

KVANT December 4

Tidsskrift for Fysik og Astronomi 21. årgang

TEMA: KOSMOLOGI & RUMTID

- BIG BANG OG INFLATION
- UNIVERSET BLIVER MØRKERE OG MØRKERE
- KVARK-GLUON PLASMA I DET TIDLIGE UNIVERS
- FYSISK ESKATOLOGI – UNIVERSET OG DET EVIGE LIV
- KVANTEGRAVITATION OG VORES UNIVERS
- IKKE-KOMMUTATIV GEOMETRI
- KVANT-NYHEDER

Løssalgspris: 45 kr

KVANT

Tidsskrift for Fysik og Astronomi

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

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

Udgives af

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

Redaktion

Michael Cramer Andersen (ansv. red.),
Christianshavns Gymnasium
Torsten Freltoft,
Sophion Bioscience A/S
Mogens Esrom Larsen,
Institut for Matematiske Fag, KU
Sven Munk (nyhedsredaktør)
John Rosendal Nielsen (nyhedsredaktør),
Aurehøj Gymnasium
Jens Olaf Pepke Pedersen,
DTU Space
Finn Berg Rasmussen,
Ørsted Lab, Københavns Universitet
Svend Erik Rugb

Korrektur

Natalia Golubeva,
Aarhus Universitet
Torben Westerberg

Foreningsrepræsentanter

Lone Djernis Olsen (KIF)
Torben Lund Skovhus (SNU),
Teknologisk Institut

Abonnementspris : 180 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: 3600 kr, 1/2 side: 2400 kr
1/4 side: 1600 kr.

Priserne er excl. moms og for reproklart materiale i farver. Henvendelser om annoncer til redaktøren, tlf. 22 67 26 42.

Oplag: 2200. Tryk: HCB Tryk ApS,
Brønderslev. ISSN 0905-8893

Produktionsplan

Nr. 1-11 udkommer ca. 15. marts
Nr. 2-11 udkommer ca. 15. maj
Deadline for mindre bidrag og annoncer er ca. en måned før, længere artikler skal modtages to måneder før.

Indhold:

Kvark-gluon plasma i det tidlige univers <i>Jens Jørgen Gårdhøj</i>	3
Big Bang og inflation <i>Michael Cramer Andersen og John Rosendal Nielsen</i>	6
Universet bliver mørkere og mørkere <i>Signe Riemer-Sørensen og Tamara Davis</i>	13
Planetkalender 2011 <i>Martin Götz</i>	18
Stjernehimlen <i>Michael Cramer Andersen</i>	19
KVANT-nyheder <i>John Rosendal Nielsen</i>	20
Kvantegravitation og vores univers <i>Jan Ambjørn</i>	21
Ikke-kommutativ geometri <i>Ryszard Nest</i>	24
Fysisk eskatologi – Universet og det evige liv <i>Helge Kragh</i>	27
Aktuelle bøger <i>Anja Skaar Jakobsen og Michael Cramer Andersen</i>	32
Elektrostatisk vægt – breddeopgave 40 med didaktisk kommentar <i>Jens Højgaard Jensen</i>	34
Foreningsnyt – foredrag i foråret	35
Gigantiske gammabobler i Mælkevejen <i>John Rosendal Nielsen</i>	Bagsiden

Billedet på forsiden viser et udsnit af Morten Scheldes maleri fra 2010, som er en del af udsmykningen i det nyistandsatte Frederik den VIII's palæ på Amalienborg. Maleriet viser hvordan man forestiller sig at sorte huller kan være forbundne via ormehuller. Foto: Torben Eskerod.

I dette temanummer om *Kosmologi og rumtid* inviteres læseren på en rejse igennem hele Universets udvikling – fra Big Bang til Universets fjerne fremtid. Undervejs præsenteres bl.a. nye resultater om kvark-gluon plasma og mørk energi samt to forskellige teorier om hvad rumtiden er på kvantniveau.



KVANT udsendes gratis til alle landets gymnasier, seminarier og HTX-kurser med velvillig økonomisk støtte fra fysikinstitutterne på Danmarks Tekniske Universitet samt Københavns, Syddansk, Aalborg og Aarhus Universiteter.

Kvark-gluon plasma i det tidlige univers

Af Jens Jørgen Gaardhøje, Niels Bohr Institutet og Discovery-centret, Københavns Universitet

Det tidlige univers bestod, indtil omkring en milliontedel sekund efter Big Bang, af en blanding af de partikler vi i dag anser for fundamentale: kvarkerne, og leptonerne og de kraftformidlende partikler, gluoner, fotoner, W- og Z-bosoner og gravitoner (disse sidste er dog endnu ikke påvist eksperimentelt). Omkring dette tidspunkt var Universets tæthed og temperatur faldet så meget, at de letteste kvarker kunne bindes i baryonerne tre ad gangen, og derved danne f.eks. protoner og neutroner. Siden det første mikrosekund har kvarkerne været gemt væk i kernepartiklerne.

Den stærke vekselvirkning

At alle kvarkerne blev indespærret i baryonerne og ikke overlevede Universets ekspansion i fri tilstand, skyldes en særlig egenskab ved den stærke vekselvirkning mellem kvarker.

Vekselvirkningsenergien mellem kvarker vokser nemlig lineært med afstanden imellem dem, hvorfor det bliver umuligt at "rive" en kvark fri. Desuden besidder såvel kvarker som gluoner en særlig egenskab, der kaldes for farve. Der er tre farver, arbitrært kaldt rød, grøn og blå. Alle eksperimenter, der er blevet udført igennem de seneste 50 år, har vist at det ikke er muligt at isolere en partikel med farve, men at de observerbare partikler i naturen alle er farveløse. F.eks. er baryonerne farveløse, fordi de består af tre kvarker med hver sin farve. Det betyder også, at vekselvirkningen mellem baryoner ikke foregår direkte ved udveksling af gluoner, men ved udveksling af farveneutrale partikler, såkaldte mesoner, der består af en kvark og en antikvark, og som hhv. bærer en farve og dennes antifarve.

Omvendt, aftager vekselvirkningen mellem kvarker, når de er tæt på hinanden. Ved meget små afstande ($< 10^{-16}$ m) er vekselvirkningen mellem kvarker så lille, at man kan opfatte dem som frie partikler. Man taler om asymptotisk frihed. Det var for udarbejdelsen af teorien om den stærke vekselvirkning, også kaldet Quantum Chromo Dynamics (QCD), der blandt andet forudsiger og forklarer dette fænomen, at David Gross, David Politzer og Frank Wilzek fik Nobelprisen i fysik i 2004.

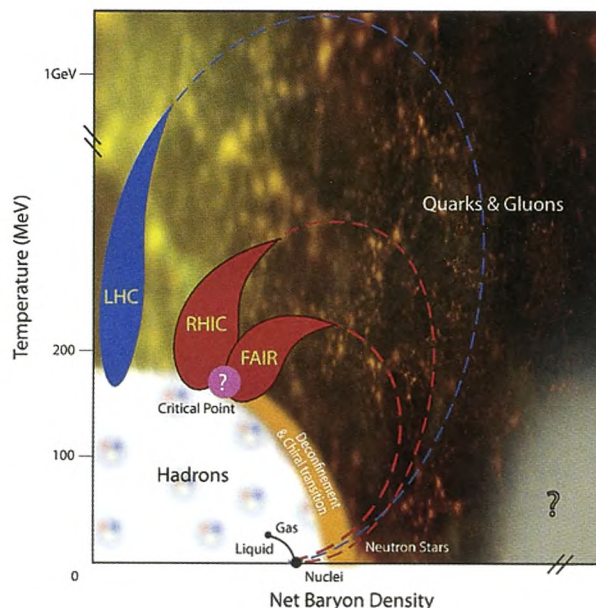
Fasediagrammet for stærkt vekselvirkende stof.

Faserne af stof, der vekselvirker via den elektromagnetiske kraft, er velkendte. F.eks. optræder vand i fast form (is) ved lav temperatur, omdannes til flydende form ved 0 °C og omdannes til damp ved 100 °C (ved et tryk på 1 atmosfære). I vands tilfælde er faseovergangene af 1. orden, dvs. de foregår ved konstant tryk og temperatur og involverer abrupte ændringer af f. eks. rumfanget.

Fasediagrammet for stof, der vekselvirker gennem den stærke kraft er langt mindre veletableret, end det er tilfældet for vand.

I det tidlige og meget kompakte univers, var afstanden mellem de forskellige partikler lav. Kvarker og

gluoner var derfor sikkert asymptotisk frie og eksisterede i en plasmalignende tilstand, der benævnes Quark-Gluon Plasma (QGP). Som følge af ekspansionen af Universet og den deraf faldende temperatur, fandt der en overgang sted fra QGP-fasen til hadrongas-fasen, en tilstand af stoffet, der består af hadroner (en fællesbetegnelse for baryoner og mesoner, dvs. partikler der består af kvarker). Ved meget høje stoftætheder, som dem der formodes at eksistere i det indre af neutronstjerner, forestiller man sig, at stoffet eksisterer som "koldt" QGP.



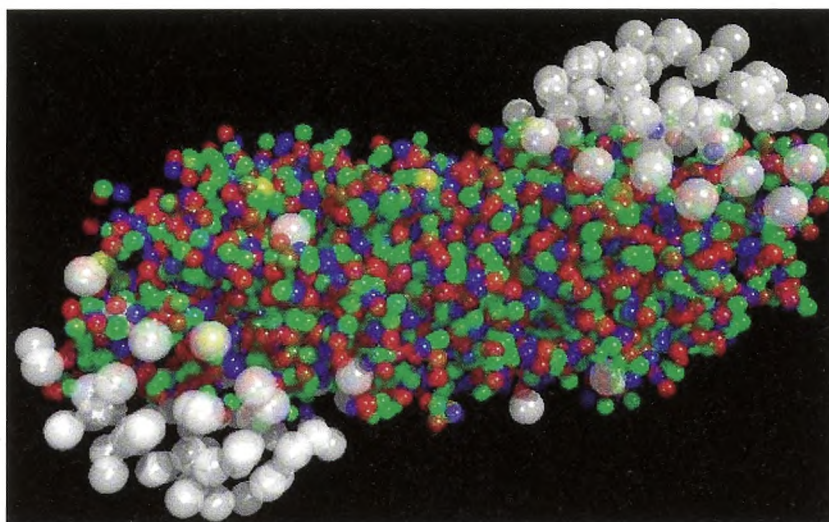
Figur 1. Fasediagram for stof, der vekselvirker gennem den stærke kraft.

Omfattende numeriske beregninger, baseret på QCD-teorien, forudsiger, at overgangen mellem kvark-gluon plasma og hadrongas-tilstandene, finder sted ved en temperatur på omkring 2000 milliarder grader (svarende til ca. 175 MeV, målt i energienheder). For et univers der udvider sig adiabatisk (det vil sige uden indgriben udefra, fra Gud eller andre), kan man udlede en simpel relation mellem temperatur og tid:

$$T[\text{K}] = \frac{1,5 \cdot 10^{10}}{\sqrt{t[\text{sek}]}} \quad (1)$$

Det er denne relation, der tillader os at tidsfæste be-
givenheden så forholdsvis præcist. Teorien forudsiger
at faseovergangen, i visse områder, er af 1. orden og
i andre af 2. orden, adskilt af et kritisk punkt, der
ikke er stadfæstet endnu, samt at endnu flere ekso-
tiske tilstande kan eksistere, som eksempelvis farve-
superledere. Figur 1 viser et muligt fasediagram for
stof, der vekselvirker stærkt.

Igennem de seneste 25 år er der foregået omfattende
bestræbelser på at studere fasediagrammet eksperimen-
telt. Metoden udnytter at man, ved at accelerere tunge
atomkerner (f.eks. guld, ^{197}Au , eller bly, ^{208}Pb) op
til høje energier og bringe dem til at kolliderer, kan
producere et meget stort antal partikel-antipartikelpar i
et område, der ikke er meget større end to atomkerner.
At man kan omdanne (bevægelses-)energi til stof på
denne måde følger af Einsteins berømte ligning, $E = mc^2$.



Figur 2. Computersimulering af en kollision mellem to blyatomkerner ca. 10^{-23} sek. efter første kontakt. De farvede kugler
illustrerer de mange kvark-antikvark par der dannes i en fuldstændig efterligning af tilstanden i det tidlige univers.

Kvark-gluon plasmatomografi

Gennem eksperimenter, ved stadigt voksende kolli-
sionsenergier, er det lykkedes at danne stofområder,
der nu når op på temperaturer over dem som QCD
forudsiger for kvark-gluon plasmaovergangen. Der er
flere "termometre", der kan tages i anvendelse for at
bestemme de ekstreme temperaturer. De spænder fra
målingen af produktionssandsynligheden for at danne
hadroner med forskellig masse, til direkte målinger
af de gammastråler, der udsendes under den første
afkøling.

At man kan identificere og studere kvark-gluon plas-
ma, er blevet vist gennem især to typer eksperimenter
ved RHIC, der har fundet sted i det seneste ti-år.

Jet-undertrykkelse.

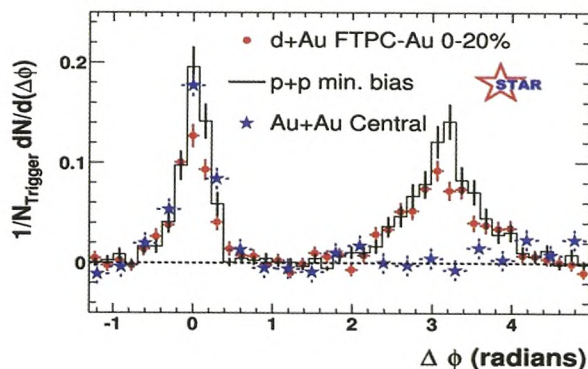
Når to tunge atomkerner støder sammen, kan man
forestille sig, at der sker flere processer samtidigt. Dels
dannes der et stort antal kvarker og antikvarker, når
kernepartikler i de to kerner støder sammen, og dels

I eksperimenter ved Relativistic Heavy Ion Collider
(RHIC), ved Brookhaven National Laboratory, i USA,
kan man producere op til 6000 ladede partikler i hver
centrale kollision mellem guldkerner. Disse partikler
vidner om en uhørt høj energitæthed under kollisioner-
ne – i et uhyre kort tidsrum. Der er gode grunde til at
mene, at der under sammenstødene dannes et kvark-
gluon plasma. Fordi kernerne støder sammen med prak-
tisk talt lysets hastighed, er kollisionsforløbet imidlertid
ovre i løbet af blot ca. 10^{-22} sek. Til sammenligning
bestod Universet af QGP i hele 10^{-6} sekunder, dvs. ca.
 10^{16} gange længere tid. Ikke desto mindre opfører det
lille energirige stofområde, der dannes i overlappet mel-
lem de to kolliderende atomkerner, sig som et lille styk-
ke tidligt univers. Overladt til sig selv vil det ekspandere
og afkøles, og stoffet vil gennemløbe de forskellige
mulige faser, indtil reaktionsprodukterne (hadroner og
andre partikler) kan registreres i avancerede detektorer,
der omslutter kollisionspunktet – et lille Big Bang.

kan enkelte kvarker, fra hver af de kolliderende kerner,
spredes næsten elastisk på hinanden og bevæge sig
igennem den samtidigt dannede tætte sky af andre kvar-
ker og gluoner. Sådanne "hårde stød" mellem kvarker
er velkendte fra de mere elementære kollisioner mellem
protoner og fører til, at der udsendes et antal hadroner i
modsatte retninger, såkaldte "jets". Jets dannes netop
fordi vekselvirkningen mellem de to spredte kvarker
øges med afstanden imellem dem, og fører til, at der
er energi nok til at danne nye kvark-antikvark par, der
samlers sig til hadroner udsendt langs de oprindelige
spredte kvarkers bevægelsesretning.

Når begge processer sker samtidigt, vil de spredte
kvarker vekselvirke med skyen af producerede kvarker,
antikvarker og gluoner, og kan miste energi, inden
de hadroniserer og bliver til jets. Energitalbet skyldes
f.eks. stimuleret udsendelse af gluoner som følge af
vekselvirkningerne i mediet. Konsekvensen af denne
vekselvirkning på kvark-gluon niveau er, at jetenergien
modificeres i kollisioner mellem store atomkerner i

forhold til tilsvarende stød mellem protoner ved samme energi. Dette fænomen er meget klart blevet demonstreret ved RHIC af de 4 eksperimenter (se figur 3) og antyder, at man ved denne type eksperimenter har adgang til en egentlig kvark-gluon-plasma tomografi, som vi kender det fra f.eks. røntgen tomografi.



Figur 3. 'Jet quenching' ved RHIC. Figuren viser antal målte partikler i jets for forskellige reaktioner som funktion af vinklen imellem den, når der trigges på en jet ved 0 grader. Bemærk, at for Au+Au kollisioner absorberes den modsatte jet.

Elliptisk flow.

Overlapområdet mellem to kolliderende atomkerner med cirkulært tværsnit har en mandelformet facon. Ved meget høje energier dannes der i overlappet massevis af nye partikler med høje impulser. Overtrykket resulterer i, at partikler har nemmere ved at undslippe langs 'mandelens' smalle akse end langs den længere akse, hvilket udmønter sig i en forskel i antal målte partikler i forskellige retninger. Forskellene afhænger af, hvordan partiklerne vekselvirker indbyrdes under den resulterende ekspansion. Det har vist sig muligt ved RHIC, for første gang, at reproducere dette strømningmønster ("elliptisk flow") ud fra hydrodynamiske beregninger. Beregningernes succes kræver dog, dels at vekselvirkningerne foregår meget hurtigt, dvs. på kvark-gluon tidskala, 10^{-23} s, dels at der stadig er en betydelig vekselvirkning. Målinger er derfor i overens-

stemmelse med, at der dannes et system med kvark-gluon frihedsgrader, der dog ikke er kendetegnet ved asymptotisk frihed, men snarere væskelignende.

Fremtiden – ALICE-eksperimentet ved LHC

De to beskrevne eksempler på målinger illustrerer, at det nu er muligt at danne og studere kvark-gluon stof under jordiske forhold. Eksperimenterne antyder dog også, at vi først er ved at komme ind i kvark-gluon plasmaområdet og uden tvivl er tæt på faseovergangsområdet til normalt stof. Med voksende kollisionsenergi vil det være muligt at forøge temperaturen betydeligt og derved realisere stoftilstande, der er tættere på den "ideale gas", kendetegnet ved asymptotisk frihed som QCD forudsiger.

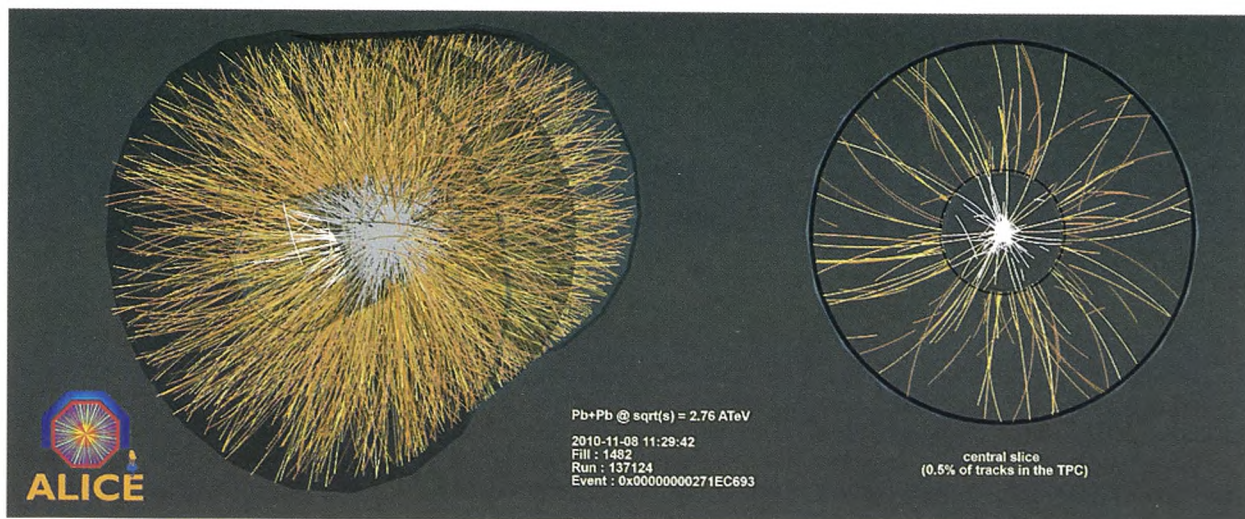
Large Hadron Collider (LHC) ved CERN begyndte, den 8. november, at kolliderer blykerner ved 14 gange højere energi (se figur 4), end det er muligt ved RHIC. Med det slagkraftige ALICE-eksperiment ved LHC er vi godt rustet til systematisk at udforske de fysiske processer, der har kendetegnet det tidlige univers.

Litteratur

- [1] RHIC whitepapers. *Nuclear Physics A* **757** (2005).
- [2] The Large Hadron Collider: <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- [3] ALICE-eksperimentet: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>



Jens Jørgen Gaardhøje er professor ved Niels Bohr Institutet, med-talsmand for BRAMHS-eksperimentet ved RHIC samt projektleder ved ALICE-eksperimentet ved LHC på CERN.



Figur 4. En af de første Pb+Pb kollision målt i ALICE-detektoren ved CERN mandag d. 8. november 2010 kl. 11.29.42.

Big Bang og inflation

Af Michael Cramer Andersen, Christianshavns Gymnasium og John Rosendal Nielsen, Aurehøj Gymnasium

I denne artikel vil vi give en introduktion til nogle af de væsentligste træk ved kosmologiens standardmodel – *Big Bang-teorien*. Teorien beskriver egentlig kun Universets geometri og dynamik, men sammen med kvantefysikken kan stoffets strukturer forklares på mange skalaer. For at få alt til at passe, må man dog medregne en hypotetisk udvidelse i det tidlige univers, kaldet *inflationen*. Big Bang-teorien kan imidlertid ikke forklare selve begyndelsen.

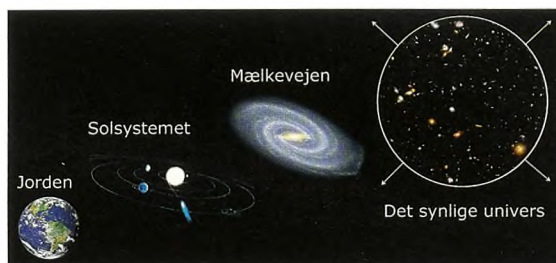
En teori for hele Universet

I fysik defineres *Universet*, som alt hvad der kan iagttages, dvs. alt hvad der findes af stof, energi og kræfter samt rum og tid. Den disciplin som beskriver Universet kaldes *kosmologi*, der betyder “læren om verdensaltet, dets oprindelse, udvikling og struktur”.

