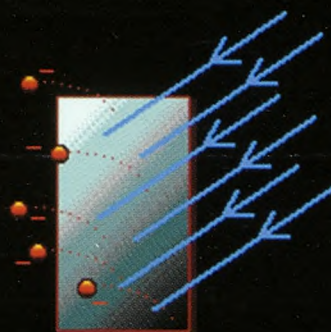
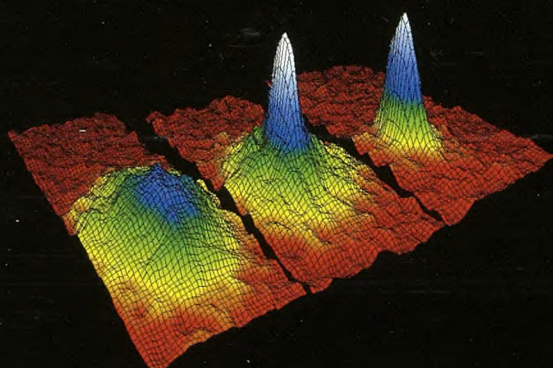
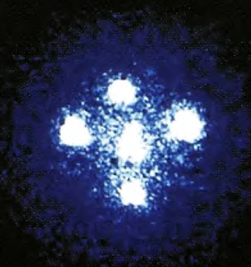
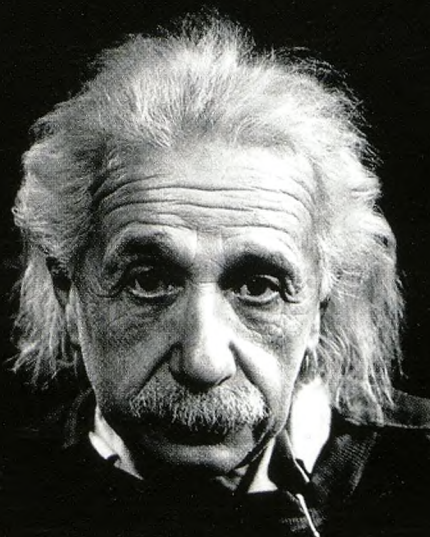
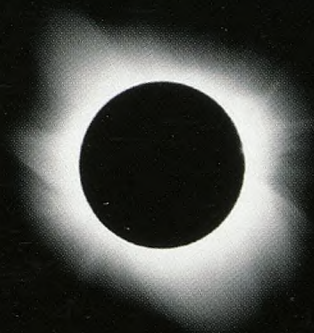


Tidsskrift for Fysik og Astronomi 16. årgang



EINSTEIN SÆRNUMMER



- SÆRNUMMER: EINSTEIN I DET 21. ÅRHUNDREDE • SPECIEL RELATIVITETSTEORI
- KVANTEKOSMOLOGI OG ALMEN RELATIVITETSTEORI • EFFEKTIV FELTTEORI
- OG KVANTEGRAVITATION • FOTOELEKTRISK EFFEKT • BOSE-EINSTEIN KONDENSATION
- TSUNAMIENS FYSIK • MINDEORD OM JENS MARTIN KNUDSEN

LØSSALGSPRIS: 40 KR

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

Ørsted Laboratoriet, Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Hjemmeside : www.kvant.dk
E-mail : kvant@kvant.dk

Udgives af

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

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.)
Ordrup Gymnasium
Camilla Bacher (AS)
Mærsk Olie & Gas
Jørgen Friis Bak, Aarhus Universitet
Jørn Johs. Christiansen (SNU)
Henrik Flyvbjerg, RISØ
Torsten Freltoft, Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen,
Matematisk Institut, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør)
Jens Olaf Pepke Pedersen,
Danmarks Rumcenter
Finn Berg Rasmussen, Ørsted Lab, KU
Svend E. Rugh

Abonnementspris : 150 kr/år.

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Henvendelser vedr. abonnement til forretningsfører Lene Körner tlf. 35 32 07 62 (koerner@kvant.dk).

Annoncepriser

1/1 side: 3000 kr, 1/2 side: 1600 kr
1/4 side: 1000 kr, Farvetillæg: 1800 kr
Priserne er excl. moms og for reproklart materiale. Henvendelser om annoncer til redaktøren, tlf. 22 67 26 42.

Oplag: 2500. Tryk: P.J. Schmidt A/S,
Vojens. ISSN 0905-8893



Produktionsplan

Nr. 2-05 udkommer ca. 15. maj
Nr. 3-05 udkommer ca. 15. september
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Verdens Fysik År 2005 – Einstein i det 21. århundrede	3
Einsteins specielle relativitetsteori <i>Helge Kragh</i>	4
KVANT-nyheder <i>Sven Munk og John Rosendal Nielsen</i>	7
Kosmologi, kvantekosmologi og Einsteins almene relativitetsteori <i>Jan Ambjørn og Poul Olesen</i>	9
Effektiv feltteori og kvantegravitation <i>Niels Emil Jannik Bjerrum-Bohr</i>	13
Foredrag i Dansk Geofysisk Forening	16
Den fotoelektriske effekt og lysets omskiftelige kvantenatur <i>Klaus Mølmer</i>	17
Nyt fra Dansk Fysisk Selskab	20
Tsunamiens fysik <i>Benny Lautrup</i>	22
Mindeord om Jens Martin Knudsen (1930-2005) <i>Jens Als-Nielsen, Poul Hjorth, Morten Bo Madsen og Finn Berg Rasmussen</i>	26
Bose-Einstein Kondensation – Når atomer synger i kor <i>Nicolai Nygaard</i>	29
Opgave-hjørnet – Havebål og brintbomber <i>Jens Højgaard Jensen</i>	33
Aktuelle bøger <i>Michael Cramer Andersen</i>	34
Oplev Solformørkelsen den 29. marts 2006 i Libyen <i>Knud Strandbæk</i>	Bagsiden

Forsiden viser: I øverste venstre hjørne, et historisk træsnit af en stor bølge; se Benny Lautrups artikel om tsunamiens fysik på side 22. I midten, Albert Einsteins portræt. Einsteins videnskabelige livsværk er temaet for dette nummer og næste nummer af KVANT. Omkring Einsteins portræt: En total solformørkelse skal minde om den anden af tre klassiske tests af den almene relativitetsteori: lysstråler fra stjerner bøjer omkring solen, og dét dobbelte så meget som forudsagt af Newtons tyngdelov. Et såkaldt "Einstein-kors," en gravitationel linse, viser det samme afbøjningsfænomen i mere dramatisk, moderne version. Se artikler af henholdsvis Jan Ambjørn og Poul Olesen, og Niels Emil Bjerrum-Bohr. En figur illustrerer den fotoelektriske effekt; se artikel af Klaus Mølmer. Massefordelinger for tre gasskyer af ^{87}Rb ved tre forskellige nano-Kelvin temperaturer. To af skyerne er Bose-Einstein kondensater; se artikel af Nicolai Nygaard.

Bestilling af ekstra eksemplarer af dette nummer (25 kr. / stk. plus forsendelse) kan ske på kvant@kvant.dk så længe lager haves.

Verdens Fysik År 2005 – Einstein i det 21. århundrede

Velkommen til et særnummer om Einstein!

Einsteins mirakelår

I 1905 indsendte en 26-årig medarbejder ved patentbureauet i Bern en ph.d.-afhandling til universitetet i Zürich. Det var hans andet forsøg på at opnå graden ved selvstudium i de fem år der var gået siden han var blevet kandidat. Hans forsøg på at blive ph.d.-studerende ved et universitet var mislykkedes. Han fik kun afslag på sine ansøgninger om assistentstillinger. Indenfor samme kalenderår 1905 færdiggjorde han, foruden ph.d.-afhandlingen, fem manuskripter til videnskabelige artikler. Fire af disse blev publiceret endnu i 1905, det femte og ph.d.-afhandlingen i 1906.

Han fik sin ph.d. i dette andet forsøg, og en forfremmelse på patentkontoret, hvor han forblev til 1909. Mange år senere fik han også Nobelprisen i fysik, med henvisning til den første af 1905-artiklerne, skrevet før ph.d.-afhandlingen. Afhandlingen blev hans mest citerede artikel, og indeholdt sammen med de andre 1905-artikler stof til endnu to Nobelpriser. Ingen anden videnskabsmand har før eller siden udvist en sådan kreativitet. Kun Isaac Newtons indsats som 24-årig tåler sammenligning. [1–3]

Hundredåret for Einsteins “mirakuløse år” er udnævnt til *Verdens Fysik År* af FN. I Danmark er der aktiviteter flere steder, koordineret af *Dansk Videnskabsformidling*; se www.wyp2005.dk. Formålet er bl.a. at formidle begejstringen for fysik til offentligheden og inspirere en ny generation af forskere. Alle kan være med til at fejre fysik og dens betydning for vores liv. På de officielle websider—www.wyp2005.org i Europa og www.physics2005.org i USA—findes bl.a. information om aktiviteter, konkurrencer og undervisningsmateriale.

KVANT markerer *Verdens Fysik År* med hele to temanumre om Einstein i foråret 2005. I en række korte artikler beskrives Einsteins mange forskellige bidrag til fysikken og hvor man finder dem i dansk forskning idag, hvad enten det drejer sig om anvendelser, videreudviklinger, eller historiske studier af Einsteins arbejder. Vi havde oprindeligt kun planlagt ét temanummer. Men forfatternes skrivelyst kombineret med to uforudsete begivenheder, som vi *må* dække i dette første nummer efter de hændte, gør at nærværende nummer af KVANT, foruden fem af elleve planlagte artikler om Einstein, også indeholder en artikel om tsunamiers fysik og mindeord om Mars-forsker Jens Martin Knudsen.

Derudover inviterer *Dansk Fysisk Selskab* til årsmøde den 2.-3. juni 2005 og *Kvinder I Fysik* holder møde den 1. juni 2005.

I næste nummer

I næste nummer bringer vi følgende artikler:

- Paul Michael Petersen: *Einsteins teorier som førte til udvikling af laseren*
- Per Hedegaard: *Faste stoffers varmekapacitet: Mærkbar kvantemekanik*
- Henrik Flyvbjerg m.fl.: *Brownske bevægelser, fra Einstein til optiske pincetter*
- Henrik Flyvbjerg m.fl.: *Brownske bevægelser og mikroorganismers motilitet*
- Benny Lautrup: *Einstein og Virkeligheden*
- Henry Nielsen: *Hvorfor fik Einstein først Nobelprisen i 1921/22?*

Referencer:

- [1] Abraham Pais (1982), 'Subtle is the Lord...' *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press.
- [2] Peter D. Smith (2003), *Einstein, Life & Times*. Haus Publishing, London.
- [3] Ove Nathan og Henrik Smith (1999), *Den harmoniske Begejstring*, afsnit 2.14. Gyldendal.

God læselyst!



Henrik Flyvbjerg er gæsterektor på KVANTs særnummer om Einstein. Han er dr.scient. i teoretisk fysik og seniorforsker på RISØ i Biosystemer og Dansk Polymer Center. Han modellerer gerne hvad som helst matematisk og statistisk, men foretrækker biologiske systemer med deres kombination af fysisk nødvendighed og evolutionær tilfældighed. “Liv er bare stof der vil noget.”



Michael Cramer Andersen er ansvarshavende redaktør af KVANT. Han er uddannet astrofysiker og videnskabsformidler og underviser på Ordrup Gymnasium. Han er interesseret i fundamentale problemer i naturvidenskaben (Universets og livets opståen) samt videnskabshistorie og -filosofi.

Einsteins specielle relativitetsteori

Helge Kragh, Steno Institutet, Aarhus Universitet

På trods af den store betydning Einstein havde for den tidlige kvanteteori, er der næppe tvivl om, at det var relativitetsteorien, sådan som den først fremkom for 100 år siden, der indskrev hans navn i fysikkens historie. Denne afgørende indsats bliver ofte misforstået og i lærebøger gengivet i en tvivlsom version. Der gives her en introduktion til den specielle relativitetsteoris fremkomst, hvor der tages hensyn til den historiske kontekst i det første tiår af 1900-tallet.

Det elektromagnetiske verdensbillede

Omkring 1905 anså mange teoretiske fysikere det newtonske mekaniske verdensbillede som dødt eller døende. I stedet var de i gang med at udvikle et radikalt alternativ med et helt andet ontologisk grundlag, efter hvilket den fysiske verden bestod af elektromagnetiske felter, der kunne være koncentreret i singularitetslignende tilstande i form af elektroner (med både positiv og negativ ladning). Det var ikke længere Newtons mekaniske ligninger, der var fundamentale, men derimod Maxwells elektromagnetiske, sådan som i udvidet form var formuleret af bl.a. H.A. Lorentz. Den generation af fysikere, der omfattede folk som Lorentz, H. Poincaré, P. Langevin, H.A. Bucherer, M. Abraham, J. Larmor og G. Mie, var overbevist om, at de var på vej mod en ny fysik, hvor alting kunne formuleres i termer af elektroner og elektromagnetiske felter. I september 1904 beskrev en eksalteret Langevin, at "denne idé har i de sidste par år gennemgået en enorm udvikling, som får den gamle fysiks rammer til at smuldre og som vender den etablerede orden om idéer og love på hovedet, for at resultere i en struktur, man kan forudse vil være enkel, harmonisk og frugtbar."

Ifølge den nye elektromagnetiske enhedsfysik kunne alle fysiske fænomener forklares ud fra den elektromagnetiske æter; elektroner masse var helt af elektromagnetisk oprindelse og varierede derfor med hastigheden, sådan som først vist af O. Heaviside i 1889. Efter denne opfattelse var elektroner ikke små materielle partikler, der var påført elektrisk ladning, men var rent elektriske – uden ladning, ingen partikler. På denne måde havde Lorentz og Larmor omkring 1900 været i stand til at forklare det overraskende resultat af Michelson-Morley eksperimentet, nemlig at Jordens bevægelse gennem verdensæteren ikke var påviselig til anden orden af $\beta = v/c$, hvor v er hastigheden i forhold til den stationære æter. Resultatet skyldtes en generel kontraktion af legemers længde med faktoren $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ og var fysisk begrundet i ændringer af kræfterne mellem legemets elektroner.

Der var i 1905 intet nyt i, at også massen ændredes med hastigheden. Spørgsmålet var hvordan. Ifølge Lorentz' teori fra 1904 ville elektronen deformeres i længderetningen og dens masse være givet ved

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \approx m_0 \left(1 + \frac{\beta^2}{2} + \frac{3\beta^4}{8} \right) \quad (1)$$

Den tyske fysiker Max Abraham opererede med en rumlig stiv model af elektronen og nåede i 1903 frem til udtrykket

$$\begin{aligned} m(v) &= \frac{3m_0}{4\beta^2} \left[\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta} \right) \ln \left(\frac{1+\beta}{1-\beta} \right) - 1 \right] \\ &\approx m_0 \left(1 + \frac{2\beta^2}{5} + \frac{9\beta^4}{35} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Som bekendt var de fuldstændige transformationsformler mellem steds- og tidkoordinater – kendt som Lorentztransformationerne – givet af Lorentz og Larmor før Einstein begyndte at udvikle sin teori. Desuden var Poincaré gået et skridt videre, idet han i 1904 havde formuleret, hvad han kaldte relativitetsprincippet. Ifølge dette princip, skrev Poincaré, "må lovene for fysiske fænomener være de samme for en 'stationær' iagttagere som for en iagttagere, der har en jævn translationsbevægelse i forhold til ham. ... Der må være en hel ny slags dynamik, som først og fremmest vil være kendetegnet ved reglen om, at ingen hastighed kan overstige lysets."

Poincaré slog fast, at lysets hastighed er invariant og han fandt – endnu før Einsteins artikel var udkommet – den korrekte formel for additionen af hastigheder:

$$V = \frac{u+v}{1+uv/c^2} \quad (3)$$

Desuden gjorde han opmærksom på, at om end længde- og tidsintervaller var relative til iagttagers system, ville størrelsen

$$dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2 \quad (4)$$

være invariant. Det kunne synes, som om hele den specielle relativitetsteori var på plads, før den 26-årige Einstein udgav sin berømte artikel fra 1905. Men det var på ingen måde tilfældet.

Zur Elektrodynamik bewegter Körper

Einsteins artikel i *Annalen der Physik* havde titlen "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" (Om bevægede legemers elektrodynamik), hvilket formentlig medvirkede til, at den ikke i første omgang vakte megen

opmærksomhed. Mange læsere opfattede den – aldeles fejlagtigt – som endnu et bidrag til den elektromagnetiske teori for materie og rum. Artiklen var på mange måder usædvanlig. Ikke blot indeholdt den slet ingen referencer, den henviste heller ikke direkte til Michelson-Morley eksperimentet eller andre eksperimenter, der ellers havde en vigtig plads i det elektromagnetiske verdensbillede. Dette er værd at fremhæve, da relativitetsteorien traditionelt ses som inspireret af eller ligefrem et svar på den anomali, Michelsons række af eksperimenter udgjorde.

Kendte Einstein overhovedet til Michelsons og Morleys eksperiment? I et brev fra 1954 skrev han: "I min egen udvikling har Michelsons resultat ikke haft væsentlig indflydelse. Jeg kan ikke engang huske, om jeg overhovedet kendte til det, da jeg skrev min første artikel om emnet." Videnskabshistoriske studier har vist, at Einstein faktisk kendte til eksperimentet, da han formulerede relativitetsteorien i 1905. Alligevel er der blandt eksperter enighed om, at hans kommentar fra 1954 er korrekt: Einsteins teori stod ikke i gæld til hverken Michelsons eller andres eksperimenter, men var baseret på helt generelle overvejelser om symmetri og simpelhed i de fundamentale naturlove, især i Maxwells ligninger.

Det er ikke her muligt at gennemgå indholdet i Einsteins banebrydende artikel, der var inddelt i en kinematisk og en elektrodynamisk del. I den første, meget simple og aksiomatisk formulerede del udledte han ud fra sine to postulater (om hhv. naturlovenes invarians og lysets absolutte hastighed) de kendte Lorentztransformationer, men han fortolkede dem helt anderledes end Lorentz og de andre elektronteoretikere. Forskellen viser sig bl.a. i, at Einsteins teori var helt generel og ikke kun gyldig for elektriske partikler. I overensstemmelse hermed havde han ingen brug for æteren, som han kort og kontant afviste. På det metodologiske plan var Einsteins teori kompakt og deduktiv, mens Lorentz' var omstændelig og byggede på en række antagelser af ad hoc karakter.

Styrken ved den einsteinske tilgang viste sig klart i den enkle udledning af Lorentz' kraftlov ($\mathbf{F} = ev \times \mathbf{B}$), der hos Einstein fremkom som en konsekvens af de elektromagnetiske transformationsformler, mens den hos Lorentz var en uafhængigt postuleret lov, en slags femte Maxwell-ligning. I slutningen af sin artikel forudsagde Einstein, at den kinetiske energi af elektroner (og andre massedele) vil variere med hastigheden som

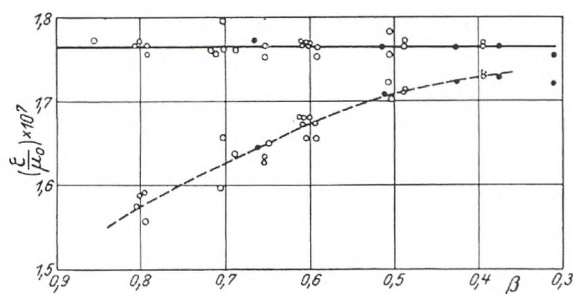
$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right) \quad (5)$$

Herfra og til den berømte formel $E = mc^2$ er skridtet kort. Formlen optræder ikke eksplicit i 1905-artiklen, men dog implicit: "Massen af et legeme er et mål for dets energiindhold; hvis energien ændres med L , ændres massen på samme måde med $L/(9 \cdot 10^{20})$, hvor energien måles i erg og massen i gram."

Einstein, Lorentz eller Abraham?

Den første test af relativitetsteorien var samtidig en test af forskellige ærterteorier for elektronens struktur, hvor det især var Lorentz' og Abrahams modeller, der konfronterede hinanden. Metoden var at afbøje hurtige elektroner fra betakilder i elektriske og magnetiske felter, hvorved det var muligt at finde variationen i elektronmassen med hastigheden. Der var ikke tale om at teste den newtonske fysiks $m = \text{konstant}$. Eksperimenter af den nævnte type blev udviklet af især den tyske fysiker Walter Kaufmann, der i 1906 kunne konkludere, at mens Abrahams teori stemte med de eksperimentelle resultater, var det ikke tilfældet med Lorentz' teori. Da sidstnævnte førte til samme variation som Einsteins relativitetsteori, var også denne falsificeret – efter mindre end et års levetid.

Lorentz accepterede nølende Kaufmanns dom, men Einstein havde et mere afslappet forhold til det tilsyneladende klare eksperimentelle resultat. Han var af teoretiske grunde overbevist om, at Abrahams teori var forkert og at hans egen var rigtig. Han argumenterede derfor, at Kaufmanns eksperiment ikke var overbevisende og at der måtte være fejlkilder til stede, som ikke var erkendt. Hvis relativitetsteorien stred mod eksperimentet, måtte eksperimentet være forkert!



Figur 1. Eksperimentelle værdier for forholdet mellem betaelektroners elektriske ladning og hvilemasse, som udregnet på basis af Abrahams udtryk (den stiplede kurve) og Lorentz-Einsteins udtryk (fuldt optrukket). Målepunkterne henviser til Bucherers eksperimenter fra 1908 (●) og eksperimenter fra 1914-16 lavet af C. Schaefer og G. Neumann (○). Ifølge begge teorier skal e/m_0 være konstant, således at måledata klart viser, at Abrahams udtryk er forkert. Fra *Handbuch der Physik*, bind. 22/1, Springer 1933.

Einsteins intuition viste sig berettiget. I nye og bedre eksperimenter fra 1908 viste en anden tysk fysiker, Adolf Bucherer, at elektronmassens målte variation var i klart bedre overensstemmelse med Lorentz-Einstein udtrykket end med Abrahams udtryk. Konklusionen, der altså var modsat Kaufmanns, blev almindeligt accepteret og endnu mere præcise eksperimenter gav den yderligere autoritet (figur 1). Endnu omkring 1915 var spørgsmålet dog ikke ganske afklaret. Blandt de nye eksperimenter, der gav støtte til det relativistiske udtryk, var spektroskopiske målinger af den finstruktur, Arnold Sommerfeld i 1916 havde forklaret som en relativistisk effekt. Anno 1920 var der ingen reel tvivl om, at relativitetsteorien gav en korrekt beskrivelse af elek-

troners massevariation. Det er dog værd at påpege, at sådanne eksperimenter ikke er i stand til at skelne mellem Lorentz' æterbaserede elektronteori og Einsteins relativitetsteori, da de to teorier jo fører til eksakt samme udtryk for $m(v)$.

Relativitetsteorien ikke revolutionær

Da Einsteins teori blev almindelig kendt og anerkendt, blev den ofte beskrevet som en revolution i fysikken, et radikalt brud med Newtons klassiske fysik. Den revolutionsretorik, der i offentligheden knyttede sig til teorien, er ironisk af to grunde. For det første blev teorien af ledende fysikere ikke oprindeligt anset for at være revolutionær, men nærmere som et konservativt, ja næsten reaktionært forsøg på at holde liv i dele af det gamle verdensbillede. Den virkeligt revolutionære teori var den elektromagnetiske æterteori – mente man. For det andet benægtede Einstein selv, at teorien var af særlig revolutionær art, hvilket han fastholdt livet igennem.

