

# Kompendium til Kosmologi



## Indhold

1. Hvad er kosmologi .....	1
2. Einsteins generelle relativitetsteori .....	1
2.1 Einsteins ækvivalensprincip.....	3
2.2 Eksperimentel bekræftelse af den generelle relativitetsteori .....	4
3. Astronomiske observationer og afstande .....	6
3.1 Verdensrummet er ikke uendeligt og homogent.....	9
4. Rød-forskydning .....	10
5. Universet udvider sig. Det kosmologiske princip.....	12
6. The Big Bang .....	14
7. Kritisk densitet.....	14
8. Mørkt stof, kvasarer, sorte huller (og anden sort mystik i universet) .....	16
8.2 Kvasarer .....	18
8.3 Neutronstjerner og sorte huller .....	19
8.4 Sorte huller.....	19
9. Partikelfysik. Vidnesbyrd om Big Bang. Den kosmiske baggrundsstråling.....	22
9.1 De 4 vekselvirkninger:.....	22
9.2 Elementarpartikler og Quarks .....	23
9.3 Universets udvikling i billeder.....	26
10. Vidnesbyrd om Big Bang. Baggrundsstrålingen.....	28

## 1. Hvad er kosmologi

Kosmologien beskæftiger sig med studiet og beskrivelsen af universet i stor skala og gennem lang tid – fra begyndelsen (hvis en sådan findes) til i dag.

Kosmologien er uløselig knyttet til astronomien gennem observationer af planeterne, solen, stjernerne og galakser, uden hvilken en naturvidenskabelig beskrivelse er mulig.

De metafysiske (filosofiske/spekulative og science fiction) beskrivelser, som var fremherskende før Newton, og som stadig findes, kan naturligvis være fascinerende, men de er ikke relevante for den teoretiske fysik.

Kosmologien er også knyttet tæt til astrofysikken, der beskæftiger sig himmellegemernes bevægelse, hovedsagelig beskrevet ud fra Newtons love og Newtons gravitationslov, samt stjernernes udstråling og energiforhold.

Det sidste er baseret på kernereaktioner i stjernernes indre. Endelig beskæftiger astrofysikken sig med en kortlægning og analyse af den elektromagnetiske stråling og partikelstrålingen (den kosmiske stråling), der findes i universet.

Den kosmiske stråling blev først observeret i 1930 af Anderson, der samtidig opdagede positronen. Positronen blev i øvrigt samme år forudsagt teoretisk af Dirac i hans relativistiske formulering af kvantemekanikken.

Det er den kosmiske stråling, der er årsagen til *nordlys*, idet meget energirige ladede partikler i den kosmiske stråling rammer jorden vinkelret på jordens akse. Nær de magnetiske poler, vil partiklerne afbøjes og bevæge sig i cirkulære baner. Med deres sammenstød med atmosfærens atomer, vil der blive udsendt (nord)lys givet ved Bohrs frekvensbetingelse:  $h\nu = E_i - E_j$

Efter den moderne anskuelse (efter 1960), er universet skabt ud af et punkt (en singularitet i rummet med uendelig stor masse og energi) i en ”vakuums eksplosion” kaldet ”The Big Bang”. På denne måde bliver kosmologien også knyttet sammen med partikelfysikken (højenergifysikken).

Ifølge Standard Modellen i partikelfysikken (efter 1975) er alle kendte partikler enten hadroner eller leptoner. Hadronerne, som har stærke-, svage- og elektromagnetiske vekselvirkninger, er bundne tilstande af de såkaldte quarks (som dog aldrig er observeret som frie partikler).

Leptonerne har kun svage og elektromagnetiske vekselvirkninger (nogle har kun svage).

Ifølge Standard Modellen findes der 6 fundamentale leptoner og 6 fundamentale quarks, samt deres anti-partikler. (Mere herom senere).

## 2. Einsteins generelle relativitetsteori

Efter 1915, da Einstein havde fremsat sin generelle relativitetsteori, har man imidlertid fået en alternativ beskrivelse af rummet og fænomenet *gravitation*.

I den generelle relativitetsteori kan rummet *ikke* overalt beskrives ved den almindelige (Euklidiske) geometri, dvs. et tre-retvinklet koordinatsystem, hvor forholdet mellem omkredsen og diameteren af en cirkel altid er lig med  $\pi$ , og hvor vinkelsummen af en trekant altid er  $180^\circ$ .

Endvidere indgår *tiden* på lige fod med de 3 rumlige koordinater ( $x, y, z$ ), som det er kendt fra den specielle relativitetsteori, (når hastighederne nærmer sig lysets hastighed  $c$ ).