På Universets store skalaer er det tyngdekraften der er dominerende. Grundlaget for moderne kosmologi er derfor Einsteins almene relativitetsteori, som er den mest præcise teori for tyngdekraften. For at beskrive mindre strukturer i Universet må man yderligere benytte kvanteteorierne for elementarpartikler, atomkerner og atomer, samt astrofysikken, der beskriver stjerner. Dertil kommer naturligvis astronomiske observationer af objekter udenfor Solsystemet og Mælkevejen. Nogle væsentlige træk ved Universet er samlet i boksen.

Væsentlige træk ved Universet

- **Universets størrelse og centrum.** Universet er begrebsmæssigt blevet større og større og centrum er fjernet fra Jorden (figur 1). Det synlige univers består af ca. 100 mia. galakser som er meget jævnt fordelt.
- **Universets stof og energi.** Det er de samme grundstoffer og elementarpartikler som findes på Jorden og i resten af Universet. Hovedparten består af brint og helium, som også dominerer stjernernes fusionsprocesser. Dertil kommer mørkt stof og mørk energi som dominerer Universets totale energi.
- **Universets stråling.** Der observeres en kosmisk baggrundsstråling af mikrobølger med samme temperatur i alle retninger, som er resterne fra en tidlig varm fase. Det faktum at stjernerne ses på baggrund af en mørk nattehimmel (Olbers paradoks) kan betyde, at Universet er endeligt i tid, rum eller begge dele.
- **Universets naturlove.** De grundlæggende naturkræfter som virker her og nu på Jorden, og som har generel karakter, antages også at virke i resten af Universet, dvs. langt væk og for længe siden.
- **Universets udvidelse.** Galaksernes hastigheder vokser proportionalt med deres afstand (Hubbles lov), som hvis alle galakserne deltager i en kæmpeeksplosion eller følger med en udvidelse af rummet.
- **Universets geometri.** Universet udvikler sig i tre rumlige dimensioner og én tid – tilsammen kaldet rumtiden, der er vævet sammen på en måde, så vi observerer det fortidige univers når vi ser ud i rummet.



Figur 1. Kortlægningen af Universet har afdækket stadigt større strukturer: Jorden → Solsystemet → Mælkevejen → Det synlige univers. Samtidig er centrum af Universet flyttet længere og længere væk fra Jorden indtil i dag hvor man kan sige, at centrum er alle steder og ingen steder.

Er Universet statisk eller dynamisk?

Da Newton anvendte sin teori om den universelle massetiltrækning på Universet var det en fiasko. Et univers fyldt med stjerner vil kollapse med tiden. Omkring 200 år senere sad Einstein med sin nye teori for tyngdekraften og regnede på dens konsekvenser for hele Universet. Han kom til samme konklusion: Et rum fyldt med stof og energi, der tiltrækkes af hinanden, er ikke stabilt og vil derfor kollapse.

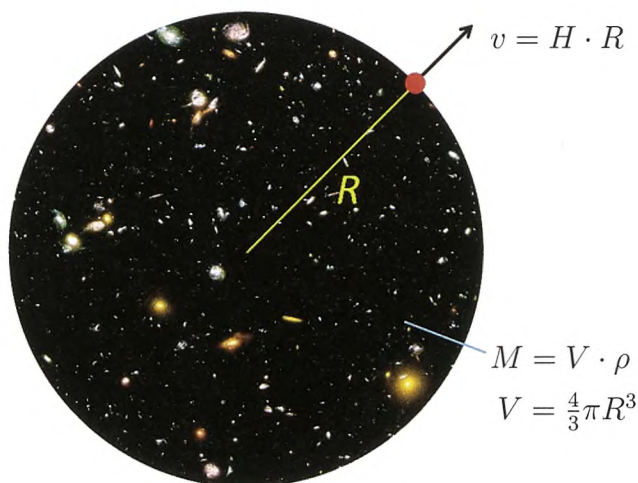
På både Newtons og Einsteins tid forekom Universet at være *statisk*. Stjernernes bevægelser er meget langsomme og kan forklares som interne bevægelser i Mælkevejen. Men med Hubbles bestemmelse (i 1920'erne) af de nærmeste galakseres afstande og bevægelser væk fra os, blev verden med ét slag meget større og *dynamisk* i stedet for statisk. Observationerne viste, at Universet udvidede sig og ved nærmere analyse af Einsteins kosmologiske ligninger viste dette sig også at være det mest naturlige. Hvis Universet udvider sig, må det have været mindre tidligere og måske haft en begyndelse, hvor alt stof og energi var samlet. Inden vi ser på kosmologi i Einsteins almene relativitetsteori, skal vi se nogle resultater som kan opnås allerede med Newtons simple teori.

Newtonsk dynamik af galakser

Med Newtons mekanik kan vi få en intuition om, hvordan en samling galakser opfører sig dynamisk. Denne analyse (se f.eks. [1]) fører til flere resultater som genfindes i en korrekt behandling med almen relativitetsteori.

Lad os betragte et stort men endeligt kugleformet rumfang af galakser med radius R og total masse M (se figur 2). Vi antager at massen er homogent fordelt,

dvs. tætheden ρ er konstant. Massen kan derfor skrives som $M = V \cdot \rho = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$. Vi betragter nu en galakse (den røde plet på figur 2) med massen m i udkanten af området. Galaksen har hastigheden v , som kan findes ud fra R via Hubbles lov: $v = H \cdot R$, hvor Hubble-konstanten H bestemmes gennem observationer.



Figur 2. Galakser i et stort men endeligt kugleformet rumfang med radius R . Den røde plet symboliserer en galakse med hastigheden $v = H \cdot R$. Man kan tænke sig en iagttagelse i centrum af kuglen.

Tyngdekraften på galaksen afhænger kun af den samlede masse indenfor rumfanget og den totale mekaniske energi for galaksen er lig $E_{\text{mek}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$, der med de ovenstående definitioner kan omskrives:

$$\begin{aligned} E_{\text{mek}} &= \frac{1}{2} m \cdot v^2 - \frac{GmM}{R} \\ &= \frac{1}{2} m (H \cdot R)^2 - \frac{Gm}{R} \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho \right) \\ &= m R^2 \left(\frac{H^2}{2} - \frac{4\pi G \rho}{3} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

I grænsetilfældet hvor den mekaniske energi er nul må den store parentes være nul og tætheden have den kritiske værdi (talværdien fås ved at indsætte H og G):

$$\rho_{\text{krit}} = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Indføres tæthedsparameteren $\Omega \equiv \rho/\rho_{\text{krit}}$ kan de tre kvalitativt forskellige tilfælde for dynamikken ordnes:

1. $\Omega < 1$, svarende til $\rho < \rho_{\text{krit}}$ eller $E_{\text{mek}} > 0$: Galaksen har nok energi til at undslippe de andre galakser, så udvidelsen fortsætter (evigt).
2. $\Omega = 1$, svarende til $\rho = \rho_{\text{krit}}$ eller $E_{\text{mek}} = 0$: Galaksen har netop energi til, at dens kinetiske energi kan balancere den potentielle energi, så dens bevægelse langsomt går i stå.
3. $\Omega > 1$, svarende til $\rho > \rho_{\text{krit}}$ eller $E_{\text{mek}} < 0$: Galaksen vil blive bremset op og udvidelsen vendes til et kollaps.

Ved denne simple analyse, foretaget med klassisk Newtonsk mekanik, af en samling af galakser har vi set, at antagelsen om en homogen massefordeling medfører, at en galakses opførsel, i afstanden R , bestemmes af kun to parametre: ρ og H , der er tæt forbundne:

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \quad (3)$$

Denne ligning, som kommer af ligning (1) i grænsetilfældet $E_{\text{mek}} = 0$, beskriver dynamikken af et klassisk "Newtonsk univers". Antages desuden, at samlingen af galakser er stor (sammenlignet med det område man kan observere) samt at stoffordelingen er isotrop, dvs. ens i alle retninger, opnår man yderligere, at der ikke behøver at være noget centrum.

Det kosmologiske princip

Observationer har vist, at Universet på store skalaer opfylder *Det Kosmologiske Princip*, så Universet er:

- **Homogent**, dvs. uden klumper og
- **Isotrop**, dvs. ens i alle retninger.

Disse to antagelser vil altid være en matematisk idealisering, som aldrig er opfyldt 100 % i virkeligheden. På små længdeskalaer er der selvfølgelig betydelig forskel på densiteten af f.eks. en stjerne eller galakse i forhold til dens omgivelser. Laver man statistik på millioner af galakser eller ser på temperaturforskellene i den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling er de relative forskelle imidlertid ret ubetydelige. På kosmiske skalaer (over ca. 300 mio. lysår) er rummet altså både homogent og isotropt.

Rumtidsgeometri – metrikken

I den almene relativitetsteori beskriver man begivenheder i den 4-dimensionale rumtid ved hjælp af én tidskoordinat, (t), og tre rumkoordinater (x, y, z), f.eks. $s_1(t_1, x_1, y_1, z_1)$. Afstanden eller mere korrekt *separationen*, s , mellem to begivenheder er i første tilnærmelse $\Delta s = s_2 - s_1$. Hvis man vil beskrive et større område af rumtiden benytter man en *metrik*, ds^2 , der beskriver afstande mellem to begivenheder i rumtiden, dvs. overalt i rummet og til alle tider. For at beskrive infinitesimale afstande benyttes et lille d i stedet for delta (Δ). De enkelte koordinater adderes kvadratisk jævnfør Pythagoras' sætning, der kan generaliseres til mange dimensioner:

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

To vigtige forskelle er, at den tidslige dimension (dt^2) skal ganges med kvadratet på lyshastigheden (for at enheden passer) og *trækkes fra*. Det sidste skyldes, at for lys er $ds^2 = 0$ og ser vi blot på én stedskoordinat (dx) fører betingelsen $c = \left| \frac{dx}{dt} \right|$ til: $0 = -c^2 dt^2 + dx^2$. Ligning (4) kaldes *Minkowski-metrikken*, og den beskriver et fladt og tomt rum. En metrik der beskriver et fysisk system har typisk koefficienter foran koordinaterne og ved sfærisk symmetri benyttes ofte sfæriske koordinater.

Kosmologi med almen relativitetsteori

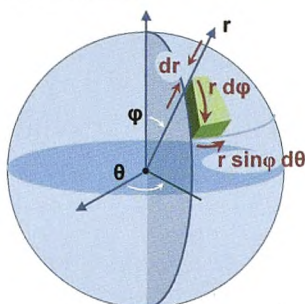
De grundlæggende ligninger i almen relativitetsteori er *Einsteins feltligninger*, der med J.A. Wheelers ord siger, at "krumningen af rumtiden fortæller hvordan stof og energi skal bevæge sig og stof og energi fortæller rumtiden hvordan den skal krumme". Rumtiden defineres af en *metrik* (se boks om "Rumtidsgeometri – metrikken"). Universets fordeling af stof og energi er godt beskrevet af den såkaldte *FRW-metrik* (se boks om "FRW-metrikken"). Når denne kosmologiske metrik, ligning (7), indsættes i Einsteins feltligninger (med kosmologisk konstant Λ), og man kræver energibevarelse fås *Friedmann-ligningerne*¹:

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (5)$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3} \quad (6)$$

FRW-metrikken

I standardkosmologien antages det, at Universet er homogent og isotropt (ensartet i alle retninger). Universets geometri beskrives mest hensigtsmæssigt med sfæriske koordinater (se tegningen nedenfor): r , θ og ϕ , hvor man kan tænke på vinklerne som Jordens længde- og breddegrader.



Figur 3. Kugle med sfæriske koordinater (Wikimedia Commons).

I Friedmann-Robertson-Walker-metrikken, se ligning (7), er geometrien udvidet til en generaliseret kugle med vilkårlig krumning, der kan udvide sig eller trække sig sammen:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right) \quad (7)$$

Krumningen, k , af rummet kan enten være positiv, negativ eller nul, svarende til henholdsvis: sfærisk, hyperbolsk eller flad (euklidisk) geometri. Størrelsen $R(t)$ kaldes *skalafaktoren*. Den er dimensionsløs og beskriver den relative størrelse af rummet sammenlignet med et bestemt tidspunkt (f.eks. i dag) eller sagt på en anden måde: Den typiske afstand mellem to galakser vil ændres med skalafaktoren, f.eks. en fordobling af begge.

Tilsammen udgør Friedmann-ligningerne et sæt af to koblede differentialligninger for skalafaktorens udvikling, $R(t)$, og løsningerne til ligningerne beskriver Universets dynamik (se boksen "Model-universer"). Ved at inkludere tiden i geometrien kan tætheden variere, $\rho(t)$, og Hubble-konstanten forvandles til en *Hubble-parameter*, $H(t)$. Derudover kan rummet have en krumning og det tomme rum (vakuum) tilskrives energi.

Den første Friedmann-ligning (5) beskriver *hastigheden* af skalafaktoren (den 1. tidsafledede) relativt til skalafaktoren. Venstresiden identificeres med kvadratet på Hubble-konstanten, dvs. $H \equiv \dot{R}/R$, som i Hubbles lov: $v = H \cdot R \Rightarrow H = v/R$. Ligningen udtrykker energibevarelse idet venstresiden beskriver den kinetiske energi og første led på højresiden beskriver den gravitationelle potentielle energi – ligesom i det newtonske tilfælde, ligning (3). De sidste to led er knyttet til rummets krumning og energien af vakuum.

Den anden Friedmann-ligning (6) beskriver *accelerationen* af skalafaktoren (den 2. tidsafledede). Heri indsættes den tilstandsligning, $p = w \cdot \rho \cdot c^2$, der giver sammenhængen mellem tryk, p , og tæthed, ρ . Ofte sættes $c = 1$ og tilstandsligningen skrives: $w = p/\rho$.

Model-universer

Vi vil betragte tre modeller af Universets udvikling med forskellige former for dominerende energi, beskrevet ved en tilstandsligning, $p = w \cdot \rho \cdot c^2$, der giver sammenhængen mellem tryk og tæthed:

Stofdomineret ($k=0$, $\Lambda=0$, $w=0$):

$$R(t) = R(t_0) \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{2/3} \quad (8)$$

hvor $t_0 = 13,7 \cdot 10^9$ år er alderen af Universet og $R(t_0) = c \cdot t_0 \cong 10^{26}$ m er radius af det synlige univers.

Strålingsdomineret ($k=0$, $\Lambda=0$, $w=1/3$):

$$R(t) = R(t_e) \cdot \left(\frac{t}{t_e}\right)^{1/2} \quad (9)$$

hvor $t_e = 4 \cdot 10^5$ år er tidspunktet for dekoblingen af stråling og stof (ved $z = 1100$). På dette tidspunkt var Universets radius $R(t_e) = R(t_0)/1100$.

Vakuumdomineret ($k=0$, $\Lambda>0$, $w=-1$):

$$R(t) = R_{init} \cdot e^{H \cdot t} \quad (10)$$

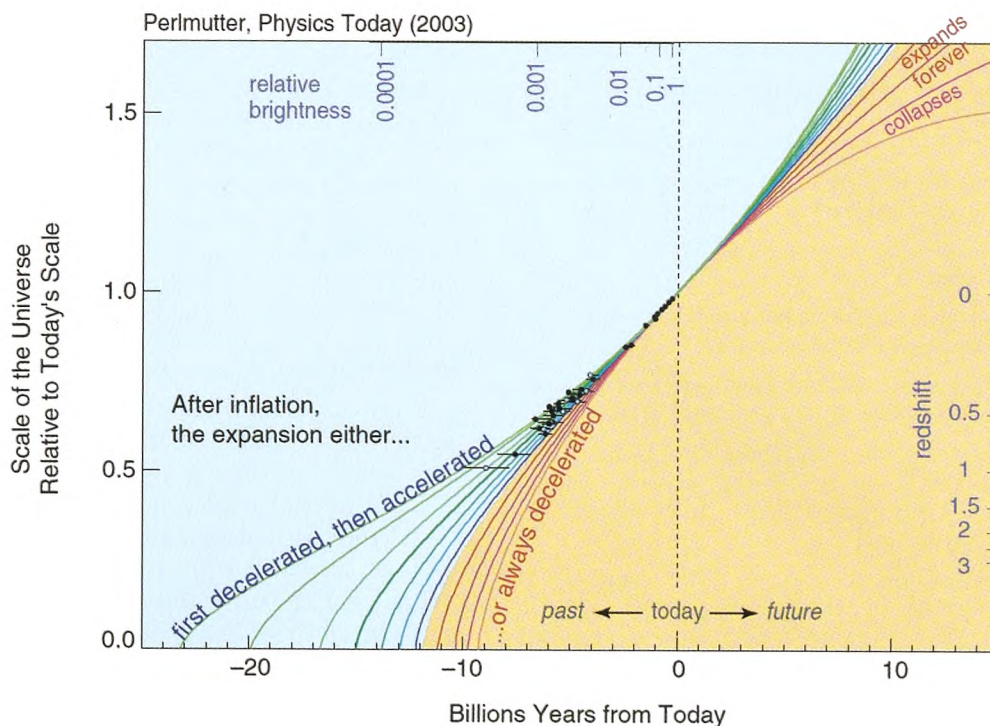
hvor H er Hubble-parameteren og R_{init} er en begyndelsesradius, f.eks. $l_{\text{Planck}} \sim 10^{-35}$ m.

I virkeligheden er Universets energi en blanding af de tre specialtilfælde (hvor f.eks. $\Omega_{\text{CDM}} = \rho_{\text{CDM}}/\rho_{\text{krit}}$):

$$\Omega_{\text{total}} = \Omega_{\text{atomer}} + \Omega_{\text{CDM}} + \Omega_{\Lambda} = 1 \quad (11)$$

hvor $\Omega_{\text{atomer}} = 0,04$; $\Omega_{\text{CDM}} = 0,23$ og $\Omega_{\Lambda} = 0,73$. "CDM" står for koldt mørkt stof. Disse værdier er bl.a. bestemt ved en analyse af målinger med WMAP-satelliten [3], [4], og bekræftes af observationer af fjerne supernovaer (se figur 4) samt statistik af galakser.

¹En prik over et symbol betyder differentieret mht. tiden, $\dot{R} = \frac{dR}{dt}$, og to prikker betyder to gange differentieret mht. tiden, $\ddot{R} = \frac{d^2R}{dt^2}$.



Figur 4. Skalafaktoren som funktion af tiden [5]. De sorte prikker er observationer af supernova type Ia, der benyttes som standardlyskilder. De farvede kurver er forskellige model-universer, hvor både mængden (Ω_{total}) og blandingen af energi er varieret. Den model der beskriver punkterne bedst giver en alder på 13-14 mia. år. Vi er begrænset til at observere galakser tilbage i tiden ud fra vores position i tid og rum. Men ved at bestemme både hældningen og krumningen af kurven kan man bestemme hvilken model der beskriver observationerne bedst og dermed bestemme alderen siden Big Bang og udviklingen fremad.

Vakuumergi og kosmologisk konstant

Fra midten af 1990'erne frem til 2003 (se boksen "Udviklingen af Big Bang-teorien") gjorde den øgede præcision i astronomiske observationer at der opstod konsensus om, at størstedelen af Universets energiindhold er knyttet til det tomme rum og at det har en frastødende virkning som får Universets udvidelse til at accelerere. Måske er denne positive acceleration af samme natur som det der gav startskuddet til Universets udvidelse. Den vakuum-dominerede løsning ser i hvert fald ud til at være nyttig til både at beskrive den nuværende og fremtidige udvikling og de allerførste øjeblikke af Universets udvikling, hvilket vi skal se nærmere på i de kommende afsnit.

Problemer med Big Bang-teorien

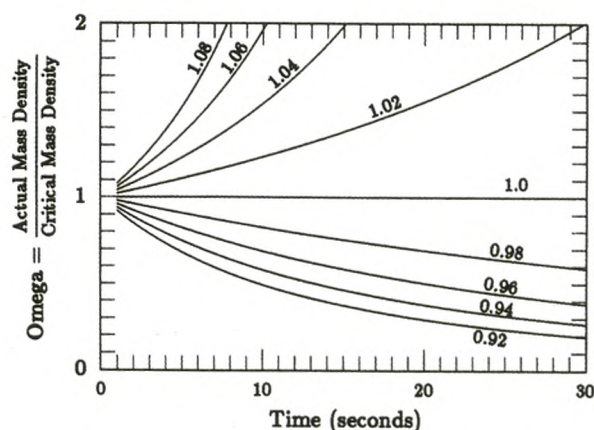
Big-Bang teorien har mange sejre i form af gode bekræftende observationer. Universets temperatur og udvidelse er bare to bekræftelser, der er svære at komme uden om. Men teorien har også sine skavanker, der kommer fra selveste begyndelsen, Big Bang. Universets udvidelse giver os en god grund til at tro at Universet har været mindre og spoler vi filmen af Universet helt tilbage, må det have haft en begyndelse. Vi vil her skitsere tre af problemerne, der har motiveret introduktionen af inflationsteorien (beskrives i et senere afsnit).

Fladhedsproblemet

Massetæthedsparmeteren af Universet – givet ved Ω – afgør, hvordan Universet vil udvikle sig i fremtiden. Denne størrelse $\Omega = \rho/\rho_{\text{krit}}$ er en enhedsløs fysisk størrelse, der er forholdet mellem masse-energi tætheden

og den kritiske tæthed. Den kritiske tæthed ρ_{krit} angiver tætheden, hvor Universet er helt fladt. I et sådant univers er geometrien euklidisk, hvilket illustreres ved f.eks. en trekant, der vil have en vinkelsum på 180° . Det er en geometri, der ikke er forskelligt fra det, som man har lært i skolen. Er Ω forskellig fra 1, vil Universets geometri krumme som en kugle eller som en sadel, hvor vores trekant har en vinkelsum forskellig fra 180° .

Forskellige bestanddele i Universet bidrager til massetætheden, og Universets udvidelse har forskellig indflydelse på udvikling af massetæthedsparmeteren. Alle energitæthederne – med undtagelse af vakuumenergitætheden vil blive ændret med udvidelsen, og Big Bang teorien siger, at værdien af Ω ved 1 sekund efter Big Bang har stor indflydelse på den nuværende værdi af Ω .



Figur 5. Kurverne beskriver udviklingen af Ω ét sekund efter Big Bang og de efterfølgende 30 sekunder. Hver kurve repræsenterer forskellige startværdier af Ω , der er angivet som tallene i diagrammet [6].