I et brev til sin ven Conrad Habicht fra maj 1905 fortalte Einstein om sine to nye, endnu upublicerede artikler i *Annalen*. Den ene teori betegnede han som "meget revolutionær", men det var teorien om fotoner, han gav denne betegnelse, ikke relativitetsteorien. På mange måder var Einsteins videnskabsopfattelse konservativ og evolutionær, og han opfattede på ingen måde relativitetsteorien – hverken den specielle eller generelle – som et drastisk brud med den gamle fysik. Nej, den var en naturlig videreudvikling af begreber, der stammede fra den klassiske fysik. I 1921 beskrev han relativitetsteorien som "en slags afpudsning af Maxwells og Lorentz' mægtige intellektuelle bygning ... ikke en revolutionær foreteelse, men en naturlig fortsættelse af en udvikling, der kan spores gennem århundreder." Newton sagde engang, at når han havde skuet videre end andre, var det fordi, han havde stået på skuldrene af giganter. Med en lidt anden sprogbrug sagde Einstein det samme. Og det var ikke koketteri. Han mente det.

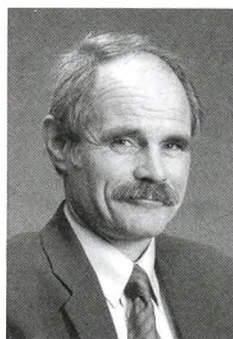
Omkring 1910 var relativitetsteorien anerkendt blandt eliten af teoretiske fysikere, men endnu dårlig kendt af flertallet og næsten helt ukendt uden for fysikermiljøet. Modtagelsen i Danmark adskilte sig ikke væsentligt fra hvordan den blev modtaget i andre små lande. Teorien blev herhjemme først introduceret af H.M. Hansen, den senere fysikprofessor og universitetsrektor, der i 1912 redegjorde for den i en artikel i *Fysisk Tidsskrift* med titlen "Relativitetsprincippet". I 1915-udgaven af Christian Christiansens *Lærebog i Fysik*, omarbejdet af Martin Knudsen, blev der lige plads til at nævne, at problemer med æterhypotesen kunne undgås "ved med Einstein at antage, at der ingen Æter findes." Relativitetsteorien optrådte iøvrigt ikke i bogen.

Endelig var den unge Niels Bohr, ikke overraskende, bekendt med Einsteins teori på et tidligt tidspunkt, om end jeg ikke ved hvor tidligt. Den optræder ikke i hans banebrydende trilogi "On the constitution of atoms

and molecules" fra 1913, selv om Bohr her anvendte Lorentz-Einsteins masseformel. I 1914 indførte Bohr en relativistisk massekorrektion i sin formel for Balmers lov, men stadig uden at referere til Einstein og uden at nævne relativitetsteorien ved navn. Einstein optræder hyppigt i Bohrs artikler og korrespondance 1912-16, men det var tydeligvis Einsteins bidrag til kvanteteori og fotoelektrisk effekt, der interesserede Bohr, ikke hans relativitetsteori.

Litteratur

- [1] A. Einstein et al. (1968), *The Principle of Relativity*, Dover.
- [2] A. Einstein (1982), *Ideas and Opinions*, Crown Publishers.
- [3] A.I. Miller (1981), *Albert Einstein's Special Theory of Relativity 1905-1911*, Addison-Wesley.
- [4] H. Kragh (1999), *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century*, Princeton University Press.
- [5] G. Holton (1988), *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*, Harvard University Press.



Helge Kragh er professor i videnskabshistorie ved Steno Institutet, Århus Universitet, og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie, herunder de teorier, der har deres baggrund i Einsteins forskning.

Tegn abonnement på KVANT

KVANT – Tidsskrift for Fysik og Astronomi er medlemsblad for foreningerne *Astronomisk Selskab*, *Dansk Fysisk Selskab*, *Dansk Geofysisk Forening* og *Selskabet for Naturlærens Udbredelse*. Man får således 4 numre af KVANT ved at melde sig ind i én af foreningerne.

Studerende kan blive medlemmer af SNU, www.naturvidenskab.net, for **kun 75 kr.** og derved få abonnement på KVANT.

Er man medlem af *Ungdommens Naturvidenskabelige Forening*, www.unf.dk, koster det også kun **75 kr.** at abonnere – husk blot at oplyse medlemsnummer!

Man kan også abonnere på bladet uden at være medlem af en forening – det koster **160 kr.** om året for abonnenter i Danmark og kan gøres på:

www.kvant.dk/abonnement.html

Det er lidt dyrere for abonnenter udenfor Danmark.

KVANT-nyheder

Af Sven Munk og John Rosendal Nielsen

SOFIA – et nyt flyvende IR-observatorium

I 2006 skal et nyt observatorium på sin første flyvning med en ombygget Boeing 747 SP. SOFIA (Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie) er navnet på dette projekt, som NASA og DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) står bag.



Figur 1. IR-optagelse med IRAS af området omkring stjernebilledet Orion (ESA/NASA).

Dette nye projekt kan ansues som en videreførsel af et tidligere, nemlig KAO (Kuiper Airborne Observatory), som NASA afsluttede i midten af 1990'erne. I KAO var et 91 cm teleskop hovedkomponenten – også beregnet til at opfange infrarød stråling. At IR-stråling kan give os forøget viden om Universet, vidner et par andre projekter om, nemlig IRAS "Infrared Astronomical Satellite" (se figur 1) og ISO "Infrared Space Observatory".

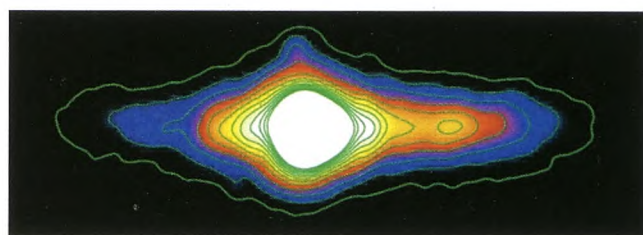
Formålet med projektet SOFIA er at iagttage astronomiske objekter i det fjerne infrarøde område (bølglængder mellem 0,040 og 0,350 mm). Spejlet i teleskopet, som opsamler og fokuserer strålingen, har en diameter på 2,6 m. Ved at flyve i en højde på 12-14 km kan luftens absorption af den elektromagnetiske stråling reduceres så meget, at objekter, som ellers ikke kan "ses" fra jordens overflade, kan afbildes. En sortlegemestråler med temperaturen 20 K har maksimal udstråling ved bølglængden 0,150 mm, så man kan vist fornemme, at kolde objekter i rummet (f.eks. tåger, planeter og stjerner under dannelse) indtager en særlig plads i SOFIA-projektet. Man vil også søge at få mere klarhed over udviklingen af det tidlige univers ved at iagttage de såkaldte Ultra-luminous IR Galaxies (ULIRGS).

I projektet indgår 10 instrumentpakker, som hver for sig sigter mod at registrere forskellige dele af den optiske stråling. Vil man vide mere om instrumenteringen, er [2] et godt sted at starte.

Kilder: (1) www.dlr.de/rd/fachprog/extraterrestrik/Sofia/SOFIA_ge.html; (2) www.sofia.usra.edu/Science/instruments/sci_instruments.html; (3) www.sofia.usra.edu/Science/instruments/performance/HAWC/spectral.html

Kollisioner i Beta Pictoris-systemet

Dannelsen af et planetsystem omkring en stjerne er et af de store spørgsmål indenfor den moderne astronomi, som astronomerne forsøger at besvare. Problemet for sådanne studier er, at vores observationsteknikker ikke er gode nok til at give detaljerede billeder. En undtagelse er Beta Pictoris-stjernen (forkortet: β Pic), der kun ligger 60 lysår væk, hvilket er grunden til, at man kan få billeder med en tilfredsstillende opløsning af stjernens omkringliggende støvskive. Man havde længe håbet, at denne støvskive var en nebulose, hvoraf et planetsystem skulle opstå, men støvskiven er imidlertid mere end 100 gange diameteren af vores eget Solsystem og har tilsyneladende en støvmasse på kun nogle få gange massen af vores Måne. β Pic, der er teenager blandt stjerner med sin alder af blot 15 millioner år, har tilsyneladende allerede dannet sit planetsystem eller der er simpelthen ingen planeter omkring stjernen. Det har dog ikke holdt forskerne fra at udforske støvskiven omkring β Pic.



Figur 2. Infrarød-optagelse af Beta Pictoris støvskiven.

Et team under ledelse af Charles M. Telesco fra University of Florida har undersøgt β Pics støvskive i det infrarøde spektrum med Very Large Telescope (VLT) i Chile, og de har fundet bevis for kollisioner i støvskiven. Observationer af infrarød stråling med en bølglængde på omkring 12 μ m (vist i figur 2) har vist, at den højre del af støvskiven har været udsat for en destruktiv kollision i en afstand af 52 AU fra β Pic. Det er kollisionsresterne, som vi ser på billedet, og de lyser på omtrent samme måde som det såkaldte zodiakalys i vores Solsystem – en svag støvskive under stadig dannelse og nedbrydning. Observationerne af kollisionen bekræfter, hvad forskere længe har formodet, at store kollisioner forekommer i støvskiven. Desværre kan dette ikke give et svar på betydningen af kollisioner for dannelsen af planetsystemer, hertil er β Pic for gammelt. Da der ikke er så mange yngre stjerner i nærheden, må vi altså bruge β Pic til at samle erfaringer til fremtidige og forbedret observationer.

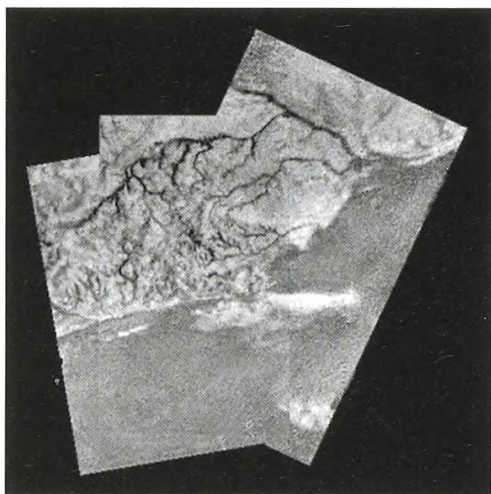
Kilder: Nature vol. 433, 2005, s. 114-115 og 133-136; Kvant nr. 3, 2004, s. 8-14

Huygens' mudderbad på Titan

Som vi annoncerede i sidste nummer af Kvant blev Cassini-Huygens rumfartøjet adskilt den 25. december sidste år. Hvis man endnu ikke har hørt det i dagspressen var adskillelsesoperationen vellykket. Huygens fortsatte imod Saturns største måne Titan, hvor den landede den 14. januar.

Turen ned igennem Titans atmosfære og kollisionen med overfladen bød på en del overraskelser. I den øvre atmosfære af Titan blev Huygens udsat for meget store påvirkninger. Sonden vippede 10-20 grader, hvilket formodentligt er foranlediget af ændringer i vindforholdene i de øvre skytag. Da sonden var kommet ud af skytaget, blev den mere rolig og vippede mindre end 3 grader. En anden overraskelse for forskerne var tykkelsen af skytaget. Man havde forventet, at sonden ville være ude af skytaget i en højde mellem 70 og 50 km, men den kom først ud af skytaget ved 30 km over overfladen. Lige efter kollisionen med Titan brugte forskerne meget tid på at beskrive Huygens' nedstigningsbane, så man kunne sammenligne observationer foretaget af Cassini og Huygens. Desuden kan man få nyttige erfaringer til fremtidige missioner i rummet.

Kollisionen med overfladen var ligeledes overraskende, da man havde forestillet sig, at mødet med månen ville ske med et bump imod en hård overflade eller med et plask i en metansø, men kollisionen skete med et splat. Huygens landede i mudder. Den største overraskelse for forskerne var, at sonden overlevede kollisionen og var i funktion efter landingen længere end man havde forventet. Specielt var teamet bag DISR (Descent Imager/Spectral Radiometer, se nyheder i Kvant nr. 3, 2004) positivt overraskede over, at landingen var blidere end forventet. Faktisk overlevede DISRs 20 Watt lampe, der skulle tænde 700 meter over overfladen for at oplyse landingsområdet. Man håbede, at lampen kunne lyse 15 minutter efter kollisionen, men den virkede stadig da Cassini mistede kontakten til Huygens – hvilket vil sige, at den lyste over én time.



Figur 3. Strukturer på overfladen af Titan, der er blevet fortolket som kystlinjer (ESA).

Desværre er Huygens-missionen ikke en komplet succeshistorie, da en del data fra sonden gik tabt. Det var meningen, at Huygens skulle sende data på to kanaler med to forskellige frekvenser til rumfartøjet Cassini, der skulle sende det videre til Jorden. Den ene sender viste sig ikke at virke, og en del data gik tabt. Heldigvis var de fleste af de videnskabelige data sendt dobbelt på de to kanaler, men desværre kom der kun 350 billeder i stedet for 700 ud af den to og en halv time nedstigning gennem Titans atmosfære. Data fra eksperimentet af Doppler-forskydningen, der kunne måle de gådefulde ændringer i vindhastighederne som Huygens oplevede, gik ligeledes tabt.

De foreløbige videnskabelige resultater er begrænset af at forskerne kun har haft kort tid til de store mængder data, der blev indsamlet under nedstigningen og efter landingen. Der er data nok til at holde forskerne bag Huygens travlt optaget i mange måneder – der kan måske ligefrem gå nogle år før vi fuldstændigt har klarlagt de videnskabelige resultater. Der er dog kommet visse resultater frem allerede på dette tidlige tidspunkt. Huygens' DISR-instrument tog nogle interessante billeder under nedstigningen, hvor man har fundet strukturer på Titans overflade såsom øer, et mosaik af floder og metankilder. Der er desuden fundet Argon-40 i Titans atmosfære, hvilket skulle være et bevis på at Titan har oplevet vulkansk aktivitet. Argon-40 dannes ved beta-henfald af Kalium-40, der kommer op ved vulkanudbrud. Der kommer ikke lava fra disse vulkaner men is (vand) og ammoniak. Dette er typisk for Titan, at de geofysiske processer svarer til Jordens, mens kemien, der er involveret i disse processer, er meget forskellig og eksotisk i forhold til Jordens geokemiske processer. Titan har flydende metan i stedet for flydende vand, frossen is i stedet for silikat klipper, kulstofbrintepartikler nedfaldet fra atmosfæren i stedet for jord og meget kold is i stedet for lava.

Kilder: www.esa.int/SPECIALS/Cassini-Huygens/; Kvant nr. 3 (2004), s. 3-7 og nr. 4 (2004), s. 5.

ESAs kosmiske visioner

Planerne for ESA's rumforskningsprogram for årene 2015-2025 er ved at blive smedede. Ikke blot skitseres projekter, hvor man vil lede efter jordlignende planeter og måner, men også en forstærket og mere detaljeret udforskning af de yderste dele af vort Solsystem optræder på listen over perspektivrige opgaver. Der trækkes også forskningsmæssige linjer fra elementarpartikelfysikken til kosmos, hvor sidstnævnte kan fungere som et laboratorium for forsøg. En række ikke trivielle projektforslag har været behandlet på en workshop i september 2004 og i foråret 2005 forventes egentlige beslutninger om de fremtidige projekter at blive taget.

Der findes flere pdf-dokumenter med relation til den omtalte workshop her: sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=35858

Kosmologi, kvantekosmologi og Einsteins almene relativitetsteori

Jan Ambjørn, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og Institute of Theoretical Physics, Utrecht
og Poul Olesen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Den klassiske almene relativitetsteori

I modsætning til mange andre fysiske teorier er Einsteins almene relativitetsteori et énmandsarbejde, i hvilket Einstein indførte idéen om sammenhængen mellem tyngdekraften og rummets geometriske struktur. Herved opstod en beskrivelse af gravitationen, der begrebsmæssigt adskiller sig væsentlig fra den Newtonske beskrivelse. Når f.eks. lyset afbøjes ved passage af Solen, skyldes dette at Solens masse får rummet til at krumme. Så set fra "lysets synspunkt" fortsætter dette ad en ret linie, der imidlertid kun er ret i det krumme rum, således at en observatør på jorden vil se en afbøjning.

Den almene relativitetsteori har mange overraskende resultater. Et af de mest kendte er eksistensen af *sorte huller*. Disse har en "horisont" med den egenskab, at lys ikke kan udsendes fra denne. Tilsvarende gælder at lys, der falder ind mod horisonten rødforskydes uendeligt. Sorte huller er observerede i mange galakser, f.eks. Mælkevejen. Eksistensen af en horisont er observeret nær det sorte hul Cygnus XR-1, hvor man fulgte den ultraviolette stråling fra varme gasskyer der cirkler om Cygnus XR-1. Man ser da at lyset bliver svagere i og med at bølgelængderne bliver længere og længere, i overensstemmelse med teorien.

Som et kuriosum kan nævnes at sorte huller blev forudsagt af Laplace i 1799, i en artikel med titlen "Proof of the theorem that the attractive force of a heavenly body could be so large, that light could not flow out of it." Argumentet er simpelt: Lad lys bestå af partikler med masse m . Betingelsen for at lyset kan forlade en kuglesymmetrisk massefordeling med masse M er da at den kinetiske energi er større end tyngdeenergien, dvs. $mc^2/2 > GmM/r$, hvor r er massefordelingens radius. Den kritiske radius er da $r_c = 2MG/c^2$, hvilket netop er radius for horisonten, der i den almene relativitetsteori kaldes Schwarzschilds radius. Naturligvis er Laplaces argument ikke tilfredsstillende med moderne øjne, da han bruger ikke-relativistisk opførsel af lyset – men hvad skulle han ellers gøre i 1799? Selve idéen om at lys ikke altid kan udsendes på grund af en stærk tyngdekraft er klart først fremført af Laplace.

Den almene relativitetsteoris formentlig vigtigste anvendelsesområde er *kosmologien*, det vil sige beskrivelsen af Universets struktur set på en meget stor skala, hvor galakser og galaksehobe kan anses for at være punkter. De basale antagelser i kosmologien er at Universet er homogent og isotropt. Med andre ord, alle steder i universet (set på en stor skala) er helt æ-

kvivalente (homogenitet) og set fra et vilkårligt punkt er observationerne uafhængige af retningen i hvilken man ser. Dette kan opfattes som en slags "kosmologisk jante-lov". Når vi ikke kan være centrum i universet, er der heller ingen andre, der kan!

Da Einstein fremsatte den almene relativitetsteori i 1916 var den fremherskende opfattelse blandt astronomer at Universet på stor skala er statisk, dvs. uforanderligt i tid. For at få dette til at passe med Einsteins feltligninger, må man indføre den "*kosmologiske konstant*." Imidlertid blev det allerede i begyndelsen af 1920'erne vist af den russiske meteorolog Friedmann at disse ligninger havde løsninger i overensstemmelse med homogenitet og isotropi, hvor universet udvidede sig fra et lille punkt, og at man i en sådan situation ikke behøvede den kosmologiske konstant. Teorien blev senere benævnt "*Big Bang*" teorien (faktisk af dens modstandere for at gøre grin med den). I sidste halvdel af 1920'erne kom så Hubbles idé om en sammenhæng mellem afstand og rødforskydning, der på smuk vis passer med Einsteins teori. Desværre var Hubbles data ikke gode, så Universets levetid viste sig at være mindre end Jordens, ca. 4,5 milliarder år. Dette førte til alternative teorier.

En forudsigelse fra Big Bang teorien er eksistensen af den *kosmiske mikrobølge-baggrund*, kaldet CMB (Cosmic Microwave Background). Denne består af fotoner i form af Planckske varmestråling, der afkøles efterhånden som Universet udvider sig. CMB er observeret og man ser at strålingen følger en smuk Planck-kurve. I dag er temperaturen faldet til $2,75 \pm 0,05$ °K.

Den kosmologiske standardmodel er naturligvis kun en første approksimation til en beskrivelse af Universet. Hvis man har fuldstændig homogenitet vil galakser og galaksehobe ikke kunne dannes. Dette problem løses ved at det allertidligste univers er beskrevet ved inflationsparadigmet, hvor Universet i løbet af ganske kort tid udvikler sig eksponentielt. I løbet af ca. 10^{-32} sek. udvides afstandene i universet med mindst en faktor $e^{66} \approx 10^{28}$. Inflationen er nødvendig for at forstå en række paradokser i den kosmologiske standardmodel (for eksempel årsagssammenhænge).

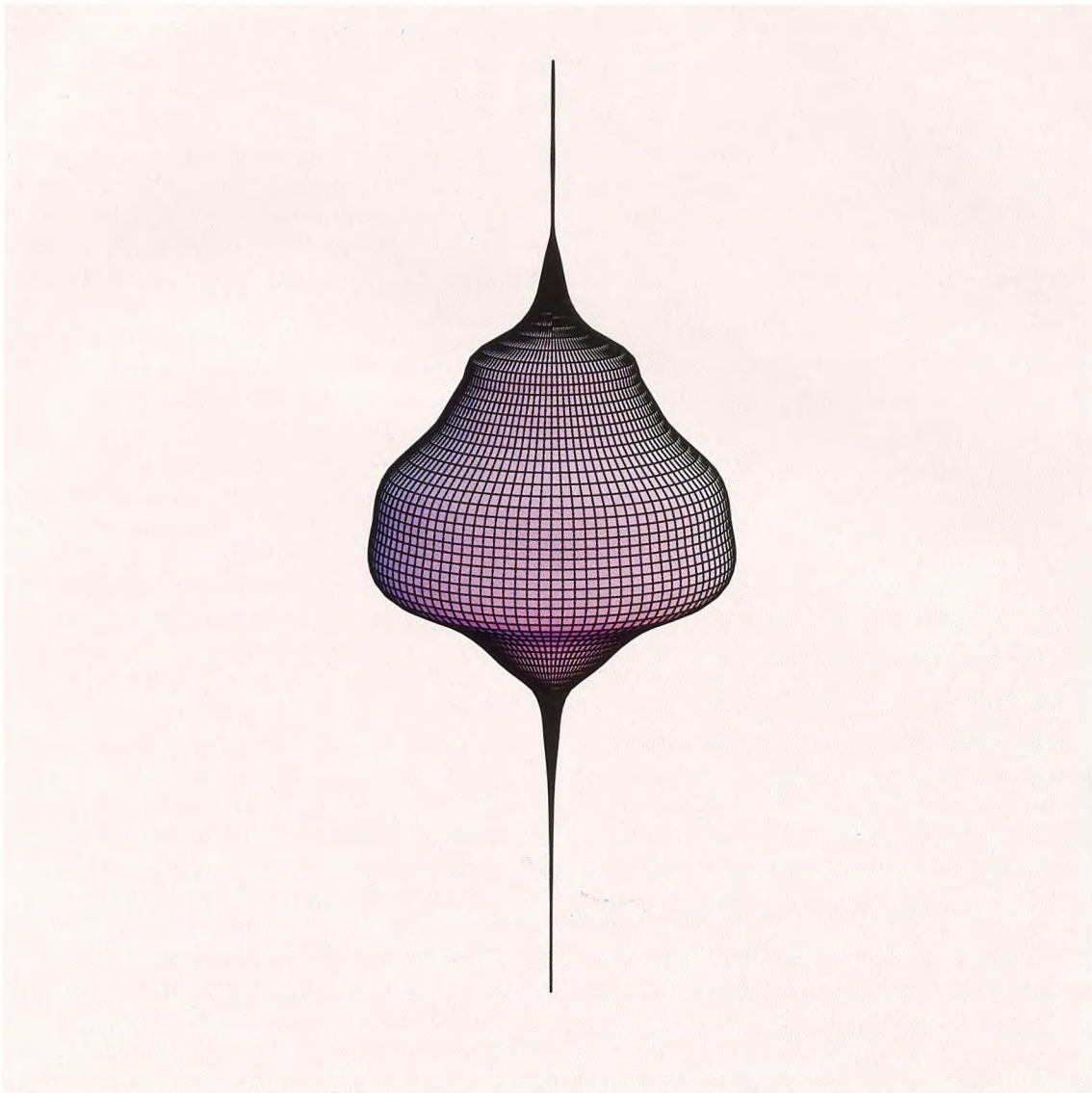
I den ekstreme inflations-udvidelsesfase opstår der kvantemekaniske fluktuationer i energitætheden, der ultimativt fører til galaksedannelse, fordi disse små-skala kvantemekaniske effekter blæses eksponentielt op. Det er et interessant træk ved denne teori at de største objekter i Universet, galakser og galaksehobe, alle er af

kvantemekanisk oprindelse. Fluktuationer giver også anledning til effekter, der kan observeres i CMB. Fluktuationernes størrelse relativt til CMB-fotonernes energitæthed er af størrelsesordenen 10^{-5} . Dette er på smukkeste vis observeret i baggrundsstrålingen.

