4), hvis vi undlader at regne med λ som bestemmende input parameter samtidigt. Vi kan ikke regne både f og λ for bestemmende uafhængigt af hinanden.

Argument 3. Valget af bestemmende fysiske størrelser afhænger af rækkevidden af den ønskede formel. Vi kan nøjes med at interessere os for bølger med bølgelængder, der er små i forhold til havdybden. Så afhænger v ikke af h . Tilsvarende afhænger v ikke af bølgehøjden a , hvis vi nøjes med at interessere os for bølger, hvor bølgehøjden er lille i forhold til bølgelængden. Endelig kan vi se bort fra overfladespændingen γ som bestemmende, ved at forudsætte bølgelængden stor nok til, at tyngdekræfter dominerer over overfladespændingskræfter.

Argument 4. Kun relevante fysiske størrelser skal tages i betragtning. Vandets viskositet η er en egenskab ved vandet, der fysisk set er uafhængig af f.eks. vandets massefylde ϱ . Men den er umiddelbart irrelevant for bestemmelsen af v . Viskositeten har først og fremmest betydning for dæmpningen af bølgerne ved, at deres mekaniske energi i det lange løb bliver til termisk energi, ikke for bølgenes hastighed. Derimod er der forskelligt indhold af mekanisk energi i ens bølger i væsker med forskellig massefylde. Derfor er det også umiddelbart relevant at antage, at v afhænger af ϱ . Det er da også tilfældet for kappilarbølger. For Atlanterhavets tyngdebølger – som er det, vi har udviklet formler for – udgik derimod ifølge dimensionsanalysen også ϱ som bestemmende for v . For mange mekaniske fænomener drevet af netop tyngdekræfter udgår størrelsen

af involverede masser af beregningerne, da de optræder ens på begge sider af lighedstegnet i Newtons II lov.

Af de to skridt, som dimensionsanalyse består af, er det valget af inputstørrelser gennem overvejelser som de her antydede, der er det svære skridt. Det kræver forståelse af den begrebslige forskel imellem modelleres parametre og variable, forståelse af forskellen imellem matematiske lighedstegn (udsagn om logisk sammenhæng) og fysiske lighedstegn (udsagn om empirisk sammenhæng), sans for modellering ved hjælp af idealiseringer, og overblik over, hvilke fysiske størrelser, der er relevante for givne fænomener. Når først Q_2 , Q_3 , Q_4 , ... er valgt, er det i forhold hertil en ret formel og overkommelig sag at gennemføre analysen ved hjælp af ligning (2).

Når den (fejlagte) opfattelse findes, at dimensionsanalyse kun kan benyttes til at finde resultater, som er fundet på anden måde i forvejen, hænger det sammen med vanskelighederne ved valget af inputstørrelser. Det er måske disse vanskeligheder, der er grunden til, at dimensionsanalyse ikke er ret hyppigt forekommende i indledende universitetsundervisning i fysik? Det antages måske, at man, for at dimensionsanalysen skal give mening, først må forberedes fysikmæssigt ad anden vej.

Imidlertid er det en overvejelse værd, om vanskelighederne ved valg af inputstørrelser ved en dimensionsanalyse ikke modsvarer nogle af de afgørende vanskeligheder på vejen til at lære at tænke, som fysikere gør, i det hele taget. I så fald er dimensionsanalysen måske den oplagte indgang til at lære fysik, forud for, at der udbygges med matematik.

Forståelsen af forskellen imellem parametre og variable i en model, forståelsen af forskellen imellem matematiske og fysiske lighedstegn, og forståelsen af forskellen imellem at overse og at se bort fra, er alle afgørende ved modellering og fysisk problemløsning. I stedet for at forudsætte disse forståelser for at give sig i kast med dimensionsanalyse, kan man spørge om sagen ikke kan vendes på hovedet: Måske er arbejde med dimensionsanalyse en af de mere direkte veje til at træne disse forståelser? Samtidig kan dimensionsanalysen undervisningsmæssigt bruges til at introducere mange dele af fysikken forud for, at der senere udbygges med den matematik, der for tidligt indført kan komme til at overskygge fysikindholdet.

Breddeopgave 68. Bohrs atommodel

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt træne dimensionsanalyse ved løsningen af denne opgave fra breddekurset på RUC (fra eksamen juni 2009, nummer 68 i rækken her i KVANT):

Niels Bohr blev i 1913 ført på sporet af sin model for brintatomet ved at bemærke, at det ikke er muligt at danne en karakteristisk længde svarende til atomets størrelse fra naturkonstanterne m_e , elektronens masse, og $e^2/4\pi\epsilon_0$, konstanten i Coulombs lov, der er de naturkonstanter, der kan indgå i resultatet af en klassisk beregning. Hvis derimod h , Plancks konstant, inddrages, fremgår der herved en karakteristisk længde af den rigtige størrelsesorden. Hvordan er Bohrradius givet ved m_e , h , og $e^2/4\pi\epsilon_0$? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer.

