

Kosmologi, kvantekosmologi og Einsteins almene relativitetsteori

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

Den klassiske almene relativitetsteori

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

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

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

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

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

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

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

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

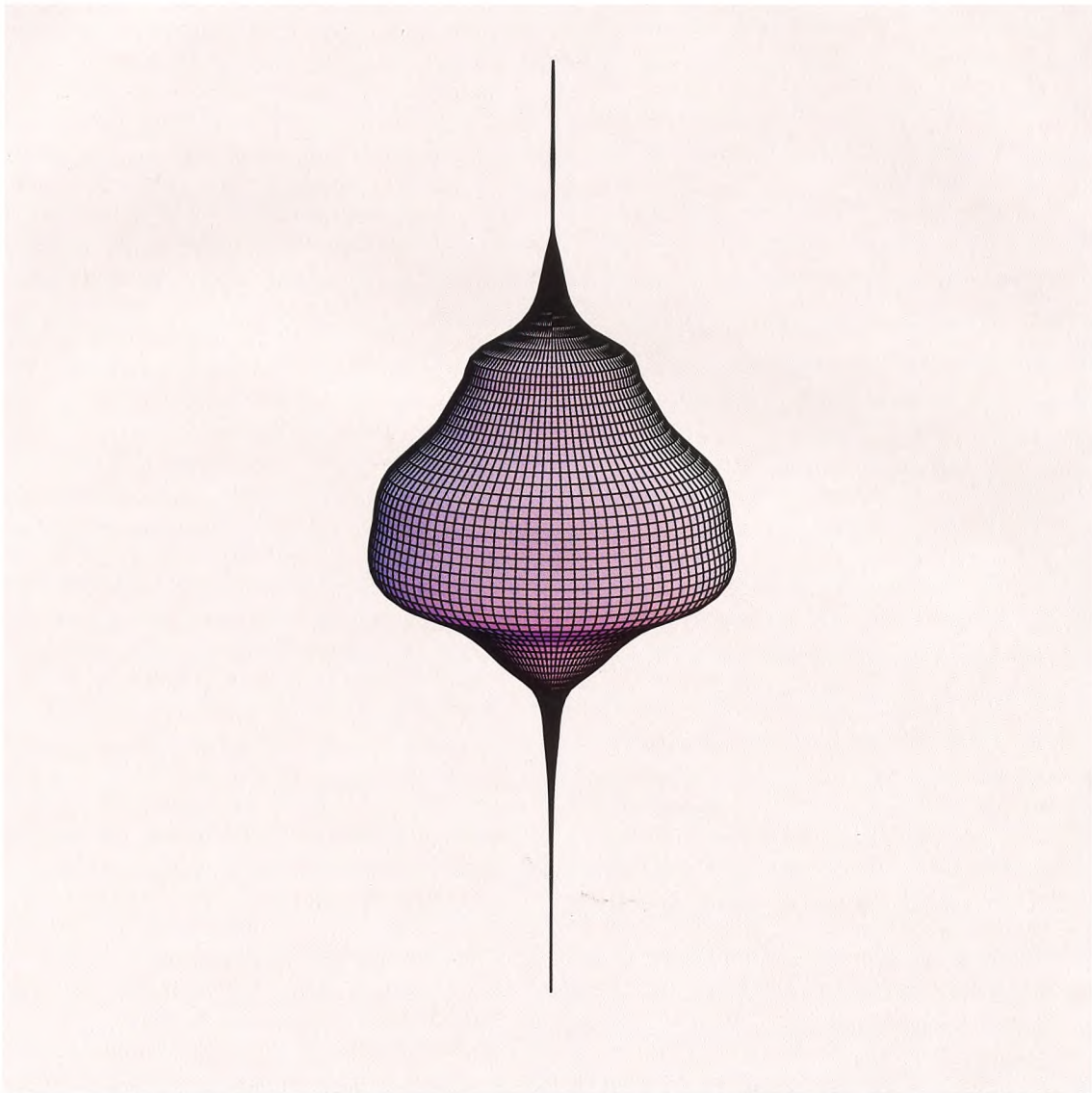
I den ekstreme inflations-udvidelsesfase opstår der kvantemekaniske fluktuationer i energitætheden, der ultimativt fører til galaksedannelse, fordi disse små-skala kvantemekaniske effekter blæses eksponentielt op. Det er et interessant træk ved denne teori at de største objekter i Universet, galakser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

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

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

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

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



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

Kvantemekanik og den almene relativitetsteori

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

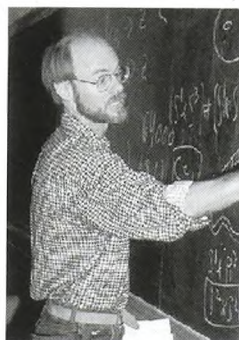
- (1) strengteorien giver naturligt en ti-dimensional verden, ikke en fire-dimensional verden
- (2) stof og vekselvirkninger svarer ikke til det vi observerer i laboratoriet.

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

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

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

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



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



Poul Olesen underviser i almen relativitetsteori og kosmologi.

Litteratur

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

PFEIFFER VACUUM

Forskerens

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

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

Helium læksøger QualyTest™

Mød os på DFS årsmøde

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