Observationer af supernovaer og et detaljeret studium af CMB har ført til at den kosmologiske konstant igen er blevet aktuel. Det nuværende univers er ca. 13,5 milliarder år gammelt. I de første ca. 10 milliarder år havde den kosmologiske konstant kun ringe effekt, men efterfølgende vokser dens betydning. Det specielle træk ved denne konstant er, at den medfører en voksende acceleration af Universets udvidelse. Til sidst vokser alle skalaer eksponentielt, og astronomerne vil få mindre og mindre at observere, fordi galakserne bevæger sig væk fra os med eksponentielt voksende hastighed. Imidlertid *behøver* det ikke at gå så galt. Der er andre teorier,

hvor man ved hjælp af felter kan have en effektiv kosmologisk konstant et stykke tid, hvorefter nye effekter tager over, og Universet ender måske i det modsatte af et Big Bang, nemlig the “Big Crunch”, hvor det hele trækker sig sammen til et punkt. Idéerne om den kosmologiske konstant og dennes alternativer kaldes teorierne for “mørk energi” (dark energy).

I det nuværende univers giver den kosmologiske konstant imidlertid en god beskrivelse af observationerne. Den mørke energi udgør ca. 70% af al energi i Universet. Dette er interessant, da f.eks. den kosmologiske konstant i kvantefeltteori er et udtryk for vakuum-energien. Situationen er altså den at vakuum (der sædvanligvis kaldes “det tomme rum”) er ansvarlig for den største del af energien i Universet. Måske kan man sige at jo mere vi forstår Universet – og ud fra observationer har vi nu en god forståelse – jo mere besynderligt ser det ud.



Figur 1. Computer-snapshot af et “typisk univers” bestående af 91.100 firedimensionale “simplexer” og en total “tid” (lodret retning, opad) $t = 40$. Et firedimensionalt simplex er en generalisation af “trekant” (i to dimensioner) og “tetrahedron” i tre dimensioner. Omkredsen til heltallig “tid” s er proportional med det rumlige tre-dimensionale rumfang $V_3(s)$. Den afbildede flade repræsenterer en interpolation mellem nabo tre-dimensionale rumfang, uden at gengive den faktiske fire-dimensionale forbindelse mellem de rumlige snit i den fire-dimensionale geometri.

Kvantemekanik og den almene relativitetsteori

Einsteins almene relativitetsteori som beskrevet ovenfor udgør Einsteins syntese af Newtons gravitationsteori og hans egen specielle relativitetsteori. Det er derfor den fælles teori hvor fysikken er styret af de to naturkonstanter G og c , Newtons gravitationskonstant og lysets hastighed. Det er imidlertid en ufuldstændig teori hvor kvantemekanik ikke indgår. Kvantemekanik, dvs. den fysik der er gyldig mikroskopisk er styret af en tredje naturkonstant, Plancks konstant $\hbar$. Præcis på grund af Big Bang og sorte huller bliver vi konfronteret med kvantemekanik selv i kosmologien. Det er allerede nævnt ovenfor at kvantefluktuationer af stof lige efter at Universet var samlet i et punkt kan være årsagen til dannelsen af galaksehobe, samt at den kvantemekaniske "vakuum energi" er relateret til den kosmologiske konstant. Der er også en række fænomener relateret til sorte huller, hvor stoffets kvantemekaniske natur spiller en rolle. I Einsteins ligninger indgår på venstre side de klassiske felter der beskriver rummets krumning, mens der på højre side indgår energi-impulstensen der stammer fra stof af kvantemekanisk natur. Det er ikke en konsistent situation. Hvorfor ikke blot formulere en kvanteteori for den klassiske almene relativitetsteori, på samme måde som vi kan formulere en kvantefeltteori for den del af stoffet der indgår på højre side af Einsteins ligning?

En del af svaret er at en sådan teori ikke er *renormaliserbar*. Det betyder at det ikke i *almindelighed* er muligt meningsfyldt at udregne kvantekorrektioner til den klassiske teori som en perturbationsserie i $\hbar$, således at korrektionerne (under tekniske antagelser der ikke vil blive diskuteret her) er små. Det betyder ikke nødvendigvis at teorien ikke kan kvantiseres, men vi har ingen generelt accepteret metode til at gøre det. Man bruger talemåden: *ikke-perturbative kvantiseringer af gravitationsteorien* om de forskellige forslag der er bragt på banen. Det er interessant at spørge ved hvilke afstande man vil forvente at en sådan kvanteteori spiller en vigtig rolle, og svaret er givet ved at kombinere de tre naturkonstanter G , c og $\hbar$ der indgår i (kvante)teorien. Der er en entydig kombination af disse konstanter, der har dimension af længde, og det kan vises at denne længde, der kaldes *Planck længden*, er repræsentativ for den afstand hvor kvante-gravitation vil spille en vigtig rolle:

$$L_P = \sqrt{G\hbar/c^3} \approx 10^{-35} \text{ m} \quad (1)$$

Dette skal sammenlignes med de afstande man vil kunne teste med den indtil nu største accelerator, LHC ved CERN, der forventes at være færdigbygget i 2007 (10^{-19} m). Selv i et logaritmisk plot er der et stort spring fra den fysik vi kan teste idag til de afstande hvor kvantegravitation forventes at være vigtig. Skeptikere vil måske sige så stort et spring, at det ikke tjener noget formål at diskutere en mulig kvante-gravitationsteori på nuværende tidspunkt. På den anden side er det muligt at vi kun kan forstå detaljer omkring Big Bang, hvis vi har forstået fysikken ved afstande sammen-

lignelige med L_P . Big Bang tvinger den makroskopiske og mikroskopiske verden sammen!

Der har været en række forslag til en mulig *ikke-perturbativ* definition af kvantegravitation. Der er ikke plads her til en diskussion af deres fortrin og mangler. Vi nøjes her med at bringe et computergenereret billede af vores univers (figur 1), som det optræder i en kvante-gravitationsteori der kan studeres numerisk.

Hvad man ser på billedet er et univers der starter ud med ingen rumlig udstrækning og som vokser eksponentielt med tiden (af computertekniske grunde trækker det sig sammen igen til et punkt). For detaljer se [1].

En af de store mangler ved de fleste af disse ikke-perturbative teorier er at de ikke giver en naturlig forbindelse mellem "stof" og gravitation. En sådan forbindelse findes i overmål i den teori der har haft den største bevågenhed i teoretisk højenergifysik de sidste 20 år: *superstrengteorien*.

Lad os diskutere de positive sider først. Fra fysikkens synspunkt er det 20. århundrede *symmetriernes århundrede*. Forståelsen af de fundamentale vekselvirkninger har været associeret med symmetrier: Einsteins specielle relativitetsteori med invarians under Lorentztransformationer, Einsteins almene relativitetsteori med invarians under koordinattransformationer, Partikelfysikkens Standardmodel med invarians under såkaldte gaugetransformationer. Disse symmetrier har hjulpet os med at begrænse antallet af mulige teorier. Man kan sige vi har bevæget os mod større og større symmetri i de fundamentale naturlove. Samtidigt er det matematiske abstraktionsniveau der er nødvendigt for at beskrive de nye teorier blevet øget, men det er mere et mentalt problem for os (mennesker) end et problem for den underliggende teori. Sammenfattende har der været en bevægelse mod "simplere" teorier med mere symmetri. Set fra det synspunkt er strengteorien på mange måder kronen på værket hvor symmetrierne er så mange at teorien er entydigt bestemt. Strengteorien er på en måde en minimal generalisation af kvantefeltteori: (punkt)partiklen er erstattet af en streng, dvs. et én-dimensionalt objekt. Partikler optræder i teorien når man betragter afstande der er store sammenlignet med Planck-længden. De forskellige partikler er forskellige vibrationer af den underliggende streng. Gravitation optræder i denne teori på lige fod med andre vekselvirkninger og en ny symmetri, *supersymmetri*, der er en symmetri mellem bosoner og fermioner, er af konsistensgrunde en nødvendighed. På denne måde optræder strengteorien som en opfyldelse af Einsteins drøm om en forenet feltteori.

Den "lille" generalisation fra partikel til streng har derfor meget store konsekvenser. I relation til Einsteins almene relativitetsteori er den største konsekvens at rum-tid ikke længere er et centralt, men et afledet begreb. Specielle to-dimensionale, såkaldte konforme feltteorier er de fundamentale objekter og i visse tilfælde og visse situationer kan de associeres med en klassisk rum-tid.

Strengteorien og dens intrikate matematiske struktur har forført en hel generation af teoretiske fysikere. Dens problem er at den tilsyneladende ikke beskriver den verden vi lever i. Situationen er meget skematisk den at

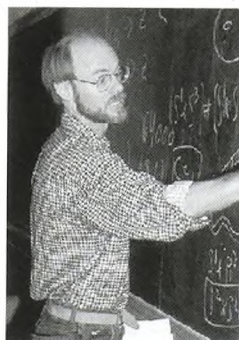
- (1) strengteorien giver naturligt en ti-dimensional verden, ikke en fire-dimensional verden
- (2) stof og vekselvirkninger svarer ikke til det vi observerer i laboratoriet.

Det er ikke udelukket at (1) og (2) kan bringes i overensstemmelse med observationerne. En indlysende nødvendig (men bestemt ikke tilstrækkelig) betingelse er at 6 af de 10 dimensioner er så små at vi (endnu) ikke har observeret dem samt at supersymmetri er en symmetri der først kan observeres ved større energier end tilgængelig i dagens laboratorier. Skal man give (1) og (2) et positivt spin kan man sige at de er en *forudsigelse* fra strengteori.

Som nævnt ovenfor har kosmologien i løbet af de sidste 15 år udviklet sig til en virkelig eksperimentel videnskab. Det bringer os til de negative sider af strengteorien. Selv om den er udviklet parallelt med den moderne eksperimentelle kosmologi har den haft forbløffende lidt at sige om de overraskende observationer. Mest bekymrende (fra et strengteoretisk synspunkt) er det at en *positiv* kosmologisk konstant er unaturlig i en strengteori. Bortset fra (1) og (2) nævnt ovenfor har strengteorien indtil nu ikke kunnet bruges til at forudsige noget om den verden vi lever i med bare en rimelig grad af sikkerhed. Det er grunden til at man stadig har et åbent øje til de såkaldte ikke-perturbative kvantegravitations-teorier nævnt ovenfor.

Man havde håbet på og mange håber stadig på at strengteorien var/er præcis hvad Einsteins specielle relativitetsteori var for Newtons mekanik og Maxwells teori (se Helge Kraghs artikel her i KVANT): den minimale generalisation der på konservativ og dog revolutionær måde forenede to tilsyneladende uforenelige teorier: kvantefeltteori og den almene relativitetsteori. Hvad vi med sikkerhed kan sige er at strengteorien ikke endnu har forenet de to teorier med samme uafvendelighed som Einsteins specielle relativitetsteori forenede Newtons mekanik og Maxwells teori.

Set i dette lys er situationen når vi går ind i år 2005 ikke så forskellig fra situationen i år 1905. Vores forsøg på at forklare den observationelle kosmologi med de teoretiske begreber vi har brugt de sidste mange år på at udvikle, inklusiv strengteori, virker søgte. Man kan håbe på at det bliver året hvor en ung fysikerinde/fysiker demonstrerer hvordan man ved på samme tid, med banebrydende nytænkning og minimal ændring, forener den almene relativitetsteori og kvantemekanikken og dermed åbner vejen til en forståelse af "tiden omkring Big Bang".



Jan Ambjørns forskningsområder er p.t. kvantegravitation, strengteori, kommutativ og ikke-kommutativ kvantefeltteori.



Poul Olesen underviser i almen relativitetsteori og kosmologi.

Litteratur

- [1] J. Ambjørn, J. Jurkiewicz and R. Loll (2004), Emergence of a 4D world from causal quantum gravity, Phys. Rev. Lett. bind **93**, 131301, [hep-th/0404156]; Semiclassical universe from first principles, to appear in Phys. Lett. B, [hep-th/0411152].

PFEIFFER VACUUM

Forskerens

"One-Stop-Shop"
Massespectrometre:
massrange op til 2048 amu

Alt nødvendigt tilbehør:
Pumpesystem, In-let system,
kammer, ventiler, skueglas,
gennemføringer, fittings og
tryksensorer

Helium læksøger QualyTest™

Mød os på DFS årsmøde

Tel. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk

Effektiv feltteori og kvantegravitation

Niels Emil Jannik Bjerrum-Bohr, Department of Physics, University of Wales Swansea

Indledning

Det er et faktum, at der indtil videre ikke er fremsat en *fundamental kvanteteori* for tyngdekraften, som både forener alle kendte vekselvirkninger i én og samme kvantemekaniske formalisme, og som også giver en acceptabel overgang til fysikken i vores fire-dimensionelle verden. Mange spekulative forslag har været fremsat som muligheder for en sådan fundamental *Grand Unifying-teori*, men de fleste har måtte opgives igen, eksempelvis på grund af en grundlæggende inkonsistens med observerede eksperimentelle data, eller på grund af uhensigtsmæssige eller modstridende fysiske konsekvenser. Blandt de mest succesfulde kandidater for fundamentale kvanteteorier er stadig *superstrengteoriene*, der på en naturlig og forholdsvis entydig måde leder til en kvantemekanisk beskrivelse af tyngdekraften. Sådanne teorier kan kun relateres til den fire-dimensionelle verden vi lever i via forholdsvis komplicerede matematiske metoder.

Kvantegravitation?

Det grundlæggende ønske om at skabe en kvantemekanisk formulering af tyngdekraften har sit udgangspunkt i forventningen om, at naturen fundamentalt set er entydig i sin form; hvilket vil sige, enten har en basal *kvantemekanisk* eller en *klassisk* beskrivelse, men vi er i det dilemma, at to teorier, som ikke er beskrevet via de samme principper, alligevel giver tilfredsstillende eksperimentelle forudsigelser for hver deres områder af naturen. Det er velkendt, at partikler i bevægelse, såsom for eksempel lys, har præcis den forudsagte relativistiske gravitationelle tiltrækning:

- idet lyset fra fjerne stjerner afbøjes på grund af massetiltrækningen fra Solen på deres vej imod Jorden,
- samt at planetbanerne omkring Solen afviger fra deres elliptiske form nøjagtigt som det er teoretisk forventet på grund af de orbitale bevægelsesenergi for planeterne.

Kvantemekanik og kvantemekaniske feltteorier er også i fin overensstemmelse med eksperimentelle resultater:

- indenfor atom-, faststof- og kernefysikken via kvantemekanikken,
- og i højenergifysikken via kvantefeltteorier.

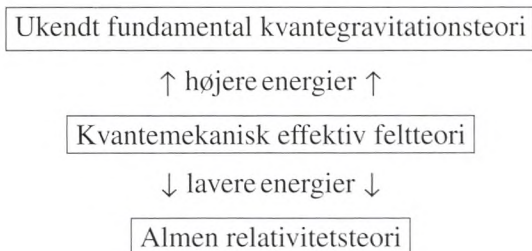
Både almen relativitetsteori og de kvantemekaniske teorier giver på hver deres længdeskala en nøjagtig beskrivelse af naturen.

På en *mikroskopisk skala* virker kvantemekanikken dog som det uundgåelige valg for en korrekt beskrivelse af naturen, og derfor er målet at skabe en kvantemekanisk teori for tyngdekraften, der giver de samme forudsigelser, som den almene relativitetsteori, for tilstrækkeligt lave vekselvirkningsenergier.

Uden en fundamental beskrivelse af tyngdekraften er det den almindelige opfattelse blandt fysikere, at vi ikke kan sige ret meget om eventuelle kvantegravitationelle effekter, men det er rent faktisk ikke korrekt. Uden at kende den grundlæggende teori er det naturligvis umuligt fuldstændigt at forudsige alle stoffets kvantemekaniske aspekter, men vi kan stadigvæk fastlægge visse entydige konsekvenser. Helt konkret er det muligt via en beskrivelse af tyngdekraften, som en *effektiv feltteori* [1, 2], at udregne konsistente perturbative kvantegravitationelle effekter med almindelige kvantefeltteoretiske metoder. Sådanne korrektioner er *unikke* i den forstand, at de også nødvendigvis må forekomme i en mere fundamental beskrivelse. En effektiv beskrivelse af kvantegravitation er derfor meget nyttig, idet vi kan udforske konkrete perturbative *kvantemekaniske konsekvenser* af tyngdekraften uden at kende til den grundlæggende formulering af en sådan kvanteteori.

Tyngdekraften — en effektiv feltteori?

Diagrammatisk kan vi kortfattet udtrykke ideen bag formuleringen af almen relativitetsteori som en effektiv feltteori således:



Selvom den fundamentale teori ikke er kendt, kan vi stadig udregne konkrete kvantemekaniske korrektioner i den effektive teori.

Einsteins *almene relativitetsteori*, som blev publiceret i 1916, forener på en meget smuk måde tankerne i hans *specielle relativitetsteori* med *Newtons tyngdekraft* ved at sammenkoble *rummets geometri* til dets *energitæthed*. Dette er matematisk formuleret i *Einstein ligningen*

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 16\pi G T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

hvor *metrikken* $g_{\mu\nu}$ er en karakteristisk størrelse for det valgte koordinatsystem, $R_{\mu\nu}$ udtrykker rummets krumning og $T_{\mu\nu}$ angiver dets energitæthed. Konstanten G er Newtons universelle *gravitationskonstant*.

Formulerer vi Einsteins almene relativitetsteori via *Einstein-Hilbert virkningen*,

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R}{16\pi G} + \mathcal{L}_{\text{stof}} \right], \quad (2)$$

hvorfra man matematisk kan udlede Einstein ligningen, er den effektive feltteoretiske beskrivelse en generalisering til virkningen,

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{R}{16\pi G} + c_1 R^2 + c_2 R^{\mu\nu} R_{\mu\nu} + \dots + \mathcal{L}_{\text{stof}} \right]. \quad (3)$$

Her har vi har introduceret nye led, der er funktioner af rummets krumning $R_{\mu\nu}$, og som er associerede med de *effektive koblingskonstanter* c_i , således at vi, i den *effektive virkning*, udover Newtons fundamentale gravitationskonstant G , også har uendeligt mange nye koblingskonstanter $c_1, c_2, \dots$.

En effektiv feltteoretisk beskrivelse af tyngdekraften er teoretisk forbundet med Einsteins almene relativitetsteori via dens Lagrange-beskrivelse, og den kan derfor ansues som en *generalisering*. Den effektive formulering vil selvfølgelig ikke lede til præcis den samme feltligning som Einsteins almene relativitetsteori¹, men derimod til en ny effektiv feltligning, en slags generaliseret Einstein ligning, der involverer de nye koblingskonstanter c_i . Det kan imidlertid udledes fra kosmologiske observationer, at koblingskonstanterne c_1 og c_2 skal være af størrelsesordenen [3] $\sim 10^{74}$ for at lede til nævneværdige afvigelser fra den almene relativitetsteoris eksperimentelle forudsigelser. Eksempelvist for $c_1, c_2 \sim O(1)$ vil den effektive beskrivelse, med en høj grad af nøjagtighed, præcis give de samme eksperimentelle forudsigelser, som den almene relativitetsteori.

Gravitonen — en ny elementarpartikel?

Elementarpartikelfysikken, såsom eksempelvis *kvante-elektro-dynamikken* (QED) eller *kvante-chromodynamikken* (QCD), der er meget succesfulde og eksperimentelt afprøvede kvanteteorier, opererer med såkaldte *feltpartikler*, der udbreder feltkraften imellem vekselvirkende partikler,

- i QED er den korresponderende feltpartikel *fotonen*, som er masseløs og har spin-1,
- imens *gluonen*, som ligeledes er masseløs og har spin-1, er feltpartikel for de stærke vekselvirkninger i QCD imellem kvarkernes farveladninger.

Teorierne QED og QCD, beskriver henholdsvis leptoners og kvarkers vekselvirkninger, og giver sammenfattende den kvantefeltteoretiske beskrivelse af elementarpartiklers dynamik i en model, som blandt partikelfysikere er bedre kendt som *Standardmodellen*. Den beskriver alle kendte stof-vekselvirkninger på nær gravitationen i én og samme formalisme.

En feltteori for tyngdekraften må derfor også nødvendigvis postulere en ny partikel — en feltpartikel, som kaldes *gravitonen*. Denne nye partikel må

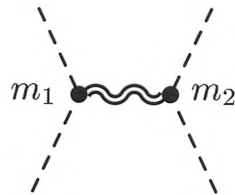
- vekselvirke med alt stof, via dets energitæthed,
- have spin-2,
- være masseløs, og dermed have uendelig rækkevidde, og udbrede sig med samme hastighed som lyset, ligesom gluoner og fotoner.

En *direkte observation* af gravitoner ville indikere eksistensen af kvantegravitation, men indtil videre er gravitonen *ikke* observeret eksperimentelt.

Feynman diagrammer og vekselvirkninger imellem partikler

Det har været kendt siden 1960'erne, at det er muligt at skabe en *kvantefeltteoretisk* beskrivelse af gravitationen, via Einstein-Hilbert virkningen, og at en sådan teori reproducerer de fleste klassiske elementer af Einsteins almene relativitetsteori. En god pædagogisk kilde til mange af disse spekulationer er Feynmans noter [4].

Vekselvirkningen imellem partikler kan i en sådan teori beskrives via *Feynman diagrammer*, hvor hvert Feynman diagram angiver et udtryk for en *kvantemekanisk amplitude*. For at udregne den fulde amplitude er det nødvendigt at summere over alle de mulige diagrammer til samme orden i de fysiske koblingskonstanter².



Figur 1. Et såkaldt Feynman træ-diagram, som svarer til en vekselvirkning imellem to partikler (angivet med stiplede linier), hvorved der udveksles en graviton (angivet med en dobbelt bølgelinie).

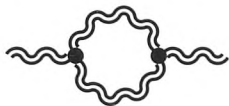
Feynman diagrammer kan klassificeres i forskellige bidrag, som har forskellig fysisk betydning. Til første approksimation inkluderer vi for eksempel kun de simplest forbundne diagrammer, det vil sige alle diagrammer, der er forbundne uden *ringslutninger*. Disse diagrammer kaldes også *træ-diagrammer* og svarer nøjagtigt til den *kvantemekaniske amplitude* som vi også kunne udregne direkte fra feltligningerne. Det er

¹Det vil sige Einstein ligningen.

²Kvadratet, af den totale amplitude, udtrykker den *kvantemekaniske sandsynlighed* for, at en given partikelproces finder sted.

vist, at amplituder, udregnet via en sådan formalisme, er i overensstemmelse med forventningerne fra Einstein ligningen.