Swarm-missionen og Jordens magnetfelt

Af Eigil Friis-Christensen, forhenværende direktør, DTU Space og Nils Olsen, DTU Space

For to år siden, den 22. november 2013, sendte Det europæiske Rumfartsagentur, ESA, tre satellitter i kredsløb i forskellige baner omkring Jorden. Målet med missionen er at opnå de hidtil bedste målinger af Jordens magnetfelt med henblik på at opnå ny viden om de fysiske processer i Jordens indre og i Jordens omgivelser til gavn for videnskaben og de mange anvendelser, som er knyttet til præcis viden om Jordens magnetfelt. Missionen, der har navnet "Swarm", er foreslået og udviklet af et internationalt konsortium med dansk videnskabelig ledelse.

Baggrund

Den førende danske position inden for dette forskningsområde er ikke tilfældig, men bygger på samarbejdet i og erfaringerne fra den første danske videnskabelige satellit, Ørsted, som blev sendt op i 1999, og som leverede videnskabelige data næsten frem til opsendelsen af Swarm. Ørsted-satellittens hovedinstrument, som måler den magnetiske feltvektor i rummet, bygger på en helt ny teknologi udviklet på Danmarks Tekniske Universitet, DTU. Ørsted-satellitten var banebrydende ikke alene inden for geomagnetisk forskning, men også fordi det var den første minisatellit (ca. 60 kg), som ikke blot var en teknologidemonstration, men som gav helt nye videnskabelige resultater, der er sammenlignelige med eller bedre end resultater fra langt dyrere satellitter. Ørsted-satellitten vakte fra første færd stor interesse i internationale forskningskredse. Denne interesse blandt forskere kunne udnyttes til at etablere et frugtbart samarbejde med NASA, som betalte for opsendelsen, og som tillige havde midler til amerikanske forskeres anvendelse af Ørsted-satellittens målinger. Så snart den danske bevilling til Ørsted-satellitten forelå, seks år før opsendelsen, blev der i projektet etableret et internationalt "science team", som blev inddraget aktivt i forberedelsen af missionen. En styrke i dette rumfartssamarbejde var, at det som noget nyt omfattede forskere inden for discipliner vedrørende både den faste jords fysik og ionosfære- og magnetosfæreforskningen.

Dette samarbejde betød, at da muligheden forelå, kunne gruppen udarbejde og til ESA fremsende et videnskabeligt og teknologisk gennemarbejdet projektforslag, Swarm, som i hård konkurrence blandt flere end 25 forslag inden for mange forskellige forskningsfelter, i 2004 blev udvalgt til at være den femte mission i ESA's Explorer-serie inden for dets "Earth Observation Programme".

Det geomagnetiske felt

Det magnetiske felt udgør kilden til en af de stærkeste kræfter, som påvirker partikler overalt i universet. Også på vores planet er magnetfeltet en dominerende kraft, som er styrende for forholdene i Jordens magnetosfære, hvilket er området beliggende fra den øverste ioniserede del af atmosfæren (i omkring 100 km højde) ud til det område, hvor Solens magnetfelt dominerer, hvilket i retning mod Solen er mellem 10 og 15 jordradier. Ikke desto mindre er vores forståelse af oprindelsen af det geomagnetiske felt og dets dynamik – for ikke at tale

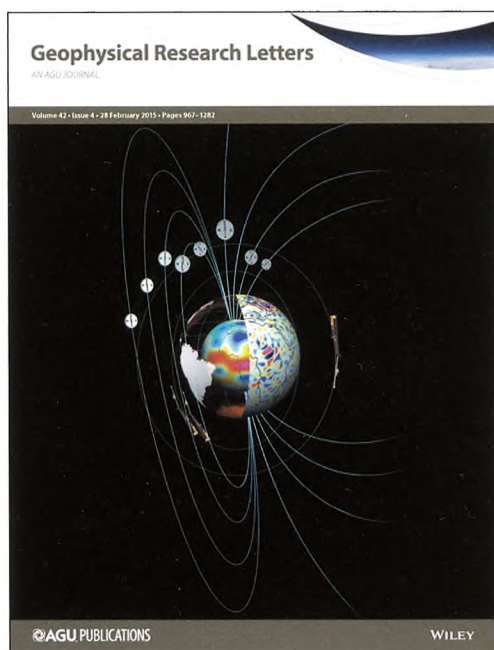
om vores mulighed for at forudsige udviklingen heri – meget lille.

Engang vurderede Einstein oprindelsen af Jordens magnetiske felt til at være blandt de tre mest vigtige og uløste problemer i fysikken. På Einsteins tid gik nogle fysikere endog så vidt at postulere nye naturlove for at forklare geomagnetismen. I dag ved vi, at magnetfeltet skabes af en dynamo i Jordens flydende ydre kerne, hvor smeltet jern og nikkel bevæger sig med op til 30 km/år for derved at danne et elektrisk strømsystem. Men endnu ved vi ikke i detaljer, hvordan dynamoen virker, og hvorfor dipolfeltet er blevet 10 % mindre gennem de seneste 150 år. Vil dette fortsætte og føre til en polvending inden for de næste hundrede eller tusind år? Dette er sket mange gange før, sidste gang for 780.000 år siden. Men vi er nu omsider tæt på at have globale data med den nødvendige rumlige og tidslige opløsning samt tilstrækkelig computerkraft til at kunne efterprøve mange af de fremsatte teorier og modeller for oprindelsen af Jordens magnetfelt og dets tidslige variationer.