Udviklingen af Big Bang-teorien

1915 Einstein fuldender den almene relativitetsteori.

1917 Einstein og W. de Sitter finder modeller med en kosmologisk konstant, der beskriver et statisk univers.

1922 A. Friedmann finder kosmologiske løsninger der peger på, at universet udvider sig.

1929 E. Hubble viser, at galaksernes rødforskydning vokser med afstanden – Universets udvidelse.

1931 G. Lemaitre diskuterer Universets skabelse fra et varmt uratom der henfalder til alle grundstofferne.

1948 G. Gamow m.fl. undersøger grundstofdannelse i et univers der hurtigt udvider sig og afkøles. Forudsiger den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling (CMB).

1948 F. Hoyle m.fl. foreslår "Steady State"-teorien, hvor Universet ser ens ud til alle tider og der løbende dannes nyt stof.

1950 F. Hoyle finder på navnet "Big Bang" om den rivaliserende teori, der begynder i en varm og tæt tilstand.

1965 A. Penzias og R. Wilson opdager CMB – den kolde rest fra Big Bang.

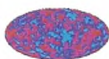
1966 J. Peebles viser, at et varmt Big Bang forudsiger den korrekte hyppighed af helium.

1969 M. Rees studerer detaljerne ved et Big Crunch (modsatte af Big Bang).

1980 A. Starobinsky, A. Guth m.fl. foreslår, at inflation kan løse horisontproblemet og fladhedsproblemet.

1990 NASA's COBE-satellit viser, at CMB er udsendt af et legeme i termisk ligevægt, som forudsagt af Big Bang-teorien.

1994 NASA's COBE-satellit viser, at temperaturvariationerne i CMB er ca. 10^{-5} .



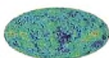
1994-98 Λ CDM-modellen (hvor Λ er den kosmologiske konstant og CDM er koldt mørkt stof) vinder frem, idet den både kan forklare strukturerne i CMB, galaksernes storskalastrukturer og grundstofhyppighederne.

1998 Observationer af fjerne supernovaer tyder på, at Universets udvidelse er accelereret, hvilket kan forklares med en kosmologisk konstant (Λ).

1999 Målinger viser at Universets geometri er flad, og at der må være en kosmologisk konstant (Λ).

2001 Hubble Rumteleskopet bestemmer Hubble-konstanten til 72 ± 8 km/s/Mpc.

2003 NASA's WMAP-satellit bestemmer, efter kortlægning af CMB, Universets alder til 13,7 mia. år og energiindholdet til ca. 4 % atomer, 23 % koldt mørkt stof og 73 % mørk energi, på grundlag af Λ CDM-modellen og inflation [3], [4].



2008 WMAP-satellitens 5-års resultater udelukker nogle inflationsmodeller og styrker andre [3].

2009 ESA's PLANCK-satellit opsendes for at kortlægge CMB i endnu større detalje [7].

2010 WMAP-satellitens 7-års resultater bekræfter en subtil afvigelse fra skalainvarians, der forudsiges af inflationsteorien: De største strukturer er lidt stærkere end de mindre [3].

Vores nuværende univers er utrolig fladt. Observationer indikerer, at det faktisk er så fladt, at Ω ikke kan have afviget fra 1 med mere end 10^{-60} i det tidlige univers for at kunne resultere i vores nuværende flade univers. En massetæthed, der afviger så lidt, er svær at forklare i standardkosmologi (uden fintuning), derfor er det nødvendigt at introducere en fase i det tidlige univers, der udvider Universet meget hurtigt, så det er meget fladt efter 1 sekund.

Problemet med magnetiske monopoler

I det tidlige univers må stof og energi have været presset sammen i et meget lille område, og hele Universet må have været et plasma, hvor eksotiske objekter forudsagt af partikelfysikken blev skabt og ikke uden videre forsvandt igen. Et af disse eksotiske objekter er magnetiske monopoler. Almindelige magneter har en sydpol og en nordpol og er derfor dipoler. En magnetisk monopol har kun enten en nordpol eller en sydpol – ligesom en elektron kun har en negativ elektrisk ladning og en proton kun har en positiv elektrisk ladning. Der er endnu ikke fundet partikler, som kun har en magnetisk nordpol eller sydpol.

Eksistensen af de magnetiske monopoler bliver imidlertid forudsagt af flere partikelfysiske teorier både strengteori og "Grand Unified Theory" (GUT). GUT-teorien forudsiger, at tre af naturkræfterne – elektromagnetismen, den svage og den stærke kernekraft – bliver til én naturkraft ved meget høje energier – dvs. 10^{16} GeV. I det tidlige univers var der en meget høj energi, og det burde derfor være et perfekt miljø til skabelsen af magnetiske monopoler. Så hvorfor findes der ingen magnetiske monopoler i det nuværende univers? En mulig løsning kunne være en mekanisme, der kan få disse partikler til at forsvinde.

Horisontproblemet

Universet er overraskende isotropt. Målinger af mikrobølgebaggrundsstrålingen (CMB) viser at temperaturen i Universet varierer med $\frac{\Delta T}{T} \cong 10^{-5}$. Partikler kan kun kommunikere indenfor en afgrænset horisont, der er bestemt af lysets hastighed. Hvis en partikel udsender en foton, kan fotonen kun nå frem til en anden partikel, hvis den kan nås med lysets hastighed. Problemet er i denne henseende, at egne af Universet, der ikke burde have været i kontakt med hinanden, er så isotrope. En mulig løsning hertil er at Universet som helhed har udvidet sig hurtigere end horisonten af det synlige univers.

Hvad er inflation?

Intet kan opstå af ingenting. Hvis du ingenting har i din hånd, vil der ikke ud af det blå materialisere sig f.eks. en bog i hånden på dig. Det er et udsagn, som de fleste kan forholde sig til. Tanken om stoffets bevarelse er formuleret så tidligt som omkring 500 f.v.t. af den græske filosof Parmenides. Denne bevarelseslov er i det 20. århundrede blevet udvidet med kendskabet til Einsteins relativitetsteori, hvor stof og energi er to sider af samme sag, formuleret smukt i udtrykket $E =$

mc^2 . Energi kan altså omdannes til stof og omvendt, men den samlede mængde af energi og stof vil altid være konstant. Denne fundamentale bevarelseslov (af enkelhedsgrunde kaldes den for energibevarelse) er en af grundstenene i fysikken, og den bekræftes² af en kæmpe mængde eksperimentelle data fra alverdens højenergi-laboratorier. Det efterlader os med et afgørende spørgsmål: Hvordan blev Universet skabt?

Big Bang-standardmodellen beskriver egentligt ikke selve Big Bang (eller hvad der var før). Den beskriver kun hvad der kom *efter* Big Bang. Det gør den til gengæld med stor succes. Standardmodellen kan give gode svar på hvordan Universet vil udvikle sig, men hvis vi ønsker at komme tættere på selve tilblivelsesprocessen må vi introducere inflation eller andre teorier.

Inflation bliver ofte beskrevet som det ultimative "free lunch" (gratis middag eller frokost), idet Universets skalafaktor vokser med mange størrelsesordener på en brøkdel af et sekund. Men man skal huske på, at det der voksede var det tomme rum, eller rettere sagt horisonten af den observerbare del af det tomme rum. Først ved afslutningen af inflationen dannedes alle de partikler og fotoner som findes i Universet. Fysikernes første overvejelser gik på om Universet blev skabt ved en kvantefluktuations, men det blev hurtigt klart, at mekanismen er mere kompliceret [6].

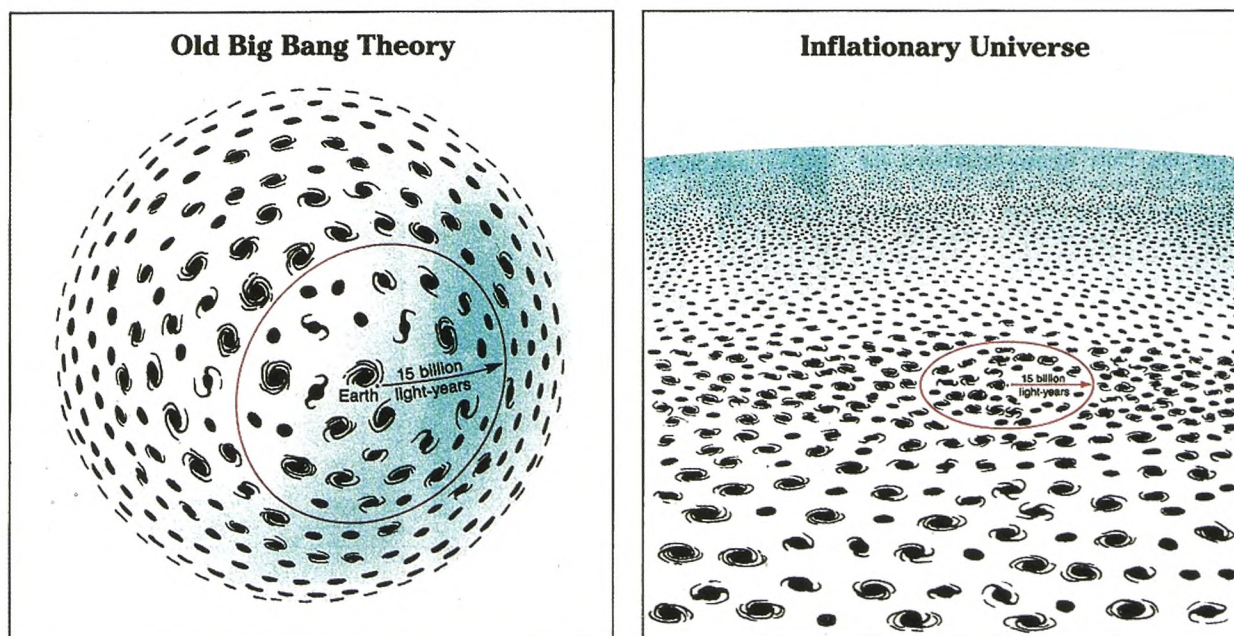
Inflationsmekanismen

Inflationen skal udvide Universet ekstremt hurtigt for at have den ønskede effekt på problemerne med Big Bang-teorien. Universet skal faktisk udvide sig hurtigere end

lysets hastighed. Det er ikke i modstrid med Einsteins almene relativitetsteori, idet det er *rummet* der bevæger sig, og heller ikke den specielle relativitetsteori, da den ikke omfatter deformationer af rumtiden. Den ekstremt hurtige udvidelse sker ved positiv acceleration af skalafaktoren. Ifølge den 2. Friedmann-ligning (6) er skalaparameterens acceleration normalt negativ, men hvis man introducerer Einsteins berømte – eller berygtede – kosmologiske konstant, kan accelerationen af skalafaktoren godt blive positiv.

Værdien af den kosmologiske konstant er dog formentligt ikke nok til at sørge for en positiv acceleration, derfor er man desuden nødt til at introducere en tilstand med negativt tryk (ikke at forveksle med et undertryk). Vakuüm tillægges normalt et tryk på nul, men ved inflationen må man forestille sig, at der var et falsk vakuum med et tryk, der er mindre end nul. Ved indsættelse af tilstandsligningen $p = -\rho \cdot c^2$ i ligning (6) bliver accelerationen positiv. Under inflationen vil vakuum skifte tilstand så trykket bliver nul. Det sker ved at introducere et skalarfelt – kendt som inflatonen – og et tilhørende potential.

Konsekvenserne af inflationsmekanismen er en ekstrem hurtig udvidelse, der praktisk talt overhaler horisonten og flader det tidlige univers ud. Set fra synspunktet af et kuglerundt Univers, vil kuglen være meget større og derfor vil det synlige univers (horisonten) afgrænse en langt mindre andel af hele Universet (se figur 6). Under inflationen bliver Universet fortyndet tilstrækkeligt til, at eventuelle eksotiske objekter, såsom magnetiske monopoler, forsvinder og Universet bliver isotropt.



Figur 6. Ifølge inflationsteorien er det synlige univers (den røde cirkel) kun en meget lille del af Universet [10].

²Regner man på hele Universet, er energien dog ikke nødvendigvis bevaret, se f.eks. [8].

Status for Inflation

For at fysikerne vil anse en teori for ekspansionen af det tidlige univers for at være en succes, skal den udvide rumfanget³ af det tidlige Univers med en faktor 10^{78} . Der er foreslået mange inflationsmodeller siden Alan Guths første model med en simpel udformning af skalarpotentialet. Nogle modeller har flere skalarfelter, mens andre intet skalarfelt har og de varierer i udformningen af potentialet. Ét potential kan beskrives med et simpelt 4. gradspolynomium, mens andre kræver mere komplicerede matematiske ligninger. De mange modeller har gjort det muligt at vælge og vrage, hvilket både er en styrke og svaghed ved teorien. Det er en svaghed, at der ikke findes en entydig model, men det faktum at så mange modeller opfylder kravene har gjort inflationsmodellerne yderst sejlivede.

Løsningen af de ovenfor nævnte problemer er langt fra den eneste motivation for at indføre inflation i det tidlige univers. Inflationen kan nemlig testes på dens betydning for strukturdannelse. Før der blev dannet store strukturer af galakser må der have været nogle mindre variationer i tæthedsfordelingen. Disse "perturbationer" kan inflationen forklare som nogle oprindelige kvantefluktuationer, der er blevet forstærket under den kraftige udvidelse. Inflationen medfører, at perturbationerne bliver ens på alle størrelsesskalaer (de er skalainvariante).

Inflationsteorien er konsistent med målinger af CMB med WMAP-satellitten, herunder polarisationen af fotonerne. De fleste astronomer anser i dag inflationsteorien som en nødvendig del af de kosmologiske modeller. Inflationen forudsiger desuden tyngdebølger, som måske vil blive observeret med PLANCK-satellitten [7]. Det vil være overraskende, hvis inflationen ikke skulle være en del af vores forståelse af Universet, men inflationsmekanismen er samtidig en ad hoc model, der løser nogle problemer i Big Bang-standardmodellen, men den introducerer blot nye problemer. For at få et mere klart billede af det meget tidlige univers, må en mere fundamental teori for kvantegravitation anvendes og den vil sandsynligvis rumme en mekanisme der minder om inflationen, f.eks. det ekpyrotiske scenarie i streng-kosmologi.

Holder antagelserne for Big Bang?

Antagelsen om, at Universet er homogent og isotropt er på én gang Big Bang-teoriens styrke og svaghed. Med antagelserne kan man forklare mange observationer og egenskaber ved det synlige univers og nogle af de problemer der opstår i den oprindelige Big Bang-teori kan løses ved at inkludere inflation. Der er mange misforståelser omkring Big Bang-teorien, som kan forklares [9]. Men der opstår også seriøse problemer, når modellen ekstrapoleres længere tilbage mod Universets begyndelse. Der holder antagelserne om homogenitet

og isotropi næppe og hvis de fastholdes lærer vi intet om en eventuel mere kompleks struktur af rumtiden. J.A. Wheeler betegnede – helt tilbage i 1955 – rumtiden under forhold som ved Big Bang, som et "rumtids-skum". Her fluktuerer både rum og tid kaotisk og rummet er præget af sorte huller forbundet af ormehuller – hvilket er alt andet end homogent og isotropt! Men det er en helt anden historie.

Litteratur

- [1] D.W. Sciama, *Modern Cosmology*, Cambridge Science Classics 1971.
- [2] Barbara Ryden, *Introduction to Cosmology*, Addison Wesley 2003.
- [3] Bibliography of WMAP Science Team Publications, <http://lambda.gsfc.nasa.gov>
- [4] Michael Cramer Andersen, Universets alder, sammensætning og skæbne bestemt!, *Kvant* nr. 1, marts 2003.
- [5] Supernova Cosmology Project, <http://supernova.lbl.gov>.
- [6] Alan H. Guth, *The Inflationary Universe*, Vintage 1998.
- [7] Hans Ulrik Nørgaard-Nielsen (2009), ESA's mikrobølgesatellit PLANCK, *Kvant* nr. 2, maj 2009.
- [8] Tamara Davis (2010), Is The Universe Leaking Energy?, *Scientific American*, juli 2010.
- [9] Charles H. Lineweaver og Tamara Davis (2005), Misconceptions About the Big Bang, *Scientific American*, marts 2005.
- [10] Eugene F. Mallove (1988), *The Self-Reproducing Universe*, Sky & Telescope, sept. 1988, p. 253-256.



Michael Cramer Andersen underviser i fysik og astronomi ved Christianshavns Gymnasium og er redaktør af KVANT. Han interesserer sig bl.a. for kosmologi og videnskabshistorie.



John Rosendal Nielsen er gymnasielærer ved Aurehøj Gymnasium og nyhedsredaktør på Kvant. Han interesserer sig bl.a. for fundamental fysik, kosmologi og videnskabshistorie.

³Under inflationen voksede skalafaktoren, efter ligning (10), ca. med en faktor $e^{60} \cong 10^{26}$, og rumfanget derfor en faktor 10^{78} .

Universet bliver mørkere og mørkere

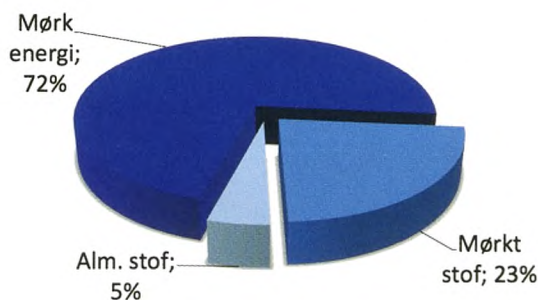
Af Signe Riemer-Sørensen, School of Physics and Mathematics, University of Queensland og Tamara Davis, School of Physics and Mathematics, University of Queensland samt Dark Cosmology Centre, Københavns Universitet

Mørk energi er en af den moderne fysiks største mysterier. Ved at accelerere Universets udvidelse, bestemmer det Universets skæbne. Alligevel har vi ingen idé om dets natur eller identitet.

Universets indhold

Alt hvad vi kender fra vores dagligdag er opbygget af almindeligt eller såkaldt baryonisk stof. Vi har en temmelig god forståelse for, hvordan baryonisk stof opfører sig. Det gælder fra de allermindste skalaer, hvor kvantemekanik gør sig gældende, til store afstande såsom planetbaner. Vi kan manipulere det almindelige stof og konstruere komplicerede systemer f.eks. computere, mobiltelefoner og andre elektroniske gadgets, der dominerer vores hverdag. Alt i alt går mange rundt med den opfattelse, at vi forstår verden omkring os ret godt... Det er bare ikke tilfældet!

Når vi kigger på det samlede indhold i hele Universet (se figur 1), udgør det baryoniske stof kun ganske få procent. Det er planeterne, stjernerne, gasskyerne, rumskibene mv., nemlig alt det vi kan observere direkte, fordi det udsender eller reflekterer elektromagnetisk stråling (lys). Resten er mørkt stof og mørk energi, hvilket er navne der dækker over det faktum, at vi ikke har den fjerneste ide om, hvad der ligger bag. Man skal passe på ikke at sammenblande de to udtryk, da det eneste de har tilfælles er "mørk" i navnet. Mørkt stof bidrager med ekstra tyngdekraft, som muliggør dannelsen og eksistensen af stjerner og galakser. Mørk energi har den stik modsatte effekt, nemlig en slags anti-tyngdekraft, som får Universet til at udvide sig hurtigere og hurtigere.



Figur 1. Universets samlede indhold. Kun ganske få procent er almindeligt baryonisk stof, som vi kender det fra Jorden, planeter, stjerner mv. Resten er mørkt stof og mørk energi.

Universets skæbne

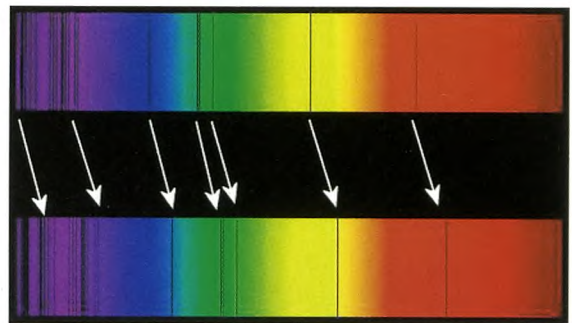
Hvorfor er det vigtigt at bruge millioner af kroner på at måle egenskaberne af mørk energi? Fordi Universets skæbne er tæt knyttet til disse egenskaber! For at

forstå hvordan, starter vi med en lille introduktion til nogle af kosmologiens grundudtryk: Rødforskydning og Friedmann-ligningen.

Hvis man kigger på spektret af lys fra f.eks. galakser, er de observerede bølglængder længere end tilsvarende spektra produceret i laboratorier på Jorden (se figur 2). Effekten kaldes rødforskydning og kan skrives som:

$$z = \frac{\lambda_{\text{observeret}} - \lambda_{\text{udsendt}}}{\lambda_{\text{udsendt}}}, \quad (1)$$

hvor z er rødforskydningen og λ er bølglængden.



Figur 2. Rødforskydning af et observeret spektrum (nederst) relativt til samme spektrum i et laboratorium (øverst), (Harold T. Stokes og Ian Tresman).

Den amerikanske astronom Edwin Hubble tillægges ofte æren for at have målt rødforskydningen af fjerne galakser i 1930-erne, hvilket ledte til konklusionen, at Universet udvider sig og dermed hele Big Bang teorien. Historisk set var det faktisk amerikaneren Vesto Slipher, der målte rødforskydningerne, men Hubble og hans kollega Milton Humason formulerede det, der siden hen blev kendt som Hubbles lov, nemlig at en galakses hastighed væk fra os, v , er proportional med dens afstand, d . Det kan skrives som:

$$d = \frac{v}{H_0} \cong \frac{zc}{H_0}, \quad (2)$$

hvor H_0 er udvidelseshastigheden i dag (normalt målt i km/s/Mpc). Det sidste lighedstegn fremkommer ved at udtrykke galaksens hastighed i brøkdeler af lysets hastighed $c = 3 \times 10^8$ m/s og gælder kun for $z \ll 1$. Rødforskydningen er defineret så $z = 0$ i dag og positiv ud i Universet dvs. bagud i tid. Til at beskrive udvidelsen af en given længde som funktion af Universets alder introducerer man skala-faktoren, a , som $1/a = 1 + z$.