Det er imidlertid velkendt, at *ægte kvanteeffekter* i feltteorier ($\hbar$ -korrektioner) først optræder i *loop-diagrammer*, hvor en partikel vekselvirker med sig selv i en ringslutning.



Figur 2. Et Feynman diagram, hvori en graviton (angivet med en *dobbelt bølgelinie*) vekselvirker med sig selv i en ringslutning, imens der integreres over dens vekselvirkningsenergi, et såkaldt *loop-diagram*. Et sådant diagram leder til uendeligheder i beregningerne.

Men loop-diagrammer er langt mere komplicerede at beregne end træ-diagrammer og det er ikke nødvendigvis sådan, at en given feltteoretisk beskrivelse leder til konsistente loop-effekter, selvom teorien giver god mening for træ-diagrammerne. I QED kan man vise, at loop-diagrammer giver god mening via en *reskalering* af finstrukturkonstanten α , og udregnede resultater for loop-effekter kan sammenlignes med eksperimentelle data. I en feltteori for gravitation genererer loop-diagrammer uendelige bidrag, som ikke kan fjernes ved at reskalere Newtons konstant ('t Hooft og Veltman) [5], hvilket gør, at teorien ikke længere er konsistent, når vekselvirkningsenergiene bliver meget høje. Man taler om, at en sådan kvantegravitationsteori *ikke er renormaliserbar*.

I en effektiv beskrivelse er dette dog *ikke* et *problem*, idet 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 , ligesom vi kan reskalere α i QED, *undgå* problemet med de højenergetiske *divergenser*. Hermed har den effektive teori også gyldighed for høje energier, og vi kan nu beregne konsistente loop-korrektioner. Eneste problem er, at den effektive teori er mere generel — den indeholder nu i princippet uendeligt mange nye koblingskonstanter, som må måles eksperimentelt. Praktisk har det dog ingen betydning, som vi har set, da selv kendskab til c_1 og c_2 kun vil have afgørende betydning ved meget høje energier.

For tilstrækkeligt lave energier er en effektiv feltteoretisk beskrivelse af tyngdekraften, således den *mest naturlige model* for den *lavenergetiske grænse* af en fundamental kvanteteori, og vi kan i den effektive formalisme behandle tyngdekraften ligesom enhver anden feltteori.

De ledende kvantekorrektioner til Newtons lov

Det er velkendt, at vi i den *ikke-relativistiske* grænse har Newtons *gravitationelle potential*, som udtrykker

tiltrækningsenergien imellem to masser,

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r}, \quad (4)$$

$V(r)$ er her den potentielle energi, m_1 og m_2 er de to masser, og r er deres indbyrdes afstand.

Som vi har set giver den effektive beskrivelse os en *konsistent* kvantebeskrivelse af tyngdekraften og i 1994 beregnede Donoghue [2], som den første, konkrete effektive kvantemekaniske loop-korrektioner i en sådan effektiv gravitationsteori. Hermed var det muligt at udregne de *eksakte* kvantefeltteoretiske *korrektioner* (Bjerrum-Bohr, Donoghue og Holstein) [6, 7] til Newtons gravitationslov

$$V(r) = -\frac{G m_1 m_2}{r} - 3 \frac{G^2 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{c^2 r^2} - \frac{41}{10\pi} \frac{G^2 m_1 m_2 \hbar}{c^3 r^3}, \quad (5)$$

Resultatet, for korrektionen til Newton potentialet, afhænger overraskende nok ikke af de to effektive koblingskonstanter c_1 og c_2 , og er beregnet ved at summe over de mulige Feynman diagrammer, som optræder for den givne vekselvirkning mellem de to partikler.

Kigger vi på den *kvantekorrigerede gravitationslov* ses det, at imens det første led i den effektive feltteoretiske beregning præcis reproducerer Newtons lov, og det andet led nøjagtigt svarer til den teoretiske forventning fra almen relativitetsteori³, angiver det tredje led den unikke kvantekorrektion til vekselvirkningen, der skyldes den kvantemekaniske beskrivelse. Kvantekorrektionen i det ovenstående udtryk for Newtons potential vil dog være ufatteligt lille, da forholdet mellem korrektionen fra almen relativitetsteori og Newton ledet er af størrelsesordenen $\sim 10^{-45}$ for et *brint-atom* og $\sim 10^{-9}$ for tiltrækningen imellem *Jorden* og *Solen*, mens de tilsvarende forhold for kvantekorrektionen vil være henholdsvis $\sim 10^{-49}$ og $\sim 10^{-92}$. Det ses derfor, at det i praksis nærmest vil være *umuligt* at skelne kvanteafvigelserne fra de klassiske bidrag fra almen relativitetsteori eksperimentelt, og det er derfor meget svært at tænke sig *eksperimentelle scenarier*, som vil kunne verificere kvanteeffekterne. Det logiske udgangspunkt er at kigge efter eksperimenter, hvor der *ikke* er noget klassisk bidrag, således at kvanteeffekten er det *eneste* bidrag. En eksperimentel mulighed er måske at undersøge *Hawking stråling* fra sorte huller, hvor kvanteeffekter måske kunne observeres. En anden mulighed er kvanteeffekterne fra tyngdepotentialet imellem *kosmiske strenge*, hvor det kan vises, at kun kvantekorrektionen er tilstede (Burgess) [9]. Men

³Dette bidrag er konsistent med perihelion korrektionen til planetbanerne omkring Solen [8].

sådanne overvejelser er dog stadigvæk meget *spekulative*, idet hverken kosmiske strenge eller sorthulstråling hidtil er blevet observeret.

Konklusion

Formuleres tyngdekraften som en effektiv feltteori — er den *effektivt renormaliserbar*, og det er dermed muligt at skabe en konsistent kvantebeskrivelse helt op til vekselvirkningsenergiene nær *Planck skalaen*: $\sqrt{c^5 \hbar / G} \sim 10^{19}$ GeV. Da Planck-energien er mange størrelsesordener højere end det, vi på nuværende tidspunkt kan opnå via partikelacceleratorer ~ 1000 GeV, har vi med den effektive beskrivelse en kvanteteori for tyngdekraften for alle energier, som vi almindeligvis opfatter som højenergetiske.

Ved vekselvirkningsenergi nær Planck skalaen forestiller man sig gennemgribende ændringer af vores opfattelse af tid og rum, og at en effektiv beskrivelse bryder sammen. Ved sådanne energier er det forventeligt, at alle kendte vekselvirkninger gravitationelle, elektriske og svage og stærke kernekrafter vil have samme størrelsesorden, og det er foreslået, at den fundamentale teori for kvantegravitation her er en strengteori, da en sådan beskrivelse indeholder tilstande, som kan fortolkes som gravitoner. Et sådant scenarie er fuldstændigt konsistent med en beskrivelse af almen relativitetsteori som en effektiv feltteori, idet den effektive beskrivelse ikke afhænger af et indgående kendskab til den fundamentale kvanteteori.

Det er ikke desto mindre ret fascinerende og interessant, at vi *trods* problemerne med at formulere en egentlig fundamental kvanteteori for tyngdekraften, alligevel her i *Einstein-året* må konkludere, at en kvantemekanisk beskrivelse af almen relativitetsteori via effektiv feltteori i dag er en realitet, og at kvantemekaniske effekter i langt de fleste tilfælde sagtens kan kvantitativt *estimeres* eller bedre direkte *udregnes* fra en effektiv beskrivelse af tyngdekraften. Da disse kvanteeffekter hidtil har vist sig at være *ekstremt små*, vil det være endog meget vanskeligt at verificere deres tilstedeværelse, men egentlig er dette faktum mere et udsagn om almen relativitetsteoris *anvendelighed* og *store gyldighed* for langt de fleste *observationer* i naturen.

Litteratur

- [1] S. Weinberg (1979), Phenomenological Lagrangians, *Physica A* **96** 327.
- [2] J. F. Donoghue (1994), General Relativity As An Effective Field Theory: The Leading Quantum Corrections, *Phys. Rev. D* bind **50** 3874 [gr-qc/9405057].
- [3] K. S. Stelle (1978), Classical Gravity With Higher Derivatives, *Gen. Rel. Grav.* bind **9**, 353.
- [4] R.P. Feynman, F.B. Morinigo and W.G. Wagner

(1999), Feynman Lectures on Gravitation, Edited by B. Hatfield, Penguin books.

- [5] G. 't Hooft and M. J. G. Veltman (1974), One Loop Divergencies In The Theory Of Gravitation, *Annales Poincare Phys. Theor. A* bind **20** 69.
- [6] 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* bind **67**, 084033 [hep-th/0211072].
- [7] N. E. J. Bjerrum-Bohr (2004), Quantum gravity, effective fields and string theory, hep-th/0410097.
- [8] Y. Iwasaki (1971), Quantum Theory of Gravitation vs. Classical Theory, *Prog. Theor. Phys.* bind **46**, 1587.
- [9] C. P. Burgess (2004), Quantum gravity in everyday life: General relativity as an effective field theory, *Living Rev. Rel.* bind **7**, 5 [gr-qc/0311082].



Niels Emil Jannik Bjerrum-Bohr er ansat som forskningsassistent ved Wales Universitet i Swansea. Hans forskningsområder indenfor højenergifysikken er p.t. kvantegravitation, amplituder i gauge-teorier og twistor-strengteori.

Foredrag i foråret 2005 i Dansk Geofysisk Forening

- Tirsdag den 8. marts kl. 18.00:
Generalforsamling; Auditoriet, Geofysisk Afdeling, Juliane Maries Vej 30.
Der serveres en let anretning til de fremmødte ved generalforsamlingen.
- Tirsdag den 8. marts kl. 19.00:
“Sumatra-Andaman Jordskælv 2. juledag 2004” ved Ólafur Gudmundsson, Niels Bohr Institutet, KU.
- Tirsdag den 3. maj kl. 19.00:
“Klima-modellering og iskernedata – det nordatlantiske klima gennem 500 år” ved Jens Hesselbjerg Christensen, Danmarks Meteorologiske Institut og Bo Møllersøe Vinther, Glaciologigruppen, Niels Bohr Institutet, KU.

Læs mere om arrangementerne på:

www.gfy.ku.dk/~dggf

Den fotoelektriske effekt og lysets omskiftelige kvantenatur

Klaus Mølmer, Aarhus Universitet

I begrundelsen for tildelingen af Nobelprisen i fysik for året 1921 til Albert Einstein anføres bredt "hans bidrag til fysikken" og "især forståelsen af den fotoelektriske effekt". Partikelbeskrivelsen af lys, som Einstein benyttede til at forklare den fotoelektriske effekt i 1905, forhindrer ikke, at en række fænomener kan beskrives kvantitativt korrekt med en klassisk bølgebeskrivelse af lys. Efter indførelsen af kvantemekanikken og Schrödingers ligning i 1925 kan den fotoelektriske effekt selv beskrives med den klassiske bølgebeskrivelse!

Den fotoelektriske effekt

Enhver lærebog i fysik, der blot antydningssvis beskriver tilblivelsen af atom- og kvanteteorien i starten af det 20. århundrede, præsenterer Albert Einsteins forklaring af den fotoelektriske effekt i 1905 som et afgørende argument for lysets kvantisering og en væsentlig forudsætning for Niels Bohrs atommodel i 1913. Den fotoelektriske effekt, som blev opdaget af Hertz i 1887 og yderligere studeret af Hallwachs i de følgende år, betegner det fænomen, at et materiale under belysning afgiver elektriske ladninger, således at man kan iagttage gnister eller måle en elektrisk strøm. År 1900 havde Max Planck beskrevet frekvensfordelingen af sort hulrumsstråling (elektromagnetisk stråling i termisk ligevægt ved en temperatur T) med en formel, der umiddelbart foreslår - uden at eksperimenter dog direkte påviser det - at lysets energi optræder i kvanter, hver med energien

$$E = hf, \quad (1)$$

hvor $h = 6,54 \cdot 10^{-34}$ J·s betegner Plancks konstant, og f betegner lysets frekvens målt i Hz. I 1905 foreslog Einstein, at den fotoelektriske effekt skyldes, at en enkelt foton absorberes og overfører hele sin energi til en enkelt elektron, hvorved denne kan frigøres fra materialet (navnet foton for et strålingskvantum blev dog først foreslået og indført i 1926). Hvis bindingsenergien af elektronen i materialet betegnes W , medfører energibevarelse således, at elektronen frigøres med den kinetiske energi

$$K = hf - W. \quad (2)$$

Niels Bohrs atomteori fra 1913 gør brug af et tilsvarende argument ved at lade elektroner i banebevægelse om atomkernen foretage "kvantespring" mellem baner, hvorunder fotoner absorberes eller ud-

sendes med en energi, $E = hf$, som netop matcher energiforskellen mellem de to baneenergier. Den amerikanske fysiker Robert A. Millikan fik i 1924 Nobelprisen i fysik dels for sine berømte oliedråbeforsøg, der påviste ladningens kvantisering, dels for eksperimenter der påviste rigtigheden af Einsteins formel, idet han med et variabelt elektrisk potential netop kunne forhindre elektronen i at nå frem til en katode, hvis dette ville indebære en tilvækst i potentiel energi, der oversteg dens kinetiske energi. Millikan skrev i sit Nobelforedrag i 1924:

"After ten years of testing and changing and learning and sometimes blundering, all efforts being directed from the first toward the accurate experimental measurement of the energies of emission of photoelectrons, now as a function of temperature, now of wavelength, now of material (contact e.m.f. relations), this work resulted, contrary to my own expectation, in the first direct experimental proof in 1914 of the exact validity, within narrow limits, of the Einstein equation, and the first direct photoelectric determination of Planck's h ".

Henvisningen til "contrary to my own expectation" skyldes, at Millikan i lighed med mange af tidens fysikere var meget skeptisk overfor Einstein "semikorpuskulære" teori for lyset. Det hører med til historien, at Albert Einstein også selv bekymrede sig for, hvordan Maxwells bølgeløsning med sit veldefinerede rumligt varierende elektromagnetiske felt pludseligt skulle kunne forsvinde fra resten af rummet og manifestere sig med al sin energi i en enkelt elektron. Den samme partikel-bølge dualitet skulle senere plage ham i forbindelse med fortolkningen af Schrödingers bølgefunktion, men det er en anden historie.

Kvantemekanikken og Schrödingers ligning

I 1925 formuleres kvanteteorien, og elektronen beskrives herefter ved en løsning til Schrödingerligningen. Lærebøger i kvantemekanik fokuserer i høj grad på de stationære løsninger, energi-egentilstandene, til denne ligning og de fundne egenværdier giver anledning til det karakteristiske spektrum af frekvenser, der absorberes eller udsendes af et bestemt atom, præcist som i Bohrs atommodel. Kvantemekaniske beregninger af lysabsorption som en dynamisk proces blev foretaget allerede i 1920'erne, men de er lidt tekniske, og en teoretisk gennemgang udelades ofte eller udsættes til et senere kapitel i de fleste lærebøger, f.eks. som eksempel på anvendelse af perturbationsregning.

Faktaboks: Den tidsafhængige Schrödingerligning

$$i\hbar \frac{d\Psi}{dt} = H\Psi, \quad (3)$$

hvor H er Hamiltonoperatoren, løses hensigtsmæssigt ved at skrive bølgefunktionen Ψ som en linearkombination af egentilstandene for det uforstyrrede atom, $\Psi = \sum_n c_n(t)|n\rangle$. Man får så ligningerne

$$i\hbar \frac{dc_i}{dt} = \sum_j H_{ij}(t)c_j(t) + E_i c_i(t), \quad (4)$$

hvor $H_{ij}(t) = \langle i | -\mathbf{d} \cdot \mathbf{E}(t) | j \rangle$ er matricelementerne af den elektriske dipolkobling for koblingen til et elektrisk felt, og, hvor $\hbar = h/2\pi$. I tilfælde af lys med frekvensen f , bliver disse led alle af formen $H_{ij}(t) = H_{ij,0} \cos(2\pi f t)$, og ligningerne kan ikke løses simpelt analytisk. Sættes $E_i = 0$ og antages det, at $c_i(t) = 1$ for korte tider, kan vi løse ligningerne til første orden for alle $c_i(t)$,

$$c_i(t) = -\frac{H_{i1,0}}{2\hbar} \left[\frac{e^{2\pi i(f_i+f)t} - 1}{f_i + f} + \frac{e^{2\pi i(f_i-f)t} - 1}{f_i - f} \right], \quad (5)$$

hvor $2\pi f_i = E_i/\hbar$. For optiske excitationer er dette udtryk helt negligibelt, medmindre nævneren i den sidste brøk er meget lille, dvs. netop ved resonant excitation, hvor $\hbar f = E_i$. Konklusion: når frekvensen af det klassiske led i Schrödingers ligning matcher excitationens energi af den atomare elektron opnås excitation af atomet.

Da den fotoelektriske effekt vedrører ionisation, altså en proces mellem en bunden og en fri tilstand, er en fuld teoretisk beskrivelse af denne proces ofte henvist til specialkurser i kvantemekanisk spredningsteori. Her foretager vi os som fysikere en pudsig mental manøvre idet vi tilsyneladende fortrænger vores egne pædagogiske diskussioner af lysets nødvendige kvantenatur og præsenterer fuldt tilfredsstillende gennemgange af Bohrs frekvensbetingelse og af Einsteins fotoelektriske ligning ud fra en helt klassisk bølgebeskrivelse. At det kan lade sig gøre skyldes den tekniske men ikke særligt komplicerede forklaring at amplituden for en given atomar egentilstand i kvantemekanikken oscillerer med en frekvens, givet ved tilstandens energi divideret med $\hbar$. På samme måde, som man får mest fart i gyngen under æbletræet, hvis man skubber med den rette frekvens, skal frekvensen f netop kompensere for forskellen i egenfrekvenser mellem to tilstande for at sandsynlighedsamplituden af den ene tilstand kan forøges på grund af bidrag overført fra den anden. (Se en kort gennemgang af de relevante ligninger i Faktaboksen).

Einsteins argument for sammenhængen mellem lysets kvantisering og den fotoelektriske effekt var kun afgørende, så længe at elektronens bevægelse skulle beskrives klassisk. Efter indførelsen af den kvantemekaniske beskrivelse af elektronens bevægelse er en klassisk feltbeskrivelse tilstrækkelig til at forklare de atomare linespektre og den fotoelektriske effekt, og det illustreres tydeligt den dag i dag i de mest benyttede og berømmede lærebøger i atomfysik. Læseren inviteres til

at checke de eksemplariske fremstillinger af optisk inducerede overgange mellem bundne tilstande og af den fotoelektriske effekt i lærebøgerne Griffith, *"Introduction to Quantum Mechanics"*, kapitel 9 og Bransden & Joachain *"Physics of Atoms and Molecules"*. (Bemærk at i disse tekster betegner ω frekvensen $2\pi f$).

Den moderne kvanteteori for lys

Efter 1925 får kvanteteorien sin helt egen formalisme med tilstandsvektorer, operatorer og hele fortolkningsproblematikken. Den samme formalisme anvendes straks på elektromagnetismen, og den moderne kvanteteori for lys opstår. I den formelle kvanteteori får lysets kvantisering en ny betydning, idet de elektriske og magnetiske feltkomponenter bliver ikke-kommuterende operatorer, og Hamiltonoperatorens egenverdier viser sig at udgøre en stige af ækvivalente niveauer, som vi fortolker som energierne af foton-antalstilstande. Der er ingen speciel grund til at betvivle rigtigheden af den kvantemekaniske beskrivelse af lyset, men det er uklart om noget eksperiment fordrer denne beskrivelse, eller om ikke en passende klassiske fordeling af strålingsamplituder og frekvenser på lige fod kan redegøre for de observerede fænomener. Samtidigt med at kvanteteorien går sin sejrsgang, og der inden for kvanteelektrodynamikken udføres succesfulde regninger på Compton-spredning, bremsestråling, Lamb-skiftet, elektronens gyromagnetiske forhold og meget mere opstår der en epoke for "neo-klassiske" strålingsteorier, hvor lyset beskrives i termer af fordelinger af klassiske felter, og et stort antal fremragende forskere støtter helt

frem til 1950'erne og 1960'erne en formodning om at alle optiske lyskilder og al fotodetektion kan beskrives korrekt med sådanne klassiske modeller.

Fotodetektion, nu med fluktuationer – kvantelys kan detekteres

Der er observerbare forskelle mellem kvantiserede lysfelter og klassiske felter, men de klassiske teorier kommer først til kort overfor eksperimenter, når man iagttager korrelationerne eller fluktuationerne i detektionen af flere fotoner. I et epokegørende forsøg, ønskede Hanbury-Brown og Twiss i 1956 at undersøge intensitetsfluktuationerne i et lyssignal. Det gjorde de ved at dele lysstrålen og måle på den med to detektorer i forskellig afstand til lyskilden. Produktet af de to detektorers middelfotostrømme kunne nu betragtes som funktion af deres indbyrdes forsinkelse. Et klassisk fluktuerende signal (Hanbury-Brown og Twiss havde lyset fra astronomiske objekter i tankerne) ville give anledning til værdien $\langle I(t)^2 \rangle$ i tilfælde af samtidig detektion, og til en lavere værdi $\langle I(t)I(t + \tau) \rangle$ i tilfælde af en lille forsinkelse τ , mens man i tilfælde af en længere forsinkelse ville få det ukorreleerede produkt $\langle I(t) \rangle^2$. I de foregående udtryk betegner $\langle \dots \rangle$ en middelværdi over tid. Hanbury-Brown og Twiss' eksperimenter var en fysisk observationsform, som endnu ikke var beskrevet teoretisk ud fra kvantemekanikken, og da man først kom i gang med at lave denne formulering, gik der et lys op for de fleste af "neo-klassikerne": her kan der være afgørende forskel på visse kvantemekaniske tilstande og klassisk lys. Lad os illustrere det med et simpelt eksempel: en fotodetektor virker ved at en elektron løsriver fra en bunden (valens) tilstand og er fri til at rejse og evt. forstærkes til et makroskopisk signal, som vi registrerer ved et klik i detektoren. I et givet tidsinterval exciteres en elektron med en sandsynlighed, der er proportional med den intensitet der rammer detektoren, hvilket medfører at det totale antal frigjorte elektroner vil være statistisk fordelt (efter en såkaldt Poissonfordeling). Er der fluktuationer i feltets intensitet vil fordelingen blive bredere. Forestiller vi os nu, at detektoren rammes med et bestemt antal fotoner, har hver enkelt foton en sandsynlighed for at udløse et klik, og er sandsynligheden tæt nok på en, vil antallet af klik være lig med antallet af fotoner – altså givet ved en fordeling som er mindre end Poissonfordelingen opnået med et klassisk felt. En sådan "sub-Poisson" statistik er en signatur af ikke-klassisk lys, dvs. lysets kvantisering. Lys fra en termisk lyskilde har et kraftigt fluktuerende fotonantal, og lyset fra en laser har en Poissonfordeling

i fotoner: disse lyskilder kan begge beskrives klassisk. Enkelte atomer kan kun udsende enkelte fotoner ad gangen da de skal genexciteres, før den næste foton kan udsendes, og deres ikke-klassiske lysudsendelse er blevet påvist. Ikke-lineære krystaller, og lasersystemer med feedback-loop kan producere mere intenst "squeezed" lys, med tilsvarende ikke-klassiske egenskaber, og i disse år undersøges en række mulige anvendelser af det ikke klassiske lys i forbindelse med datakommunikation og højpræcisionsmålinger. Det skal siges til ære for en af de oprindeligt overbeviste advokater for de neo-klassiske beskrivelser af lys, Len Mandel, at da han havde "set lyset", blev han en af de største pionérer i eksperimentel kvanteoptik, og han udtænkte og udførte indtil sin død for få år siden en lang række af de smukkeste eksperimenter over kvantemekanikkens mystiske egenskaber, man kan forestille sig. Mandel og Wolfs hovedværk "*Optical Coherence and Quantum Optics*" giver en omhyggelig indføring og gennemgang af eksperimenter med ikke-klassiske optiske fænomener.