En ”begivenhed” i rummet på stedet ( $x, y, z$ ) og til tiden  $t$ , beskrives i et 4-dimensionalt koordinatsystem ved fire koordinater ( $ct, x, y, z$ ), som i almindelighed skrives  $(x_0, x_1, x_2, x_3)$ .

I transformationsformlerne mellem en begivenhed set fra to iagttagere, der bevæger sig i forhold til hinanden indgår tiden på lige fod med de øvrige koordinater og sted og tid er blandet sammen, som det også er tilfældet i den specielle relativitetsteori.

I den sædvanlige geometri er kvadratet på den (infinitesimale) rumlige afstand mellem to punkter givet ved:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Denne afstand er en invariant, dvs. den er uafhængig af iagttageren og koordinatsystemet, og hvorvidt iagttageren bevæger sig eller ej.

I den specielle og generelle relativitetsteori er ”afstanden”  $ds$  mellem to begivenheder givet ved:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Dette er imidlertid også en relativistisk invariant, hvilket betyder, at ”rum-tidsafstanden” mellem to punkter i rum-tiden er den samme for alle iagttagere, mens den Euklidiske rumlige afstand ikke er det i den specielle relativitetsteori.

Nogle fremstillinger foretrækker at have  $ds^2$  med det modsatte fortegn, da det så er i overensstemmelse med den Euklidiske afstand når  $dt = 0$ . På den anden side er det anvendte  $ds^2$  ovenfor altid positivt for  $dt > 0$ , idet vi ved division med  $dt^2$  får:

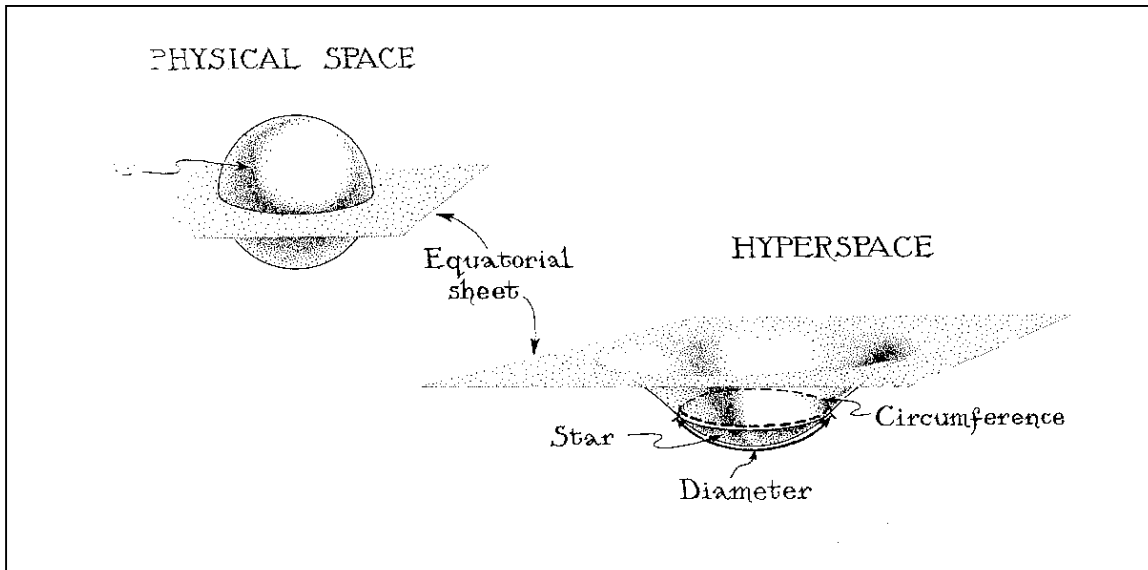
$$\frac{ds^2}{dt^2} = c^2 - \frac{dx^2}{dt^2} - \frac{dy^2}{dt^2} - \frac{dz^2}{dt^2} = c^2 - v^2 > 0$$

For et signal, der bevæger sig langs  $x$ -aksen med lysets hastighed vil der gælde  $dx = cdt$ , og dermed  $ds = 0$ . I et henførelsessystem (inertialsystem), der følger med signalet, vil man derfor til stadighed befinde sig i det samme punkt af rum-tiden. Dette kan godt virke helt grotesk. For en iagttager der registrerer en foton udsendt fra en galakse 2 mia. lysår borte, vil de to begivenheder i en henførelsessystem, der følger med fotonen ske i det samme punkt af rumtiden!

Ifølge Einstein er rummet *krumt*. Det betyder, at det ikke overalt kan beskrives ved den almindelige (Euklidiske) geometri.