Det geomagnetiske felt er ikke alene relevant for forståelsen af dannelsen og udviklingen af vores egen planet. Jordens magnetfelt vekselvirker med solvinden, som er en varierende plasma bestående af ioniserede partikler og tilhørende magnetfelt, som til stadighed udsendes fra Solen. Jordens magnetosfære tilpasser sig hele tiden solvindens tryk og magnetfelt. Det sker gennem fysiske processer, som vi kalder rumvejret. Vi kan observere rumvejret, både gennem in situ målinger på satellitter i kredsløb og gennem dets virkninger på Jorden, for eksempel i form af magnetiske storme, som giver kraftige elektriske strømme i den øverste del af atmosfæren ledsaget af nordlys. Men de globale fysiske processer, som er anledning hertil, er endnu ikke tilstrækkeligt forstået, til at vi kan forudsige virkningen på Jorden af variationer i Solens output. Flere internationale forsknings- og satellitprojekter er iværksat for at øge vores viden på dette område. Med Swarm-missionen har ESA tilvejebragt de hidtil mest nøjagtige observationer af Jordens magnetfelt og dets tidslige variationer.

Kilderne til magnetfeltet

De mest nøjagtige observationer af Jordens magnetfelt er midlet, men ikke målet med missionen. Det videnskabelige mål er at anvende målingerne til at opnå den bedste viden om og forståelse af kilderne til magnetfeltet.



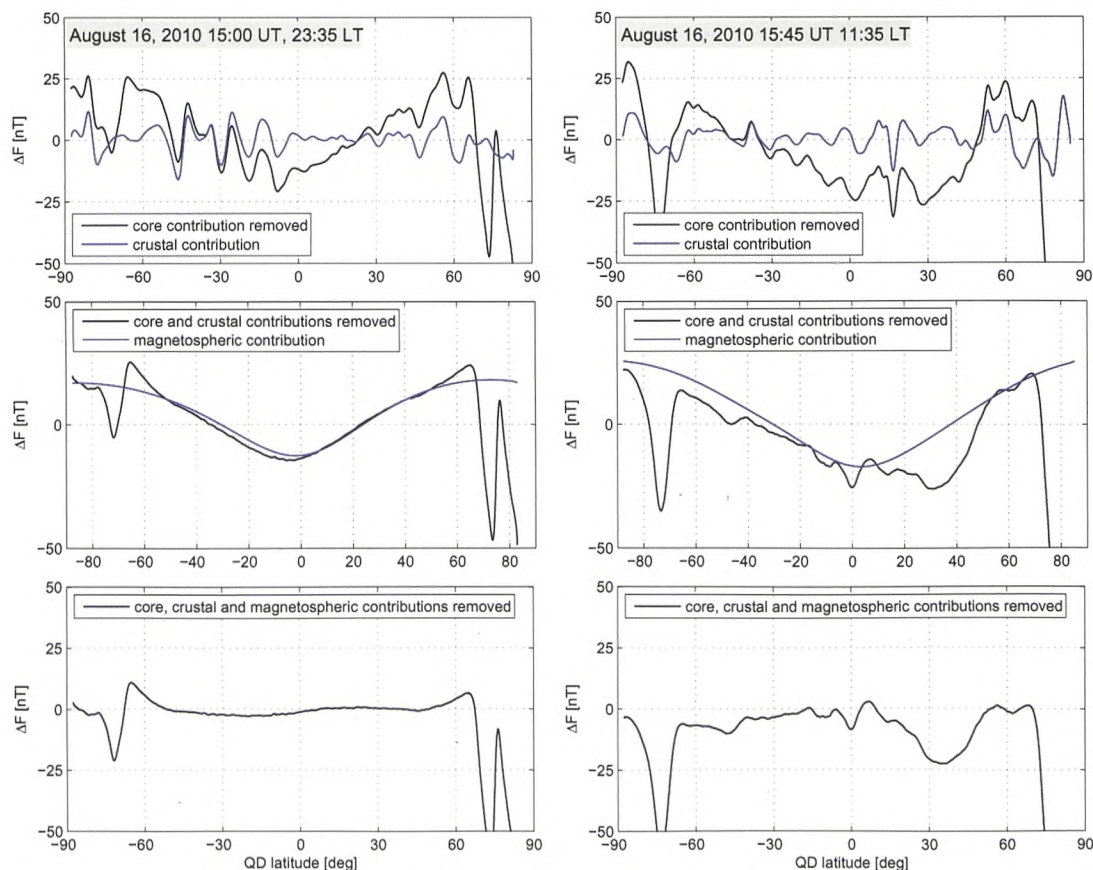
Figur 1. Figuren viser en tredimensionel præsensation af resultaterne af analysen af det første års data vedr. feltet fra Jordens kerne i 3000 km dybde samt fra feltet i Jordens skorpe.