Velfortjent Nobelpris for en "midlertidig" konklusion

Einsteins indsigt i 1905 vedrørende lysets partikelnatur var dristig og korrekt teori "til tiden". Bohrs atommodel i 1913 og den kvantemekaniske beskrivelse af atomet ved Schrödingers ligning i 1925 er delvise konsekvenser af denne indsigt men ender ved skæbnens ironi med at gøre den overflødig. Som ved en højere retfærdighed får vi dog en ny kvanteteori for lys, hvor partikelelementet stadig er til stede, og i den fulde kvanteoptiske beskrivelse af lys-atom vekselvirkningen, der kvantiserer både atomet og den elektromagnetiske stråling, spiller lyset faktisk sin rolle som oprindeligt tiltænkt af Einstein. Men, vi skulle hen i den anden halvdel af det 20. århundrede, før studiet af korrelationer og støj i forbindelse med den fotoelektriske effekt endeligt kunne afsløre lysets partikelnatur.



Klaus Mølmer er fysiker ved Aarhus Universitet. Han beskæftiger sig bl.a. med kvanteoptik og teorien for målinger på kvantemekaniske systemer.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab

Hjemmeside: www.nbi.dk/dfs

Jan W. Thomsen (formand)

Niels Bohr Institutet, Universitetsparken 5

2100 København

E-mail: jwt@fys.ku.dk

Tlf. 3532 0463 / Fax 3532 0460

Per Morgen (næstformand) (per@fysik.sdu.dk)

Erik Horsdal Pedersen (kasserer) (horsdal@phys.au.dk)

Johannes Andersen (ja@astro.ku.dk)

Ole Bakander (ole.bakander@post.tele.dk)

Winnie Svendsen (ws@mic.dtu.dk)

Kim Lefmann (fogedby@ifa.au.dk)

Poul V. Thomsen (pvt@phys.au.dk)

DFS årsmøde 2005

Dansk Fysisk Selskab afholder sit årsmøde 2005 på Hotel Nyborg Strand. Mødet starter torsdag den 2. juni kl. 11 og slutter fredag den 3. juni kl. 17. På andendagen afholder DFS sin årlige generalforsamling. Dagen før DFS-årsmødet, onsdag den 1. juni, holder netværk for Kvinder i Fysik (KIF) sit årlige møde.

DFS-årsmødet vil indeholde følgende plenarforedrag: Francoise Combes (l'Observatoire de Paris, Paris) *Dark Matter, black holes and formation of galaxies*, Ferenc Krausz (Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching) *Atto-second pulses and atto-second physics*, Flemming Besenbacher (IFA, Århus) *Dynamics of Nano structures on Surfaces revealed by fast scanning SPD*, Scott Kuo (Johns Hopkins University, Baltimore) *Solid State Interfaces in the Nano Age*, Dorte D. Jensen (Niels Bohr Institutet, Copenhagen) *The Huygens mission to Titan*.

Derudover vil der være parallelsessioner om astrofysik, atomfysik, faststoffysik, højenergifysik, geofysik samt uddannelse og undervisning. Sideløbende hermed vil forskningsresultater blive præsenteret som posters. DFS lægger herunder særlig vægt på at give yngre forskere mulighed for at præsentere deres resultater for en bredere kreds. Endelig vil en række firmaer demonstrere nyt forskningsapparat på en udstilling.

Alle landets fysikere opfordres til at deltage i Dansk Fysisk Selskabs årsmøde med indlæg og posters og ikke mindst til at bidrage til en livlig diskussion af spændende forskningsresultater.

Program

Årsmødeprogrammet findes på DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs). Det vil løbende blive opdateret i takt med modtagelsen af indsendte abstracts. Det endelige program forventes at være klart medio maj.

DFS posterprisen 2005

DFS ønsker at opretholde det øgede fokus indledt sidste år på årsmødets postersession. Kriterierne, som komiteen efter bedste evne vil benytte under udvælgelsen af årsmødets bedste poster er følgende: Originalt videnskabeligt indhold, rimelig informationsmængde, æstetik, overskuelighed, struktur, 'special effects', og endelig er en engageret præsentation også et plus. De tre bedste poster vil udover den obligate vin- og chokoladepræmie også blive hædret med diplom-

er samt få tilbud om at publicere en redigeret version af posteren i Kvant. Endelig vil studerende til og med phd-niveau fra den vindende poster få tildelt et års medlemsskab af DFS. Vinderne kåres udmiddelbart efter DFS's generalforsamling.

Frist for tilmelding og indsendelse af abstracts

Fristen for tilmelding til årsmødet og for indsendelse af abstracts er **fredag den 1. april 2005**. Tilmeldinger modtages dog også efter denne dato, så længe der er plads på hotellet, men studerende kan ikke søge om friplads (se nedenfor) efter tilmeldingsfristens udløb. Også abstracts kan indsendes efter fristens udløb, men dels kommer disse ikke nødvendigvis med i abstractbogen og dels får indsenderen kun mulighed for en posterpræsentation.

Tilmelding, indkvartering, priser m.v.

Tilmelding til DFS/KIF-møderne foretages direkte til Hotel Nyborg Strand. Benyt venligst internet-linket til hotellet på DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs). Møderne samt indkvartering foregår på Hotel Nyborg Strand, Østerøvej 2, DK 5800 Nyborg. (tlf. +45 6531 3131, fax +45 6531 3701). Pris for mødedeltagelse, incl. eventuel overnatning og diverse måltider, fremgår af hjemmesiden. Betalingsmåder vil fremgå af hotellets bekræftelse, som fremsendes i starten af maj måned. Bemærk, at man frem til den 27. marts frit kan afbestille sin tilmelding, men **efter denne dato er tilmeldinger almindeligvis bindende**.

Fripladser for studerende: Søg inden den 18. april!

For studerende, der ikke er indskrevet på Ph.D.-studiet, vil der være et antal fripladser. Ansøgning om en af fripladserne sker automatisk ved at afkrydse den relevante rubrik på hjemmesiden/tilmeldingsskemaet. Studerende kan få friplads af DFS, og her er det en forudsætning, at man er medlem. Fripladserne vil blive fordelt kort tid efter tilmeldingsfristens udløb, og man vil modtage særskilt besked herom den 9. maj. Hvis pladserne er brugt op, har man fortsat mulighed for at deltage mod betaling som anført på tilmeldingsskemaet.

Abstracts

Abstracts indsendes via DFS's hjemmeside (www.nbi.dk/dfs). Fristen for indsendelse af abstracts er **fredag den 22. april 2005**.

DFS's sektioner sammensætter programmet på grundlag af bl.a. de indsendte abstracts, og deltagerne vil få meddelelse herom, hvis deres bidrag er udvalgt til et foredrag. De øvrige bidrag (samt hvis man ikke ønsker foredrag) vil blive præsenteret i en posterudstilling. Posterboards er 1.15 m brede og 1.45 m høje, og de er hævet ca. 30-40 cm over gulvet. Se endvidere omtalen af DFS posterprisen 2005 ovenfor. De indsendte abstracts vil løbende være tilgængelige på internettet. Overhold venligst tidsfristen for rettidig indsendelse (se afsnittet om tidsfrister ovenfor).

Sprog

Årsmødets sprog er engelsk. Enkelte sessioner, f.eks. inden for uddannelse og undervisning, vil foregå på dansk. Deltagerne bedes indrette deres præsentationer efter, at hovedparten af tilhørerne er ikke-specialister i det behandlede emne.

Transport

Transport til/fra Nyborg sørger deltagerne selv for. Der bli-

ver arrangeret bustransport mellem Nyborg Station og hotel Nyborg Strand i forbindelse med årsmødets start torsdag formiddag og årsmødets afslutning fredag eftermiddag. Angiv venligst på tilmeldingsblanketten om der påregnes deltagelse i denne fælles bustransport. Det tager dog kun 10-15 minutter at spadserer mellem station og hotel.

Yderligere information

Spørgsmål vedrørende årsmødet besvares ved at sende en e-mail til jwt@fys.ku.dk. Benyt venligst kun denne adresse til henvendelser vedr. årsmødet.

KIF-årsmøde 1. juni 2005

Netværk for Kvinder i Fysik (KIF) afholder sit årsmøde ons-

dag d. 1. juni 2005, ligeledes på Nyborg Strand. Mødet, der starter kl. 10, omfatter faglige foredrag af to kvindelige danske fysikere, Liv Hornekær og Lise Arleth, samt et foredrag af statistiker Inge Henningsen over et mere generelt "kvinder i fysik-tema med tid til efterfølgende diskussion. Alle er velkomne til at overvære foredragene, og alle opfordres til at deltage i mødet med en poster; abstract indsendes via DFS. Dagen afsluttes med et netværksmøde med yderligere udveksling af erfaring og diskussion. For yderligere information, kontakt venligst Tina Christensen, DMI. Tlf.: 3915 7496, mobil: 2125 9153, e-post: tic@dmu.dk. Tilmelding sker via DFS's hjemmeside. Se KIF's hjemmeside for løbende opdateret program, kif.nbi.dk, samt tidligere års programmer.

Tilmeldingsblanket - DFS Årsmøde 2005

DFS, IJAF og KIF årsmøder

Bemærk!! Tilmelding bør helst foregå via DFS's hjemmeside www.nbi.dk/dfs

Navn: _____
Institution: _____
Adresse: _____
Postnr. og by: _____
Telefon: _____ E-mail: _____

Tilmelding her gælder deltagelse i DFS-årsmødet 2. juni-3. juni 2005, overnatning natten mellem torsdag og fredag samt alle måltider fra torsdag formiddag til fredag eftermiddag. Bemærk, at DFS-medlemmer får rabat på deltagergebyret.

- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på enkeltværelse; DFS-medlem; 2.230 kr.
- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på enkeltværelse; ikke-medlem; 2.560 kr.
- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på dobbeltværelse; DFS-medlem; 1.940 kr.
- ☐ Deltager (incl. Ph.D. studerende) med overnatning på dobbeltværelse; ikke-medlem; 2.270 kr.
- ☐ Studerende med overnatning på delt tre-sengs værelse; DFS-medlem; 1.600 kr.
- ☐ Studerende med overnatning på delt tre-sengs værelse; ikke-medlem; 1.750 kr.
- ☐ Fysikstuderende (ikke Ph.D) og medlem af DFS - søger DFS friplads.
- ☐ Astronomistuderende (ikke Ph.D) - søger IJAF friplads.
- ☐ Deltager (også studerende) uden overnatning; DFS-medlem; 1.450 kr.
- ☐ Deltager (også studerende) uden overnatning; ikke-medlem; 1.750 kr.
- ☐ Deltager (også studerende) dagmøde; kun frokost; uden overnatning; 700 kr.
- ☐ Deltager (også studerende) dagmøde; frokost og middag; uden overnatning 1.150 kr.
- ☐ Jeg ønsker bustransport mellem station og hotel.

KIF-årsmødet 1. juni 2005

Tilmelding her gælder deltagelse i KIF-årsmødet onsdag 1. juni 2005 samt frokost og eftermiddagskaffe. Overnatning er natten mellem fredag og lørdag (incl. morgenmad).

- ☐ Deltager med overnatning på enkeltværelse; 1.135 kr.
- ☐ Deltager med overnatning på dobbeltværelse; 830 kr.
- ☐ Deltager uden overnatning; 310 kr.

Denne blanket indsendes bedst i internetversionen på DFS-hjemmesiden www.nbi.dk/dfs, men den kan også sendes med brev eller fax senest den 1. april 2005 til Hotel Nyborg Strand, 5800 Nyborg. Mærk kuverten/faxen 'DFS 2005'.

Tsunamiens fysik

Benny Lautrup, Niels Bohr Institutet

Den 26. december 2004 blev kystområderne omkring det Indiske ocean ramt af en tsunami, der forvoldte omfattende ødelæggelser og store tab af menneskeliv. Mange forestiller sig, at en tsunami må være en monster-bølge med en helt særpræget fysik, men som jeg skal demonstrere, er fysikken bag en tsunami helt ordinær. *En tsunami er simpelthen en lavvandsbølge med meget lille amplitude og meget stor bølgelængde.* Sådanne bølger har en enkel og velkendt form, der for eksempel kan findes beskrevet i [1, kap. 24]. I det følgende vil jeg indkredse fænomenet gennem vurderinger, der skulle give den korrekte størrelsesorden. I betragtning af usikkerheden på de data, der angår jordskælvet og den efterfølgende tsunami, er det sikkert så meget, der kan gøres uden at foretage egentlige numeriske simuleringer (se [2, 3, 4]). På grund af den aktuelle interesse har jeg forsøgt at anvende så autoritative net-henvisninger, som det har været muligt for mig at finde.

Jordskælvets størrelse

Epicentret for det indonesiske jordskælv lå omkring 160 km vest for Sumatras nordlige ende. Jordskælvets størrelse blev ud fra seismografiske målinger og efter nogen diskussion vurderet til at være $\mathcal{M} = 9.0$ på Richter-skalaen [5, 3]. Der findes en empirisk sammenhæng, kaldet Gutenberg-Richter formelen, mellem et jordskælvs størrelse og den energi, der udstråles til hele jordkloden i form af seismiske rystelser. Hvis energien E måles i joule (J), skrives Gutenberg-Richter formelen traditionelt som [5, 6],

$$\log_{10} E \approx 4.8 + 1.5 \mathcal{M} \quad (1)$$

For det aktuelle jordskælv giver formelen $E \approx 2 \times 10^{18}$ J, hvilket svarer til en eksplosion af omkring 500 millioner ton TNT¹. Dertil kommer den energi, som er involveret i de massive forskydninger af materiale i jordskorpen, men den er vanskeligere at vurdere.

Man kan få en ide om størrelsen af dette jordskælv ved at sammenligne med det samlede danske energiforbrug, som er på 0.65×10^{18} joule per år [8]. Alene jordskælvets seismiske udstråling kunne således forsyne Danmark med energi i 3 år. Da hele verdens energiforbrug er på 4×10^{20} joule per år [9], ville jordskælvet dog kun kunne forsyne menneskeheden med energi i omkring halvdagen.

Store jordskælv forekommer sjældnere end små. Antallet af jordskælv per år, som er større end $\mathcal{M}$,

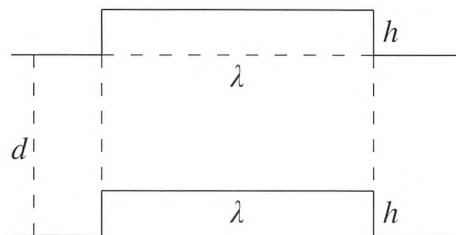
adlyder også en Gutenberg-Richter relation (se for eksempel [10, fig. 5]),

$$\log_{10} N \approx 8 - \mathcal{M}. \quad (2)$$

Ifølge denne formel forekommer et jordskælv med $\mathcal{M} \geq 9$ i gennemsnit kun en gang hvert tiende år.

Energien i et “vandbjerg”

Fordelingen af efterskælv viste, at seismiske forskydninger ramte hele 1200 km af den nord-syd gående brudlinie, hvor den Indiske plade glider under den Burmesiske [11]. Havbunden vurderes at have rejst sig nogle meter lodret opad i en bredde på 150 km øst for neddykningslinien, medens den vandrette forskydning er anslået til omkring 20 m [3].



Figur 1. Et kasseformet “vandbjerg” skabt ved en lodret forskydning h i havbunden over et område $\lambda \times L$, hvor λ er kassens bredde og L dens længde (ind i papiret). Havets dybde er d .

Når havbunden hurtigt forskydes i lodret retning, bliver vandet både flyttet og sat i bevægelse på en kompliceret måde. Men når skælvet er kortvarigt, virker det rimeligt at antage, at vandets totale mekaniske energi er den samme, uanset hvordan den er fordelt på potentiel og kinetisk energi. Vi vil derfor vurdere den mekaniske energi ved at antage, at hele vandsøjlen over det pågældende område blot forskydes lodret opad i takt med havbunden og ender med at være i hvile, således at den kun har potentiel energi (se figur 1). Da det stykke af vandsøjlen, som ligger mellem havbunden og havoverfladen er i opdriftsligevægt med det omgivende hav, vil den potentielle energi alene skyldes den del af vandsøjlen, der “stikker op over” havoverfladen.

Ud fra dette argument behøver vi altså blot beregne det arbejde, der skal udføres for at bygge et kasseformet “vandbjerg” ved at “skrabe” vand sammen fra den udstrakte havoverflade. Betegnes kassens højde med h , bredden med λ og længden med L , bliver kassens masse $M = \rho h \lambda L$, hvor ρ er vandets massefylde. Eftersom

¹Energien af meget store eksplosioner (for eksempel fra kernevåben) måles ofte i forhold til den energi, der frigøres i sprængning af et ton af sprængstoffet TNT (trinitrotoluen). Enheden 1 tonTNT er simpelthen fastsat til at være en milliard kalorier, altså 4.184×10^9 J [7].

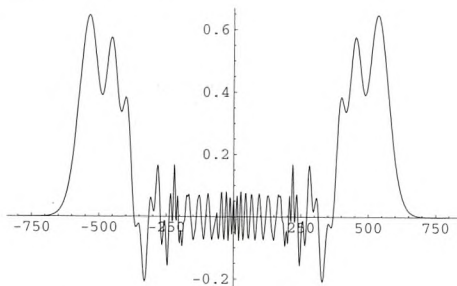
vandbjergets partikler i gennemsnit kun løftes $h/2$ over havoverfladen, bliver den potentielle energi,

$$E = Mg \cdot \frac{1}{2}h = \frac{1}{2}\rho g \lambda L h^2, \quad (3)$$

hvor g er tyngdeaccelerationen. Et kasseformet vandhul med samme dimensioner har i øvrigt den samme potentielle energi, fordi det kræver det samme arbejde at "grave" det ud af havoverfladen.

For den aktuelle tsunami tager vi $\lambda \approx 150$ km og $L \approx 1200$ km. Historiske data for lignende begivenheder [12] tillader os at gætte på $h \approx 5$ m, hvilket også er af nogenlunde samme størrelse som det russiske Tsunami Laboratory's simulering af havoverfladens maksimale højde i det Indiske hav [2]. Med $\rho \approx 1000$ kg/m³ og $g \approx 10$ m/s² bliver den totale energi, der er afsat i vandet, derfor ifølge (3) $E \approx 2 \times 10^{16}$ J. Dette svarer til cirka 1% af jordskælvets seismiske strålingsenergi og er i god overensstemmelse med en anden vurdering [11].

Efter at det udstrakte men ikke særlig høje vandbjerg er skabt, begynder det at synke sammen, og dets energi vil til sidst ende i overfladebølger, som hovedsagelig udbreder sig vinkelret på brudlinien. Det er nogle af disse bølger, der senere vil optræde på kysterne som tsunamier. Det er en meget kompliceret proces (se figur 2), som afhænger af jordskælvets karakter og forløb og af de lokale topografiske forhold.



Figur 2. Et forsøg på at simulere, hvorledes et vandbjerg kunne synke sammen og udsende to bølgetog i hver sin retning. Vandbjergets bredde var oprindelig $\lambda = 200$ og dets højde $h = 1$. Figuren er konstrueret ved at Fourier-transformere det kasseformede bjerg, tidsudvikle det under hensyntagen til dispersionen, og til slut transformere det tilbage igen.

Tsunamier er lavvandsbølger

For at komme videre, vil vi antage, at overfladebølgerne indeholder bølgelængder helt op til samme størrelse som bredden $\lambda = 150$ km af forstyrrelsen i havbunden. De længste bølger er altså meget længere end den gennemsnitlige havdybde i det indiske ocean, $d \approx 4$ km. Det er ikke nemt at vurdere, hvor meget af vandbjergets oprindelige energi der tildeles de længste bølger, men vi skal i det følgende anvende en bølgeamplitude af størrelsen $a = 1.5$ m. I en tsunami er amplituden meget mindre end dybden, som er meget mindre end bølgelængden, hvilket kan udtrykkes

gennem ulighederne,

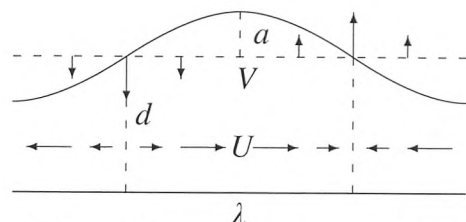
$$a \ll d \ll \lambda, \quad (4)$$

En tsunami er derfor en *lavvandsbølge med meget stor bølgelængde og meget lille amplitude*. Det faktiske forhold mellem bølgelængde og dybde i de bølger, vi betragter her, er $\lambda/d \approx 40$, medens forholdet mellem dybde og amplitude er $d/a \approx 3000$.

Ud over bølgelængden λ og amplituden a , karakteriseres en overfladebølge også ved dens periode τ . I en halv periode bliver en bølgetop til en bølgedal, således at den lodrette hastighed må være af størrelsen (se figur 3),

$$V \sim \frac{a}{\tau} \quad (5)$$

I denne og de følgende vurderinger er alle numeriske faktorer såsom 2 og π kastet bort. Der er altså ikke tale om egentlige ligninger, men om sammenligninger af størrelsesordener, hvilket signaleres af tegnet $\sim$ (for omtrentlighed).



Figur 3. En enkelt periode af en overfladebølge, der bevæger sig mod højre. Bemærk de specielle strømningsforhold, som får bølgetoppen til at flytte sig λ i tiden τ .

I et tidsrum af størrelsen τ må hele bølgetoppens oprindelige volumen være strømmet ned i området under den, men da vand er usammentrykkeligt må det også have forladt området igen i vandret retning. Betegnes den typiske vandrette strømningshastighed under bølgetoppen med U , vil vandet i tidsrummet τ flytte sig distancen $U\tau$ i vandret retning, så at det flyttede volumen bliver $U\tau Ld$. Da dette volumen må være sammenligneligt med det nedstrømmende volumen, som cirka er $a\lambda L$, fås

$$U\tau Ld \sim a\lambda L, \quad (6)$$

og dermed

$$U \sim \frac{a\lambda}{\tau d}. \quad (7)$$

Eftersom $\lambda \gg d$, er den vandrette strømningshastighed altså meget større end den lodrette $V \sim a/\tau$. Læg også mærke til, at alt vandet under bølgen sættes i bevægelse med typisk strømningshastighed U , fordi havet er så lavvandet i sammenligning med bølgens størrelse. I dybvandsbølger med $\lambda \ll d$ sættes kun det øverste overfladelag af tykkelsen $\lambda/2\pi$ i bevægelse. Generelt kan man vurdere dybvandsbølgers egenskaber ved at erstatte d med $\lambda/2\pi$ [1, kap. 24].

I en overfladebølge omsættes potentiel og kinetisk energi hele tiden til hinanden, og der må derfor

i gennemsnit være lige meget potentiel og kinetisk energi i bølgen. Med andre ord må der for en enkelt bølgelængde gælde, at

$$\rho \cdot \lambda L d \cdot U^2 \sim \rho \cdot \lambda L a \cdot g a. \quad (8)$$

På venstre side har vi vurderet den kinetiske energi af vandet under bølgen som massen gange hastighedens kvadrat, og på den højre side har vi vurderet den potentielle energi af bølgetoppen og bølgedalen på samme måde som for vandbjerget. Alle simple numeriske faktorer er igen kastet bort.