Den afgørende forskel på den Newtons og Einsteins teori er at det som vi opfatter som legemers bevægelse og accelerationer, (som følge af den gravitationelle tiltrækning), i Einsteins teori beskrives, (rent matematisk) som om legemerne blot følger den ”korteste vej” i rum-tiden - i et krumt rum. Dette indebærer, at rum-tiden ”krummer” omkring massive legemer.

Nedenfor er vist en todimensional analogi til et 3-dimensionalt krumt rum, i et matematisk hyper-rum, der visualiserer dette.



se er  
mer.  
fter, men

## 2.1 Einsteins ækvivalensprincip

Gravitationen (og kun gravitationen) påvirker alle legemer på den samme måde. Alle legemer får den samme acceleration. F.eks. har astronauter, der kredser om jorden i et rumskib ingen mulighed for at afgøre, hvorvidt de befinder sig i et inertialsystem (som bevæger sig jævnt og retlinet) eller er accelererede, hvis de ikke ser udenfor rumskibet. Forsøg lavet i rumsonden, vil følge Newtons love på samme måde, som hvis de blev udført i et inertialsystem.

For at dette er korrekt, er det vigtigt at "den træge masse", som indgår i Newtons 2. lov, er den samme som "den tunge masse", der indgår i Newtons gravitationslov.

*Dette kaldes det svage ækvivalensprincip.*

*Det stærke ækvivalensprincip* udsiger, at bevægelse, som skyldes gravitation er ækvivalent med acceleration, som følge af "et frit fald" i en krum (ikke Euklidisk) rum-tid.

Ikke Euklidisk geometri er velkendt i den (bestemt ikke ukomplicerede) gren af matematikken, der kaldes differentialgeometrien, og som er geometri på en ikke plan flade.

Mest kendt er geometri på en kugle. (sfærisk geometri). En sådan flade er imidlertid indlejret i et Euklidisk rum, og matematikken, der anvendes bygger på Euklidisk geometri.

Hvis man derimod er bundet til kugleoverfladen, vil man have en ikke Euklidisk geometri, og hvor vinkelsummen i en trekant altid er større end  $180^0$ , og "rette linier" (korteste vej mellem to punkter) er storcirkler, dvs. en snitkurve mellem kugleoverfladen og en plan, som går gennem kuglens centrum.

Dette er sådan set nemt nok at forstå, mens det er langt vanskeligere at forestille sig, at vores rum er et ikke Euklidisk rum, men (jævnfør figuren ovenfor) er indlejret i et rum med 4 dimensioner.

Og hvad mener man i det hele taget med, at rummet er "krumt"? I en fysisk omverden følger lyset "rette linier", så:

*de rette linier i rum-tiden er simpelthen defineret ved den vej som lyset følger.*

Lysets vej nær massive objekter er derfor *ikke* rette linier i den Euklidiske geometri.

Det er et af de allermest fundamentale principper i fysikken ("Principle of least time"), at en fri bevægelse mellem to punkter, altid sker langs den bane, der tager den korteste tid. Den korteste vej mellem to punkter i en vilkårlig (ikke plan) flade kaldes en *geodæt*. På en kugle er geodæterne storcirkler.

Geodæterne ("de rette linier") i rum-tiden er fastlagt af den vej som lyset følger. Om rummet som helhed også er krumt eller fladt, kan man ikke afgøre i dag.

Man skal ikke opfatte dette sådan, at Newtons teori er forkert. Placeringen af Newtons love i den generelle relativitetsteori er tværtimod et eksempel på det korrespondensprincip, som først er blevet formuleret af Bohr.

En "ny teori", skal indeholde den allerede kendte og empirisk underbyggede teori, som et specialtilfælde, således som det også er tilfældet for den specielle relativitetsteori.

Einsteins teori giver de samme resultater, som Newtons gravitationslov, når hastighederne er små sammenlignet med lysets hastighed  $c$ , og hvis man ikke er for tæt på meget massive legemer. Man kan derfor opfatte den generelle relativitetsteori, som en teori, der har den klassiske fysik som et (overordentligt vigtigt) specialtilfælde.

Mens Newtons gravitationslov matematisk set er overordentlig simpel, så er den generelle relativitetsteori næsten grotesk matematisk kompliceret, og egentlige beregninger er overordentlig vanskelige (umulige). I 1916 lykkedes det dog den tyske matematiker Karl Schwarzschild (mens han var officer i 1. verdenskrig) at løse Einsteins ligninger for en kuglesymmetrisk massefordeling, hvor han også forudsagde eksistensen af sorte huller. (Desværre blev han dræbt året efter).

For alle beregninger af planeters og stjerners bevægelser i galakserne, kan man uden indskrænkning stadig anvende Newtons love.