I takt med at Universet udvider sig, fortyndes energitætheden af indholdet. Almindeligt stof fortyndes

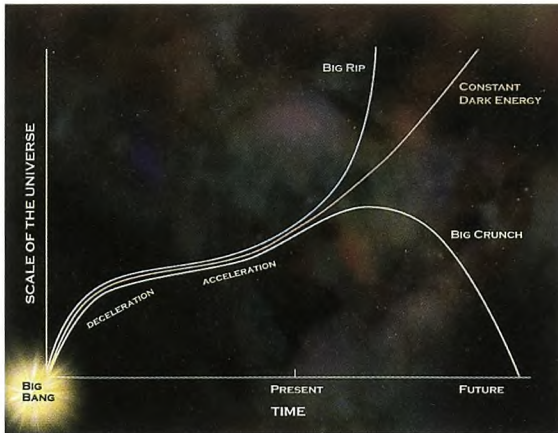
proportionalt med volumen, så udviklingen af energitætheden er givet ved $\Omega^{stof}(t) = \Omega_0^{stof}/a^3$, hvor Ω_0^{stof} er energitætheden i dag. Det forholder sig anderledes med fotoner, som fortyndes med $1/a^4$ og den mørke energi fortyndes slet ikke, da den er knyttet til det tomme rum! Universets udvidelse kan beskrives med Friedmann-ligningen der kan udtrykkes som:

$$\frac{\left(\frac{\text{Udvidelses-}}{\text{hastighed}}\right)^2}{\left(\frac{\text{Udvidelses-}}{\text{hastighed i dag}}\right)^2} = \left(\frac{\text{Summen af}}{\text{energitætheden}}\right), \quad (3)$$

hvor energitæthederne, der skal summeres over, er stråling (dvs. lys), stof (både baryonisk og mørkt stof), mørk energi og rumtidens krumning. På matematisk form ser Friedmann-ligningen således ud:

$$\frac{H^2}{H_0^2} = \frac{\Omega_0^{\text{stråling}}}{a^4} + \frac{\Omega_0^{\text{stof}}}{a^3} + \Omega_0^{\text{mørk energi}} + \frac{(\Omega_0^{\text{total}} - 1)}{a^2}, \quad (4)$$

hvor Ω_0 'erne er energitæthederne, målt i dag, for henholdsvis stråling, stof, mørk energi og rumtidens krumning givet i enheder af den kritiske tæthed, der er nødvendig for et Univers med flad rumtidsgeometri (dvs. $\Omega_0^{\text{total}} = 1$, så det sidste led bliver nul). Det ses af Friedmann-ligningen, at Universets skæbne er tæt forbundet til dets indhold (de tre første led) og til rumtidsgeometrien (det sidste led). Afhængig af den mørke energis egenskaber vil Universet enten udvide sig for evigt eller begynde at trække sig sammen (se figur 3).

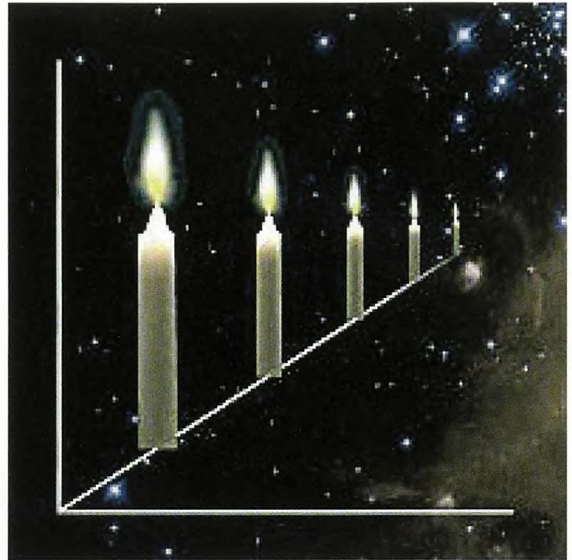


Figur 3. Universets skæbne er tæt forbundet med dets indhold og rumtidsgeometri. Hvorvidt det vil udvide sig for evigt eller trække sig sammen igen afhænger bl.a. af den mørke energis egenskaber (Chandra/NASA).

Supernovaer afslører accelererende udvidelse

Mørk energi (i den nuværende form) blev introduceret i Friedmann-ligningen i slutningen af 1990'erne efter den overraskende opdagelse, at Universets udvidelse accelererer. I 1998 publicerede to uafhængige forskergrupper observationer af supernovaer af den såkaldte

type 1a. Denne type supernovaer er standardlyskilder, idet de skyldes stjerner der eksploderer med samme lysstyrke hver gang, hvormed deres observerede lysstyrke afhænger af deres afstand til Jorden (se figur 4). Samtidig er supernovaerne meget kraftige, så de kan observeres i fjerne galakser (se figur 5).



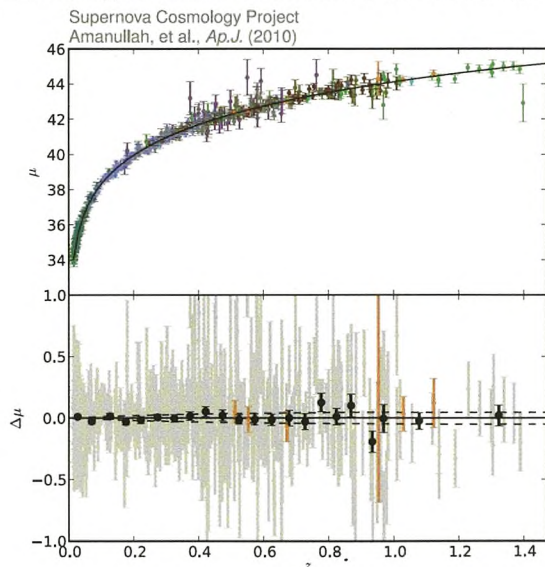
Figur 4. Standardlyskilder. Jo længere væk lyset er, jo svagere ser det ud, selv om hvert lys lyser lige meget (www.universeadventure.org).



Figur 5. Billede fra Hubble Rumteleskopet af en supernova i udkanten af galaksen NGC 4526. Supernovaer er så kraftige, at de kan observeres i fjerne galakser og type 1a er en standardlyskilde (NASA/ESA).

Man kan også udlede afstanden til supernovaerne fra rødforskydningen i ligning (2). De to afstandsmål kan sammenlignes i et såkaldt Hubble-diagram (se figur 6), hvor man plotter den målte lysstyrke som funktion af rødforskydningen. Begge er proportionale med afstand, så man forventer en ret linie, hvis Universet udvider sig med konstant hastighed. I det nære Univers ($z < 0,1$) er sammenhængen tilnærmelsesvis retlinet,

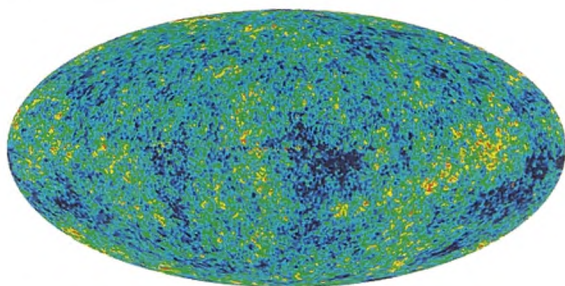
og vi genfinder Hubbles lov (ligning (2)). Længere væk afhænger sammenhængen af, hvordan udvidelseshastigheden ændres. Hvis man sammenligner med teoretiske forudsigelser for den forventede lysstyrke som funktion af rødforskydning, kan man bestemme, hvor meget Universets udvidelse skal accelerere for at forklare afvigelsen fra den lineære sammenhæng.



Figur 6. Øverst: Et Hubble-diagram hvor lysstyrken (op er svagere) plottes som funktion af rødforskydningen. Den optrukne linie viser den teoretiske forudsigelse, hvis Universets udvidelse accelererer. Nederst: Forskellen mellem de målte lysstyrker og den teoretiske forudsigelse (Supernova Cosmology Project, supernova.lbl.gov).

Mørk energi og andre observationer

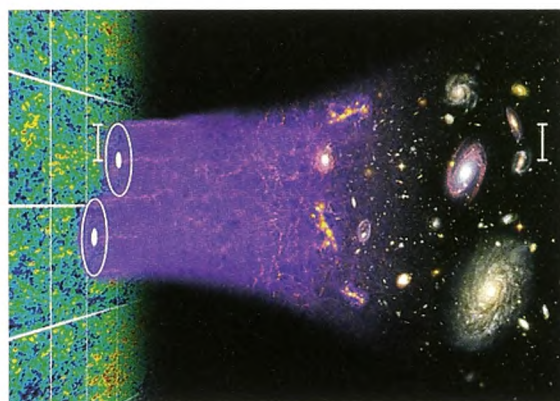
Mørk energi blev hurtigt en populær forklaring på den tilsyneladende acceleration, fordi det samtidig kan forklare et par andre uløste gåder. Målinger af den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling viser, at Universet har en flad rumtidsgeometri. For at opnå denne flade geometri skal Universet have en kritisk energitæthed. Energitætheden af stof (både almindeligt og mørkt stof) kan også måles fra den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling. Resultatet er, at stof kun kan udgøre ca. 30% af den kritiske energitæthed. Det indikerer, at de sidste 70% må udgøres af en ny og ukendt form for energi med andre egenskaber end stof.



Figur 7. Kortlægning af temperaturfluktuationer i den kosmiske mikrobølgebaggrund målt med Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. Temperaturfluktuationerne giver information om rumtidsgeometrien og energitætheden af stof i Universet (WMAP/NASA).

Baryoniske akustiske oscillationer

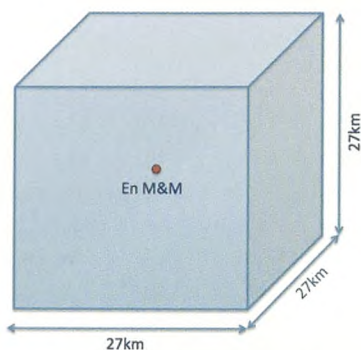
En af de nyeste metoder til at undersøge mørk energi er observationer af de såkaldte baryoniske akustiske oscillationer. De er en slags standardmålestok, som har samme længde ved alle afstande, og derfor vil se mindre og mindre ud, jo længere væk de observeres (ligesom type Ia supernovaer er standardlyskilder). De baryoniske akustiske oscillationer er rester fra udbredelsen af lydbølger i det meget tidlige Univers. Som følge af Universets udvidelse faldt tætheden, og eftersom lydbølger ikke kan udbredes i vakuum, fastfros lydbølgerne i gassen, hvorved der opstod bølger i massetætheden. Med tiden kollapsede de tætte områder fra bølgetoppene og dannede galakser. Derfor er der et underliggende mønster i galaksefordelingen i dag, som afspejler lydbølgerne i det tidlige Univers. Tredimensionelle galaksekort (se figur 11) giver os mulighed for at studere galaksefordelingen og dermed udlede Universets udvidelseshistorie samt egenskaberne af den mørke energi.



Figur 8. De baryoniske akustiske oscillationer er rester af lydbølger, der fastfros da tætheden af Universet faldt så meget, at de ikke længere kunne udbredes. De udgør en standardmålestok, som har samme længde ved alle afstande (WiggleZ Dark Energy Survey [4]).

Mørk energis egenskaber

Fra observationer af supernovaer, den kosmiske mikrobølgebaggrundsstråling og de baryoniske akustiske oscillationer kan vi udlede nogle generelle egenskaber for den mørke energi. Først og fremmest skal den, som navnet antyder, være mørk. Det betyder, at den mørke energi ikke må vekselvirke med fotoner eller nogle af de andre almindelige partikler andet end via tyngdekraft. Samtidig fortæller den kosmiske mikrobølgebaggrund os, at mørk energi ikke kan være stof. Faktisk skal den have en effekt stik modsat tyngdekraft, som ofte udtrykkes som et negativt tryk, for at forklare den accelererende udvidelse. Den målte energitæthed af mørk energi er ca. 10^{-12} kJ/m³. Det svarer nogenlunde til kalorieindholdet i en enkelt M&M (ca. 20 kJ) jævnt fordelt i en terning med sidelængder på 27 km. Så lav en energitæthed er svær at måle i laboratorier og den eneste grund til, at mørk energi er så vigtig, er den enorme udstrækning af Universet.



Figur 9. Energitætheden af mørk energi svarer til kaloriemængden i en M&M jævnt fordelt i en terning med sidelængder på 27 km.

I Einsteins generelle relativitetsteori bidrager trykket fra en komponent til dens gravitationelle tiltrækning gennem den såkaldte energi-stress tensor, som er givet ved komponentens masse, energi, tryk og viskositet. For den nuværende beskrivelse af rumtidsgeometrien (Friedmann-Robertson-Walker metrikken), udløser tilstedeværelsen af et konstant negativt tryk en accelererende udvidelse, hvis Universet allerede udvider sig, og en deceleration af hastigheden, hvis Universet allerede trækker sig sammen. Sammenhængen mellem tætheden, ρ , og trykket, p , af en komponent er givet ved tilstandsligningen:

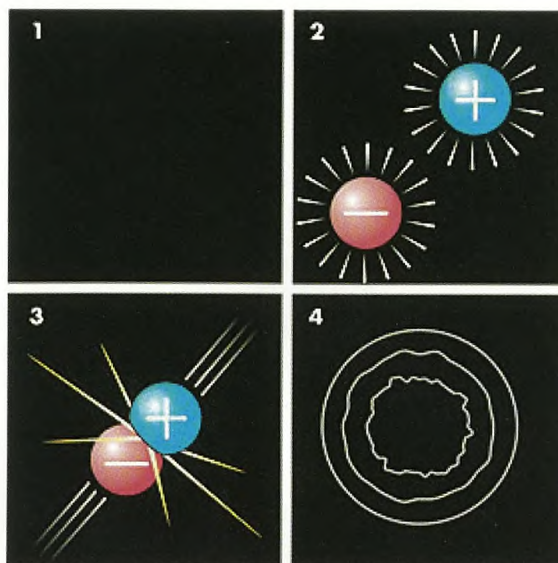
$$p = w\rho, \quad (5)$$

hvor w er en konstant, der varierer fra komponent til komponent. For at opnå en accelererende udvidelse skal den mørke energi have $w < -1/3$. Observationer af den kosmiske mikrobølgebaggrund peger mod en konstant værdi på $w = -1$ for mørk energi med en usikkerhed på mindre end 10 %.

Mørk energis natur

Hvad er den mørke energi? Der er flere teoretiske ideer til at forklare identiteten af den mørke energi. De fleste af dem falder inden for to kategorier: En kosmologisk konstant som er konstant over tid og sted, eller en dynamisk størrelse, som kan variere.

Et eksempel fra den første kategori af kosmologiske konstanter er vakuumenergi. Fra kvantemekanikken ved vi, at vakuum ikke bare er et kedeligt ingenting. Det består af små energifluktuationer som skyldes usikkerhedsprincippet: $\Delta E \cdot \Delta t \geq h = \text{konstant}$. Det betyder at partikel-antipartikel par kan låne en lille smule energi, ΔE , fra vakuum til at eksistere et kort tidsrum, Δt , hvis bare de annihilerer tilstrækkeligt hurtigt (se figur 10). Det virker oplagt at sådanne fluktuationer kan forklare den mørke energi. Hvis man regner efter, viser det sig dog, at energitætheden af den mørke energi er 10^{120} gange mindre end den tæthed kvantemekanikken forudsiger for vakuum-fluktuationer. Det kan formentlig beskrives som den største uoverensstemmelse i fysikkens historie, og hvis mørk energi og vakuumenergi er det samme, så er der stadig noget, vi ikke har forstået.



Figur 10. Illustration af vakuum-fluktuationer: 1. Vakuum. 2. Et partikel-antipartikel par opstår fra vakuum. Alle kvantetal, på nær energi, er bevarede. 3. Partiklerne annihilerer og leverer deres energi tilbage til vakuum. Hvis det sker tilstrækkeligt hurtigt, sikrer usikkerhedsprincippet at energien er bevaret. 4. Annihilationen efterlader bølger i rumtiden (Illustration Tim Jones).

Et eksempel fra den anden kategori af tids- og stedvarierende mørk energi er et endnu uidentificeret skalarfelt. Et skalarfelt er en størrelse som er defineret i hvert punkt i rummet ved en enkelt værdi. Temperatur og tyngdepotentialer er eksempler på sådanne størrelser. De har en værdi i alle punkter, men f.eks. ikke nogen retning. Hvis mørk energi er relateret til et skalarfelt, kan det variere i tid og sted, hvilket komplicerer sagen noget. Hvis skalarfeltet ikke varierer eller kun varierer ganske langsomt, vil dets egenskaber ligne en kosmologisk konstant, og det er svært at skelne mellem de to teorier. Umiddelbart er der ingen observationer, der tyder på variation og det almindeligt accepterede kosmologiske paradigme, kaldt Lambda Cold Dark Matter (eller bare Λ CDM), er baseret på en kosmologisk konstant.

Andre forklaringer

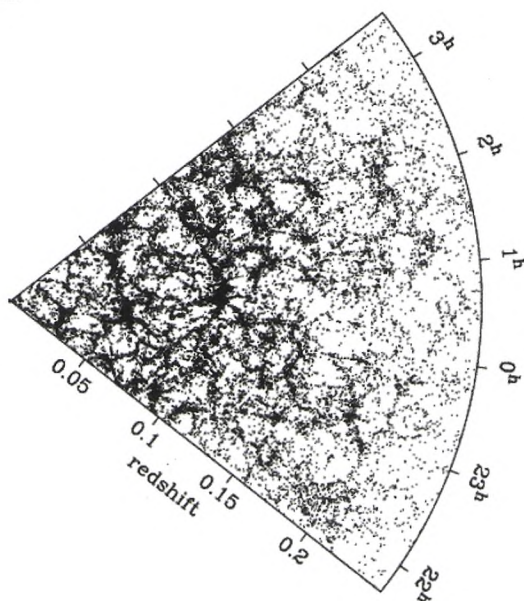
Det kan også tænkes at beskrivelsen af mørk energi ikke kræver nogen ny opdagelse, men at den observerede effekt skyldes, at vi gør forkerte antagelser om Universet. En af basis-antagelserne bag Friedmann-ligningen (ligning (4)) er, at Universet er homogent og isotropt. Med andre ord betyder det, at Universet ser ens ud over det hele. Fra tredimensionelle galaksekort (se figur 11), kan vi se, at Universet har samme struktur som en hullet ost med store tomrum i galaksefordelingen. Præcis hvor meget denne uhomogenitet betyder for præcisionen af Friedmann-ligningen, er endnu uvist.

Hvis vi tilfældigvis befinder os midt i et af tomrummene, kan det faktisk have samme effekt på vores observationer som en accelererende udvidelse. Det er meget svært at skelne mellem de to scenarier, men for at kunne efterligne en accelererende udvidelse, skal vi befinde os meget nær centrum af et kugleformet

tomrum, hvilket mange astrofysikere mener kræver en unaturlig tilpasning af teorien.

En lignende teori er, at selv om den overordnede rumtidsgeometri er flad, så kan rumtiden have lokale krumninger, der kan efterligne en accelererende udvidelse, hvis de har den rigtige størrelse og fordeling.

En anden mulighed er, at vores forståelse af tyngdekraft er forkert. Friedmann-ligningen (ligning (4)) er udledt ved hjælp af Einsteins generelle relativitetsteori. Selv om den generelle relativitetsteori er eksperimentelt bevist på flere størrelsesskalaer, er det ikke sikkert, at den er gyldig på meget store skalaer (ligesom Newtons mekanik ikke gælder på meget små skalaer, hvor vi er henvist til kvantemekanik). Hvis dette er tilfældet, bliver vi nødt til at ændre hele baggrunden for kosmologien.



Figur 11. En skive af et tredimensionalt kort over galaksernes position i Universet (hver prik er en galakse). Det er tydeligt at Universet er mere klumpet end homogent (2dF Galaxy Redshift Survey).



Figur 12. Hubble Deep Field med masser af galakser vi stadig kan se. Med tiden bliver der længere og længere mellem dem, efterhånden som Universet udvider sig (Hubble Rumteleskopet, NASA/ESA).

Universet bliver mørkere og mørkere

For en galakse betyder Universets udvidelse ikke ret meget. Inden for galaksen er det tyngdekraften, der dominerer og holder sammen på stjernerne. Det samme gælder også vores Solsystem. Det er afstanden mellem galakserne, der øges, efterhånden som Universet udvider sig. Da lys udbreder sig med en endelig hastighed, vil lyset fra færre og færre galakser have haft tid til at tilbagelægge afstanden til os. Vi vil derfor med tiden se færre og færre objekter på nattehimmelen, og jo hurtigere Universet udvider sig, jo voldsommere bliver effekten. På samme tid bliver den mørke energi mere og mere dominerende på grund af de forskellige komponenters egenskaber i Friedmann-ligningen, så både direkte og indirekte bliver Universet mørkere og mørkere, jo mere det udvider sig.

Ny og spændende fysik

Den nødvendige tilstedeværelse af mørk energi, i det nuværende state-of-the-art kosmologiske paradigme, dækker i virkeligheden over et stort hul i vores viden om Universet. Uanset om observationerne skyldes vakuum energi, et kugleformet tomrum, misforstået tyngdekraft på store skalaer eller noget helt andet, så forklarer teorien om mørk energi for mange observationer til at blive ignoreret. Selv om den endnu ikke giver os nogen fysisk forklaring på den accelererende udvidelse, så er mørk energi en effektiv teori, der tillader os at beregne og forudsige Universets egenskaber og skæbne.