Indsættes hastigheden (7) kan vi løse efter perioden τ og finder dermed den såkaldte *dispersionsrelation for lavvandsbølger*,

$$\tau = \frac{\lambda}{\sqrt{gd}}. \quad (9)$$

Her er omtrentlighedstegnet erstattet med et rigtigt lighedstegn, fordi en mere omhyggelig beregning med alle faktorer inkluderet viser, at det er korrekt [1, s. 344].

Bølgetoppenes hastighed, også kaldet *fasehastigheden*, er som for alle bølger givet ved forholdet mellem bølgelængde og periode,

$$c = \frac{\lambda}{\tau} = \sqrt{gd}. \quad (10)$$

Vælger vi $\lambda = 150$ km og $d = 4$ km, finder vi fasehastigheden $c = 200$ m/s $= 720$ km/h, hvilket er af samme størrelse som et sædvanligt jetflys hastighed. Perioden bliver $\tau = 750$ s, altså omkring 12 minutter. Til gengæld bliver den horisontale strømningshastighed kun $U \sim 8$ cm/s, medens den vertikale bliver af størrelsen millimeter per sekund.

Disse tal er allesammen omtrentlige og afhænger af valget af input-parametre, men er nok ret typiske for fænomenet. Satellitbilleder synes at pege på en noget større bølgelængde ($\lambda \approx 400 - 500$ km) og lavere amplitude ($a \approx 60$ cm) end brugt her [11]. Hertil skal det dog bemærkes, at fra at være en næsten retlinet bølge, bliver tsunamien mere og mere buet, efterhånden som den skrider frem. Da energien er nogenlunde konstant, må en sådan forlængelse af bølgen kompenseres gennem en formindskelse af amplituden.

I en tsunami sættes enorme vandmasser således i bevægelse med forholdsvis lille hastighed. Med en bølgelængde på hundreder af kilometer mærkes der intet til en lille ændring i havoverfladen på en meter eller to, når man er langt til havs². Men selv om en tsunami er et ganske blidt fænomen ude på havet, så gør dens enorme energi den til et monster, når den rammer en kystlinje.

²Med moderne navigationsinstrumenters høje præcision burde den lille højdeforskel og den langsomme strømning over lange tidsrum dog kunne registreres.

En tsunami-bølges energi

Den totale energi i en enkelt bølgelængde af en harmonisk bølge kan vurderes som i (3), og når alle numeriske faktorer inkluderes bliver den [1, p. 351]

$$E = \frac{1}{2} \rho g \lambda L a^2. \quad (11)$$

Tages $L = 1200$ km, $\lambda = 150$ km og $a = 1.5$ m, fås $E \approx 2 \times 10^{15}$ J, hvilket udgør omkring 10% af den samlede energi, jordskælvet tilførte vandet. I betragtning af, at der formodentlig dannes mere end en enkelt bølgetop, og at der også efterlades et spektrum af bølger med mindre bølgelængde, virker det ganske rimeligt og passer meget godt med simuleringen fra Tsunami Laboratory [2].

Per meter af bølgens transversale længde L bliver energien $E/L \approx 2 \times 10^9$ J/m. Med en sådan energi til rådighed kan man løfte 200.000 tons stof en meter lodret op. Måske bliver det endnu klarere, når man ser på energitransporten i bølgen. I gennemsnit bliver den $E/L\tau \approx 2 \times 10^6$ W/m, så når bølgen rammer kysten, afleverer den af størrelsen megawatt per meter.

Dispersion

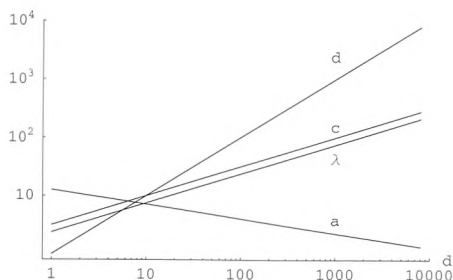
Det interessante ved lavvandsbølger er, at fasehastigheden kun afhænger af dybden, men ikke af bølgelængden. Alle lavvandsbølger bevæger sig i første tilnærmelse med samme hastighed, og en sammensat bølge, som indeholder mange lange bølgelængder, vil derfor bevare sin form. En ideel lavvandsbølge er med andre ord *dispersionsfri*.

Men det er kun en idealisation. Når bølgelængden bliver sammenlignelig med dybden, $\lambda \sim 2\pi d$, indtræder der *dispersion*. Den relevante parameter for, hvornår dispersionen sætter ind, er faktisk ikke særlig stor i nærværende tilfælde, nemlig $\lambda/2\pi d \approx 6$. En beregning med de korrekte numeriske faktorer inkluderet viser, at en lavvandsbølge med bølgelængde på 100 km har omkring 0.5% lavere fasehastighed end en med bølgelængde 150 km. I løbet af en periode på 12 minutter vil den derfor falde knap en kilometer bagud i forhold til den længere bølge. Over lange tidsrum bevirker dispersionen, at det er de allerlængste bølger, der når først frem. Forudsat amplituden er den samme (hvad den nok ikke er), vil de længste bølger have mest energi og dermed forvolde størst skade.

Når tsunamien nærmer sig land

Lad os forestille os en lavvandsbølge med en uendelig række af bølgetoppe på vej ind mod land. Når havdybden bliver mindre, falder fasehastigheden som $c \sim \sqrt{d}$. Da bølgetoppene ikke kan ophobes noget sted, må perioden τ mellem toppene være den samme hele vejen ind. Dette betyder ifølge dispersionsrelationen

(9), at bølgelængden også kortes ned som $\lambda \sim \sqrt{d}$. Hver bølge indeholder energien (11), og da lange bølger så godt som ikke taber energi undervejs, vil bølgens energi også være konstant hele vejen ind. Det betyder, at amplituden må vokse som $a \sim 1/\sqrt{\lambda} \sim d^{-1/4}$, kaldet Greens lov.



Figur 4. Variation i bølgeparametrene som funktion af dybden d , når $a = 1.5$ m, $\lambda = 150$ km og $c = 200$ m/s for $d = 4000$ m. Tilnærmelsen bliver ugyldig, når amplituden bliver sammenlignelig med vanddybden, altså cirka under det punkt, hvor linien "d" krydser linien "a". Bemærk, at figuren kan vildlede en smule, fordi de forskellige størrelser måles i forskellige enheder (angivet ovenfor).

Lad os som før betragte en tsunami med periode på 12 minutter, som på dybden $d = 4000$ m har bølgelængde $\lambda = 150$ km, fasehastighed $c = 200$ m/s og amplitude $a = 1.5$ m. Når den ankommer på dybden $d = 40$ m, vil den have bølgelængde $\lambda = 15$ km, fasehastighed $c = 20$ m/s = 72 km/h og amplitude $a = 5$ m (se figur 4). Længere inde mod land rejser bølgen sig endnu mere, og bevæger sig endnu langsommere. Når amplituden bliver sammenlignelig med dybden, sætter ikke-lineære effekter ind og får ofte bølgen til at vælte og fråde, før den løber op på stranden. Her frigøres en stor del af dens enorme energi på omkring en gigajoule per meter og medfører omfattende destruktion af kysten.

Konklusion

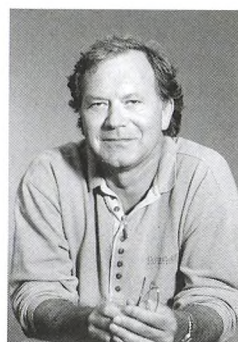
Tsunami-bølger er lavvandsbølger med meget store bølgelængder, fasehastigheder og perioder. Medens sædvanlige dønninger har bølgelængder på måske 150 meter, vil tsunamien på dybt vand have en bølgelængde på måske 150 kilometer og vare 12 minutter. Når en sådan tsunami-bølge går på land, vil dens periode være den samme som på dybt vand, medens hastigheden og bølgelængden bliver mindre og amplituden større. Resultatet er, at vandspejlet hæves adskillige meter i omkring en halv periode, og stranden derved oversvømmes. Hvis der kommer flere bølger efter hinanden, vil bølgedalene afstedkomme en kraftig udstrømning mod havet.

Tsunami-bølgers opførsel er stærkt afhængig af lokale topografiske forhold. I det indonesiske jordskælv gik brudlinien fra syd til nord, og tsunami-bølgerne bevægede sig hovedsagelig mod øst og vest. Det forklarer formodentlig, at Bangladesh slap næsten uskadt fra begivenheden, selv om oversvømmelser ofte plager dette lavtliggende land.

Afhængigt af den seismiske forstyrrelses karakter ankommer en bølgedal sommetider først og giver anledning til en sænkning af vandspejlet med kraftig udsugning på stranden. I den aktuelle tsunami så man dette fænomen især øst for brudlinien, for eksempel i Thailand, men også på vestkysten af Sri Lanka [13]. Folk på stranden reagerede dog kun i få tilfælde hensigtsmæssigt på denne advarsel.

Litteratur

- [1] B. Lautrup, "Physics of Continuous Matter", Institute of Physics Publishing (2005).
www.lautrup.nbi.dk/continuum
- [2] Webside fra det russiske Tsunami Laboratory's webside
tsun.sscc.ru/tsulab/20041226.htm
- [3] Websider fra den amerikanske National and Atmospheric Administration (NOAA).
www.pmel.noaa.gov/tsunami/sumatra20041226.html
www.ngdc.noaa.gov/seg/hazard/tsu.shtml
wcawtc.arh.noaa.gov/IndianOSite/IndianO12-26-04.htm
- [4] Webside fra den danske Teknologiportal.
www.teknologiportal.dk/EN/Teknologi/Energy+and+Environment/Energy+management+-+Environmental+management/-Tsunami.htm
- [5] Websider fra det amerikanske US Geological Survey.
earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/usslav/neic.usgs.gov/neis/general/measure.html
- [6] Om seismisk udstråling af energi.
seismo.um.ac.ir/education/Radiated%20Seismic%20Energy%20and%20Energy%20Magnitude.htm
- [7] Om enheden "ton TNT".
physics.nist.gov/Pubs/SP811/appenB9.html
- [8] Om det danske energiforbrug.
www.energioplysningen.dk/statistik/forbrug.htm
- [9] Det amerikanske energiministerium (DOE)'s oplysninger om verdens energiforbrug.
www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/highlights.html
- [10] Om relationen mellem jordskælvs frekvens og størrelse.
www.physicstoday.org/pt/vol-54/iss-6/p34.html#ref
- [11] Generel beskrivelse af jordskælvet og tsunamien.
en.wikipedia.org/wiki/2004_Indian_Ocean_earthquake
- [12] En faglig artikel om jordskælv og tsunamier.
C. Synolakis, Ph. Liu, G. Carrier, and H. Yeh (1997), "Tsunami-genic Sea-Floor Deformations", *Science* bind 278, s. 598-600
- [13] Om vandets tilbagetrækning før tsunamien ankomst
Get off the beach - now!, *Nature* bind 433, s. 354 (27 January 2005)



Benny Lautrup begyndte sin forskning inden for højenergifysik, men skiftede i midten af 1980'erne til neurale netværk og var i en årrække leder af Center for Kunstige Neurale Netværk. I de senere år har hans forskning mest angået fluid mekanik og komplekse systemer. Han er aktuell med lærebogen "Physics of Continuous Matter" (ref. 1).

Mindeord om Jens Martin Knudsen (1930 - 2005)

Torsdag d. 17. februar 2005 døde Jens Martin Knudsen, 74 år gammel. Jens Martin Knudsen var Lektor i fysik ved Københavns Universitet og Adjungeret Professor i planetfysik ved Aarhus Universitet.

Jens Martin Knudsen var uddannet som folkeskolelærer i Silkeborg. Videbegærlighed og lyst til at sætte sig dybere ind i naturvidenskab fik ham til at fortsætte på studenterkursus i København, og derefter påbegynde magister-studiet i Fysik ved Københavns Universitet. Efter uddannelsen som magister i fysik havde han et udbytterigt, toårigt ophold på MIT, Massachusetts Institute of Technology, i perioden 1962-64. Her stiftede Jens Martin bekendtskab med en helt ny teknik: Mössbauer spektroskopi. Efter sit ophold ved MIT vendte Jens Martin hjem til Københavns Universitet til en lektorstilling i fysik, som han varetog til det sidste, også efter pensioneringen ved 70 års alderen i 2000.

Jens Martin var en ildsjæl, der helt og fuldt brændte for de tanker og idéer han mente var rigtige. Som ung lektor mente Jens Martin, at den vigtigste opgave han kunne udføre var at yde en indsats i U-lande, ved at hjælpe folk her i gang med at etablere en naturvidenskabelig uddannelse på universitetsplan. Det blev til et par år i Tyrkiet (1966-67) og derefter ca. 5 år i Brasilien (1969-73). Her blev erfaringen fra MIT nyttig: Mössbauer spektroskopi var som nævnt et nyt felt; det er en relativt billig og overkommelig teknik, som kan anvendes på mange forskelligartede problemstillinger – og det inspirerede Jens Martin til at arbejde på etableringen af en Mössbauer-gruppe i Brasilien.

Gennem sit liv på Københavns Universitet har Jens Martin med succes undervist i et bredt spektrum af kurser på fysikstudiet, fra begynderkurser til de mere avancerede kurser på 2. del. Det har givet ham en dyb indsigt i mange sider af fysikken og samtidig et stort antal venner blandt fysikere over hele Danmark. Men størst indflydelse har Jens Martin haft blandt sine studerende. Jens Martin var meget afholdt; det vil ikke være forkert at sige højt elsket af de studerende. Hans dør stod altid åben. Ikke alene for de allermest talentfulde studenter, men også de måske lidt svagere studerende kunne altid finde et råd. Når de studerende forlod Jens Martins kontor, var det med den overbevisning at der også er en plads til dem her i livet.

Som underviser var Jens Martin Knudsen en legende. Han besad i sin undervisning og i sin formidling den uhyre sjældne evne at kunne tryllebinde sine tilhørere, uanset hvilket emne han talte om. Jens Martins undervisningsmetoder var ikke pyntet med nogen form for pædagogisk avantgarde, men baserede sig alene på en massiv dosis af en uimodståelig begejstring og en dyb ærefrygt for naturen. Dette gjorde ham i stand til at fastholde ikke alene et fysikauditorium fyldt med studerende (det fortælles, at de mødte frem, selv om de havde 40 i feber), men også lyttere og seere på nationalt plan,

når han i radio og TV forklarede om grundforskning i et ligefremt og letforståeligt sprog.

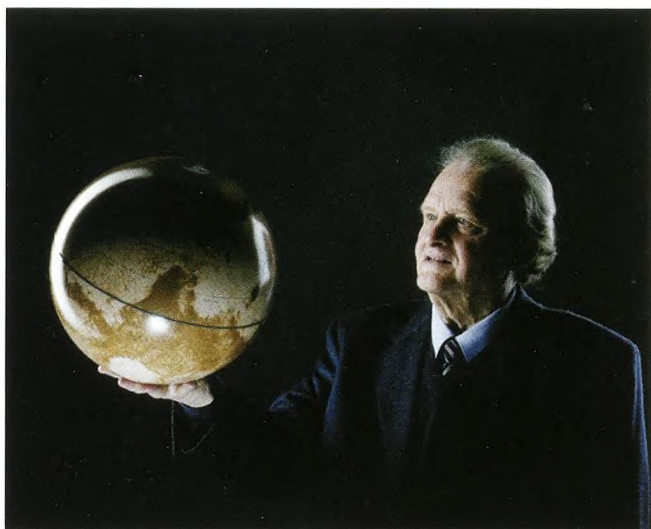
Med karakteristisk beskedenhed tøvede Jens Martin længe, før han fik sine håndskrevne undervisningsnoter oversat til engelsk og trykt som bog (reference 1). Da det endelig blev gjort, forblev bogen fast inventar i det indledende fysikkursus ved Københavns Universitet i mere end 10 år. Bogen starter helt anderledes end traditionelle fysikbøger med et historisk kapitel hvor Galileis, Tycho Brahes, Keplers og Newtons store opdagelser bliver genfortalt. Det Absolutte Rum er et gennemgående tema. På en af bogens første sider står, som et lille haiku, en af de sætninger, som Jens Martin ofte gentog (med eftertryk) og derefter lod blive hængende i luften, mens han holdt en lang, lang sigende pause:

*Det er umuligt
at afmærke et punkt
i det astronomiske rum
og senere genfinde
dette punkt.*

At Jens Martins undervisning på første år af fysikstudiet gjorde indtryk ses blandt andet deraf at studenterne valgte at navngive deres eget møderum: "Det Absolutte Rum". Fra de berømte forelæsninger har de studerende samlet en række citater, som fortæller om Jens Martins personlighed og hans holdning til naturvidenskab. Et eksempel: "Hvis noget opfattes som den absolutte sandhed, er det ikke videnskab. Hvis noget er videnskab, er det ikke den absolutte sandhed."

Jens Martin brugte ofte at sætte tingene lidt på spidsen for at gøre sin pointe helt klar: Han fortalte, at hvis *han* skulle skrive en ny Danmarkshistorie, ville den komme til at indeholde fire kapitler, ét om hver af følgende personer: Tycho Brahe, Ole Rømer, H.C. Ørsted og Niels Bohr. Resten af Danmarks historie ville være at betragte som ubetydelige fodnoter. Disse fire personer vil blive husket så længe civilisationen varer. Gennem deres forskning skabte disse mennesker den egentlige baggrund for Danmarks velstand. Desuden var deres arbejde med til at frigøre Europas intellektuelle liv fra snærende bånd skabt for eksempel af kirke og statsmagt.

Der er ingen tvivl om at Jens Martin mente, at den naturvidenskabelige forskning er en af de vigtigste drivende kræfter i historien og dertil en af de vigtigste kulturelle aktiviteter mennesket udøver. Han hævdede, at det vi kalder den vestlige civilisation tog sin begyndelse med Tycho Brahes opdagelse af en supernova d. 11. november 1572. Denne opdagelse og de systematiske målinger Tycho Brahe herefter igangsatte, blev startskuddet til den naturvidenskabelige metode. Da en gruppe studerende og kolleger d. 11. november sidste år fejrede den vestlige civilisations 432 års fødselsdag, var det i mindst lige så høj grad til ære for Jens Martin.



Figur 1. Fysikeren Jens Martin Knudsen (1930-2005).
Foto: Thomas Borberg, Polfoto.

Også som forsker har Jens Martin Knudsen sat sit præg på Universitetet og her skal nævnes en betydningsfuld opdagelse gjort sidst i 1970'erne: Jern og nikkel har man i århundreder brugt i legeringer, men de to grundstoffer ligner hinanden så meget, at de i legeringer er anbragt på deres pladser i krystalgitteret på en fuldstændig tilfældig måde, og det stod også at læse i lærebøger om metallegeringer. Jens Martin var sammen med en studerende, Jørgen Albertsen (født Petersen), i færd med at studere jernmeteoritter, og det var i forbindelse med undersøgelsen af en metal-lamel ekstraheret fra en sådan jern-meteorit, at Jens Martin opdagede at Mössbauer spektret af denne lamel så ganske anderledes ud end spektrene af andre jernlegeringer. Der er tale om en lille, men meget karakteristisk afvigelse fra Mössbauer spektret af almindeligt metallisk jern. De separerede lameller fra jernmeteoritterne består af legeringer af jern og nikkel, og det de to opdagede var, at der i disse lameller findes en komponent, hvori den lokale symmetri omkring jernkernerne afviger fra kubisk symmetri. Både i almindeligt ferromagnetisk rumcentreret jern og i de rustfri legeringer, der krystalliserer i den fladecentrerede form, finder man sædvanligvis jernatomet i kubiske omgivelser. Men med opdagelsen af et kraftigt kvadrupolskift i Mössbauer-spektret af den undersøgte lamel, var Jens Martin straks klar over at en helt ny legering var fundet (reference 2). Nærmere undersøgelser, bl.a. i samarbejde med G.B. Jensen, DTU, viste, at den ordnede struktur består af velordnede lag af henholdsvis jern og nikkelatomer. Det er denne lagdeling, som giver anledning til den lille, men tydeligt skelnelige afvigelse fra kubisk symmetri, idet én af de kubiske akser har en lidt anden længde end de to andre (reference 3). Størkningen ved dannelsen af en jernnikkel legering i meteorittens moderlegeme (en asteroide) er ekstremt langsom, fordi afkølingshastigheden var så lille, af størrelsesordenen 1 grad på 1 million

år. Under de forhold har jern og nikkelatomerne haft tid til at finde deres retmæssige plads i krystalgitteret. Jens Martins opdagelse af denne ordnede fase i jernnikkel legeringer gav genlyd i vide kredse og også en del protester. Nogle af disse interessante resultater af Jens Martin Knudsens forskning er beskrevet i hans doktorafhandling fra 1984.

Under sit flerårige ophold i Brasilien fik Jens Martin lejlighed til at sammenligne farven af planeten Mars med farven af den brasilianske røde jord. Et naturligt spørgsmål var, om der kunne være et fælles træk ved årsagerne til farven på de to planeter. Den røde tropejord i Brasilien er skabt gennem tusinder af år ved årlig skiftet mellem regntid og tørtid. Kunne det røde støv på Mars mon være skabt ved lignende processer? Dette spørgsmål blev begyndelsen til et helt nyt forskningsfelt i Danmark (se referencerne 4 og 5). Sidst i 1970'erne startede en debat om oprindelsen af en lille gruppe af meteoritter, som adskilte sig en smule fra alle andre kendte meteoritter, idet denne gruppe af meteoritter havde oxygen-isotopforhold, som gjorde at de dannede en gruppe for sig selv. Gruppen kaldes SNC-meteoritterne efter typemeteoritterne Shergotty, Nakhla og Chassigny. Sidenhen har der samlet sig så mange kraftige indicier for at disse meteoritter stammer fra Mars, at enhver anden forklaring på disse meteoritters oprindelse ville være yderst eksotisk. Men da Jens Martin Knudsen igangsatte studier af disse meteoritter ved Københavns Universitet, var oprindelsen af disse sten stadig kontroversiel. Sammen med anvendelsen af Mössbauer spektroskopi i studierne af SNC-meteoritterne fulgte tillige indgående litteraturstudier, blandt andet af de udførlige rapporter (i tidsskrifterne *Science* og *Journal of Geophysical Research*) fra de ambitiøse Viking-missioner, som NASA gennemførte sidst i 1970'erne.

Omkring 1990 var der planer under opsejling, både i Rusland og USA, om at sende en ubemandet mission med videnskabeligt udstyr til vores naboplanet Mars. Naturligvis var Jens Martin Knudsen med i det ekspertpanel, der diskuterede, hvilke eksperimenter man ville kunne få det største udbytte af. Det kan næppe undre, at Jens Martin foreslog at man burde udvikle et Mössbauer spektrometer, der kunne tåle denne rumfærd; for, som Jens Martin gjorde rede for, derved ville man få meget detaljerede oplysninger om Mars' geologiske udvikling, inklusive det store spørgsmål om i hvilken grad flydende vand har medvirket i denne udvikling (reference 6). Vel vidende, at det både var et kostbart og kompliceret forslag. Med typisk beskedenhed tilføjede Jens Martin derfor til allersidst i ekspertgruppens rapport et afsnit om et langt enklere (og billigere) supplerende eksperiment, der består i at opsamle magnetiske støvpartikler på permanente magneter af forskellig styrke, og studere partiklerne med et kamera. Det var dette forslag, der vandt så meget gehør, at det kom med på Mars Pathfinder missionen i 1997 (reference 7), og i mere sofistikeret form igen på NASA's

2004 mission (reference 8), hvor nu også det langt mere ambitiøse Mössbauer eksperiment kom med. Det var en stor glæde for Jens Martin at opleve den succesfulde landing af de to rovere, Spirit og Opportunity, selvom han på grund af sin svære kræftsygdom ikke selv kunne være med i kontrolcenteret i Pasadena. Da det første Mössbauer spektrum optaget på en anden planet blev sendt tilbage til Jorden, sørgede instrumentets konstruktør, Göstar Klingelhöfer fra Mainz, for at Jens Martin var blandt de allerførste som fik det at se. Jens Martin forblev indtil sin død et meget aktivt medlem af den danske Mars-gruppe, som han prægede med sin personlighed, med flittigt arbejde, og med idéer og inspiration.