Men den Newtonske mekanik er pr. definition Euklidisk, og vil aldrig kunne forudsige et endeligt – eller "krumt" univers. Hvis man tror på at universet er endeligt og krumt, (hvad alt tyder på), og som har været den etablerede opfattelse siden 1960'erne, så er man tvunget til (ind imellem) at beskæftige sig med den almene relativitetsteori som grundlaget for Kosmologien.

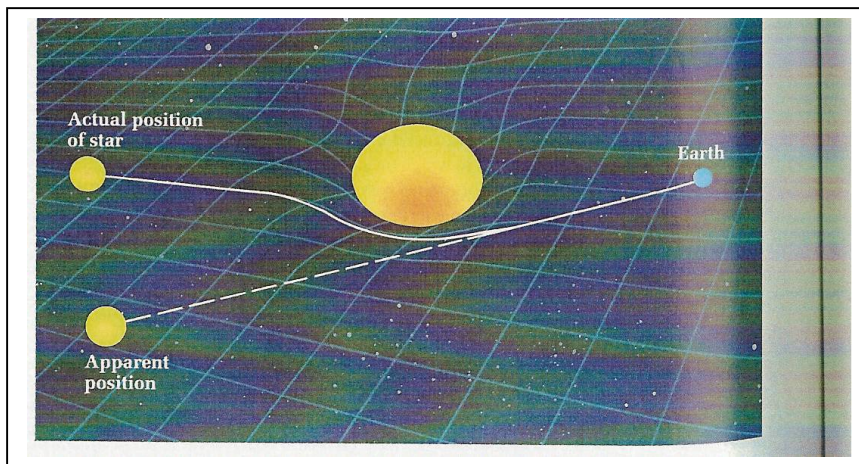
## 2.2 Eksperimentel bekræftelse af den generelle relativitetsteori

På grund af de meget små afvigelser, som den generelle relativitetsteori har i forhold til Newtons mekanik, (og den Euklidiske geometri), (når vi er langt borte fra områder med meget stor krumning, som f.eks. neutronstjerner og sorte huller), så er teorien vanskelig at få bekræftet direkte. Einstein nævnte selv 3 områder, hvor man kunne få teorien afprøvet.

1. **Merkurs perihelium-drejning.** (Perihelet er det punkt af den elliptiske bane, hvor en planet er nærmest solen). Merkurs bane har en stor eccentricitet i forhold til de andre planeter. Imidlertid forskyder Merkurs perihelium sig en ganske lille smule som følge af påvirkningen fra de andre planeter. Astronomer har længe målt perihelium-drejningen, men den beregnede værdi ud fra Newtons love afveg fra målingerne. Einstein viste imidlertid, at bidraget - hvis man tog hensyn til den almene relativitetsteori - netop svarede til forskellen på en målte og beregnede værdi af perihelium-drejningen.

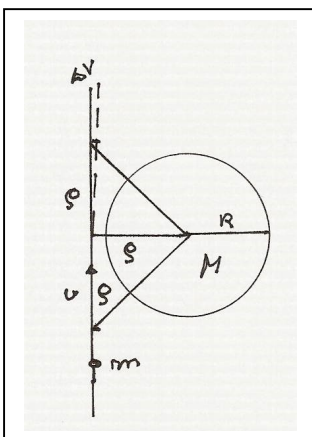
2. **Den gravitationelle rød-forskydning**, når et meget massivt legeme udsender lys. På samme måde som et massivt legeme mister kinetisk energi, når det opsendes fra jorden vil lyset miste energi og dermed få større bølgelængde, når det udsendes fra et meget massivt legeme. Effekten er dog kun lille for f.eks. solen, mens den er uendelig stor for et sort hul, så lyset aldrig undslipper.
3. **Når lys passerer et meget massivt legeme** (en stjerne, en galakse eller et sort hul), vil lyset blive afbøjet "på samme måde" som det er tilfældet for et massivt legeme. Dette skyldes krumningen af rummet omkring det massive legeme.

Figuren nedenfor er stærkt forteget. Afbøjningen for lys, der passerer tæt på solen er et par bue sekunder. (Endvidere er det jo umuligt, at se lyset fra stjerne, når man ser mod solen).



Det lykkedes imidlertid for den engelske astronom og astrofysiker A. S. Eddington (som i 1930'erne blev omtalt som en af de kun 3 personer i verden, der helt forstod Einsteins teori), i et meget berømt eksperiment, at måle lyset fra en stjernes afbøjning, når det passerede solen, under en total solformørkelse på øen Principe ud for Afrika den 29. maj 1919.