Litteratur

- [1] <http://arxiv.org/abs/1009.1411v1>
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy
- [3] <http://www.science.org.au/nova/115/115key.html>
- [4] <http://wiggles.swin.edu.au/site/science.html>
- [5] Barbara Ryden, "Introduction to Cosmology", ISBN-0-8053-8912-1



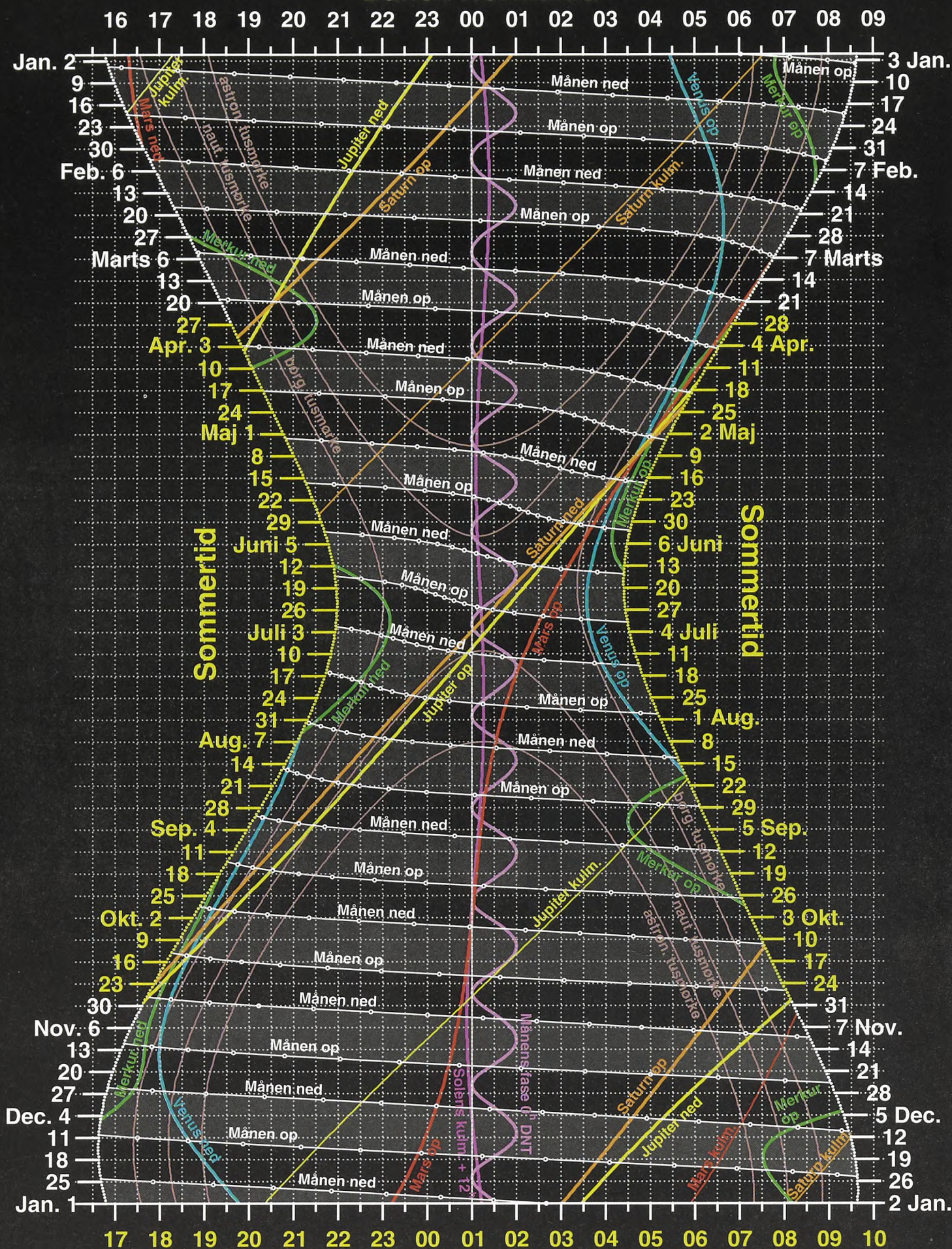
Signe Riemer-Sørensen er tilknyttet University of Queensland, hvor hun arbejder med bestemmelse af de kosmologiske parametre fra kortlægning af galakser.



Tamara Davis arbejder for University of Queensland og Dark Cosmology Centre ved Københavns Universitet med måling af kosmologiske parametre og modeller fra type Ia supernovaer og baryoniske akustiske oscillationer.

Planetkalender for København 2011

Dansk Normaltid





Stjernehimlen
den 15/1 kl. 0.00

Månens faser



På *morgenhimlen* ses Merkur, Venus og Saturn.
På *aftenhimlen* ses Mars og Jupiter.

Solsystemet ca. 15. januar

Kun planeter synlige med det blotte øje er vist nedenfor.
Udenom planetbanerne ses Dyrekredsens 12 stjernebilleder.
Den røde streg markerer Ekliptika - Solsystemets baneplan.

Astronomiske begivenheder

- 13/12 Stjerneskedssværmen *Geminiderne* kulminerer
- 21/12 Total måneformørkelse fra kl. 7.32. Totalitet kl. 8.40
- 22/12 Vintersolhverv
- 4/1 Partiel solformørkelse. Maksimum kl. 9.30
- 4/1 Stjerneskedssværmen *Geminiderne* kulminerer
- 21/3 Forårsjævndøgn

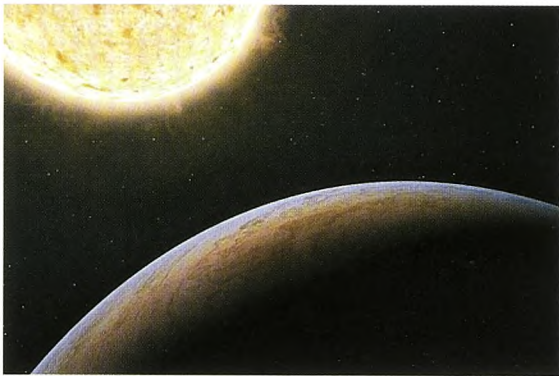


Af John Rosendal Nielsen, KVANT

Opdagelsen af en indvandrerplanet

ASTROFYSIK. Opdagelsen af en exoplanet er ikke længere en nyhed i sig selv. Der er fundet næsten 500 planeter, der kredser omkring en anden stjerne end vores sol. Når exoplanet HIP 13044b får ekstra opmærksomhed, er det fordi den ikke oprindeligt har været en del af vores galakse. Stjernen HIP 13044 er en del af den såkaldte Helmi-strøm af stjerner, der oprindeligt tilhørte en dværggalakse. Denne dværggalakse blev opslugt af Mælkevejen for omkring 6-9 milliarder år siden.

Stjernen HIP 13044 ligger omkring 2.000 lysår fra Jorden i stjernebilledet Formax (Ovnen) på den sydlige stjernehimel. Stjernen er i den sidste fase af sit liv. Efter at have opbrugt brint-brændstoffet i sit kerneområde har stjernen pustet sig op til en rød kæmpestjerne og har nu trukket sig sammen igen, hvorved der startes en heliumforbrænding inde i kernen.



Planeten HIP 13044b minder en del om Solsystemets største planet, idet den er mindst 1,25 gange tungere end Jupiter. Men exoplaneten kredser meget tæt om sin stjerne – med en afstand på 0,055 AE og et omløb på 16,2 dage. Den har formentligt ikke altid kredset så tæt på stjernen, men blev trukket ind mod stjernen, mens den var en rød kæmpestjerne. Indtil videre har planeten undgået at blive opslugt af stjernen, men næste gang HIP 13044 svulmer op til en rød kæmpestjerne, vil planeten ikke undgå sin skæbne.

Astronomerne opdagede exoplaneten ved at måle de små rokkebevægelser af stjernen, som skyldes exoplanetens tyngdekraft. Observationer af disse rokkebevægelser blev udført med ESO's La Silla-observatorium i Chile. Med HIP 13044b kan vi få løftet lidt af sløret om exoplaneter i andre galakser og om planeter i omløb af stjerner i deres afsluttende stadium af livet.

Kilder: www.tycho.dk/article/articleview/6159; www.eso.org/public/denmark/news/eso1045.

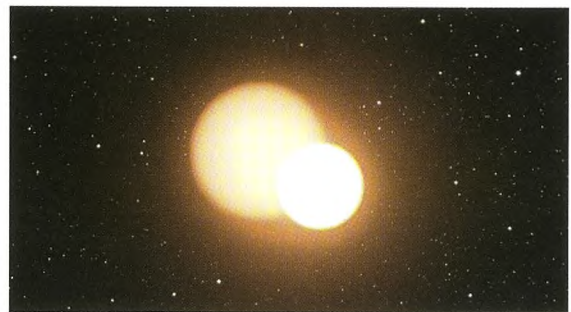
Vægten af en pulserende stjerne

ASTROFYSIK. Cepheidestjerner er pulserende stjerner, der rent fysisk puster sig op og falder sammen med en regelmæssig periode. De har derfor en stor betydning for afstandsbestemmelse i Universet, idet der er en sammenhæng mellem deres pulsationsperiode og deres egentlige lysstyrke.

Denne sammenhæng – kendt som *periode-lysstyrke relationen* – siger at jo langsommere de pulserer, desto klarere er de. Ved at måle pulsationsperioden for cepheidestjernen kan dens egentlige lysstyrke beregnes. Ved simpel fotometri

kan man ved at sammenligne med lysstyrken set fra Jorden beregne afstanden til cepheiden. Cepheider er forholdsvis lysstærke og kan derfor observeres i de nærmeste galakser.

På trods af Cepheidernes store betydning for astronomien, er de ikke ordentligt forstået. Det er derfor af stor betydning, at man har kunnet bestemme en cepheidestjernes masse. Det lykkedes ved at benytte flere teleskoper – deriblandt ESO's La Silla-teleskop i Chile – og massen af pulserende stjerne blev bestemt med høj præcision. Ved målingen af Cepheidens masse har astronomerne kunnet afgøre en gammel strid mellem to teorier, der havde konkurrerende forudsigelser. De nye resultater viser at forudsigelsen fra teorien om stjerners pulsation er lige i øjet, mens forudsigelsen fra teorien om stjerners udvikling ikke passer med de nye observationer.



Måling af Cepheidens masse blev muligt, da den er en del af dobbeltstjernesystem, hvor de to stjerner – set fra Jorden – passerer ind foran hinanden. Dobbeltstjernesystemet blev fundet i den Store Magellanske Sky, hvor cepheiden pulserer med en periode på 3,8 døgn. Den anden stjerne er lidt større og køligere, og de to stjerner kredser om hinanden på 310 dage. Ved observationer af passagen er det altså blevet muligt at beregne de to stjerners bane, størrelse og masse. De nye målinger betyder at astronomer kan bestemme afstanden til den Store Magellanske Sky med en nøjagtighed på 1 %, hvilket er en væsentlig forbedring af den kosmiske afstandsskala.

Kilder: www.tycho.dk/article/view/6170; www.eso.org/public/denmark/news/eso1046/.

Få tre årgange af KVANT for 200 kr. (inkl. forsendelse i Danmark)

Denne pakke indeholder årgang 2007-2009, bortset fra enkelte udsolgte numre. Der er 7 temanumre om bl.a.: "Videnskab og kunst", "Astronomiår 2009", "Large Hadron Collider" og "Kvinder i forskningsfronten". Pakken kan bestilles ved at sende en e-mail til kvant@kvant.dk, med navn og adresse. Betaling sker via kontooverførsel (med netbank).



Kvantegravitation og vores univers

Af Jan Ambjørn, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og Utrecht Universitet

Hvorfor er vi interesserede i at forene Einsteins almene relativitetsteori, teorien for makrokosmos, og kvantemekanik, teorien for mikrokosmos? En sådan teori vil måske kunne forklare Big Bang.

Tre naturkonstanter spiller fundamentale roller i vores forståelse af naturen: gravitationskonstanten G , som optræder i Newtons tyngdelov, lysets hastighed c , som optræder i Einsteins specielle relativitetsteori, og Plancks konstant h , som først blev introduceret af Planck i beskrivelsen af termisk stråling. I kvantemekanikken bruges i dag oftest den reducerede konstant $\hbar = h/2\pi$.

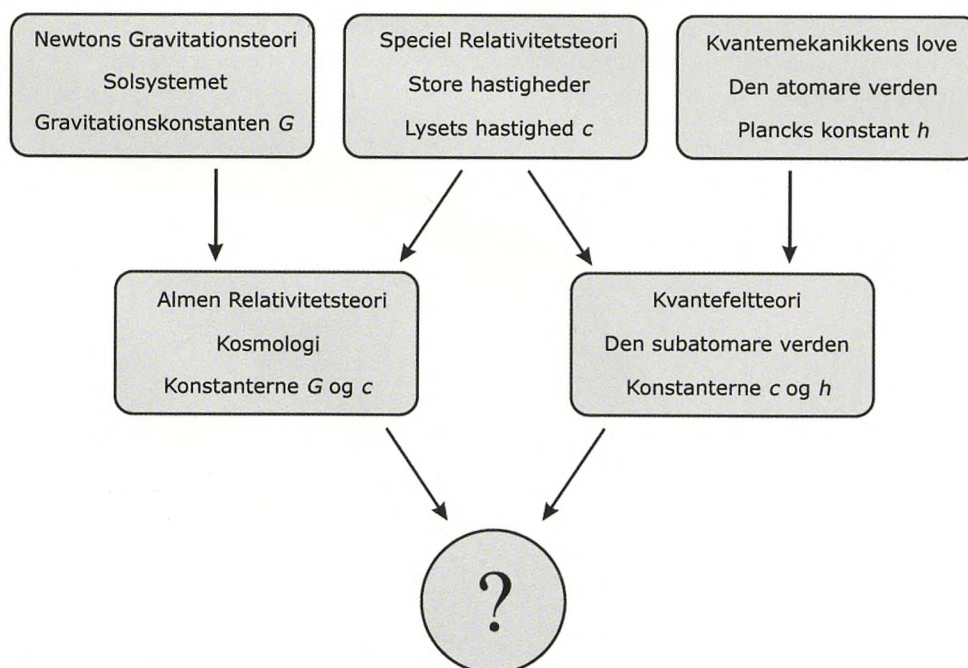
Konstanterne er associeret med fysiske love der beskriver forskellige områder af vores verden. Newtons tyngdelov beskriver vores solsystem, dvs G er relateret til store afstandes fysik. Den specielle relativitetsteori beskriver fysikken ved store hastigheder, som er tæt på den maksimale hastighed c . Endelig optræder Plancks konstant $\hbar$ på en central måde i kvantemekanikken, dvs den beskrivelse af naturen, der hersker i mikrokosmos.

Einsteins almene relativitetsteori forener fysikken associeret med G and c . Teorien beskriver, hvordan energi kan deformere rum og tid. Teorien giver tilsyneladende en god beskrivelse ikke bare af Solsystemet, men af hele Universet på stor skala. Den specielle relativitetsteori og kvantemekanikken, dvs. teorierne med c og $\hbar$, er idag forenet i, hvad der kaldes kvantefeltteori. Der er mange teorier, der går under navnet kvantefeltteori, men den såkaldte "standardmodel" er udvalgt gennem eksperimenter og beskriver med forbløffende

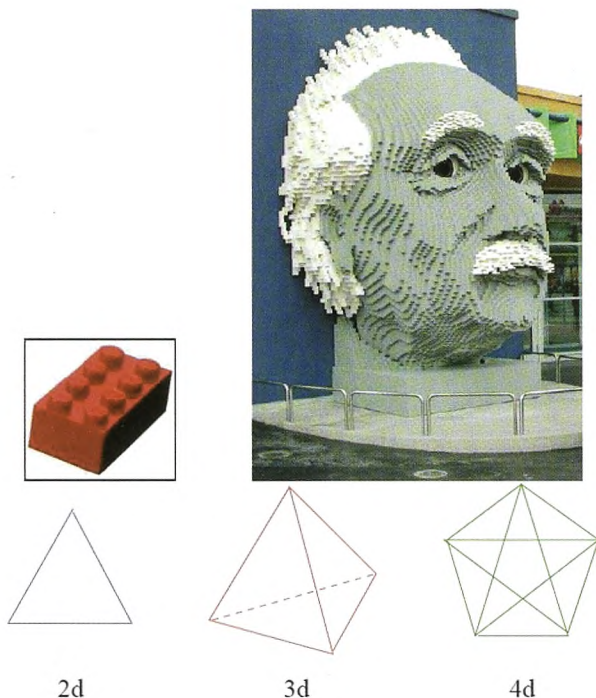
præcision den atomare og subatomare verden ned til de mindste afstande, man kan teste (10^{-18} meter).

Det er naturligt at prøve at foretage det "endelige" skridt og forene den almene relativitetsteori og kvantefeltteorien, som illustreret på figur 1. Vi kalder denne hypotetiske teori for "kvantegravitationsteorien". I en sådan teori vil man forvente, at G , c og $\hbar$ optræder på lige fod. En vis kombination af disse konstanter har dimension af længde, og man kan argumentere for, at denne længde er den "naturlige" længdeenhed i den forenede teori. Længden kaldes for Planck-længden, og den er utrolig lille: $1,6 \cdot 10^{-35}$ meter. Da vi som nævnt kun kan teste ned til 10^{-18} meter i laboratorieeksperimenter, og da vi forventer, at kvantegravitationsfænomener kun vil være rigtigt vigtige, når vi kommer ned til Planck-længden, er det usandsynligt, at vi vil kunne teste en sådan teori i laboratoriet i den nærmeste fremtid.

Der eksisterer en række kvantegravitationsteorier, der kommer med forskellige bud på, hvordan de fysiske love kan se ud, når vi betragter afstande så små som Planck-længden. Den såkaldte strengteori er måske den bedst kendte. Typisk er det dog meget svært i disse teorier at ekstrapolere til makroskopiske længdeskalaer, og vi ved derfor ikke, om de virkelig beskriver den verden, vi kender.



Figur 1. Sådan ledes vi til en kvantegravitationsteori.



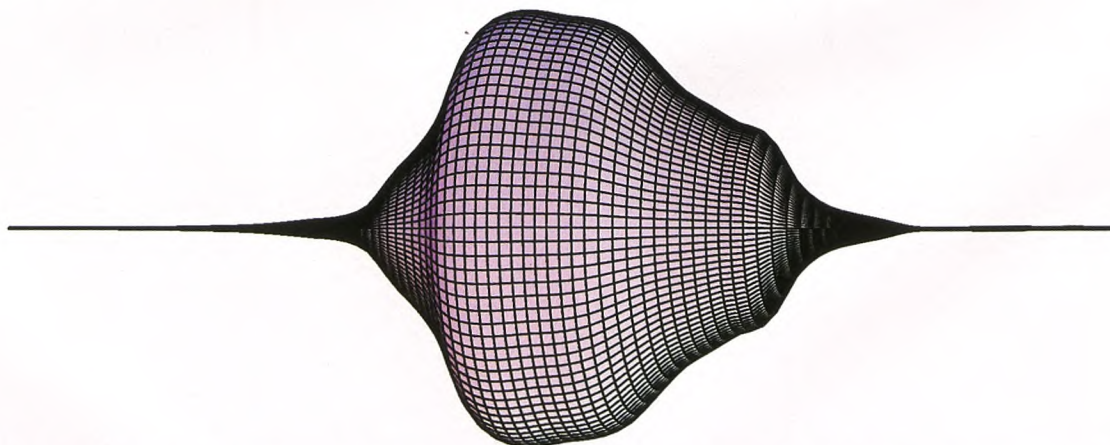
Figur 2. Byggesten brugt til Einsteinskulptur (legoklodser) og byggesten brugt til hhv. todimensionale geometrier (trekanter), tredimensionale geometrier (tetrahedra, der har fire trekanter, som udgør den todimensionale overflade) og firedimensionale geometrier (fire-simplekser, dvs. fem tetrahedra, som udgør den tredimensionale "overflade").

For nogle af disse teorier kan de moderne computere hjælpe os: Vi propper simpelthen de regler der beskriver "hele verden" ind i computeren og ser for den givne teori, om det, der kommer ud, ligner vores egen verden. For den teori, der kaldes CDT (en lidt teknisk betegnelse, der står for "causal dynamical triangulations"), er dette tilsyneladende tilfældet. Denne kvantegravitationsteori er forbløffende simpel. Vores verden, beskrevet ved rumtiden, er i CDT konstrueret ud fra byggeklodser, som med tre rumlige retninger og en "tidsretning" er såkaldte fire-simplekser, dvs. den firedimensionale analogi til en trekant (se figur 2).

Hver rumtid, som man kan konstruere ved at lime sådanne byggeklodser sammen, optræder med en vægt, der er bestemt ud fra generelle principper, der er kendt fra kvantefeltteori. I kvantegravitationsteorien summerer man nu over alle mulige rumtider med de givne vægte. Det er her computeren kommer os til hjælp: Vi beder den om at lime byggeklodserne sammen på alle mulige måder og derefter foretage summen. Et typisk univers vil bestå af mellem 40.000 og 360.000 fire-simplekser. Det er vigtigt at understrege, at vi ikke betragter vores byggeklodser, fire-simplekserne, som en fundamental, diskret enhed af rumtiden. De er blot bekvemme byggesten, som vi bruger til at opbygge en rumtid. I sidste ende ønsker vi, at deres størrelse skal gå mod nul. Som en illustration lad os forestille os, at vi ønsker at bruge legoklodser til at modellere f.eks. Einstein med (se figur 2). Vi opnår da en bedre og bedre approksimation til den "rigtige" Einstein ved at bruge mindre og mindre legoklodser.

I en kvantegravitationsteori fluktuerer rumtiden. Det, vi kalder vores (semiklassiske) rumtid, er en vægtet middelværdi over alle mulige rumtider, dvs. alle mulige firedimensionale geometrier. Kvantefluktuationerne kan vi observere, når vi kigger på en given geometri i computeren og sammenligner med "middelvegeometrien". Jo mindre vores univers er, jo større fluktuationer. Det er derfor, kvantefluktuationer kun dominerer i mikrokosmos.

Figur 3 viser en todimensional projektion af et sådant univers genereret af computeren. Havde vi taget et andet univers genereret af computeren, ville det ligne det viste, men ikke være identisk med det. Når vi så foretager en vægtet superposition af alle disse universer, får vi vores "middelunivers", og det var en stor overraskelse for os, at dette middelunivers var en løsning til Einsteins klassiske ligninger (op til den nøjagtighed, som computeren giver os). Fluktuationerne omkring dette middelunivers er ganske store. Det er ikke i overensstemmelse med det, som vi observerer i den virkelige verden. Vores verden kan forekomme os flimrende og uklar af mange grunde, men ingen af dem er relateret til kvantefluktuationer!



Figur 3. Et "typisk univers" genereret af computeren. Det består af 91.000 fire-simplekser, hvor tiden (vandret) består af 40 tidsenheder. Til en given tid t er omkredsen af figuren proportional med det rumlige volumen $V_3(t)$ af det tredimensionale rum, som approksimativt er en kugleflade.

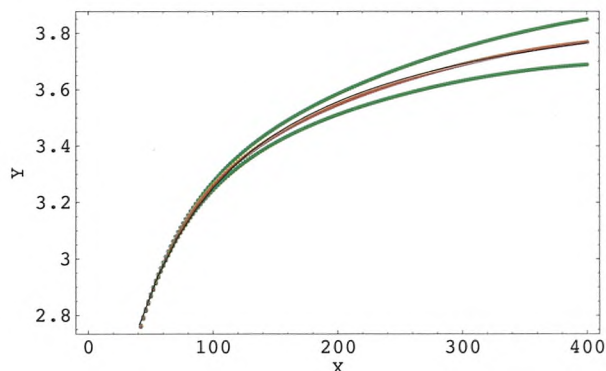
Her er det vigtigt at forstå, at computersimulationerne har deres begrænsninger. De største universer, vi kan have i computeren, består af ca. 300.000 fire-simplekser. Kald længden af kanterne i et simpleks for a . Hvor stort er et sådant univers? Prøv at arrangere fire-simplekserne i et regulært firedimensionalt gitter. Man ender da op med en kasse, hvis sidelængde er $10 \cdot a$. Vores univers er derfor ganske lille, og det er grunden til, at det kan have så store kvantefluktuationer. Faktisk er det meget overraskende, at vi kan se så god en semiklassisk opførsel for vores lille middelunivers.