Kilderne til Jordens magnetfelt er illustreret i figur 1 taget fra forsiden af tidsskriftet Geophysical Research Letters. Figuren viser nogle af resultaterne af analysen af det første års data. Kilderne til magnetfeltet kan opdeles i to kategorier: Elektriske strømme og magnetiseret materiale. Elektriske strømme findes overalt i Jorden og dens omgivelser. Det mest betydende af disse

strømsystemer findes i Jordens flydende, metalliske kerne i en dybde på mere end 3000 km. Udbredte strømsystemer med langt svagere strømme findes i magnetosfæren og i ionosfæren og faktisk også i oceanerne, idet saltvand er elektrisk ledende. Magnetiseret materiale findes især i Jordens skorpe (de øverste 5 til 30 km) i form af bjergarter. Det målte felt herfra er illustreret i figur 1 sammen med det geomagnetiske felt ved grænsen mellem kappen og Jordens flydende kerne i 3000 km dybde.

I Jordens kappe (dvs mellem 30 og 3000 km dybde) er temperaturen for høj, til at der kan eksistere en permanent magnetisering, men da kappen er elektrisk ledende, findes også her elektriske strømme. Disse strømme er induceret gennem ændringer i det magnetiske felt fra de elektriske strømme i ionosfæren og i magnetosfæren. I sagens natur er de inducerede strømme endnu svagere end de primære strømme, men simuleringsforsøg har vist, at når satellitterne i løbet af nogle år har nået deres optimale baner, kan vi med Swarm-missionens nøjagtige målinger forvente de første resultater nogensinde om strukturen af kappens ledningsevne i tre dimensioner, dvs. som funktion af både beliggenhed og dybde.

Vi kan få en fornemmelse af sammenhængen mellem de forskellige bidrag til det målte magnetfelt i satellithøjde ved at se på figur 2. Venstre side af figur 2 viser den del af satellittens bane, som ligger på natsiden, medens højre side beskriver feltet på dagsiden. Målingerne er fra den tyske CHAMP-satellit, som havde en lavere bane end Ørsted og derfor var særlig velegnet til at måle detaljerne i feltet fra skorpen og ionosfæren.



Figur 2. Målinger af magnetfeltet gennem et omløb af den tyske CHAMP-satellit. Figuren viser bidragene fra de forskellige kilder på hhv. nat- og dagsiden. Se teksten for yderligere detaljer.

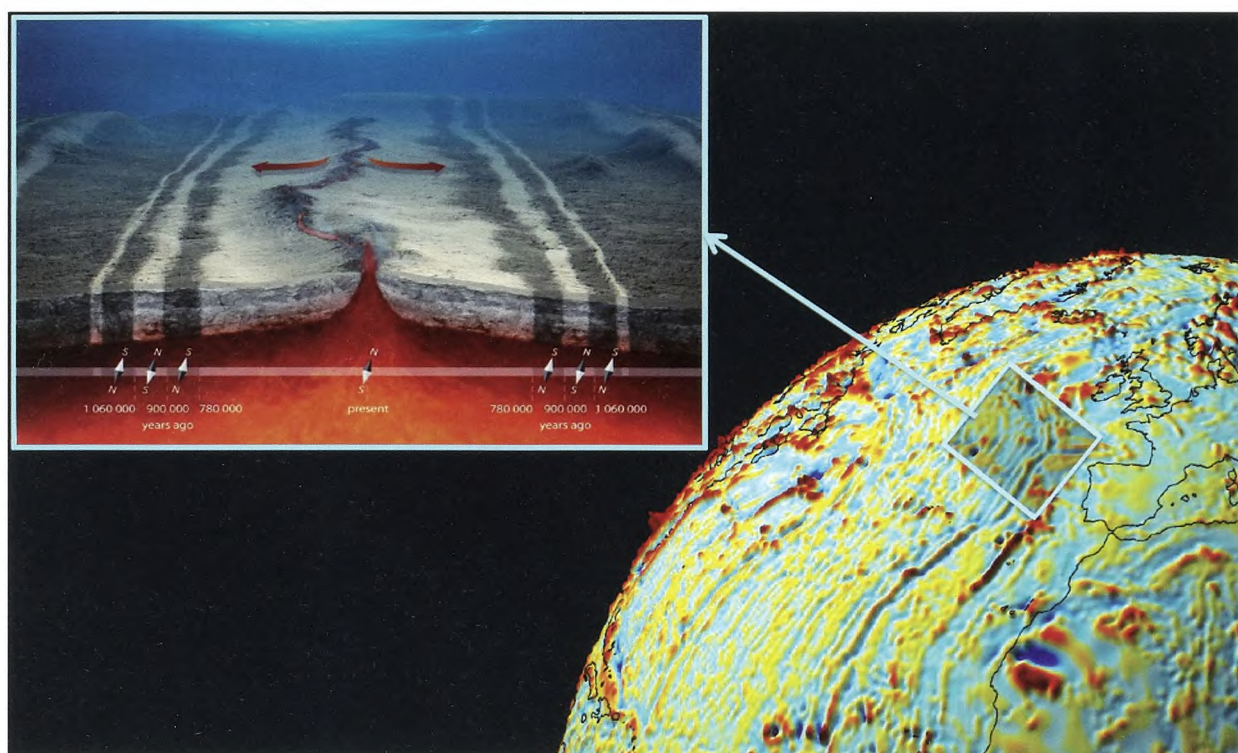
Selv på de mest magnetisk rolige dage ses variationer i magnetfeltet, som skyldes de elektriske strømme i magnetosfæren og i ionosfæren. Disse strømme er stærkest på Jordens dagside, hvor Solens ultraviolette stråling giver anledning til en kraftig forøgelse af ledningsevnen i ionosfæren i ca. 100 km højde over Jorden. Da magnetfeltet fra de stærke strømme i Jordens flydende kerne er meget stort i forhold til de andre bidrag, er en numerisk model af dette felt trukket fra observationerne. Resultatet heraf er gengivet ved den sorte kurve i figur 2 (øverste panel). Den blå kurve viser en model af skorpefeltet, som i figur 2 (midterste panel) er trukket fra observationerne, illustreret ved den sorte kurve. Det, der er tilbage af observationerne, stammer fortrinsvis fra kilder uden for Jorden, dvs. fra magnetosfæren og ionosfæren. Strømmene i magnetosfæren er beliggende flere tusind kilometer fra satellitterne og giver derfor en storskala-variation, som tydeligt ses, og som relativt let kan modelleres i form af den blå kurve. Såfremt også denne model trækkes fra observationerne, resterer der et bidrag fra strømmene i ionosfæren, i en afstand på kun få hundrede km. Dette bidrag er vist i figur 2 (nederste panel). Forskellen på ionosfærestrømmene på nat- og dagside er her meget tydelig, idet ledningsevnen skyldes den ioniserende UV-stråling fra Solen. Men i polområderne omkring 20 grader fra de geomagnetiske poler, den såkaldte nordlyszone, eksisterer elektriske strømme både på natsiden og på dagsiden, fordi ledningsevnen her er kraftigt forøget på grund af elektrisk ladede partikler, især elektroner, som er blevet accelereret langs de magnetiske feltlinjer fra magnetosfæren ned til ionosfæren, hvor de medvirker