Umiddelbart skulle man ikke tro, at Newtons gravitationslov ville forudsige nogen afbøjning for et legeme, der har hvilemassen nul, men på samme måde, som man kan bestemme radius af et sort hul, ved en ikke relativistisk beregning af en relativistisk effekt (se herom senere), så kan man også i dette tilfælde lave en beregning på grundlag af Newtons gravitationslov.



Beregningen af afbøjningen, når et legeme med masse  $m$  og hastighed  $v$  passerer et legeme (solen) med masse  $M$  i afstanden  $\rho$  (som kaldes for stødparameteren) er matematisk set identisk med Rutherfords beregning af alfapartiklernes afbøjning ved sammenstøde med en Au-kerne. Skal beregningen udføres eksakt, er det lidt matematisk kompliceret, men det viser sig at man opnår det samme resultat ved en forsimplet beregning. Man antager således, at kraften kun virker på et stykke som er  $2\rho$ , men også at kraften er konstant den samme, som når partiklen passerer i afstanden  $\rho$ .

$$F = G \frac{mM}{\rho^2} \quad \Delta s = 2\rho \quad \Delta t = \frac{\Delta s}{v} = \frac{2\rho}{v}$$

Afbøjningen (i radian) kan beregnes som:  $\alpha = \frac{\Delta v}{v}$

$$\text{Accelerationen } a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F}{m} = \frac{GM}{\rho^2} \Rightarrow \Delta v = \frac{GM}{\rho^2} \Delta t = \frac{GM}{\rho^2} \frac{2\rho}{v} = \frac{2GM}{\rho v}$$

Heraf finder man: 
$$\alpha = \frac{\Delta v}{v} = \frac{2GM}{\rho v^2}$$

Erstatter man nu  $\rho$  med solens radius  $r_{sol}$ , giver det formelen:

$$\alpha = \frac{\Delta v}{v} = \frac{2GM}{r_{sol} v^2}$$

Det, som man skal bemærke ved Newtons teori er, at afbøjningen er uafhængig af massen  $m$ , idet den ikke indgår i resultatet. Erstatter vi nu (ubekymret) hastigheden  $v$  med lysets hastighed  $c$ , får man en urelativistisk beregning af lysets afbøjning.

$$\alpha = \frac{2GM}{r_{sol} c^2} \quad \alpha = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2,0 \cdot 10^{30}}{6,95 \cdot 10^8 \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2} = 4,27 \cdot 10^{-6} = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ radian}$$

Da 1 buesekund =  $1/3600^0 = 2,78 \cdot 10^{-4}$  grad, forudsiger Newtons (tilpassede) teori en afbøjning på knap et buesekund.

Det interessante er, at afbøjningen er af den samme størrelsesorden, som en beregning ud fra den generelle relativitetsteori, der imidlertid (og heldigvis) forudsiger den dobbelte afbøjning.

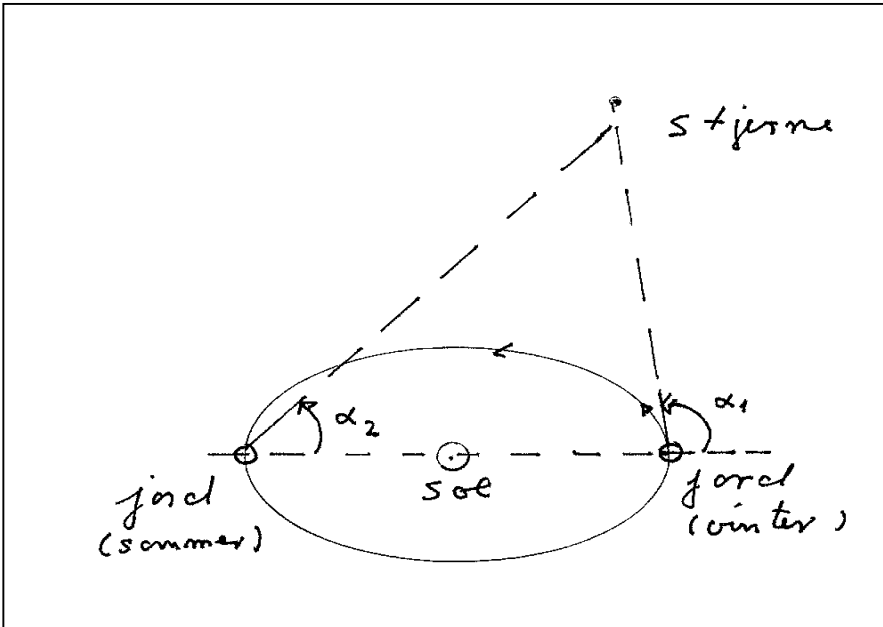
Som det fremgår af størrelsen af afbøjningen, så krævede det overordentlig følsomme kikkert observationer af den observerede sigtelinie til stjernen, men Eddington konkluderede alligevel, at man havde målt den dobbelte afbøjning af den Newtonske, og dermed fået bekræftet Einsteins teori. (Målinger foretaget i Brasilien, synes dog at hælde mere til den Newtonske værdi, men dette druknede totalt i larmen fra Eddingtons påståede succes).