Jens Martin holdt i 1998 et foredrag i Århus om Mars og resultaterne fra Mars Pathfinder. Efter dette foredrag faldt diskussionen på de midtjyske jernrige røde jorde, som er magnetiske. Diskussionen endte med at Jens Martin fik en prøve med sig for at teste, hvordan den opførte sig, når den blev blæst hen over de magneter, der var konstrueret til Pathfinder missionen. Jens Martins begejstring var stor, da han fandt ud af, at støvet af denne jord blev fanget på fire af magneterne, ligesom støvet på Mars blev det på Pathfinder-magneterne. Det gav startskuddet til det nu veletablerede Mars Simulerings Laboratorium ved Århus Universitet.

Jens Martins forhold til det at søge efter sandheden var båret af en dyb respekt for den naturvidenskabelige metode – en metode, der gennem en kombination af teori og eksperiment, giver os indsigt i naturen. Jens Martins søgen og undren gjaldt i næsten lige så høj grad de vilkår, hvorunder menneskene lever. Velkendt er Jens Martins optagethed af de filosofiske – og de religiøse – konsekvenser af menneskenes dybere og dybere indsigt i Universets oprindelse og udvikling. Disse interesser og overvejelser og Jens Martins store indsigt i naturvidenskab, samt hans uomtvistelige talent for at udtrykke selv komplicerede idéer og tanker i et klart og forståeligt sprog, gjorde ham til en skattet foredragsholder over hele Danmark.

Jens Martins studenter var de første til at værdsætte hans indsats og sørge for, at den blev påskønnet: studenterne har indstillingsret til prisen for bedste undervisning på Københavns Universitet, "Årets Harald", som Jens Martin fik tildelt i 1990. Siden fulgte i 1997 Jens Rosenkjær prisen og Tycho Brahe medaljen. H.C. Ørsted medaljen i sølv og et ridderkors blev tildelt ham i 2000. Kronen på pristildelingerne blev Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs guldmedalje, som Jens Martin fik overrakt i efteråret 2004.

Gennem hele sit professionelle virke havde Jens Martin Knudsen en uvurderlig støtte i sin hustru Anne. Hun har fulgt ham både til Boston, Ankara og Brasília og på foredragsturnéer rundt i Danmark. Anne delte sin mands engagement i U-landsproblematikken og i om-

sorgen for unge mennesker. Stærkest kom det til udtryk, da parret adopterede en forældreløs dreng i Brasilien. Ulykkeligtvis følger der ikke med alle børn garanti for et lykkeligt forløb, og Anne og Jens Martin måtte opleve den sorg, at deres dreng døde fra dem i en alt for ung alder.

Jens Martin Knudsens aktiviteter drejede sig ikke alene om forskning og undervisning. Et gammelt ord-sprog, som Jens Martin af og til citerede, illustrerer på udmærket måde hans daglige liv og færd: "Kæmp ej mod alverdens mørke, men tænd et lys".

Det gjorde Jens Martin for rigtig mange af os. Vi vil savne ham.

Jens Als-Nielsen
Poul Hjorth
Morten Bo Madsen
Finn Berg Rasmussen

Litteratur

- [1] J.M. Knudsen, P.G. Hjorth, *Elements of Newtonian Mechanics*, 3rd ed., ISBN 354067652X, Springer Verlag (2000).
- [2] J.F. Petersen, M. Aydin and J.M. Knudsen (1977), "Mössbauer Spectroscopy of an Ordered Phase (Superstructure of FeNi) in an Iron Meteorite", *Phys. Lett.*, bind **62A**, 192.
- [3] J.F. Albertsen, G.B. Jensen and J.M. Knudsen (1978), "Structure of taenite in two iron meteorites", *Nature*, bind **273**, 453.
- [4] V.W.A. Vieira, T.V.V. Costa, H.G. Jensen, J.M. Knudsen, M. Olsen and L. Vistisen (1986), "Oxidation State of Iron in SNC Meteorites as Studied by Mössbauer Spectroscopy", *Physica Scripta*, bind **33**, 180.
- [5] J.M. Knudsen (1989), "Mössbauer Spectroscopy of ^{57}Fe and the Evolution of the Solar System", *Hyperfine Interactions*, bind **47**, 3.
- [6] J.M. Knudsen, M.B. Madsen, M. Olsen, L. Vistisen, C.B. Koch, S. Mørup, E. Kankleit, G. Klingelhöfer, E.N. Evlanov, V.N. Khromov, L.M. Mukhin, O.F. Pri-lutski, B. Zubkov, G.V. Smirnov and J. Juchniewicz (1991), "Mössbauer Spectroscopy on the Surface of Mars. Why?", *Hyperfine Interactions*, bind **68**, 83.
- [7] M.B. Madsen, S.F. Hviid, H.P. Gunnlaugsson, W. Goetz, C.T. Pedersen, A.R. Dinesen, M. Olsen, L. Vistisen, R.B. Hargraves, and J.M. Knudsen (1999), "The Magnetic Properties Experiments on Mars Pathfinder", *J. Geophys. Res.-Planets*, bind **104**, 8761.
- [8] M.B. Madsen, P. Bertelsen, W. Goetz, C.S. Binau, M. Olsen, F. Folkmann, H.P. Gunnlaugsson, K.M. Kinch, J.M. Knudsen, J. Merrison, P. Nørnberg, S.W. Squyres, A.S. Yen, J.D. Rademacher, and S. Gorevan (2003), "The Magnetic Properties Experiments on the Mars Exploration Rover Mission", *J. Geophys. Res.* bind **108**(E12), 8069.

Bose-Einstein Kondensation: Når atomer synger i kor

Nicolai Nygaard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20999-8410, USA

I 1924 udledte den unge bengalske fysiker S. N. Bose Plancks strålingslov ved at postulere, at fotoner er uskelnelige partikler. Deres tællestatistik er derfor forskellig fra klassiske partikler, som kan skelnes fra hinanden. Da Boses artikel blev afvist af *Philosophical Magazine*, sendte han manuskriptet til Einstein, som prompte oversatte det til tysk og sørgede for at det blev publiceret [1]. Einstein udvidede efterfølgende Boses analyse til at omfatte massive partikler og opdagede herved det fænomen vi idag kender som Bose-Einstein kondensation.

To slags partikler

Klassisk fysik skelner mellem identiske partikler, på samme måde som man til et cocktail party kan skelne mellem to identisk klædte enæggede tvillinger: De bliver præsenteret som Peter og Poul: "Det er Peter til venstre." Hvis man nu ikke slipper tvillingerne med blikket, vil man til enhver tid kunne sige hvem der er Peter og hvem der er Poul. Forlader man lokalet for en stund, vil man ikke bagefter kunne afgøre hvem der er hvem, da de er identiske. Men det skyldes manglende viden hos iagttageren.

Klassisk fysik skelner på samme måde mellem identiske partikler: Det har mening at sige, at den ene af to identiske partikler har en given koordinat, og den anden har en anden koordinat, da vi i princippet kan iagttage begge partikler kontinuert i tid og rum, og således til enhver tid vide hvilken af de to der, for eksempel, "var den der startede længst til venstre."

I kvantemekanikken forholder det sig anderledes. Her kan vi ikke følge de enkelte partiklers baner i detalje, eftersom de er beskrevet ved bølgefunktioner, der kun giver sandsynligheden for at finde en bestemt partikel et givent sted i rummet. Hvis to partikler befinder sig i det samme område, vil deres bølgefunktioner overlappe, så hvis vi måler tilstedeværelsen af én af dem, kan vi umuligt afgøre hvilken af de to der var tale om. Kun at én af dem befandt sig der hvor vi kiggede. Partiklerne er med andre ord uskelnelige.

Ombytning af to identiske partiklers koordinater må derfor ikke ændre noget fysisk i en kvantemekanisk beskrivelse, da det ingen mening har at sige, at den ene af to identiske partikler har en given koordinat, og den anden partikel en anden koordinat. Begreberne "den ene", henholdsvis "den anden", er meningsløse, og enhver ombytning af to partikler efterlader alle målbare aspekter af systemet uændrede. Det er en selvstændig erkendelse, at naturen har valgt at bygge denne uskelnelighed ind på det mest fundamentale niveau, således at

alle fysisk forekomne tilstande er uændrede under ombytning af to identiske partikler. Denne empiriske indsigt betyder, at når vi beskriver tilstanden af et system af identiske partikler med en bølgefunktion, som afhænger af partiklernes koordinater, kan denne højst ændre sig med en fasefaktor, når vi ombytter to partikler:

$$\Psi(\dots, \mathbf{x}_i, \dots, \mathbf{x}_j, \dots) = \lambda \Psi(\dots, \mathbf{x}_j, \dots, \mathbf{x}_i, \dots), \quad (1)$$

hvor hver partikel er beskrevet ved et sæt koordinater $\mathbf{x}_i$, der for eksempel kunne angive en position i rummet. Hvis vi ombytter de samme to koordinater *to* gange, ender vi naturligvis hvor vi startede. Så $\lambda^2 = 1$.

Alle partikler kan derfor inddeles i to klasser efter værdien af λ . For $\lambda = +1$ kaldes partiklerne *bosoner*, mens de for $\lambda = -1$ kaldes *fermioner*. Disse to typer partikler er fysisk væsensforskellige. Bosoner er sociale i den forstand, at et ubegrænset antal bosoner kan klemmes ind i en given kvantetilstand. Fermioner er derimod enspændere, idet to eller flere identiske fermioner ikke kan være i den samme tilstand. Var de nemlig det, ville bølgefunktionen være uforandret ved ombytning af to partikel-koordinater (se figur 1). Men samtidigt skal den skifte fortegn, da $\lambda = -1$ for fermioner. Følgelig er bølgefunktionen nul, og dermed er også sandsynligheden for tilstanden nul: Den er forbudt. Dette kaldes *Paulis udelukkelsesprincip*, og vi har lige bevist det. Vi må konkludere, at en given kvantetilstand maksimalt kan rumme en enkelt fermion.

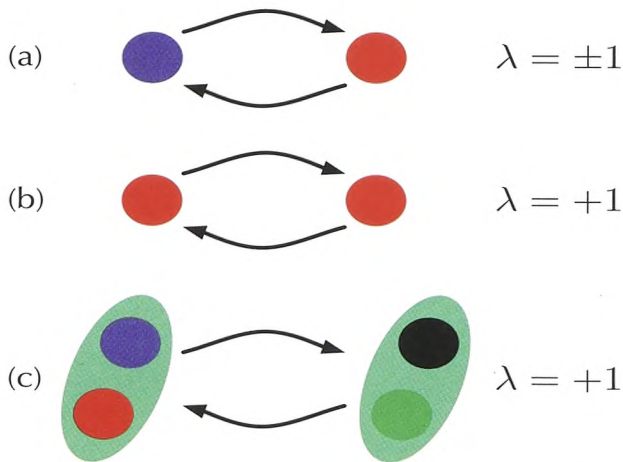
Elektroner og nukleoner er alle fermioner, men atomer kan opføre sig som bosoner, hvis de er sammensat af et lige antal fermioner. Tænk på ombytning af to par af fermioner, som vist i figur 1 (c). Ombyttes partiklerne to og to, er der en faktor -1 for hver permutation, hvilket tilsammen giver $\lambda = +1$. Det er let at generalisere dette argument til et større antal partikler. For eksempel er ${}^7\text{Li}$ (3 protoner, 3 elektroner og 4 neutroner) en boson, mens ${}^6\text{Li}$, der har en neutron færre, er en fermion.

Einsteins indsigt

Einstein viste, at for en ideal gas af bosoner er befolkningen af en kvantetilstand med energi ϵ_v givet ved

$$n_v = \frac{1}{e^{(\epsilon_v - \mu)/k_B T} - 1}, \quad (2)$$

kaldet Bose-Einstein fordelingen. Her er k_B Boltzmanns konstant, og T er temperaturen. Det kemiske potential, μ , er bestemt ud fra betingelsen, at antallet af partikler, $N = \sum_v n_v$, er bevaret.



Figur 1. Ombytning af to identiske partikler og de mulige værdier af fasefaktoren λ i ligning (1). Partiklernes kvantetilstand er indikeret ved deres farve. Hvis partiklerne er i forskellige tilstande (a), er både $\lambda = +1$ og $\lambda = -1$ mulige. Hvis partiklerne derimod er i samme tilstand (b), kan λ kun antage værdien $+1$, eftersom en ombytning ikke ændrer noget. I (c) illustreres ombytning af to par af identiske partikler. Ombytningen foretages ved at permutere partiklerne to og to, hvilket giver en samlet fasefaktor $\lambda = (\pm 1)^2 = +1$. Par af identiske partikler opfører sig derfor som bosoner.

Hvad Einstein indså var, at den maksimale værdi for μ er ϵ_0 , den laveste partikel energi, eftersom $\mu > \epsilon_v$ svarer til en tilstand med negativ befolkning. For en varm gas $\mu \rightarrow -\infty$, og Bose-Einstein fordelingen er identisk med en klassisk Boltzmann fordeling. I takt med at temperaturen reduceres, øges værdien af det kemiske potential, indtil $\mu = \epsilon_0$. I det tilfælde divergerer udtrykket (2), og Einstein postulerede, at gassen deles i to: “Én del kondenserer, resten forbliver en fortættet ideal gas”, [2]. Kondenseringen er udtryk for en ophobning af partikler i grundtilstanden, som vil have en makroskopisk befolkning givet ved

$$N_0 = N - \sum_{v \neq 0} n_v. \quad (3)$$

Dette er hvad vi forstår ved et Bose-Einstein kondensat (BEC).

Med Einsteins ord ligger det interessante i Boses teori for lyskvanter i hypotesen om en vidtgående formel sammenhæng mellem stråling og gas. Vi kan følgelig kvalitativt forstå BEC ved at betragte atomerne som manifestationer af de Broglies stofbølger med en bølgelængde $\lambda_{dB} = h/\sqrt{2\pi m k_B T}$, hvor m er atomernes masse, og h er Plancks konstant. Når temperaturen reduceres, bliver partiklerne mere og mere udtværede, og overgangen til BEC sker når de individuelle bølgepakker begynder at overlappe. Kondensatet består af atomer, der svinger i takt, og som tilsammen udgør en makroskopisk stofbølge, et veritabelt superatom. Kondensatet er derfor beskrevet ved en makroskopisk bølgefunktion, der adlyder en bølgeligning. Eftersom atomerne vekselvirker indbyrdes, er denne ligning ikke lineær. Det er interessant,

at Einsteins artikel var blandt de første, der benyttede de Broglies stofbølge koncept, og på den måde var med til at bane vejen for Schrödingers bølgemekanik.

Superatomer og Superflydere

i 1938 postulerede F. London en sammenhæng mellem BEC og den nyligt opdagede superflydende fase i ^4He (helium II). Eftersom ^4He isotopen er bosonisk, så han i helium II's nærmest magiske egenskaber en manifestation af den makroskopiske bølgefunktion, der beskriver et kondensat. Af Londons ide udsprang Tisza og Landaus enormt succesrige to-væske model, hvori helium II beskrives som bestående af to sameksisterende væsker med hver sin tæthed og hastighedsfelt; en normal væske, som opfører sig klassisk, og en superflydende del, som flyder frit uden viskositet. Det er kondensatet, beskrevet ved bølgefunktionen $\Psi_0(\mathbf{r}) = |\Psi_0(\mathbf{r})|e^{i\phi}$, der bestemmer de superflydende egenskaber. Således er den superflydende hastighed givet ved den rumlige variation af fasen, ϕ , af kondensatets bølgefunktion:

$$\mathbf{v}_s = \frac{\hbar}{m} \nabla \phi, \quad (4)$$

akkurat som vi kender det fra kvantemekanikken ($\hbar = h/2\pi$). Det unikke er, at alle atomerne i kondensatet har den samme fase ϕ , således at de flyder i samlet flok.

Studiet af helium II førte til en lang række fremskridt i mange-legeme fysik, specielt i 1950'erne. Men helium er plaget af stærke vekselvirkninger mellem partiklerne, som slører kondensatet. Derfor drømte BEC fysikere om at lave et kondensat i en gas, hvor effekten af vekselvirkninger ville være mindre på grund af den lavere tæthed. Denne drøm skulle vise sig at være særdeles vanskelig at realisere. Således tog det mere end tyve år fra de første eksperimenter kom igang i midten af 1970'erne, til det lykkedes at skabe Einsteins kondensat i en atomar gas.

Kolde Atomer

En væsentlig teknologisk hurdle, som skulle overkommes, var udviklingen af laserkøling, der gjorde det muligt at køle atomare gasser til ultralave temperaturer. I 1995 lykkedes det Eric Cornell og Carl Wieman ved University of Colorado og Wolfgang Ketterle ved MIT at fremstille de første Bose-Einstein kondensater i laserkølede gasser af henholdsvis rubidium og natrium atomer [3, 4]. Denne bedrift har ført til en eksplosion af teoretisk analyse og eksperimenter i dusinvis af laboratorier verden over, hvor fysikere udforsker deres nye legetøj i enhver tænkelig detalje. Cornell, Wieman og Ketterle delte i 2001 Nobelprisen i fysik for deres banebrydende arbejde.

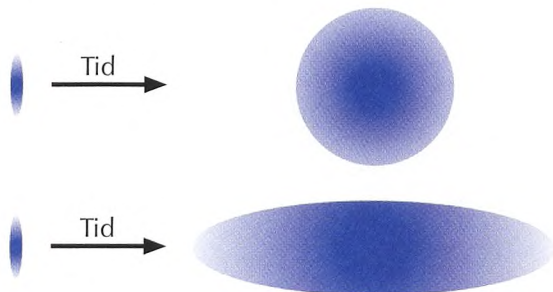
En lang række af eksperimenter har afdækket talrige interessante aspekter af BEC. Her skal vi koncentrere os om blot et par effekter, som yder en god illustration af kondensatets kvantemekaniske natur. Den første knytter sig til den måde kondensatet udvider

på. I eksperimenterne køles gassen, mens den holdes fanget i en fælde, hvor atomerne holdes sammen enten af laserstråler eller magnetiske felter. Men i fælden er kondensatet mindre end den optiske opløslighed, så det er nødvendigt at slukke for fælden, og lade gassen udvide sig for at tage billeder af den. Når en klassisk gas udvider sig, vil den rumlige fordeling efter en vis tid være sfærisk symmetrisk, uafhængigt af formen af den oprindelige beholder. Årsagen er, at de atomare hastigheder i fælden følger en Maxwell fordeling, som kun afhænger af atomernes fart, v , ikke deres bevægelsesretning. Således er antallet af partikler, hvis hastighed ligger i intervallet $[v, v + dv]$, proportionalt med $\exp(-mv^2/2k_B T)dv$.

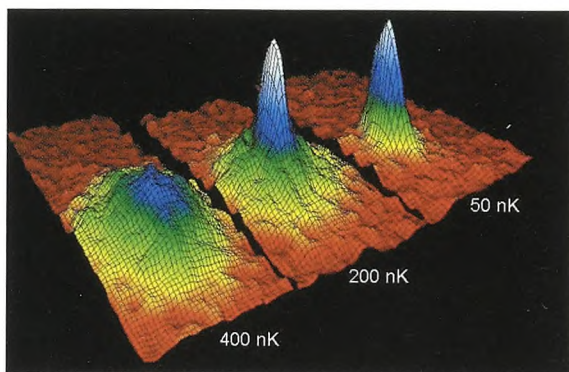
Under fri ekspansion er hastighedsfordelingen uforandret, hvorimod hver enkelt atoms position er bestemt ud fra

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 t, \quad (5)$$

hvis vi kan se bort fra tyngkraften. I grænsen hvor $t \rightarrow \infty$, er den oprindelige rumlige fordeling irrelevant, og vi kan negligere $\mathbf{r}_0$. Derfor udvider gassen sig asymptotisk som en kugle, hvori tætheden er Gaussfordelt. Dette er illustreret i figur 2.



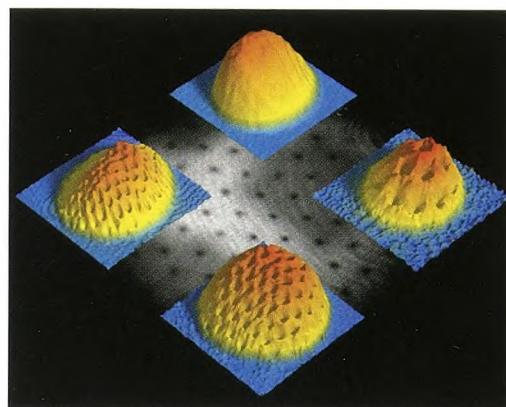
Figur 2. Ballistisk udvidelse af en klassisk gas (øverst) og et Bose-Einstein kondensat (nederst). Hvor en klassisk gas udvider sig som en kugle uanset begyndelsesbetingelserne, fastholder et kondensat sin oprindelige form, men med den korte og lange akse ombyttet.



Figur 3. Billeder af ^{87}Rb gasser efter udvidelse for tre forskellige temperaturer angivet i nano-Kelvin. Profilen til venstre er den typiske Gaussiske fordeling for en klassisk gas. For lavere temperaturer (midten) gror en asymmetrisk profil op, som indikerer at et kondensat er dannet. Ved endnu lavere temperaturer er alle atomerne i kondensatet, og den termiske sky af klassisk fordelte atomer er helt forsvundet. Fra University of Colorado, jila.colorado.edu/bec.

I modsætning hertil vil et Bose-Einstein kondensat, der udvider sig, beholde en profil, som afspejler den oprindelige form. Dette er på grund af den makroskopiske befolkning af grundtilstanden i fælden. Vi ved fra Heisenbergs usikkerhedsprincip, $\Delta x \Delta p < \hbar$, at en gas fanget i en anisotropisk fælde vil have den højeste impuls-komponent langs den korteste dimension i fælden. Derfor vil kondensatet udvide sig hurtigst i den korteste retning, når det sættes fri, med det resultat, at der vendes op og ned på formen (se figur 2). Observationen af denne særegne udvidelse af et kondensat var et slående bevis for BEC, som vist i figur 3.

Således opfører kondensatet sig som en sej væske, i stand til at holde sin form, på trods af at det er en meget tynd gas karakteriseret ved et ultrahøjt vakuum. Ligeledes vil et kondensat skvulpe, som en klat gelatine, hvis man puffer til det. Den slags kollektive bevægelser er en dramatisk illustration af, at atomerne i kondensatet opfører sig ens og synger i kor, når de bliver anslået, og er et vigtigt redskab til at karakterisere gassen [5].



Figur 4. Tætheden af et kondensat udsat for et roterende potential. For lave rotationshastigheder (øverst) forbliver kondensatet stationært, mens det for stigende rotationshastighed (med uret) rummer et større og større antal hvirvelstrømme. På det sidste billede (til venstre) rummer kondensatet 130 sådanne vortices. Fra MIT, cua.mit.edu/ketterle_group.