til øget ionisering. På grund af satellittens relativt lille afstand til strømmene i ionosfæren er observationerne af disse relativt kortbølgede, og vanskelighederne ved at modellere disse strømme er yderligere øget, ved at disse strømme, især i nordlyszonen, også varierer meget hurtigt.

De videnskabelige spørgsmål

Med opsendelsen af den danske Ørsted-satellit i 1999 og den tyske CHAMP-satellit i 2000 begyndte en æra med kontinuerligt forbedrede modeller af Jordens magnetfelt, både som grundlag for grundforskningen og til gavn for teknologiske anvendelser. Swarm-missionen med dens forbedrede instrumentering og den omhyggeligt designede konstellation af tre satellitter giver os ikke blot den hidtil bedste beskrivelse af det magnetiske felt, men vil også give os de hidtil bedste målinger af ændringerne i magnetfeltet fra Jordens indre. Disse ændringer er udtryk for strømminger af materiale i Jordens flydende kerne, som vi nu har mulighed for at observere med hidtil uset rumlig og tidslig opløsning.

Magnetfeltet fra Jordens skorpe beskrives ved de såkaldte magnetiske anomalier, områder hvor det målte magnetfelt er lidt større eller lidt mindre end bidraget fra Jordens kerne, se figur 3. Kortlægningen af anomalierne bliver i udstrakt grad, sammen med andre geologiske målinger, anvendt til geologisk kortlægning, især i forbindelse med eftersøgning af olie- og mineralforekomster. Derfor er der stor interesse for at anvende satellitdata til at øge detaljerne i de globale kort, således at de bedst muligt kan understøtte de lokale detaljerede målinger med fly eller skibe.



Figur 3. Kort over magnetfeltanomalier i Jordens skorpe. De røde (blå) farver viser positive (negative) anomalier, dvs. områder, hvor magnetfeltet er lidt kraftigere (svagere) end magnetfeltbidraget fra Jordens kerne. Udsnittet illustrerer, hvorledes nogle af anomalierne i Atlanterhavet er dannet ved opstigning af magma i området mellem de tektoniske plader. Ved størkningen af magmaen fik bjergarterne et magnetfelt svarende til feltet fra Jordens kerne i den pågældende periode og de indeholder derved information om magnetfeltet tilbage i tiden – som en “geologisk båndoptager”.

Især dette aspekt har været bestemmende for konfigurationen af de to satellitter i de lave baner begyndende i ca. 460 km højde. De to satellitter skal flyve parallelt i en afstand på ca. 150 km ved ækvator for at være i stand til at måle anomalier i magnetfeltet, som har relativt lille udstrækning. Allerede efter et års data har Swarm været i stand til at kortlægge skorpen med samme nøjagtighed som CHAMP-satellitten har kunnet gøre ved anvendelse af 10 års observationer. Det betyder, at vi i løbet af de næste år, når Swarm-satellitterne er kommet tættere på jordskorpen og dermed vil måle et kraftigere signal, kan forvente en betydelig forbedring af den rumlige opløsning af skorpen magnetfelt.