### 3. Astronomiske observationer og afstande

Vi vender os nu til den astronomiske del af kosmologien. Fra oldtiden har man observeret, at der fandtes to typer af "stjerner". "Vandrestjernerne", som er planeterne, der bevægede sig blandt de øvrige stjerne og fiksstjerne, der fulgte med jordens rotation, men var ubevægelige gennem året.

Tidligere (i 200 år), var et af hovedargumenterne mod den Heliocentriske Verdensopfattelse (planterne bevæger sig i elliptiske baner omkring solen) var at man ikke kunne observere nogen ændring i sigtelinierne til fiksstjernerne, som det skulle være tilfældet på grund af jordens bevægelse omkring solen.

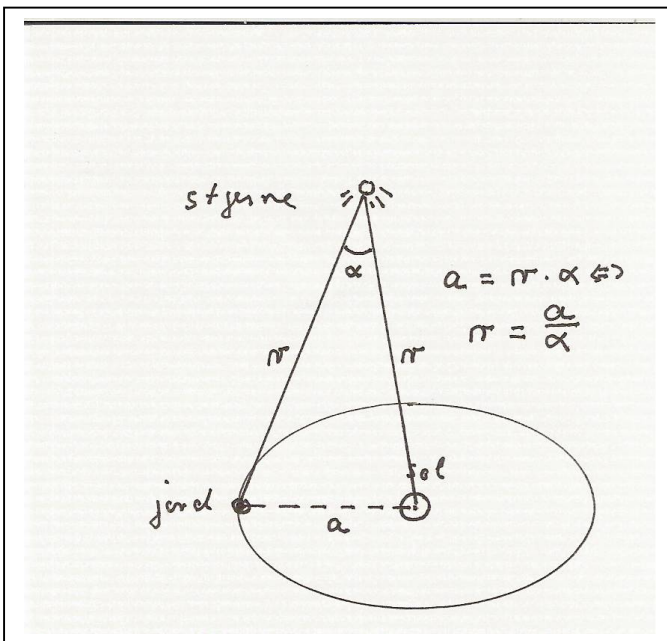




Ændringen af retningen af *sigtelinien* til en stjerne, som følge af jordens bevægelse om solen, kaldes for **stjernens parallakse**.

På figuren er parallaksen  $\alpha$  den øverste vinkel i trekanten. Det ses, at  $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ .

Efter at Kopernikus, Galilei og underbygget af Kepler havde beskrevet det Heliocentriske verdensbillede, forsøgte adskillige astronomer op gennem 1700 og 1800 tallet at måle parallaksen for de nærmeste/mest lysende stjerner - men uden resultat.



Dette kunne have to årsager. Enten var det Heliocentriske verdensbillede forkert, eller også var stjernerne langt fjernere end man havde regnet med.

Først i 1838 lykkedes det for den tyske astronom og kikkert konstruktør F.W. Bessel med nye præcisionskikkerter at måle en parallelakse for Sirius B., som befinder sig 4,26 lysår borte.

Afstandsbestemmelse ved parallakse, har ført til afstandsenheden 1 **parsec**, som stadig anvendes i astronomien.

Der gælder som bekendt at buen  $a$ , svarende til vinklen  $\alpha$  (målt i radian) er lig med radius  $r$  gange  $\alpha$ .

$$a = r \alpha.$$

Måler man  $\alpha$  og kender  $a$ , så kan man bestemme afstanden  $r$ .

1 parsec er defineret som den afstand, hvorunder jordens halve storakse  $a$  ses under en vinkel på 1 buesekund =  $1/3600^\circ$ .

$$1 \text{ buesekund} = \frac{1}{3600} \frac{\pi}{180} = 4,848 \cdot 10^{-6} \text{ radian.}$$

Sætter vi  $a = 149,6$  mill  $km$  får man:

$$1 \text{ parsec} = \frac{a}{\alpha} = \frac{149,6 \cdot 10^9 \text{ m}}{4,848 \cdot 10^{-6}} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

Da  $1 \text{ lysår} = c \cdot 1 \text{ år} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$ , finder man, at

$$1 \text{ parsec} = 3,26 \text{ lysår}$$

Det kan oplyses, at den nærmeste stjerne Alfa-Centauri har en parallakse svarende til en afstand på 1,3 parsec (4,22 lysår).