Betragt det "typiske univers", der er vist på figur 3. Hvis vi følger tiden fra venstre mod højre, så starter Universet med ingen rumlig udstrækning at have. Derefter udvider det sig og trækker sig så sammen igen til et punkt. Til en given tid er det tredimensionale rum approksimativt en tredimensional kugleflade, og hele rumtiden er derfor tilnærmelsesvis en firedimensional kugleflade (ud fra hvilken der stikker to tynde "tråde" ud uden rumlig udstrækning). Efter at vi midler over mange geometrier, får vi en perfekt firedimensional kugleflade. En sådan geometri er netop løsningen til Einsteins klassiske ligninger med en kosmologisk konstant, der bestemmer radius af kuglefladen. Løsningen svarer dog ikke til vores almindelige rumtid, men en rumtid, hvor tiden behandles på lige fod med de rumlige retninger. Man siger, at rumtiden har Euklidisk signatur og den har ikke nogen foretrukken retning.

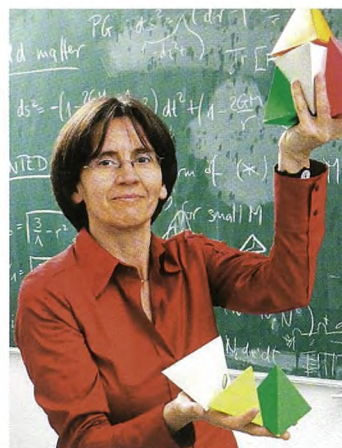
Computersimulationerne er af tekniske grunde udført med Euklidisk signatur, og det er derfor, vi har fundet en løsning med Euklidisk signatur, men når man "roterer" den Euklidiske tid tilbage til almindelig tid, vil den firedimensionale kugleflade blive til den "rigtige" rumtidsgeometri, der kaldes de Sitter-rumtid. Denne repræsenterer et univers, hvis rumlige del udvider sig eksponentielt hurtigt med tiden, hvor eksponenten er bestemt af den kosmologiske konstant. Vores univers opfører sig noget anderledes i øjeblikket, fordi det indeholder stof og stråling (som vi ikke har medtaget i vores computermodel). Men den mest revolutionerende observation i kosmologien i de sidste 12 år er netop, at vores univers nærmer sig en tilstand af konstant acceleration, som måske er bestemt af en kosmologisk konstant. I vores computersimulationer har vi observeret den Euklidiske version af dette uden andet input end den simpleste kvantegravitationsteori, man kan tænke sig. Andre kvantegravitationsteorier har indtil nu haft svært ved at opnå dette resultat på en naturlig måde.

Er det muligt at "observere" (via vores computersimulationer) klare kvantefænomener på korte afstande? Svaret er ja. Vi har studeret diffusionsprocesser på vores fluktuerende rumtid. Den måde, diffusionen spredt sig på, fortæller os om dimensionen af den underliggende rumtid (se figur 4). Matematisk set definerer diffusionsprocessen, hvad der kaldes den "spektrale dimension". For ethvert "pænt" rum er den spektrale dimension den samme som den "normale" dimension, man ville tildele et sådant rum, men man kan også definere diffusion på mere fraktale strukturer og for disse opnå ikke-heltallige dimensioner. Når vi måler den spektrale

dimension ud fra vores fluktuerende kvanterumtider, ser vi, at den ændrer sig fra fire (en tidsretning og tre rumretninger) for store afstande til to for små afstande! Efter at vi først observerede dette fænomen, er det blevet reproduceret af en del af de andre kvantegravitationsteorier, så måske er det en egenskab ved enhver rimelig kvantegravitationsteori? I øjeblikket arbejder vi på at forstå, om denne observation kan forklare Big Bang som et naturligt resultat af kvantefluktuationer.



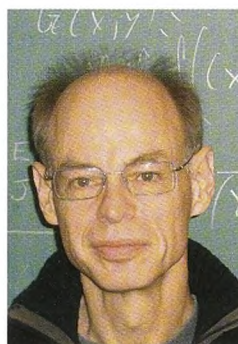
Figur 4. Den spektrale dimension (Y) som en funktion af diffusionstiden (X), hvor de grønne linier er error bars.



Figur 5. En fysiker der bygger Universet op vha. simple byggestene (tetrahedra). Billedet er af Renate Loll, Utrecht, som er en af de fysikere, der opfandt CDT-modellen.

Litteratur

- [1] Jan Ambjørn, Jerzy Jurkiewicz og Renate Loll (2008), The self-organizing quantum universe, *Scientific American*, juli 2008.



Jan Ambjørn arbejder med teoretisk højenergifysik og kosmologi, herunder kvantegravitation (bl.a. statistiske og numeriske modeller), strengteori, mangelpartikel-QCD, baryonasymmetri og sorte huller.

Ikke-kommutativ geometri

Af Ryszard Nest, Institut for Matematiske Fag, Københavns Universitet

Ikke-kommutativ geometri er en relativt ny matematisk disciplin, som er opstået ved sammensmeltning af forskellige grene af matematikken. Den har indført nye idéer og veje at tænke på mange velkendte matematiske problemer i topologi, geometrisk gruppeteori og matematisk fysik. I denne artikel vil vi forsøge at forklare lidt om dens metoder og hvordan de kan tænkes at blive anvendt i kvantegravitation.

Ikke-kommutativ geometri er en relativt nyudviklet disciplin, som skabtes for omtrent 30 år siden ud fra et ønske om at finde et sammenhængende grundlag for en række fænomener, som kom fra vidt forskellige områder af både matematik og fysik, men som syntes at have meget til fælles. Dens grundlægger er Alain Connes [1], som i den forbindelse fik Crawford-prisen.

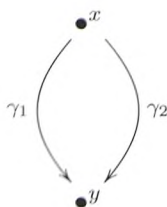
En algebra af funktioner

Det matematiske princip som er meget vigtigt i den sammenhæng stammer fra grundlæggeren af den moderne algebraiske geometri, Alexander Grothendieck. Det siger, at en struktur på et rum er bestemt af en algebra af funktioner på rummet. Polynomier, differentiable funktioner eller kontinuerte funktioner giver f.eks. allesammen forskellige strukturer på den reelle akse. Men omvendt, bestemmer punkter i rummet ikke nødvendigvis alle de interessante funktioner.

Et godt eksempel er en dobbeltrod af en andengrads-ligning. Det svarer til ét punkt (hvis der kun er én mulig værdi af løsningen af andengrads-ligningen), men to forskellige "funktioner", som ikke kan adskilles ved hjælp af deres værdier.

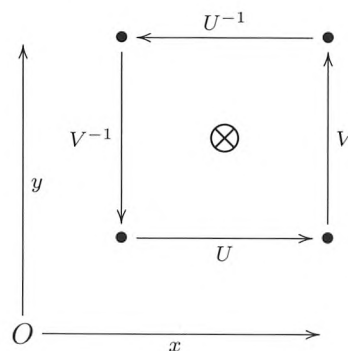
Den anden observation som er vigtigt her stammer fra kvantemekanikken. Den siger os, at "funktioner" som svarer til de fysiske observable kommuterer ikke. I et fysisk eksperiment er det ikke ligegyldigt, i hvilken rækkefølge observationer udføres. Det mest kendte eksempel er Heisenbergs "usikkerhedsrelation" der siger, at hvis x betegner beliggenheden af en partikel og p dens impuls, så er $xp \neq px$. Det medfører både at, vores algebra af "funktioner" er ikke-kommutativ, og at "punkter" i rummet bliver visket ud. Lad os betragte to simple eksempler.

Figuren herunder viser et "to-dimensionalt" punkt:



Vores funktioner (γ_1 og γ_2) har fire værdier, og danner 2×2 matricer. De to "punkter" kan ikke skilles af.

Det andet eksempel stammer fra fysik, og er følgende. Vi tænker på en elektron, som er tvunget til at blive på et gitter, f.eks. et saltkrystal.



I midten har vi et magnetfelt (markeret med $\otimes$) lodret mod tegningens plan. Eksperimentet siger, at hvis elektronen løber rundt i cirklen, resulterer det i et faseskift i elektronens bølgefunktion. Hvis U og V betegner henholdsvis flytning i x - og y -retningen, kan det beskrives med relationen $V^{-1}U^{-1}VU = e^{i\theta}$. Med andre ord, en algebra genereret af de to forskydninger er ikke-kommutativ. I modsætning til det forrige eksempel, kan man slet ikke finde nogle "punkter", og de to observationer som beskriver værdierne af x - og y -koordinaterne, kommuterer ikke.

Den konkrete algebra, som genereres af U og V kaldes for en ikke-kommutativ torus $\mathbb{T}_\theta^2$ og den dukker op flere forskellige steder i matematikken. Dens lokale version, den såkaldte "kvanteplan", er genereret af ikke-kommuterende koordinater x_1, x_2, x_3, x_4 , der opfylder relationer af formen:

$$x_i x_j - x_j x_i = \theta_{i,j}$$

Denne struktur er mere og mere anvendt i kvantefeltteori under betegnelsen "ikke-kommutativ rumtid". Forhåbningen her er, at den ikke-kommuterende natur af variablene vil hjælpe med at løse divergensproblemer i teorien. Der findes efterhånden modeller, hvor denne forhåbning er opfyldt, men de er langt fra hvad vi har brug for, for at kunne beskrive den virkelige verden. Men selv de enkleste eksempler peger på nye fænomener, som kan opstå i den situation. En meget enkelt model af en partikel i et ikke-kommutativt rum udviser for eksempel ikke-perturbative effekter. Eksempelvis

findes der ligevægtstilstande – de såkaldte instantoner – som ikke kan ses ved at ekstrapolere fra den semi-klassiske grænse.

Geometri

Det næste skridt er “geometri”. Klassisk geometri er det samme som “afstandsmåling”, dvs. givet to punkter i rummet, tilskrives vi dem deres afstand

$$\bullet \text{---} dx \text{---} \bullet$$

I det øjeblik, hvor vi har opgivet punkterne, er vi tvunget til at finde en anden beskrivelse af geometri. Her kommer fysikken igen til hjælp. Det vigtigste vink er meget klassisk, det er *måleenheder*. De har en lang historie, med de nyeste standarder helt anderledes end de gamle, som bestod af stykker af platin opbevaret i en kælder i Paris i 1800-tallet. Den moderne tidsenhed er f.eks. givet ved afstanden mellem to spektrallinier i et Cæsium-133 atom, på et bestemt punkt på jordens overflade. Dvs. den rigtige måde at bestemme enheder er ved hjælp af energispektre, som i matematik svarer til et “spektrum af en operator”. Den operator, som dukker op her, er velkendt i kvantefeltteori som “propagator” eller som den inverse af “Dirac-operatoren”, $\not{D}$, faktisk møder man ofte tegninger af formen

$$\bullet \text{---} \not{D}^{-1} \text{---} \bullet$$

Det samlede resultat er en spektraltripel, som består af

- En algebra $\mathcal{A}$ af observable (algebra betyder, at dens elementer kan lægges og ganges sammen), typisk ikke kommutativ;
- Et (Hilbert-)rum af tilstande, hvor vores algebra virker;
- En Dirac-operator, $\not{D}$, som virker på rummet af tilstande, og som har et energispektrum som bestemmer både dimensionen af vores system og som kan bruges som erstatning for afstand.

Der er nogle relationer mellem observable og Dirac-operatoren, der kan sammenfattes som et udsagn om, at observable lokaliserer både afstands- og tidsmålinger foretaget ved hjælp af Dirac-operatoren. I vores første eksempel er den eneste mulighed en 2×2 matrice af formen

$$\frac{1}{l} \begin{Bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{Bmatrix},$$

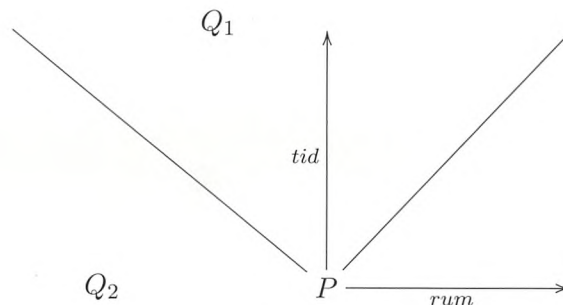
hvor l svarer til afstanden mellem vores to punkter – punkter kan ikke skilles ad, men deres afstand er alligevel veldefineret. Det dimensionsbegreb, som dukker naturligt op i denne sammenhæng er typisk hverken et heltalligt eller reelt tal.

Den måde at tænke på viser sig at være meget effektiv, især i matematik. Men den har også konsekvenser ved anvendelser i kvantefeltteori. Det er faktisk

nok at betragte den enkleste mulige ikke-kommutative model for vores ‘tidsrum’, hvor man tænker sig et *fladt* Minkovski-rum sammen med en meget mild ikke-kommutativ ingrediens som i vores første eksempel med 2×2 -matricerne. Her har vi allerede struktur nok til at rekonstruere vores viden om partikelfysik. Det viser sig nemlig, at Dirac-operator nærmest kan udledes kanonisk fra første principper, og at dens spektrum reproducerer standardmodellen i partikelfysikken (fænomenologisk) i et *krumt* rum. Den klassiske gravitationsteori dukker op som en konsekvens af den ikke-kommutative struktur.

Når først vi har bevæget os over i den ikke-kommutative verden, dukker der nye fænomener op, som kan relateres til fysik. En af de vigtigste er, at de fleste af de algebraer, som kommer frem ved beskrivelsen af fysiske systemer, har en naturlig og nærmest kanonisk “tidsudvikling”.

For at forklare dette, kan vi tænke på kausalitet i gravitationsteorien. I relativitetsteorien, medfører grundantagelsen om lysets endelige hastighed en endelig hastighed af korrelationer. Det betyder, at to begivenheder kun kan influere hinanden hvis de sidder i hinandens lyskegle:



Det som sker i P har indflydelse på det som sker i Q_1 , men ikke på det som sker i Q_2 .

Hvis vi husker vores “usikkerhedsrelationer”, betyder det at observable lokaliseret i P og Q_1 ikke kommuterer, mens observable lokaliseret i P og Q_2 kommuterer med hinanden. I vores algebraiske beskrivelse dukker denne effekt op som en parametergruppe af automorfier af $\mathcal{A}$ (tænk: tidsudvikling), som har følgende egenskab. Når vi flytter observable lokaliseret i P fremad ved hjælp af vores automorfier, vil de nye observable ikke kommutere med dem som er lokaliseret i P . Mens dem som ligger udenfor lyskeglen vil kommutere med alt det som er lokaliseret i P . I kvantefeltteori kaldes det for lokalitetsprincippet, og det er en af de vigtigste principper der anvendes ved opbygning af modeller i teoretisk fysik. Det som er overraskende her er, at den omvendte konstruktion viser sig at være mere naturlig. Det er en nærmest entydig konstruktion af automorfgruppen baseret på den ikke-kommutative natur af vores algebra. Man fristes til at sige, at tidsforskydning inden for lyskeglen er bestemt af

ikke-kommuterende egenskaber af observable. Denne gruppe af automorfier kaldes for modulær-gruppen og den er direkte relateret til noget som er kendt i statistisk fysik som Kubo-Martin-Schwinger-betingelsen. Selve KMS-betingelsen kan formuleres relativt til vores automorfigruppe og de tilstande som opfylder den, kaldes for KMS-tilstande. I konkrete fysiske systemer svarer de til ligevægtstilstande.

En anden effekt af ikke-kommutativitet er det som i fysik kaldes for faseovergange, f.eks. smeltning af is. For at forklare dette, kan vi gå tilbage til vores modulær-gruppe. Generelt tillader den flere forskellige ekstreme KMS-tilstande, eller "rene faser" af vores system. Ved skalering af parametrene (ændring af tidsenhed, som her opfører sig som ændring af "temperatur") ændres de tilladte KMS-tilstande og deres struktur. En præcis analyse af dette fænomen er blevet foretaget ved analyse af spektale tripler associeret til aritmetiske systemer, men også nogle mere fysiske modeller, de såkaldte "fuzzy spheres".

Idéen i "fuzzy spheres" er, at opbygge et ikke-kommutativt system associeret til rotationssymmetrien af en kugleoverflade og undersøge dens KMS-tilstande. Ved det som svarer til lave temperaturer observeres et fuldstændig kaotisk (faktisk endelig dimensional) system, igen beskrevet med endelige matricer. Når temperaturen vokser, dukker der en faseovergang op af flere tilladte ekstreme KMS-tilstande, som reproducerer både den glatte struktur og geometrien af kugleoverfladen.

Et af forsøgene på at anvende ikke-kommutativ geometri til kvantegravitation starter på lignende måde som den beskrevet af Jan Ambjørn i hans artikel i dette nummer af Kvant. Rumtiden erstattes med en samling af små kasser, de såkaldte simplekser. Men her skilles vejene lidt. Til stierne langs kanterne i vores samling af kasser tilskrives observable, de såkaldte holonomier, som ikke kommuterer. Algebraen af holonomier har et naturligt rum, som den virker på, og en naturlig Dirac-operator, som giver den ikke-kommutative version af "geometrien" på samlingen af alle mulige "geometrier" på vores samling af kasser. Selve algebraen af holonomier er på dette stadium ret kedelig, den svarer til vores endelig dimensionale matricer. Men geometrien beskrevet af Dirac-operatoren indeholder allerede lidt flere informationer. Næste skridt består af en undersøgelse af, hvad der sker ved grænseovergangen, når kasserne deles op igen og igen. Her dukker der nogle interessante fænomener op:

- Kravet om konsistens af vores konstruktion under inddelinger tvinger os automatisk til at arbejde med fermioner (partikler med halvtalligt spin), som faktisk er overraskende i en ren "gravitationsteori";
- Konstruktion af Dirac-operatoren har en naturlig skaleringsinvarians, som svarer til, at jo nærmere vi vil studere et bestemt punkt, jo højere energi skal der anvendes.

- Det er relativt nemt at konstruere de såkaldte kohærente tilstande, som beskriver den semi-klaske grænse, hvor kvanteeffekter på tidsrummet ignoreres og hvor partikler bliver beskrevet indenfor rammerne af kvantemekanikken. Den resulterende teori viser sig til at være den velkendte Dirac-ligning for en partikel i et krumt rum.

Men arbejdet med denne model er kun lige begyndt, og foran os ligger der en stor del forskning, inden man kan sige noget om teoriens anvendelighed.

Litteratur

- [1] Webservice af Alain Connes, <http://www.alainconnes.org/en/downloads.php>
- [2] Joachim Cuntz (2001), Quantum Spaces and Their Noncommutative Topology, *Notices AMS*, Sept. 2001, 793-799.



Ryszard Nest er professor ved Institut for Matematiske Fag, Københavns Universitet. Han leder forskningsgruppen i Ikke-kommutativ Geometri der, sammen med Topologigruppen, danner Grundforskningscenter i "Symmetri og Deformationer". Hans hovedinteresser er centreret omkring anvendelser af ikke-kommutativ geometri i analyse, deformationsteori og matematisk fysik.

PFEIFFER VACUUM

PFEIFFER og TRINOS

samt vore partnere

VAT-COMVAT-GAMMA-HSR

ØNSKER ALLE VORE KUNDER

**Glædelig Jul
&
Godt nytår**

og takker for året der gik.

På gensyn i 2011

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

Fysisk eskatologi – Universet og det evige liv

Af Helge Kragh, Institut for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet

Kosmologi er en udviklingsvidenskab, der rekonstruerer Universets historie fra Big Bang til den sene fremkomst af intelligent liv. Ifølge nogle fysikere er den kosmiske fremtid nok så væsentlig som fortiden, især hvis fremtidsscenerne omfatter livets skæbne. Vil intelligent liv være en parentes i Universets historie, eller vil det fortsat eksistere i den fjerne fremtid, måske i al evighed? Et nyt og kontroversielt forskningsområde, kaldet "fysisk eskatologi", beskæftiger sig med disse spørgsmål.

Historisk prolog

I middelalderen og renæssancen blev Universet ofte fremstillet som en slags levende organisme, der var behersket af og centreret omkring mennesket, Guds udvalgte skabning. Det var vanskeligt, ja næsten umuligt, at forestille sig et univers uden mennesker, for i en vis forstand var mennesket altings mål og formål. I overensstemmelse med renæssancehumanismens idealer blev Universet opfattet som antropocentrisk, og mennesket tillagt en afgørende rolle i verdensordenen. Denne orden var gudsskabt, men ikke uforanderlig, for Gud havde i sin visdom skabt verden engang i

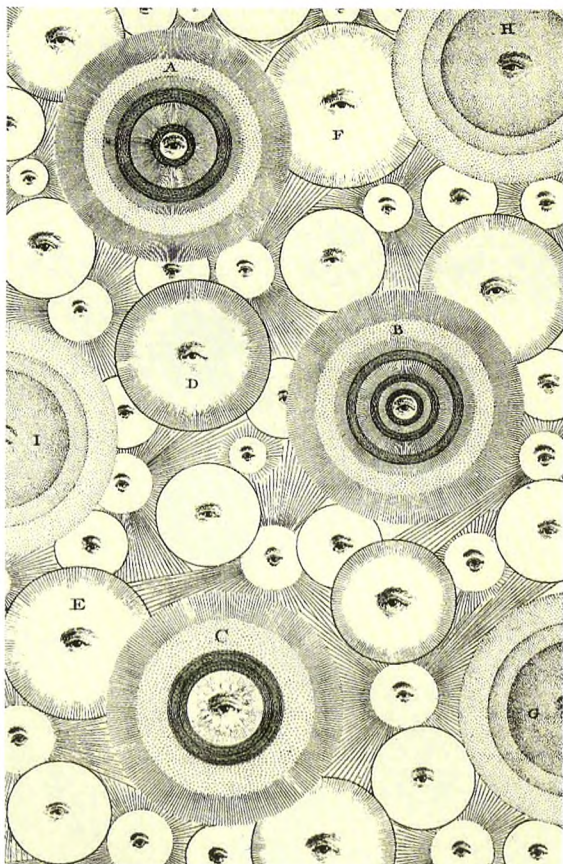
den fjerne fortid – for næsten 6000 år siden! – og den ville ikke fortsætte med at eksistere i al evighed. I overensstemmelse med de apokalyptiske passager i Bibelen var det anerkendt, at verden var på vej mod sin undergang. Med dommedag ville alting ophøre, og alt liv ville forsvinde, om end muligheden for en genkomst stod åben. På Herrens dag, hedder det i Peters andet brev, "skal himlene forgå med brag, og elementerne skal komme i brand og opløses, og Jorden og alt menneskeværk på den skal brænde op". Men det siges også, at efter dommens dag vil der komme "nye himle og en ny jord".