Mineralsammensætningen og temperaturen i Jordens kappe er ikke kendt. Adskillige teorier er fremsat, men endelige svar afventer en metode til at verificere dem gennem målinger. Swarm-missionen er designet til at kunne give nogle svar på denne udfordring ved at måle kappens ledningsevne, som er en funktion af både mineralsammensætning og temperatur. Ledningsevnen bestemmes ved at måle det meget svage magnetfelt, som skabes af strømme, der induceres i kappen af ændringer i de elektriske strømme uden for Jorden. Til at gennemføre disse analyser kræves samtidige målinger fra satellitter langt fra hinanden, dvs. i baner, der ideelt set er vinkelrette på hinanden. En så stor forskel på banerne kan kun opnås ved enten en særskilt opsendelse eller ved at den tredje satellit bringes i en lidt højere bane, ca. 530 km, hvis baneplan langsomt ændres. Dette vil i løbet af nogle år bringe satellitten i passende afstand fra de to andre satellitters baner.

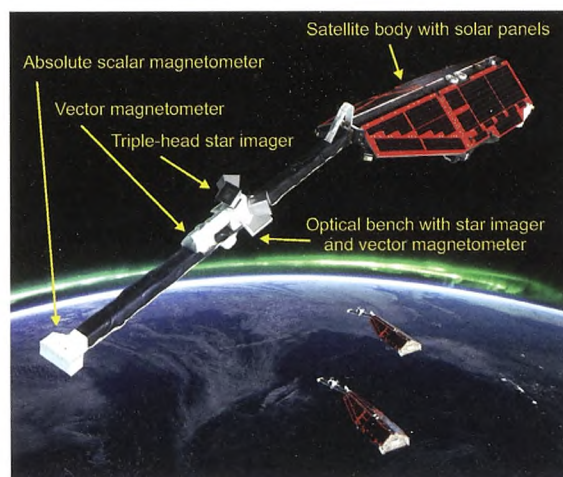
Udforskning af rumvejret er et af hovedformålene med missionen. Da magnetfeltet er den mest betydende kontrollerende faktor i de fysiske processer, der ledsager rumvejret, er præcise målinger af magnetfeltet og især samtidige målinger på flere steder en helt afgørende forudsætning for en øget forståelse af disse processer. Samtidige målinger af det elektriske felt giver en endnu bedre mulighed for at bestemme de elektriske strømme ud fra de magnetiske målinger. Disse undersøgelser vil i mange tilfælde være koordineret med jordbaserede kampagner, gennem hvilke man med radarmålinger af plasmadriften i ionosfæren, optiske målinger af nordlysenes beliggenhed og målinger af magnetfeltet på et stort antal målestationer på Jorden, kan supplere de rumbaserede observationer.

Missionen

Hvad er så forskellen på Ørsted og Swarm bortset fra, at Ørsted kun er en enkelt satellit? Ørsted var designet til at opnå de ønskede observationer inden for en meget lille økonomisk ramme, ca. 10 % af omkostningerne ved tidligere geomagnetiske missioner. Men det stod også klart, at uanset kvaliteten er der nogle fundamentale og uoverstigelige begrænsninger ved anvendelsen af målinger fra en enkelt satellit. Dette er en konsekvens af, at nogle af kilderne til det målte magnetfelt er bundet til Jorden, mens andre er styret af Solens position. En separering af bidragene fra de forskellige kilder forudsætter data, der er hensigtsmæssigt fordelt i tid og rum. Derfor fremsatte gruppen bag Ørsted allerede før opsendelsen af Ørsted-satellitten et projektforslag til

ESA om et mere ambitiøst projekt baseret på foretagelse af samtidige observationer i forskellige kredsløb om Jorden. Efter udvælgelsen af Swarm blev en væsentlig del af forskernes forberedende arbejde specifikt viet til at finde og dokumentere den optimale konfiguration af de tre satellitter i forhold til de opstillede videnskabelige mål.

Kravet om optimal og kontrolleret anbringelse af de tre Swarm-satellitter i specifikke baner om Jorden forudsætter, at der ombord på satellitterne er mulighed for at styre satellittens bane. Dette opnås ved at medbringe en beholder med gas, som gennem dyser kan udledes i forskellige retninger og derved langsomt ændre satellittens bane. Dette er fuldstændig forskelligt fra Ørsted-satellitten, hvis bane ikke aktivt kunne ændres efter opsendelsen, og som derfor kunne laves meget kompakt med en totalvægt ca. 10 gange mindre end en af Swarm-satellitterne. Men dette betød også, at Ørsted måtte anbringes i en relativt høj bane for ikke at risikere, at den ville falde for hurtigt ned i Jordens atmosfære.