For stjerner, der befinder sig mere end ca. 100 lysår borte er afstandsbestemmelse ved parallakse målinger ikke længere muligt. (Der findes galakser, som er milliarder af lysår borte).

For fjerne objekter, anvender man en anden metode, kaldet *Cepheide-metoden* og efter 1940 den såkaldte fotometriske metode.

Nogle stjerner har en pulserende lysstyrke, der afhænger af pulsens frekvens.

Disse kaldes for Cepheider (opkaldt efter navnet på den først observerede "Cepheide").

For Cepheider, hvor afstandsbestemmelse kan bestemmes ved parallaksemålinger, har man fundet det bemærkelsesværdige, at frekvensen på entydig vis kun afhænger af stjernes absolutte lysstyrke. Med kendskab til denne sammenhæng har man herefter kunnet bestemme afstanden til Cepheider, hvor parallakse bestemmelse ikke er mulig. Ud fra frekvensen kan man nemlig regne sig frem til stjernes absolutte lysstyrke for derefter at måle den tilsyneladende lysstyrke direkte.

Den absolutte og den tilsyneladende lysstyrke er nemlig knyttet sammen af afstandskvadratloven.

Hvis nemlig  $L_{abs}$  og  $L_{obs}$  betegner den absolutte og den tilsyneladende (observerede) lysstyrke og  $r$  er afstanden til stjernen, gælder der: ( $4\pi r^2$  er overfladen af en kugle med radius  $r$ ). Uden absorption vil den samme mængde lys, som udsendes passerer enhver kugleflade med lyskilden i centrum)

$$L_{obs} = \frac{L_{abs}}{4\pi r^2}$$

Hvorafter man kan beregne afstanden  $r$  til stjernen.

Det var netop denne metode, som Edwin Hubble anvendte, da han i 1920'erne bestemte samvarende værdier af afstandene til 18 galakser og deres hastigheder.

Hastigheden blev bestemt ved at måle rød-forskydningen i stjernernes spektre.

Den **fotometriske metode**, går ud på at bestemme spektret fra fjerne objekter, kompenseret for absorptionen fra interstellar gas og så finde en stjerne med det samme spektrum (absolut lysstyrke), som man kender afstanden til, måle de tilsyneladende lysstyrker for begge stjerner og så anvende afstandskvadratloven.

Hvis stjernerne i afstande  $r_1$  og  $r_2$  har samme absolutte lysstyrke  $L_{abs}$ , vil der nemlig for de *tilsyneladende* lysstyrker  $L_1$  og  $L_2$  ifølge afstandskvadratloven gælde:

$$L_1 = \frac{L_{abs}}{4\pi r_1^2} \quad \text{og} \quad L_2 = \frac{L_{abs}}{4\pi r_2^2}$$

Heraf følger

$$L_1 4\pi r_1^2 = L_2 4\pi r_2^2 \quad \Rightarrow \quad r_2 = r_1 \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

### 3.1 Verdensrummet er endeligt og homogent

Helt op til midten af 1950'erne, var det den almindelige opfattelse at verdensrummet altid havde eksisteret, at det var uendeligt, homogent i galaktisk skala og statisk (*steady-state* model). Før Hubbles observationer, var der heller ikke noget eksperimentelt vidnesbyrd om det modsatte. Der var dog to alvorlige indvendinger mod en "steady state" model af universet.

For det første, som Einstein og andre havde bemærket: Hvis gravitationsloven havde uindskrænket gyldighed, også på kosmologiske afstande, så måtte universet nødvendigvis trække sig sammen på grund af gravitationen, og dette ville stride mod forestillingen om et statisk univers.

Af samme grund indførte Einstein den såkaldte *kosmologiske konstant*, som var en korrektion til gravitationsloven og som forårsagede en frastødning ved galaktiske afstande.

Som altid i fysikken, så bryder man sig ikke om et teoretisk begreb, som ikke har andre fremtrædelsesformer, end at forklare en uoverensstemmelse med observationer.

Einstein kaldte senere "den kosmologiske konstant" for den største fejltagelse i sit liv. Alligevel spøger "den kosmologiske konstant" stadig i litteraturen, sammen med mørkt stof og andre ikke observerbare størrelser.

Men allerede i 30'erne var man på sporet af, en klar uoverensstemmelse mellem galaksernes rotationshastigheder og mængden af observerbart stof. Det var et faktum, at accelerationerne i bevægelsernes var alt for store til at kunne forklare ud fra det observerbare stof. Herefter opstår teorien om det "mørke stof". Mørkt stof har siden været en accepteret del af kosmologien, uden man nogensinde er kommet nærmere til en forståelse af hvad mørkt stof er eller dets oprindelse.