Figur 1. På dommens dag vil verden gå under og livet ophøre. Begrebet *eskatologi*, der betegner forestillinger om verdens afslutning, er teologisk, mens det er kontroversielt, om det også har en plads i kosmologien.



Figur 2. Omkring 1600, hvor astrologiske og alkymistiske forestillinger endnu var almindelige, optrådte mennesket som en central aktør i det fysiske univers. Illustration fra den engelske naturfilosof og mystiker Robert Fludds bog *Utriusque Cosmi* fra 1617.



Figur 3. Englænderen Thomas Wright udgav i 1750 bogen *An Original Theory of the Universe*, hvori han beskrev et kosmologisk system, hvor Gud og intelligent liv var overalt i Universet.

Med den newtonske videnskabs dominans fra omkring 1700 blev mennesket detroniseret fra sin rolle som naturens mål og reduceret til blot en neutral iagt-tager af den. Oplysningstidens adskillelse mellem natur og menneske – eller rettere mellem natur og ånd – blev udfordret af den naturromantiske strømning i starten af 1800-tallet, men uden at udfordringen satte sig varige spor.

Videnskabeligt argumenterede spekulationer om Universets ultimative skæbne er ikke forbeholdt moderne kosmologi. Fra midten af 1800-tallet gav den populære "nebularhypotese" Universet en historisk dimension, der yderligere blev forstærket af ekstrapolationer baseret på termodynamikkens anden hovedsætning. Hvis entropien fortsætter med at vokse, og den frie energi dermed fortsætter med at aftage, vil liv og livgivende processer da ikke ophøre i den fjerne fremtid? "Varmedøden" vil indtræffe, og den vil være irreversibel [1]. Som den engelske digter Algernon Swinburne i 1866 udtrykte det på poetisk, men dog præcis form:

Then star nor sun shall waken,
Nor any change of light:
Nor sound of waters shaken,
Nor any sound or sight:
Nor wintry leaves nor vernal,
Nor days nor things diurnal.
Only the sleep eternal
In an eternal night.

Den pessimistiske forudsigelse af en kosmisk varmedød var i en lang periode kontroversiel og genstand for megen diskussion, både af videnskabelig, filosofisk og teologisk art. Vi finder i denne periode ansatser til en videnskabelig baseret eskatologi, herunder spekulationer om, hvorvidt mennesket eller menneskelignende liv kan tilpasse sig det højentropiske miljø i den fjerne fremtid. Den tyske fysiker Caspar Isenkrahe argumenterede, at dette var muligt. I en bog fra 1910 konkluderede han, at selv om mennesket ville uddø, så betød det ikke livets endeligt, for over lange tidsrum ville livsformer kunne tilpasse sig selv de mest ekstreme fysiske omstændigheder.

Den almindelige holdning var dog, at i det lange løb kunne livet ikke konkurrere med entropilovens tyranni. Denne holdning blev bl.a. formuleret af James Jeans i en forelæsning fra 1928, på et tidspunkt hvor Universets ekspansion endnu ikke var kendt. Ifølge Jeans var fremtidsscenariet dette [2]:

Som tiden går vil Universets konstruktion forvitres, nedbrydes og opløses, og ingen genopbyggelse eller rekonstruktion er mulig. Termodynamikkens anden lov tvinger det materielle univers til altid at bevæge sig i den samme retning og ad den samme vej, en vej der kun kan ende i død og tilintetgørelse.

Universet i den fjerne fremtid

Mens mennesket og den menneskelige bevidsthed traditionelt ikke medtænkes i de fysiske videnskaber, er der i anden halvdel af det 20. århundrede gjort flere forsøg på at ændre på dette forhold. Nogle af disse er knyttet til forståelsen af kvantemekanikken (som hos Eugene Wigner og John Wheeler), andre til kosmologiske sammenhænge og andre igen til det antropiske princip, som Brandon Carter indførte i 1974. Hele pointen med det antropiske princip er, at Universet og dets udvikling må være konsistent med eksistensen af mennesker som observerende og bevidste væsner, eller mere generelt med avancerede livsformer.

Uanset om bevidstheden spiller en aktiv rolle i naturprocesser eller ej, så er det fristende, og vel i en vis forstand naturligt, at reflektere over livets fortsatte muligheder i forskellige kosmologiske teorier eller scenarier. Sådanne teorier vurderes primært efter deres overensstemmelse med observationer, men andre faktorer af en mere subjektiv eller filosofisk art kan også indgå. Man kan fx foretrække en bestemt kosmologisk model, fordi den i højere grad end andre modeller harmonerer med visse menneskelige (snarere end epistemiske) værdier. En sådan værdi kan være vedvarende intelligent liv i Universet. Der er adskillige eksempler på, at fysikere og astronomer har tillagt denne værdi betydning i den forstand, at de *ønsker* et univers, hvor livet altid fortsætter. Argumenter af denne art indgik i den kosmologiske debat i 1950'erne mellem steady-state modellen og modeller af Big Bang-typen. På omkring samme tid fremhævede Paul Dirac

det ønskelige i, at en kosmologisk teori i det mindste tillader muligheden for et evigt liv.

Moderne kosmologi er "historisk" i den forstand, at den søger at forklare det nutidige univers som resultatet af fortidige processer, der ultimativt kan føres tilbage til Big Bang for 13-14 mia år siden. Den fortidige kosmiske udvikling er godt forstået, men hvad med fremtiden? De ligninger, der beskriver kosmologiske modeller, er tidssymmetriske, så de fortæller os ikke blot om den kosmiske fortid, men også om den kosmiske fremtid. Alligevel er det først for relativt nyligt, at denne fremtid er blevet gjort til genstand for seriøse studier, dvs. at man på grundlag af kosmologiske modeller og fysisk viden har opstillet scenarier for Universets ultimative skæbne.

Eskatologi er et teologisk begreb, der betegner forestillinger om verdens afslutning, mere specielt menneskets skæbne efter døden. Sådanne forestillinger findes i de fleste religioner, men af historiske årsager har den kristne eskatologi været særlig vigtig i den vestlige kulturkreds. Fra omkring 1970 begyndte enkelte fysikere og astronomer at bruge ordet i forbindelse med teoretiske studier af Universets tilstand i den meget fjerne fremtid. Vil verden gå under i et kataklystisk "Big Crunch"? Vil den blot fuse ud og langsomt nærme sig en død tilstand? Eller vil den måske genskabes igen og igen? I nogle af disse "eskatologiske" studier indgår intelligent liv direkte og centralt, mens andre studier ignorerer livet eller blot nævner det parentetisk. Især for førstnævnte studier har man foreslået navnet "fysisk eskatologi", idet man hermed ønsker at understrege området som et fysisk forskningsprogram, der hverken er af teologisk eller filosofisk karakter. Navnet indgår i en del kosmologiske og astrofysiske artikler, men har ikke vundet officiel anerkendelse. Ifølge John Barrow og Frank Tipler er fysisk eskatologi "studiet af livets overlevelse og opførsel i den fjerne fremtid", hvor "liv" dog skal forstås i en meget generel forstand [3; 4].

I forsøget på at etablere fysisk eskatologi som en respektabel astrofysisk disciplin gør man meget ud af at nedprioritere de spekulative elementer. Området bygger på kendt fysik og hævdevundne videnskabelige metoder, siges det. Desuden anstrenger man sig for at distancere området fra teologisk eskatologi og generelt at benægte, at det har noget med religiøse forestillinger at gøre. Det første moderne arbejde af en eskatologisk art fremkom i 1969, hvor Martin Rees undersøgte, hvordan et lukket univers ville nærme sig den endelige (eller måske endelige) udslettelse i et "Big Crunch". Et par år senere undersøgte Paul Davies de termodynamiske forhold i modeller af et evigt ekspanderende univers. I ingen af disse tidlige eksempler spillede liv nogen rolle.

Siden da har mange fysikere udviklet scenarier af en lignende type, blot meget mere detaljerede. Resultatet afhænger naturligvis af de undersøgte kosmologiske modeller og antagelser om hvilke fysiske processer, der indgår i den fremtidige kosmiske udvikling. Fx vil scenariet afhænge af, om protonen antages at være ustabil eller ej. I ekstrapolationer af den næsten absurde størrelsesorden, der her er tale om, er man næsten tvun-

get til at antage, at de nuværende fundamentale fysiske love vil fortsætte med at være gyldige og tilstrækkelige. Man ved naturligvis godt, at dette næppe er tilfældet, men denne konservatisme hører til spillets regler. Som et avanceret eksempel på denne type fremtidsscenarier, eller fysisk eskatologi om man vil, kan nævnes en artikel fra 1997 af Fred Adams og Gregory Laughlin, som eksplicit udelukkede liv fra deres analyse for derved at gøre den mere videnskabelig [5].

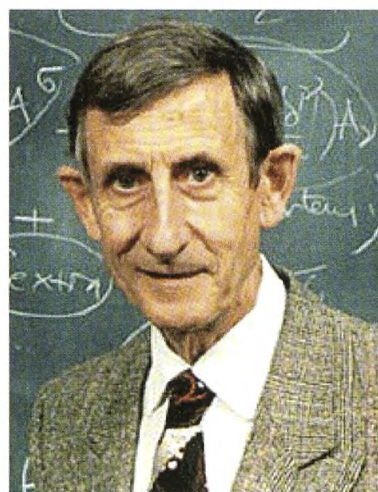
Et fremtidsscenario for et åbent og stadigt ekspanderende univers, sådan som fremlagt af Adams, Laughlin og flere andre, kan typisk starte med udslukningen af lysende stjerner og deres omformning til neutronstjerner eller sorte huller, hvilket måske finder sted om 10^{14} år (10.000 gange Universets nuværende alder). Når der er gået 10^{34} år, vil alt stof være blevet til en tynd og kold suppe af sorte huller, elektroner, positroner, neutrinoer og fotoner. De sorte huller "fordamper", sådan som først forudsagt af Stephen Hawking, og efter det gigantiske tidsrum på 10^{118} år vil selv de tungeste sorte huller være forsvundet. Til den tid vil Universet bestå af en umådelig tynd elektron-positron plasma i en ultrakold stråling af neutrinoer og fotoner. Og det er så det. Man bør nok hæfte sig ved, at det tager 10^{118} år at nå til denne tilstand af kedsommelig fysisk evighed. Det er rigtig lang tid!

Uendeligt i alle retninger

I 1978 holdt den ansete teoretiske fysiker Freeman Dyson et foredrag om den endeløse tid, der af mange bliver anset som det grundlæggende arbejde i fysisk eskatologi [6]. I modsætning til de tidligere nævnte arbejder var liv og bevidsthed af central betydning for Dysons analyse, der netop fokuserede på muligheden for evigt liv. Han tænkte ikke på noget så vulgært og bibelsk som mennesker, men på meget højere udviklede livsformer af en ikke nærmere defineret organisk art. For ham var biologi en integreret og helt central del af kosmologien. Foredraget og den efterfølgende artikel i *Reviews of Modern Physics* var på mange måder bemærkelsesværdige, ikke mindst på grund af sammenblandingen af matematisk-fysiske argumenter med stærkt spekulative og normative antagelser. Dyson, der erklærede sig for "filosofisk optimist", var overbevist om, at Universet har et formål, og at livets fortsatte eksistens er en vigtig del af dette kosmiske formål. Lige så lidt som middelalderens filosoffer kunne han forestille sig et livløst univers.

Etiske og lignende normative værdier regnes normalt som irrelevante fremmedlegemer i naturvidenskab, men Dyson accepterede ikke denne traditionelle skelnen mellem videnskab og menneskelige værdier. En anden fremragende fysiker, nobelpristageren Steven Weinberg, havde året før i sin bog *De første tre minutter* konkluderet, at "Jo bedre vi forstår Universet, des mere meningsløst forekommer det os". Dyson var lodret uenig. Hans univers havde et formål, nemlig at understøtte og udvikle livet i stedse større rigdom, kompleksitet og diversitet. Et lukket univers, der måtte ende i et Big Crunch, gav ham en følelse af klaustrofobi. Universet

måtte være åbent, uendeligt og udtømmeligt i tid, rum, liv og muligheder. "I den åbne kosmologi har historien ingen afslutning", som han sagde.



Figur 4. Den engelsk-amerikanske fysiker Freeman Dyson (født 1923) var en pioner i udviklingen af kvanteelektrodynamikken og har i bøger og artikler bidraget til de mere spekulative dele af fysik og kosmologi.

Den ukuelige optimist Dyson argumenterede, at i et åbent univers vil intelligent liv ikke blot kunne eksistere i al evighed, ultimativt vil det også blive forenet i en biologisk og bevidsthedsmæssig forstand – hele Universet vil måske blive til en levende superorganisme. For at nå sådanne konklusioner måtte han rimeligvis indføre nogle højst spekulative antagelser, bl.a. om "subjektiv tid" og "kosmisk dvale", men han hævdede, at disse kunne begrundes i de fysiske love. Dysons fremtidsscenario var af samme type som nævnt ovenfor, blot gik det længere end til sølle 10^{118} år. Hans tabel over fremtidens kronologi omfattede bl.a. disse begivenheder:

Stjerner afkøles	10^{14} år
Stjerner løsrives fra galakser	10^{19} år
Sorte huller fordamper	10^{64} år
Alt stof henfalder til jern	10^{1500} år

Da Dyson skrev sin artikel, var inflationsteorien endnu ikke fremkommet, og eksistensen af en eksotisk mørk energi (som normalt tilskrives en kosmologisk konstant) var ukendt. Senere forskere har taget hensyn til disse og andre nyere opdagelser i kritiske revurderinger af Dysons analyse. Disse senere bidrag til fysisk eskatologi er helt i Dysons ånd, blot mere opdaterede og i flere tilfælde endnu mere spekulative og ambitiøse. Et enkelt eksempel vil antyde karakteren af denne type undersøgelser, hvortil en række af fremtrædende astrofysikere og kosmologer har bidraget.

Ifølge den prominente russisk-amerikanske fysiker Andrei Linde, en af inflationsteoriens fædre, hører studiet af livet i den fjerne fremtid til kosmologiens fornemste og mest presserende opgaver. Lige som Dyson ønskede han evigt liv, men i 1988 måtte han konkludere,

at dette nok ikke var muligt i vores univers. Heldigvis kunne Linde undgå en sådan pessimistisk konklusion ved at henvise til sin teori om såkaldt kaotisk inflation, der indebærer stadig skabelse af nye universer eller kosmiske domæner. Vore fjerne efterkommere vil ikke kunne overleve i vores univers, men måske de så kan rejse til et andet univers med bedre muligheder for fortsat liv. Og når dette univers er ved at dø, kan de rejse til endnu et nyt univers, etc. Linde forklarede, at vores univers måske vil ende i et sort hul, men trøstede læserne af *Physics Letters* med, at det nok vil tage $10^{10.000}$ år, før det sorte hul opsluger alt. Så der vil være tid nok til at "udarbejde en succesrig overlevelsesholdning eller en mere filosofisk holdning til fremtiden" [7]. Overlevelsesholdningen kunne være de kosmiske rejser til nye bioenlige universer, mens Linde undgik at kommentere, hvori den mere filosofiske holdning til fremtiden kunne bestå.

Fysisk eskatologi og evigt liv

Evighed er, ligesom eskatologi, et teologisk begreb, men det har altså ikke forhindret nogle fysikere i at bruge det i kosmologiske spekulationer. I almindelighed er fysisk eskatologi karakteriseret ved en ret ekstrem form for reduktionisme, idet det implicit eller eksplicit hævdes, at *alting* kan forstås udtømmende på grundlag af den fysik og matematik, vi kender i dag. Dette gælder ikke blot naturen, men også livsforhold, etiske værdier og religiøse forestillinger. Det liv, der tales om, er ikke liv, som du og jeg kender det, men defineres abstrakt i fysiske og informationsteoretiske termer. Frank Tipler hører til de mest outrerede af de fysiske eskatologer, og også til de mest reduktionistiske. For ham er fysik og matematik altings grundlag, i bogstavelig forstand alt der eksisterer. Som han og Barrow har fremhævet, så er påstanden om det evige liv i overensstemmelse med en af de mangfoldige versioner af det antropiske princip, nemlig det såkaldte "endelige antropiske princip", der netop postulerer, at livet aldrig kan forgå. Ikke mange fysikere tager denne version alvorlig, men Tipler gør.

Jeg kan ikke her komme nærmere ind på Tiplers ofte kontroversielle og ekstreme teorier, der næppe deles af mange af hans kolleger i fysikken. Ekstreme som hans ideer unægtelig er, så er nogle af dem dog ganske repræsentative for den nye forskningstradition i fysisk eskatologi. Tipler hævder at have *bevist* livets evige eksistens, at det uundgåeligt følger af fysikkens love. Som han formulerede det i en artikel fra 2003: "Intelligent liv vil overleve indtil tidens ende, fordi det kræves af fysikkens love; eller for at udtrykke det på en anden måde, fordi sådan overlevelse er et af Universets formål" [8]. Det evige intelligente liv er ikke mennesker af kød og blod, men selvreproducerende erkendende robotter, der kun i en genealogisk forstand er knyttet til os.

Grænsen for spekulationer inden for fysisk eskatologi og lignende områder er knap til at få øje på. Den ansete kosmolog Edward Harrison foreslog i 1995 – tilsyneladende i fuld alvor – at vores univers er skabt af superintelligente væsner levende i et andet univers [9]. I

modsætning til Tiplers robotter er Harrisons intelligente væsner af omtrent samme slags som os, blot umådeligt højere udviklede. Homo sapiens vil måske selv engang nå et sådant avanceret udviklingsstadium og kan så gå i gang med at skabe nye universer til gavn for sig selv og andre kosmiske væsner. Med denne spekulation mente Harrison at kunne give en god forklaring på, hvorfor Universet er rationelt forståeligt og så eminent egnet til at huse højere livsformer.

Videnskabelige bidrag til den fysiske eskatologi publiceres typisk i astronomi- og fysiktidsskrifter eller i den nye litteratur, der er vokset op omkring astrobiologien. Tidsskriftet *International Journal of Astrobiology*, der første gang udkom i 2002, indeholder flere bidrag af den spekulative type. I en af disse artikler argumenteres, at menneskers personligheder kan genskabes eller simuleres i fremtidens supercomputere, sådan at selv den individuelle personlighed kan leve evigt. I overensstemmelse med Dyson, og i modstrid med Weinberg, mener forfatteren, at livet er formålsbestemt og har en kosmisk mening. En anden artikel i samme tidsskrift, med den pompøse titel "The Theory of Everything and the Future of Life", slutter med følgende opfordring:

Vi må straks begynde at tage fysisk eskatologi mere alvorligt, for det er selve livets fremtid i Multiverset der her er på spil. Hvad er meningen med vore liv, hvis livet ikke eksisterer i morgen? Det vil være særdeles spændende og tilfredsstillende [at finde ud af] hvordan menneskeheden og andre livsformer vil være i stand til at redde sig og fortsætte deres overlevelse uendeligt i fremtiden.

Kommentarer skulle være overflødige.

Fra kosmobiologi til kosmoteologi

Inden for den klasse af teorier, jeg her har skitseret, er det rimeligt at skelne mellem kosmologiske fremtidsscenarier og egentlig fysisk eskatologi, hvor fokus er på fortsat liv i Universet. Førstnævnte arbejder er ret uproblematiske, men også ret sterile. Der er tale om hypotetisk-deduktive argumenter, hvor man ud fra den bedste fysiske og kosmologiske viden slutter til konsekvenser om Universets tilstand i den meget fjerne tilstand. Argumenter af en logisk set lignende type er almindelige i fysikken og ofte af stor nytte, da man ved at teste konsekvensen kan vurdere hypotesens gyldighed. Dette lader sig imidlertid ikke gøre for fremtidsscenariernes vedkommende, i det mindste ikke i nogen realistisk forstand. Af denne grund kan de forekomme at være epistemisk sterile øvelser, om end af en interessant slags.

Egentlig fysisk eskatologi er naturligvis spekulativ, hvilket dog ikke i sig selv er en alvorlig indvending. Dele af området er dog særdeles spekulative, bl.a. fordi de opererer med modeller og antagelser for begreber som liv, intelligens og bevidsthed. Hertil kommer, at de ofte er præget af pseudodysindigheder og en tvivlsom

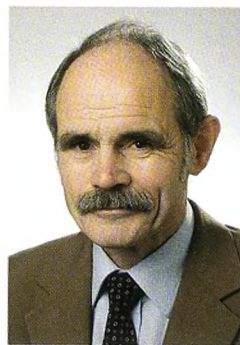
eller illegitim brug af filosofiske og teologiske begreber. I det mindste i nogle tilfælde minder de mere om middelalderens skolastiske diskussioner end om fysisk videnskab, idet de reelt set ikke forpligter sig over for den virkelige natur.

Al den stund fysisk eskatologi optræder i anerkendte videnskabelige tidsskrifter, må området i en sociologisk forstand regnes som videnskabeligt, men det kan diskuteres, om det også er det i en epistemisk og metodologisk forstand. I det mindste understreger denne type teoretisk forskning, at demarkationsproblemet mellem videnskab og ikke-videnskab stadig er aktuelt [10].

Der er bred konsensus om, at fysik og anden naturvidenskab må være religiøst neutralt, hvilket da også er tilfældet med de fleste bidrag til fysisk eskatologi. Tiplers version er usædvanlig ved eksplicit at inkludere religiøse elementer, om end dette sker på en højst utraditionel måde. Teologi er ifølge Tipler "ikke andet end fysisk kosmologi baseret på antagelsen om, at livet som helhed er udødeligt". I andre tilfælde har det fysisk-eskatologiske projekt et kvasireligiøst præg, idet det ofte er motiveret i det urgamle og religiøst baserede ønske om evigt liv. Der er ikke tale om apologetisk fysik, men snarere om at spekulativ kosmologisk fysik optræder som en sækuler og tilsyneladende videnskabelig erstatningsreligion. Hvis jeg blev tvunget til at vælge, ville jeg vælge den ægte vare.