Figur 4. Figuren viser strukturen af Swarm-satellitterne og placeringen af de magnetiske instrumenter. På instrumentbommen er yderst anbragt instrumentet, der måler styrken af magnetfeltet (skalarfeltet) med meget stor nøjagtighed. Længere inde er anbragt vektormagnetometeret, der sammen med stjernekameraet giver den magnetiske magnetfeltvektor i et kendt referencesystem. Skalarfeltmålingerne anvendes til løbende kalibrering af vektormålinger.

Swarm-satellitterne (se figur 4) er forsynet med de samme instrumenter, som Ørsted er forsynet med. Dog er teknologien naturligvis yderligere udviklet. Hovedinstrumentet er vektormagnetometeret, der måler de tre komponenter af den magnetiske feltvektor med en nøjagtighed på 0,5 nanotesla (nT). Den absolutte nøjagtighed hviler på en meget nøjagtig bestemmelse af retningen, hvilket sker gennem stjernekameraet, som er blevet markant forbedret bl.a. gennem udvidelse med flere kameraer i forskellige retninger. Da Jordens magnetfelt er ca. 50000 nT skal retningen bestemmes med en nøjagtighed på 0,5/50000 eller 1/100000 radian svarende til ca. 2 buesekunder. Det betyder, at stjernekameraets målinger skal korrigeres for aberrationen, den tilsyneladende ændring af retningen til stjernerne, som pga. af Jordens hastighed i banen omkring Solen på 30 km/s i forhold til lyshastigheden er 1/10000 radian eller ca. 20 buesekunder.

Derudover er Swarm-satellitterne forsynet med nogle yderligere instrumenter til observering af parametre, der er af betydning for rumvejret, herunder det elektriske felt og elektrontætheden. Et instrument til måling af satellitternes acceleration giver mulighed for at beregne gnidningsmodstanden og dermed tætheden af atmosfæren i satellithøjde. Atmosfærens tæthed øges i takt med den opvarmning, som de energirige elektrisk ladede partikler giver anledning til, når de rammer atmosfæren.

Fremtiden

Med de resultater, der allerede er opnået gennem det første års data, er der ingen tvivl om, at Swarm-missionen vil leve op til de mål, der blev opstillet ved valget af missionen. Det gælder fx bestemmelsen af de langsomme tidslige ændringer af strømmene i Jordens flydende kerne. Disse er udtryk for bevægelse af materiale og er nødvendige for at afprøve de fremsatte dynamoteorier. Ovenfor er nævnt den forventede forøgelse af den rumlige opløsning af skorpefeltet samt muligheden for at bestemme ledningsevnen i Jordens kappe i tre dimensioner. Fælles for disse videnskabelige undersøgelser er, at de er baseret på statistiske undersøgelser af store mængder af data, hvilket vil sige, at resultaterne vil blive mere nøjagtige, jo længere tid missionen varer og instrumenterne holder. Den nominelle operationsperiode er fire et halvt år. Men ESA har allerede nu tilkendegivet, at hvis satellitterne holder længere – og meget tyder på, at de gør – vil der blive afsat midler til at forlænge missionen. Måske vil det også give mulighed for at foreslå en efterfølger for missionen, idet der er behov for en kontinuerlig monitorering af Jordens magnetfelt fra rummet. Specielt kan man forvente et behov for, at rumvejret i endnu mere udstrakt grad bliver overvåget og forsøgt forudsagt, idet det moderne teknologisk udviklede samfund er afhængig af en infrastruktur, som i højere og højere grad bygger på anvendelsen af satellitter. Men da alle anvendelser kræver præcis viden om hovedfeltet, som er det langsomt varierende magnetfelt fra strømme i Jordens kerne, vil det også være nødvendigt at måle dette med jævne mellemrum. Således er det nødvendigt hvert femte år at udarbejde en ny matematisk beskrivelse (model) af det geomagnetiske felt til forskellige teknologiske anvendelser, og fremtidige modeller uden fortsat adgang til satellitdata vil i løbet af få år slet ikke kunne leve op til de krav, som vi i dag stiller til nøjagtigheden af dem.

Litteratur

- [1] Friis-Christensen, E., H. Luehr, and G. Hulot (2006), Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field, *Earth, Planets and Space*, **58**, 351-358; <http://link.springer.com/article/10.1186/2F03351933>.
- [2] Friis-Christensen, E., H. Luehr, G. Hulot, R. Haagsmans, M. Purucker, (2009), Geomagnetic Research from Space, *Eos*, **90** (25), 213-214; <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009EO250002/full>.
- [3] Olsen, N., & Stolle, C. (2012), Satellite Geomagnetism. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **40**, 441-465; <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-042711-105540>.

- [4] Olsen, N. et al., (2015), The Swarm Initial Field Model for the 2014 geomagnetic field, *Geophys. Res. Lett.* **42**(4), 967-1282; <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014GL062659/full>. Denne artikel indgår i en speciel sektion med navnet: ESA's Swarm Mission, One Year in Space.
- [5] ESA: Swarm – Earth Explorers, http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/Swarm/Overview2



Eigil Friis-Christensen, adjungeret forskningsprofessor, Catholic University of America, tilknyttet NASA Goddard Space Flight Center. Direktør for DTU Space 2007-2012. Videnskabelig leder af Ørsted-projektet 1993-1997, Swarm "Lead Investigator" og formand for "ESA's Swarm Mission Advisory Group" 2002-2015.