Vores andet eksempel viser på dramatisk vis, hvordan kvantemekanikken dikterer kondensatets opførsel. Hvis man rører i en normal væske, vil man straks sætte den i rotation. Derimod vil et kondensat i begyndelsen modsætte sig forsøget på at sætte det i bevægelse. Årsagen er, at kondensatets bølgefunktion kun kan beskrive cirkelbevægelser, hvis omkreds er et helt antal de Broglie bølgelængder, hvilket svarer til at impulsmomentet per partikel er kvantiseret i enheder af $\hbar$, ganske som i Bohrs model for brintatomet. Kun hvis man rører hurtig nok til at opfylde denne kvantiseringsbetingelse vil kondensatet rotere. Når kondensatet begynder at rotere, danner det kvantiserede hvirvelstrømme, eller *vortices*, som er huller i tæthedsfordelingen, hvorom fasen af bølgefunktionen vokser med præcis 2π . Disse vortices er mini tornadoer, hvorom atomerne cirkulerer

med en lokal hastighed givet ved ligning (4). Eftersom hvirvlerne frastøder hinanden, organiserer de sig i en karakteristisk gitterstruktur. Det er illustreret i figur 4, som viser billeder af et BEC under omrøring med en laserstråle med varierende rotationsfrekvens.

BEC i Danmark

I skrivende stund står hele tre danske eksperimentelle grupper på spring til at bringe BEC til Danmark. I Aarhus stiler Michael Budde mod at blande bosoner og fermioner i et optisk gitter, som er et krystal af lys. Når to eller flere laserstråler interferer og danner en stående bølge, bevirker den varierende lysintensitet, at atomerne ser et periodisk potential bestående af bakker og dale. Med dette redskab kan atomfysikere genskabe mange af de kendte fænomener fra faststoffysikken, såsom båndstruktur og Bloch oscillationer. Men eftersom det periodiske potential er dannet ved hjælp af laserlys, kan både dets geometri og styrke ændres vilkårligt. Derfor kan man eksperimentelt studere fysiske fænomener, som ligger udenfor den traditionelle faststoffysiks rækkevidde. Ved for eksempel at øge styrken af det optiske gitter, er det muligt at inducere en faseovergang mellem to vidt forskellige kvantemekaniske faser: Superflydende og isolerende. I den superflydende tilstand glider atomerne frit gennem gitteret, hvorimod de i den isolerende fase er låst fast med netop en partikel per brønd [6]. En sådan kvantefaseovergang er interessant, fordi den er styret, ikke af termiske fluktuationer som en klassisk faseovergang, men af fluktuationer på kvantniveau.

Ved at blande bosoniske og fermioniske atomer i et optisk gitter håber Michael Budde at kunne justere potentialet, således at hver brønd indeholder præcist én boson og én fermion i den isolerende fase. I den situation kan man via elektromagnetiske felter få atomerne til at gå sammen parvis og danne en hær af heteronukleare molekyler.

På H. C. Ørsted Institut vil Jan Thomsen studere kondensater, hvis atomer kan befinde sig i mere end én indre tilstand. Eftersom disse indre tilstande kan opfattes som komponenterne i en spinvektor, er det muligt at studere overgange mellem både ferro- og anti-ferromagnetiske faser styret af atomernes indbyrdes vekselvirkninger.

Endelig vil Jörg Helge Müller i Eugene Polziks gruppe på Niels Bohr Institutet udnytte BECs unikke optiske egenskaber til at lagre lypulser. På grund af kondensatets høje optiske tæthed er koblingen mellem atomerne og lyset stærkere end for en klassisk gas. Derfor skulle det være muligt at udveksle ikke-klassiske korrelationer mellem et BEC og en laser, og altså i sid-

ste ende overføre informationerne fra en lypuls til et kondensat for senere at læse dem ud igen. Et Bose-Einstein kondensat vil på den måde kunne fungere som en slag kvante-harddisk.

For alle tre gruppers vedkommende er det et realistisk mål at have et kondensat indenfor et halvt år, så 2005 kan meget vel blive et særdeles koldt år i Danmark.

Afslutning

Man ser i Einsteins arbejde med den fotoelektriske effekt og hans opdagelse af stimuleret emission i 1917 en naturlig ledetråd, der fører til BEC. Einstein forklarede den fotoelektriske effekt ved at indføre hypotesen om lyskvanter, hvis statistik Bose uddybede. Stimuleret emission er grundkonceptet i lasere, som bevirker at et makroskopisk antal lyskvanter befolker en enkelt svingningstilstand af det elektromagnetiske felt, på mange måder identisk med den måde atomer stimuleres sammen i kondensatet. Der er en smuk sammenhæng i det faktum, at den eksperimentelle realisering af BEC i en gas blev muliggjort af netop laseren, som satte eksperimentalfysikere i stand til at dysse atomernes termiske bevægelse ned ved at bombardere dem med fotoner.

Litteratur

- [1] S. N. Bose (1924), Z. Phys. bind **26**, 178.
- [2] A. Einstein, Sitzungsber. K. Preuss. (1925) Akad. Wiss. bind **1**, 3.
- [3] E. A. Cornell and C. E. Wieman (2002), Rev. Mod. Phys. bind **74**, 875.
- [4] W. Ketterle (2002), Rev. Mod. Phys. bind **74**, 1131.
- [5] D. S. Jin, J. R. Enscher, M. R. Matthews, C. E. Wieman and E. A. Cornell (1996), Phys. Rev. Lett. bind **77**, 420.
- [6] M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. W. Hänsch og I. Bloch (2002), Nature bind **415**, 39.



Nicolai Nygaard er gæsteforsker ved National Institute of Standards and Technology i Maryland, USA. Hans forskning omhandler Bose-Einstein kondensation og superflydende Fermi-gasser.

Opgave-hjørnet - Havebål og brintbomber

Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, Roskilde Universitetscenter

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra sidste nummer samt en ny opgave. I sidste nummer af KVANT blev denne breddeopgave fra RUC (fra sommereksamen 1976, nr. 19 i rækken af KVANT) bragt:

19. Havebål og brintbomber.

Hvad er forholdet mellem typiske temperaturer i brændende havebål og eksploderende brintbomber? Begrund svaret.

Løsning

Ved forbrændingen i et havebål foregår der den kædeproces, at kul- og brintatomer forbinder sig med iltatomer til kultveilde- og vandmolekyler under afgivelse af energi, der blandt andet bruges til at sønderdele det organiske materiale i bålet og sønderdele luftens iltmolekyler, således at der frembringes nye kul-, brint- og iltatomer, der forbinder sig til kultveilde- og vandmolekyler under afgivelse af yderlig energi, der osv.

Ved forbrændingen/eksplosionen i en brintbombe foregår der den kædeproces, at to brintkerner forbinder sig til en heliumkerne under afgivelse af energi, der blandt andet bruges til at overvinde den elektriske frastødning mellem to nye brintkerner, således at de kommer tæt nok på hinanden til at forbinde sig til en heliumkerne under afgivelse af yderligere energi, der osv.

Størrelsesordenen af den energi, der skal til for at rive et kul- eller brintatom ud af organisk materiale eller til at splitte et iltmolekyle, er eV (typisk energi i kemi). Temperaturen, der skal til for at en given andel af molekylerne i havebålet har kinetisk energi af mindst denne størrelsesorden, er proportional hermed.

Størrelsesordenen af den energi, der skal til for at overvinde den elektriske frastødning mellem to brintkerner, er MeV (typisk energi i kernefysik). Temperaturen, der skal til for at en tilsvarende andel af brintkernerne i brintbomben har kinetisk energi af mindst denne størrelsesorden, er proportional hermed.

Da de to proportionalitetskonstanter imellem temperatur og karakteristisk energi er de samme, er forholdet mellem temperaturerne i et havebål og i en brintbombe som forholdet mellem energierne eV og MeV.

Temperaturen i en brintbombe er altså i størrelsesordenen én million gange større end i et havebål.

Kommentar

Ifølge K.A.Jensens "Almen kemi II" er typiske temperaturer i kemiske forbrændingsprocesser af størrelsesordenen 10^3 K. Og ifølge Politikens Forlags "Atomenes hvem-hvad-hvor" er antændelsestempera-

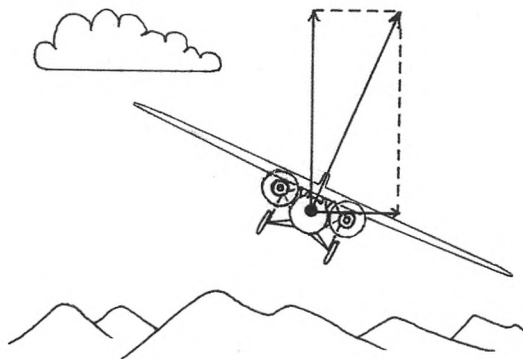
turen af en brintbombe over 10^8 K. Så på trods af de forsimplede fremstillinger af både forbrændingsprocesserne i et havebål og fusionsprocesserne i en brintbombe i overslagsbesvarelsen her af opgaven, er svaret 10^6 for forholdet mellem de to temperaturer ikke helt skævt.

Opgaven er et eksempel på en eksamensopgave fra det såkaldte "Breddefysikkursus" på RUC, hvor netop bredden udnyttes. Løsningen på opgaven beror jo på at kombinere indsigter fra forskellige fysiske deldiscipliner. Ved undervisning inden for rammerne af en enkelt deldisciplin – og altså ikke på tværs af deldisciplinerne – er der en del af breddeopgaverne, der som denne ville sprænge rammerne. De fleste breddeopgaver bevæger sig dog faktisk inden for fysiske enkeltdiscipliner. Det vigtigste ved breddeopgavegenren er efter min mening ikke så meget det fysiktværfaglige. Selvom det har sin charme. Det vigtigste er de åbne formuleringer af opgaverne. Med deraf følgende krav til fysifiseringer og matematifiseringer. Inden for fysiske enkeltdiscipliner eller på tværs af dem.

20. Vipning af flyvemaskine

Inden næste nummer af KVANT udkommer kan læserne overveje denne breddeopgave (fra sommereksamen 2000, nr. 20 i rækken her i KVANT):

Hvorfor hælder/vipper en flyvemaskine ved kursændring? Hvordan hænger vipningen og kursændringen sammen? Begrund svarene.



Figur 1. Fly der vipper. Tegning af Kaj Roland.

Løsning og kommentar bringes i næste nummer. Der er kommet kommentarer til breddeopgaven i december-nummeret om "Relativistisk tyngdepunktsforskydning". En diskussion af disse bringes i næste nummer af KVANT.

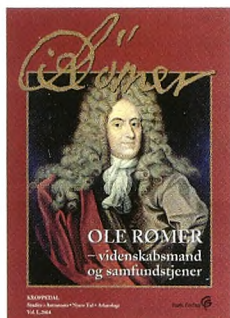
Aktuelle bøger

Michael Cramer Andersen, KVANT

Ole Rømer – videnskabsmand og samfundstjener

Redaktion: Per Friedrichsen, Ole Henningsen, Olaf Olsen, Claus Thykier og Chr. Gorm Tortzen.

KROPPEDAL – Studier i Astronomi, Nyere tid, Arkæologi. Gads Forlag 2004. 360 sider, ill., 299 kr.



Denne bog udkommer i forbindelse med 300-års jubilæet for grundlæggelsen af Ole Rømers observatorium og 25-års jubilæet for Ole Rømer Museet som i dag er en del af "KROPPEDAL – Museum for Astronomi, Nyere tid og Arkæologi". Grundlæggeren af Ole Rømer Museet, Claus Thykier, beretter i det sidste kapitel om begivenheder i museets første 25 år. Det er især takket være hans indsats og interesse for historisk astronomi, at vi har en samling af originale ting fra Rømer, tæt på beliggenheden af Rømers landobservatorium.

Bogen er det første bind i Kroppedal Museets skriftserie. Der vil forhåbentlig komme flere spændende artikler om Rømer i fremtiden. Den almindelige læser, vil nok finde bogen lidt for detaljeret med de mange noter og referencer. Bogen bærer således lidt præg af, at være en museumsskriftserie med forskellige bidrag til Rømer-forskningen. Til gengæld er bogen yderst velillustreret og gennem støtte er den blevet noget billigere end en typisk tilsvarende indbundet bog med samme omfang!

I bogen høstes nogle af frugterne fra årtiers Rømerforskning. I mange år antog man, at det meste af Rømers videnskabelige arbejde var gået tabt, ved Københavns brand i 1728. En omfattende eftersøgning i forskellige arkiver førte imidlertid til et større kildemateriale, hvoraf meget er blevet oversat til dansk (fra latin, tysk og fransk) og udgivet i "Rømer – korrespondance og afhandlinger samt et udvalg af dokumenter" i 2001.

I dag har Rømerforskere således et langt bedre grundlag for at skrive mere fuldstændige kapitler om Rømers forskning og arbejder og ikke mindst hans store indsats som embedsmand, der har været meget lidt belyst. Bogen rummer 18 kapitler skrevet af danske Rømer-eksperter med en fyldig bibliografi og en nyttig oversigt over Ole Rømers levnedsløb.

Et lille eksempel på én af de mange interessante historier som bogen fortæller, er Rømers bidrag til springvandene i Versailles. Den franske konge, Ludvig den XIV, ønskede de mest imponerende springvand i haven til sit slot Versailles. Her kom forskerne ved Akademiet til hjælp idet den franske astronom Jean Picard havde konstrueret et nivelleringsinstrument med kikkertsigte som gjorde det muligt, at bestemme højder i landskabet over flere hundrede meter med imponerende præcision. Rømer deltog i det omfattende ni-

velleringsarbejde og beregnede bl.a. rørtykkelser og styrker i vandledninger.

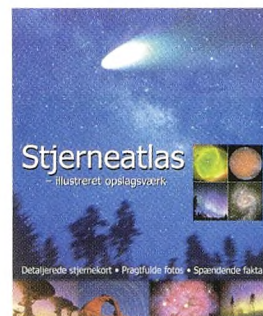
Der skulle bruges meget vand til springvandene, der blev startet hver gang kongen ankom eller forlod slottet og ved besøg af betydningsfulde gæster. Det blev planlagt at inddæmme nogle søer på et plateau knap 8 km fra slottet samt at etablere en vandledning gennem tunnel og via akvadukt, som skulle forsyne parken og slottet med vand. Denne vandledning ville ifølge opmålingerne have et fald på blot 3 meter over den 8 km lange strækning. Et så nøjagtigt anlægsarbejde kostede et millionbeløb og stillede meget store krav til det indledende nivelleringsarbejde. Men Picard og Rømers nivellering var meget præcist og anlægsarbejdet blev realiseret. Selv om det tog fire timer for vandet at ankomme, efter det var sluppet løs, fik springvandene det vandtryk de behøvede.

Bogen er interessant fordi den beskriver nogle sider af Rømer, der ikke er beskrevet så fyldigt før.

MCA

Stjerneatlas – Illustreret opslagsværk

Forfatter: Robin Scagell, oversat af Jan Teuber. Forlaget Aktium 2004. 96 sider, ill., 149 kr.



Dette stjerneatlas henvender sig til (yngre) amatør-astronomer som vil lære om himmelfænomenerne og orientere sig på nattehimmelen. Man kan bl.a. læse om tåger, hobe, galakser, formørkelser, planeter og kometer. En række stjernekort viser nattehimmelen opdelt i fire områder og måned for måned med forklaring af de vigtigste synlige stjernebilleder. En række stjernebilleder vises med helsides-fotos og de astronomiske objekter der findes i dem forklares mere indgående. For seks af stjernebillederne kan man lægge et gennemsigtigt overlæg ovenpå med hjælpestreger og navne på stjernerne – meget pædagogisk!

På andre opslag forklares "Stjernernes liv", "Stjernetyper", "Stjernevidenskab", "Skyer i rummet", "Mælkevejen", "Galakser", "Solen", "Månen", "De indre planeter", "Kæmpeplaneterne", "Små kloder i Solsystemet" og "Kikkerter og teleskoper". Altsammen er flot illustreret og sproget er let forståeligt. Der er desuden en ordliste som er uundværlig for begynderen.

MCA

Rettelse: I sidste nummer af KVANT blev prisen på "Gyldendals minilex – Fysik", af Anders Smith og Henrik Smith, angivet til 175 kr., men den korrekte pris er blot 123,75 kr (inkl. moms).

Forfatterne har bestræbt sig på, at holde prisen og vægten nede, så gymnasieelever kan købe den og have bogen med i tasken – en prisværdig tanke! Af samme grund er illustrationerne lidt sparsomme.

TIDSKRIFTER & BOGSAMLINGER KØBES

Så som "Zeitschrift für Physik", "Annalen der Physik", "The Physical Review", ...
også videnskabelige bogsamlinger samt
kostbare enkeltbøger.

HERMAN H. J. LYNGE & SØN A/S
Internationalt Videnskabeligt Antikvariat siden 1821

Tlf.: 33155335 <http://www.lynge.com>



Ph.d.-stipendier ved "Glas og tid"

– Danmarks Grundforskningsfonds center for seje væskers dynamik

I forbindelse med centrets opstart d. 1. juni 2005 opslås to stipendier ved Institut for matematik og fysik (IMFUFA) på RUC med tiltrædelse i tidsrummet 1/6-1/9. De ideelle ansøgere er personer med erfaring med eksperimentel faststoffysik, som ser en udfordring i opbygning af nye opstillinger i forbindelse med ren grundforskning drevet af nysgerrighed. De konkrete projekter vi har i tankerne er:

Målinger under høje tryk: Der skal etableres et nyt laboratorium til studier af seje væskers mekaniske og dielektriske relaxsation under ekstremt høje tryk. Formålet er at undersøge hvordan seje væskers dynamik afhænger af temperaturen, og hvordan dynamikken eventuelt modificeres af trykket. I første omgang studeres simple organiske væsker der bliver sejtflydende langt under stuetemperatur (f.eks. glycerin), men det er tanken at udvide undersøgelserne til at omfatte polymerer, såkaldte "bioprotective sugars" eller metalliske glasser. Disse målinger vil formentlig foregå i et samarbejde med forskere fra Frankrig (Paris) og Polen (Katowice).

Termo-visko-elastiske responsfunktioner: Når en væske ved afkøling bliver meget sejtflydende, bliver termodynamiske lineære respons-egenskaber som f.eks. varmfylde, udvidelseskoefficient, osv., alle frekvens-afhængige. Vi har stillet os det mål at være de første der måler et såkaldt fuldstændigt sæt af termo-visko-elastiske respons-funktioner, et mål der efter et grundigt forarbejde nu er inden for rækkevidde. Ph.d.-projektet kommer til at omfatte udvikling af ny målemetoder i denne forbindelse.

Disse to stipendier er de første af en række i forbindelse med opbygningen af et "center of excellence". De næste to stipendier forventes besat ved årsskiftet 2005/2006.

Der er ingen ansøgningsfrist idet ansøgninger behandles løbende. Ansøgning i tre eksemplarer sendes til centerleder professor Jeppe Dyre (IMFUFA, RUC, postbox 260, 4000 Roskilde - tlf. 4674 2284). Ansøgere, der bliver indkaldt til samtale, må være forberedt på en udvælgelsesprocedure der også lægger vægt på bred fysisk viden, gå-på-mod og godt humør.

Om RUCs glasgruppe: Kernen i glasgruppen udgøres af Thomas Schrøder, Tage Christensen, Niels Boye Olsen samt centerlederen. – Grundfilosofien i forskningen er, at da glas dannes af ekstremt seje væsker, må en bedre forståelse af glas' egenskaber gå via en bedre forståelse af seje væsker i termisk ligevægt. Dette har ført til nye teorier og nye målemetoder (se f.eks. <http://glass.ruc.dk>). Det er grundforskningscentrets hovedformål at undersøge gyldigheden af disse teorier for en række nye typer seje væsker – også under ekstremt høje tryk – samt for "computer væsker".

Oplev solformørkelsen den 29. marts 2006 i Libyen

Astronomisk Selskab har gennem undertegnede arrangeret en rejse i forbindelse med den totale solformørkelse i foråret 2006. Valget af lokalitet er faldet på Libyen pga. de gode meteorologiske og transportmæssige forhold. Libyen er også blevet accepteret i det internationale samfund.

Samtidigt har vi mulighed for at opleve denne Middelhavskultur, der fuldt ud kan konkurrere med de største seværdigheder i Grækenland og Italien.

Ud fra de foreløbige tilmeldinger til turen er der mange, der ønsker Libyen frem for Tyrkiet. Der er allerede omkring 30 (februar 2005), på tilmeldingslisten, og da der i forbindelse med selve formørkelsen skal skaffes plads i en teltlejr i Jalu Oasen, er det vigtigt, at vi hurtigt får reserveret plads her, da netop denne oase bliver et tilløbsstykke fra bl.a. amerikanske og tyske ekspeditioner. Derfor er det nødvendigt med en hurtig tilmelding!

På Astronomisk Selskabs hjemmeside www.as-dk.org og as.dsri.dk vil vi løbende oplyse om bl.a. astronomiske forhold og give nyttige link.

Ørkenens drømmesyn – 10 dages rejse til Libyen under solformørkelsen den 29. marts 2006

En spændende rejse til det hidtidige lukkede land med fantastiske attraktioner, som kan konkurrere med de største seværdigheder i Grækenland og Italien + solformørkelsen!

Udpluk af programmet: Afrejse onsdag den 22. marts fra København med fly (via Zurich) til Tripoli. Ophold i Tripoli med bl.a. besøg på Nationalmuseet og videre til Benghazi. Onsdag den 29. marts kl. 10:30 UT observeres solformørkelsen i oasen "Jalu". Fredag den 31. marts med fly til København (via Zurich).

Pris anslåes til 15.000 kr: som inkluderer bl.a. flybilletter, lufthavnsskatter og passagerafgifter; 'transfers' og udflugter iht. program; lokal engelsktalende guide; indlogering på hotel af god turiststandard i delt dobbeltværelse med bad-toilet mv.; halvpension (morgen- og aftensmad) og dansk rejseleder på hele rejsen.

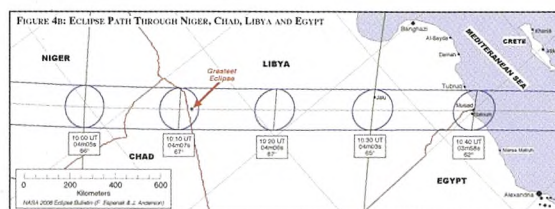
Ikke inkluderet: Visum, øvrige måltider og drikkevarer, entrées, forsikringer og drikkepenge; teknisk arrangement: Unitas Rejser. Der tages forbehold mht. endeligt program samt priser.

Jalu Oasen:

Geografisk længde: $+21^{\circ}33.0'$ – bredde: $+29^{\circ}2.0'$

Solformørkelsen:

Maksimum: kl. 10:30 UT. Varighed: 3 min. og 12 sek.



Figur 1. Detaljeret kort over grænseområdet Libyen/Egypten ved Middelhavet samt den omtalte Jalu Oase, hvor observationen foregår (figur hentet fra [2]).

På gensyn

Knud Strandbæk

Agerland 11, 6091 Bjert

tlf. 76311000, mobil 40403700

mail: knud@strandbaek.net eller

astro-travel@stella-nova.net

Referencer:

- [1] Uddybende program og information om turen kommer på www.as-dk.org eller www.stella-nova.net og ved at kontakte Knud Strandbæk.
- [2] NASAs ekspert Fred Espenaks webside om solformørkelser, sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse. Espenak tager også til Libyen.
- [3] Denne hjemmeside vil give gode idéer, www.spearstravel.com/eclipse06.htm