Litteratur

- [1] H. Kragh (2008), *Entropic Creation*, Aldershot.
- [2] J. Jeans (1928), The physics of the universe, *Nature* bind **122**, 689-700.
- [3] J. Barrow F. Tipler (1986), *The Anthropic Cosmological Principle*, Cambridge.
- [4] M. Ćirković (2003), Physical Eschatology, *American Journal of Physics* bind **71**, 122-133.
- [5] F. Adams G. Laughlin, A dying universe, *Reviews of Modern Physics* bind **69**, 337-371.
- [6] F. Dyson (1979), Time without end, *Reviews of Modern Physics* bind **51**, 447-460.
- [7] A. Linde (1988), Life after inflation, *Physics Letters B* bind **211**, 29-31.
- [8] F. Tipler (2003), Intelligent life in cosmology, *International Journal of Astrobiology* bind **2**, 141-148.
- [9] E. Harrison (1995), The natural selection of universes containing intelligent life, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* bind **36**, 193-203.
- [10] H. Kragh (2011), *Higher Speculations*, Oxford.



Helge Kragh er professor i videnskabshistorie ved Institut for Videnskabsstudier, Aarhus Universitet, og arbejder især med de fysiske videnskabers nyere historie. Han har ledet udgivelsen af firebindsværket "Dansk Naturvidenskabs Historie".

Aktuelle bøger

Af Anja Skaar Jacobsen og Michael Cramer Andersen

Kvantemekanik

Af: Klaus Mølmer
 "Kvantemekanik – Atomernes vilde verden"
 Aarhus Universitetsforlag 2010
 181 sider, illustreret, 198 kr.
<http://www.unipress.dk>.



Denne lille bog giver en kortfattet, kontant og veloplagt, populærvidenskabelig fremstilling af kvantemekanikken, dens paradokser og dens anvendelser. Klaus Mølmer er professor i fysik ved Aarhus Universitet og en af verdens førende kvanteoptikere. Samtidig er han en mester ud i kunsten at formidle sit svære stof til både studerende og

lægfolk. Mølmers fremstilling af kvantemekanikken bygger på teoriens historiske udvikling, fordi, som han skriver, "der gemmer sig en god portion fysisk indsigt i at følge, hvordan teorier opstår og går under i et samspil mellem eksperimentelle fakta og håbefulde spekulationer". Den opfattelse deler denne anmelder til fulde. Efter et lynkursus i klassisk fysik, hører vi således om den historiske udvikling af kvantemekanikken fra den tidlige kvanteteori og navnlig, selvfølgelig, Bohrs atommodel, over bølge- og matrixmekanikken, til teoriens mange anvendelser i beskrivelsen af atomer, kerner, mindre molekyler, faste stoffer og Big Bang. Til slut nævnes anvendelsen af kvantemekaniske effekter i forskellige former for teknologi såsom lasere, atomure og, sandsynligvis, i fremtidens computere.

I modsætning til de fleste lærebøger i kvantemekanik, er debatten om kvantemekanikkens fortolkning et centralt kapitel i bogen. Mølmer har her et meget klart standpunkt i Københavnerfortolkningens favør. Som Bohr og Heisenberg er Mølmer af den opfattelse, at kvanteteorien er et udtryk for vores viden om kvantefænomener. Teorien giver ikke et billede af hvordan kvantesystemer opfører sig uafhængigt af iagttagers eller eksperimentatørens vekselvirkning med

dem. Mølmers overbevisning er forankret i hans arbejde med forfinelsen af de matematiske teknikker der bruges i de numeriske beregninger i kvanteoptikken, de såkaldte Kvant Monte-Carlo modeller. Opkaldt efter kasinoerne i Monaco henviser disse modeller direkte til det tilfældige aspekt ved den kvantemekaniske måleprocess. Kvant Monte-Carlo-folkene mener, at diskontinuerte kvantespring og såkaldte bølge-kollaps sker direkte som et resultat af målinger af kvantesystemets egenskaber. Som Bohr sagde, kan man ikke observere eller måle på kvantesystemer uden at påvirke deres udvikling. Senere i bogen nævnes enkelte af de banebrydende kvalitative eksperimenter, der, som Alain Aspect's berømte EPR-lignende forsøg i 1982, har bekræftet atomare partiklers nærmest magiske opførsel. Efter anmelderens mening er det her, det for alvor bliver spændende. Desværre er der kun enkelte litteraturhenvisninger i teksten, så den nysgerrige, der gerne vil vide mere om den senere tids eksperimentelle undersøgelser af de paradoksale kvanteeffekter, bliver ikke tilfredsstillet. I den henseende skuffer også listen over yderligere læsning, som ikke ser ud til at love mere uddybelse på det punkt. Jeg kan derfor kun opfordre forfatteren til at skrive en mere uddybende bog om den seneste udvikling indenfor kvanteoptikken.

“Kvanteteorien ser ud som den gør, fordi den virker”, proklamerer Mølmer og undgår dermed behændigt at snakke om sandhed og den virkelige verden. En instrumentalistisk holdning som denne udelukker bestemt ikke det synspunkt, at kvantemekanikken og Københavnerfortolkningen ser ud som den gør på grund af den givne historiske udvikling. Derimod ligger der i sidstnævnte opfattelse – mente navnlig den amerikanske fysiker David Bohm, – at udviklingen historisk set meget vel kunne have taget en anden retning, og dermed kunne teorien og dens fortolkning have set anderledes ud. Det motiverede ham til, helt tilbage i 1951, at konstruere en alternativ fortolkning af kvantemekanikken. Bohm indsatte et kvantepotentiale i bevægelsesligningen, der skulle genindføre en deterministisk banebeskrivelse for partikler. Kvantepotentialet kan imidlertid ikke observeres i et eksperiment, hvorfor det går under betegnelsen skjult variabel. Mølmer anerkender Bohms teori som et formelt og operationsdygtigt alternativ til Københavnerfortolkningen, men antyder, at Bohms senere idéer om den stærke forbundethed mellem partikler, som han kaldte den “indfoldede orden”, giver associationer til et holistisk og religiøst natursyn, og det, mener Mølmer, frastøder de fleste fysikere. Bohms fortolkning har således kun haft få tilhængere. Derimod har den såkaldte Mangeverdenfortolkning, efter først at have været næsten totalt ignoreret, nydt stigende interesse de senere år, og det kunne have været interessant med en bemærkning om, hvad det kan skyldes.

Belært af videnskabshistorien bliver vi mindet om, at på trods af kvanteteoriens mange succeser, kan vi forvente, at også den en dag vil blive erstattet eller suppleret med en bedre og mere omfattende fysisk teori. Efter at man har læst forfatterens begejstrede lovprisning af kvanteteorien, dens succeser, dens forudsigelser om særlige paradokser der bekræftes eksperimentelt, samt dens utallige anvendelser – kommer det som lidt af en overraskelse, at han runder af med at fastslå, at “blot et eneste fysikforsøg, der giver resultater i modstrid med kvantemekanikkens forudsigelser, vil vælte teorien og starte en ny revolution af fysikken af samme karakter som den, der skete for hundrede år siden”. Som eksemplet med den klassiske fysik viser, skal der for det meste mere til end et enkelt modstridende forsøg, før en teori væltes.

Anja Skaar Jacobsen

Videnskaben og verden – mennesket og maskinen

Redaktion: *Bent Raymond Jørgensen, Jørgen Lyngbye og Henrik Georg Bohr* med bidrag fra en lang række forskere.

Billedredaktion: *Andrew Jackson*.

Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck 2010, 464 sider, illustreret, 349 kr. <http://www.nytnordiskforlag.dk>.



Denne bog handler om de store metafysiske spørgsmål og videnskabens foreløbige svar på dem. En lang række forskere stiller de vanskelige spørgsmål, som ikke umiddelbart har noget præcist og endegyldigt svar. Men hvis man ikke tør stille spørgsmålene eller give et bud på svarene, bliver man aldrig klogere. Det er derfor prisværdigt, at forfatterne gør forsøget.

Nogle af de spørgsmål som bogen belyser er: Universets tilblivelse, grundstoffernes dannelse og en livsvenlig planets opståen. Andre kapitler handler om hvad virkeligheden er, hvad et menneske er, hvordan bevidstheden fungerer og hvad der er de fysiske forudsætninger for livsprocesserne. Vi hører også om hvordan livsprocesserne kan opfattes mekanisk – som molekylære ‘maskiner’ – og hvordan man forsøger at få maskiner til at danne kunstig bevidsthed. Til sidst åbnes op for nogle større perspektiver for fremtiden, bl.a. den igangværende søgen efter liv i Universet og hvad virkeligheden, videnskaben og vorherre har med hinanden at gøre. Dette sidste kapitel er skrevet af den tidligere overrabbiner Bent Melchior, mens de øvrige 17 kapitler er skrevet af forskere.

Et par eksempler på kapitler, der nok vil interessere dette blads læsere, skal omtales kort. Holger Bech Nielsen har bidraget med et veloplagt kapitel “Om begyndelsen til alt og det mindste af alt”, hvor han gør en ihærdig indsats for at gøre strengteorien forståelig. Han diskuterer også om livet selv ligger i naturlovene og hvordan kvalitativt nye (emergente) strukturer kan opstå ud af mange enkeltdele. Den nu afdøde Jens Mikael Bang har bidraget med et interessant kapitel om “Livsprocesserne i lyset af matematisk-materialistisk fysik”, hvor han bl.a. citerer Niels Bohr og diskuterer de komplementære begreber ‘fleksibilitet’ og ‘stabilitet’ og hvordan de optræder i klassisk mekanik og kvantemekanikken.

Den ene af redaktørerne af bogen, Bent Raymond Jørgensen, er historiker med hang til videnskabens verdensbillede på alle niveauer. Han var også initiativtager til bogen “Videnskaben eller Gud?” (1996), som var resultatet af en række foredrag og tv-programmer. Der er flere gengangere blandt bogens bidragsydere, men denne bog er væsentligt mere omfattende. Bogen kan varmt anbefales til alle, der interesserer sig for at vide hvorfor verden ser ud og fungerer som den gør og hvad mennesket og bevidstheden er.

Michael Cramer Andersen

Elektrostatisk vægt – breddeopgave 40 med didaktisk kommentar

Af Jens Højgaard Jensen, IMFUFA, NSM, RUC

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

Her bringes løsning og kommentar til opgaven fra forrige nummer samt en ny opgave. Opgaven i sidste nummer af KVANT var denne breddeopgave fra RUC (nr. 40 i rækken her i KVANT):

Breddeopgave 40. Elektrostatisk vægt

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra sommereksamen 1997, nr. 40 i rækken her i KVANT):

Figuren viser en principskitse af en såkaldt elektrostatisk vægt:



Hvordan er sammenhængen mellem massen på vægtskålen og ladningerne på kondensatorpladerne, når vægten er i balance? Begrund svaret.

Løsning

Vi antager, at kondensatorpladernes udstrækning er stor i forhold til afstanden imellem dem. Så er det elektriske felt imellem pladerne tilnærmelsesvist homogent, idet der ses bort fra randeffekter. Ifølge Gauss lov anvendt på en flade omkransende en af pladerne fås feltet imellem pladerne da til at være:

$$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}, \quad (1)$$

idet Q er størrelsen af ladningerne på de to kondensatorplader, A deres areal og ε_0 dielektricitetskonstanten i vakuum. Og idet felterne fra ladningerne på de to plader ophæver hinanden uden for mellemrummet imellem pladerne.

Imellem pladerne forstærker felterne udgående fra de to plader hinanden med feltet givet ved ligning (1) som resultat. Styrken af det elektriske felt udgående fra hver enkelt af pladerne er derfor det halve af det i ligning (1). Hvorfor størrelsen af kraftpåvirkningen fra den ene plade på den anden er:

$$K = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0 A} \quad (2)$$

Hvis massen der skal vejes kaldes M , tyngdefeltstyrken g og vægtens to arme l_M og l_Q , er svaret på

opgaven derfor:

$$l_M M g = \frac{l_Q Q^2}{2\varepsilon_0 A}; \text{ eller } M = \frac{l_Q}{l_M} \frac{Q^2}{2g\varepsilon_0 A} \quad (3)$$

Kommentar

Jeg synes opgaven som breddeopgave betragtet er god af to grunde.

Den første grund er, at opgaven både lever op til at vedrøre en virkelig, ikke tænkt, problemstilling, og til at være formuleret i et nogenlunde dagligdags sprog, således at den nøjere præcisering af problemet i fysiske termer bliver et centralt punkt ved opgaveløsningen. Og det til trods for, at det er en opgave vedrørende elektrodynamik, hvor det erfaringsmæssigt er sværere end i f.eks. mekanik eller termodynamik at undgå at forfalde til internt formulerede problemer. Som det f.eks. er tilfældet for opgaven om telefonstrømme i sidste nummer af KVANT.

Den anden grund til, at jeg synes, at det er en god breddeopgave, er, at den lader sig besvare mindre rigtigt uden at besvarelsen er helt forkert. Mere hyppig end eksamensbesvarelser svarende til ovenstående var, at kraftpåvirkningen fra den ene plade på den anden fandtes ved at gange feltet fra ligning (1) med Q , således at svaret på opgaven kom til at afvige fra ligning (3) med en faktor $1/2$. Og der var også forkerte, men dog meningsfulde besvarelser, hvor Coulombs lov blev anvendt for den gensidige tiltrækning pladerne imellem som om de var punktførmige. For mig at se er det med til at holde undervisningen på sporet, når de svagere eksamenspræstationer demonstreres ved ufuldstændige bud på løsning af problemer hørende til dagsordenen, frem for at den svagere gennemførelse finder sted ved besvarelse af hjælpespørgsmål delvis uden for dagsordenen og konstrueret med henblik på niveaudifferenciering.

Breddeopgave 41. Rulning

Inden næste nummer af KVANT udkommer, kan læserne eventuelt overveje løsningen til denne opgave fra breddekurset på RUC (fra sommereksamen 2006, nr.41 i rækken her i KVANT):

En hul og en massiv cylinder med ens masser og ens radier ruller med samme fart hen imod et skråplan. Hvad er forholdet imellem, hvor langt de ruller op af skråplanet? Begrund svaret.

Løsning og kommentar bringes i et kommende nummer.

Foreningsnyt – foredrag i foråret

Foredragskalender

Dato	Tid	Foredragstitel	Foredragsholder	Forening
Jan.				
24/1	19.30	Fra de mindste partikler til de største strukturer	Peter H. Hansen	SNU
31/1	19.15	Mørkt stof	Kristian Pedersen	AS (Kbh)
Feb.				
7/2	19.00	Mørkt stof	Kristian Pedersen	AS (Årh)
11/1	17.00	On the relationship between plane and solid geometry	Paolo Mancosu	VHS
14/2	19.30	Livet i undergrunden	Bo Barker Jørgensen	SNU
21/2	19.15	Stjerneskelv	Jørgen Christensen-Dalsgaard	AS (Kbh)
28/2	19.00	Stjerneskelv	Jørgen Christensen-Dalsgaard	AS (Årh)
Mar.				
7/3	19.30	Lys på det mørke univers	Anja C. Andersen	SNU
14/3	19.15	Meteoritter. Sten fra før verden blev til	Henning Haack	AS (Kbh)
21/3	19.00	Meteoritter. Sten fra før verden blev til	Henning Haack	AS (Årh)
Apr.				
4/4	19.15	Astronomi i rumalderen	Niels Lund	AS (Kbh)
4/4	19.30	Myresamfund: Social evolution uden kultur	Jacobus J. (Koos) Boomsma	SNU
11/4	19.00	Astronomi i rumalderen	Niels Lund	AS (Årh)
Maj.				
2/5	19.15	Exoplaneter og liv i Universet	Anja C. Andersen	AS (Kbh)
9/5	19.00	Exoplaneter og liv i Universet	Anja C. Andersen	AS (Årh)
9/5	19.30	Modeller af liv	Kim Sneppen	SNU

AS (Kbh): Astron. Selskab (København), Aud. 4, H.C. Ørsted Inst., Universitetsparken 5, 2100 Kbh. Ø (www.astronomisk.dk).

AS (Årh): Astron. Selskab (Århus), Matematisk Inst., Aarhus Universitet, Ny Munkegade, Bygn. 1530, Aud. D2, 8000 Århus C.

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

VHS: Videnskabshist. Selskab, H.C. Ørsted Inst., aud. 10, Universitetsparken 5, 2100 Kbh Ø (www.math.ku.dk/videnskabshistorie).

Astronomisk Selskab

Temaet for efterårets foredragsrække er *Dansk astronomi i kikkerten*. I kølvandet på det internationale astronomiår 2009, fulgte bogen *Dansk astronomi i kikkerten*. Heri fortæller en række førende danske forskere om deres forskning, og bogen giver dermed et indblik i, hvad der arbejdes med indenfor dansk astronomi i dag.

Vi har inviteret 5 af disse forskere til at holde et foredrag, baseret på deres bidrag til bogen. De fem foredrag omhandler derfor en bred vifte af topaktuelle emner, som der forskes aktivt i, på de danske universiteter. Bogen vil kunne købes ved foredragene for 200 kr. Normalprisen er 245 kr.

Bemærk at foredragene i København afholdes et nyt sted: H. C. Ørsted Institut og ikke som tidligere i Rockefellerkomplekset. Foredragene afholdes i samarbejde mellem Astronomisk Selskab, Tycho Brahe Planetarium og Folkeuniversitetet. De er tilrettelagt af Anja C. Andersen, Torben Arentoft og Michael Quaade.

Der afholdes et astronomisk week-endarrangement på Stevns 1-3. april. Se hjemmesiden for flere detaljer: www.astronomisk.dk.

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Forårets tema er: "Nyere eliteforskningscentre", først og fremmest centre med finansiering fra Grundforskningsfonden. Følgende centre er repræsenterede: "Eksperimentel Subatomar Fysik", Niels Bohr Institutet, "Geomikrobiologi", Århus Universitet, "Dark Cosmology Centret", Niels Bohr Institutet, "Center for Social Evolution", Københavns Universitet og "Center for Biokompleksitet", Niels Bohr Institutet.

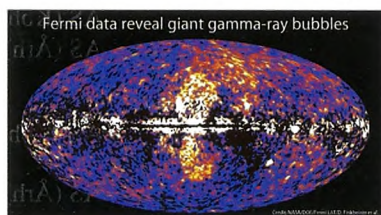
Alle interesserede er velkomne til selskabets foredrag – det er ingen forudsætning, at man er medlem. Læs mere om selskabets foredrag på: www.naturvidenskab.net. Foredragene holdes på Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, København K.

Videnskabshistorisk Selskab

Foredragene afholdes på H.C. Ørsted Institut i København. Kl. 16.30 byder selskabet på kaffe, te og frugt i Institut for Matematiske Fags frokoststue, rum 04.4.19 på 4. sal. Man er velkommen til at gå med ud at spise med foredragsholderen efter foredraget, på egen regning.

Gigantiske gamma-bobler i Mælkevejen

NASA's gammastrålingsrumteleskop Fermi har opdaget en hidtil ukendt struktur omkring centrum af Mælkevejen.



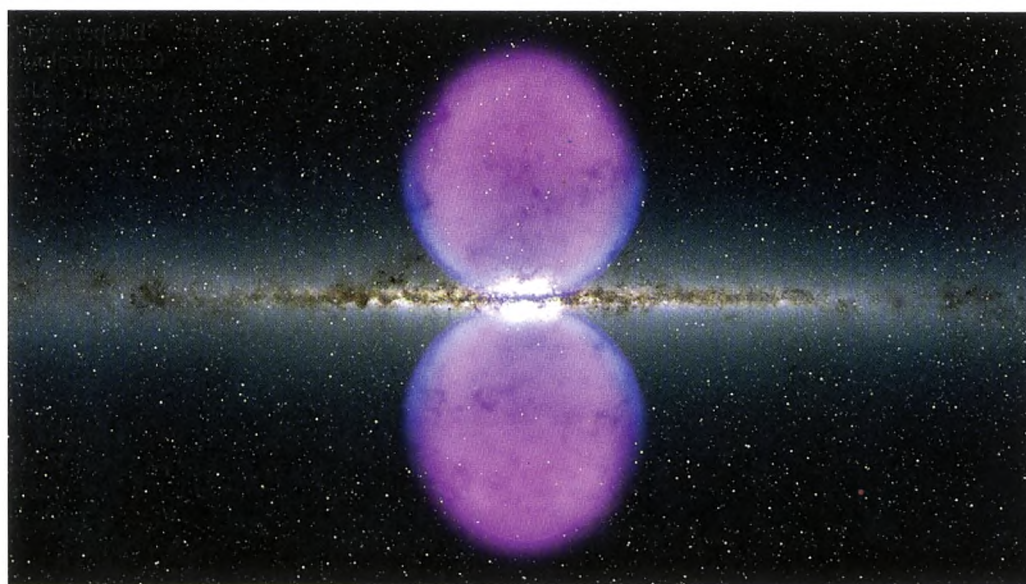
Fermi's "all-sky"-kort ved energier fra 1-10 GeV. Den gigantiske røntgenstrålestruktur blev opdaget ved at bearbejde data herfra (NASA).

Opdagelsen kan beskrives som to gigantiske bobler af gammastråling, der ligger på hver sin side af Mælkevejen – vist på illustrationen fra NASA (nederst). Hver af boblerne strækker sig ca. 25.000 lysår ud fra Mælkevejen og har altså

en samlet udstrækning på 50.000 lysår, hvilket skal ses forhold til Mælkevejens samlede diameter på 100.000 lysår.

Astronomerne er mildest talt forundrede over de nye observationer, og de har påbegyndt en analyse, der skal klarlægge hvordan boblerne er opstået. Det står klart at udsendelsen af boblerne er et resultat af et voldsomt udbrud i energi. En mulig kilde kunne være, at boblerne er resultatet af to modsatrettede energirige jetstråler fra det supermassive sorte hul i centrum af Mælkevejen. Der er ingen tegn på nogen nuværende jetstråleaktivitet fra vores galaktiske centrum, men boblerne kan være millioner af år gamle. En anden mulighed er, at gammastrålingsboblerne er blevet dannet ved en voldsom episode med måske mange tunge stjernefødsler.

Kilder: www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/new-structure.html; www.tycho.dk/article/view/6143



En kunstners illustration af de to gammastrålingsbobler. De blå buer på boblernes kanter er tidligere blevet observeret i røntgenstråling af den tysklejede ROSAT-mission i 1990'erne. Gammastrålingen, der er observeret af Fermi (vist med magenta), er den mest energirige form for elektromagnetisk stråling vi kender (NASA).