Nils Olsen, professor i geofysik ved DTU og adjungeret professor ved Københavns Universitet. Leder af Swarm ESL konsortiet der omfatter 13 europæiske og nordamerikanske institutter, som står for den videnskabelige dataanalyse af målingerne fra Swarm-satellitterne.

PFEIFFER VACUUM

PFEIFFER-adixen-TRINOS

samt vore partnere

VAT-COMVAT-GAMMA-HSR

TAKKER FOR I ÅR OG
ØNSKER ALLE VORE KUNDER

**Glædelig Jul
&
Godt nytår**

På gensyn i 2016

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
Erik.Fjeldgaard@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com

H.C. Ørsted Medaljen til gymnasielærer Henrik Parbo

Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) tildelte den 7. december 2015 H.C. Ørsted Medaljen i bronze for fremragende formidling af naturvidenskab til lektor Henrik Parbo, Aarhus Katedralskole. Overrækkelsen fandt sted på Geologisk Museum i København efter det sidste foredrag i SNU's efterårssæson. Efter uddelingen var der reception.

SNU's formand Dorte Olesen siger om valget af Henrik Parbo blandt de mange indstillede: "Henrik Parbo er en unik formidler, som gennem 40 år har formået at engagere den ene generation efter den anden med sin viden og indsigt i kemi og fysik – fag som idag er helt centrale for at forstå den avancerede udvikling i vores samfund, men desværre nok svære at gennemskue for mange. SNU ønsker med prisen at markere, hvor vigtigt det er at få formidlet denne forståelse, og hvor stor en indsats det rent faktisk kræver."

Henrik Parbo har med en relevant og vedkommende formidling af kemien gennem 40 år formået at inspirere og engagere sine elever og samtidig udvikle og styrke faget kemi i gymnasiet, bl.a. gennem sine lærebøger og sit samarbejde med erhvervslivet. Henrik Parbo er overordentligt vellidt, fagligt dygtig og vidende. Han har et stort engagement, han stiller krav til eleverne og er med sit venlige og hjælpsomme væsen meget vellidt.

Han har været en af hovedkræfterne på lærebogssystemet *Kend Kemien 1-3* og medforfatter på bl.a. *Kemi i perspektiv*, *Kemiske demonstrationsforsøg* og flere temahæfter og bøger, som viser kemiens anvendelse og samfundsmæssige betydning. Henrik Parbo har været ansat på Aarhus Katedralskole siden 1975 med fagene kemi og fysik og har været en central deltager i skolens samarbejdsprojekter med erhvervslivet gennem mange år bl.a. med elevprojekter på virksomheder.

I perioden 1986-1993 var Henrik Parbo fagkonsulent i kemi og med til at præge og udvikle faget kemi ved gymnasireformen i 1988, hvor faget Kemi A blev styrket fra at være et forsøgsfag til ordinært A-fag. Som lærer og censor på kurset *Ke-*

miske Undervisningsforsøg på Aarhus Universitet har han været med til at sikre den eksperimentelle dimension en central plads i undervisningen.

Henrik Parbo er også en værdsat kollega, inspirerende, fagligt utroligt vidende og samtidig nysgerrig, levende og glad for at samarbejde. Kolleger hører i øjeblikket ofte om det spændende nye udviklingsarbejde med formidlingsprojektet Smag for livet, der støttes af Nordeafonden.

Om SNU og H.C. Ørsted Medaljen i bronze

Selskabet for Naturlærens Udbredelse – i daglig tale kaldet SNU – blev stiftet af H.C. Ørsted i 1824. SNU er et samlingspunkt, hvor fremtrædende forskere formidler den nyeste viden, ofte på tværs af traditionelle faggrænser. SNU har fra 2012 sat fokus på den vigtige formidling i gymnasiet ved en årlig uddeling af H.C. Ørsted Medaljen i bronze til inspirerende gymnasielærere og fremragende formidlere i den gymnasiale verden inden for Selskabets fagkreds. En inspirerende gymnasielærer i naturvidenskab kan være afgørende for, om en elev bliver interesseret i naturvidenskab og teknik og måske motivere til valg af uddannelse inden for disse områder.

Tildelingen sker på baggrund af indstillinger fra gymnasierektorer og elevråd over hele Danmark, som er blevet bedømt af et fagkyndigt bedømmelsesudvalg. Tidligere modtagere er: i 2012 rektor Jannik Johansen, Frederiksberg Gymnasium; i 2013 lektor Niels Hartling, Birkerød og lektor Peter Arnborg Videsen, Viborg Gymnasium og HF; og i 2014 lektor Pia Gommessen, Faaborg Gymnasium.

Læs mere på www.facebook.com/SNU1824 og www.naturvidenskab.net.



Medaljemodtageren Henrik Parbo og formand for SNU Dorte Olesen.