Der er en anden og mere konkret grund til at universet ikke er uendeligt. Det er ikke så svært at vise, at hvis universet var uendeligt og homogent, (det vil sige den samme tæthed overalt af galakser) så ville himlen ikke være sort. De uendelig mange stjerner ville tilsammen give et klart univers og ikke et sort univers.

Lad os antage, at tætheden, dvs. antallet af stjerner svarende til f.eks. 1 kubikparsec er  $n_s$ . Og lad os antage at den gennemsnitlige luminositet (udsendt energi pr. sek.) er  $L_s$ . (Solens luminositet er  $L_{sol} = 3.827 \cdot 10^{26} W$ )

Ifølge afstandskvadratloven vil intensiteten  $I_r$  fra en stjerne i afstanden  $r$  være:  $I_r = \frac{L_s}{4\pi r^2}$

Vi betragter nu et vilkårligt punkt  $P$  i rummet. I dette punkt vil vi udregne intensiteten fra de uendelig mange stjerner i verdensrummet.

Dette gør vi ved at dele verdensrummet op i kugleskaller med centrum i  $P$ , radius  $r$  og infinitesimaltykkelse  $dr$ .

Rumfanget  $dV$  af en sådan kugleskal er overfladen  $4\pi r^2$  gange tykkelsen  $dr$ .  $dV = 4\pi r^2 dr$ .

Der er derfor  $dN = n_s dV = n_s 4\pi r^2 dr$  stjerner i kugleskallen, som vil bidrage med en intensitet (ifølge afstandskvadratloven, da de alle har samme afstand til  $P$ ).

$$dI = I_r dN = I_r n_s 4\pi r^2 dr = \frac{L_s}{4\pi r^2} 4\pi n_s r^2 dr = L_s n_s dr$$

Skal man bestemme intensiteten fra alle universets stjerner, skal man blot integrere dette udtryk fra

en minimum afstand  $r_{min}$  til  $\infty$ .  $I = L_s n_s \int_{r_{min}}^{\infty} dr$

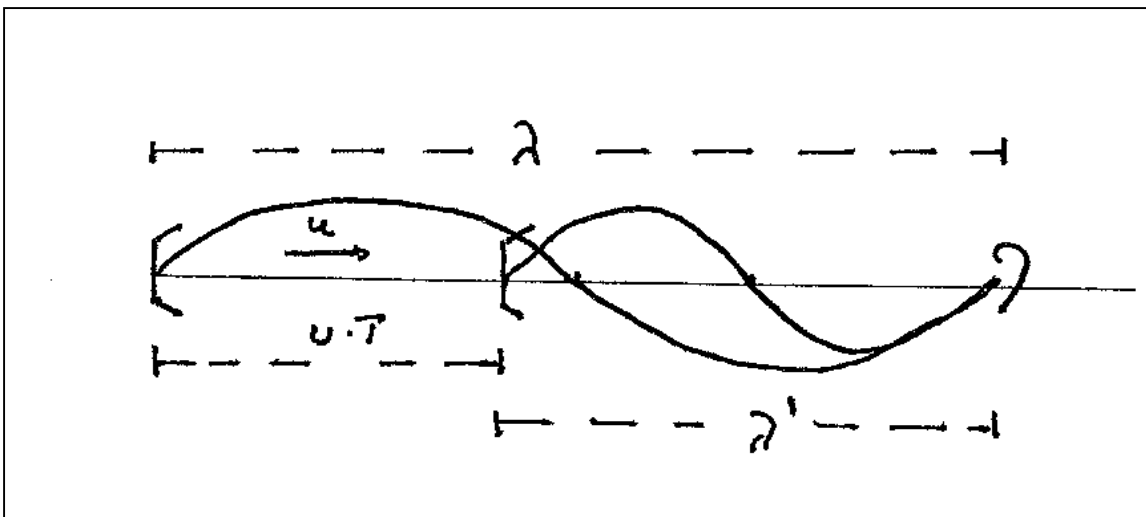
Dette integral vil imidlertid altid have værdien uendelig, så himlen burde være *hvid* ifølge antagelsen om et uendeligt homogent univers.

Forbehold om at stjernetåger vil dæmpe lyset, viser sig ikke at kunne forklare uoverensstemmelsen.

Vi må derfor konkludere, at enten er universet endeligt eller også bliver tætheden af stjerner mindre jo længere man kommer bort fra jorden. Da den sidste antagelse (fra et ikke religiøst synspunkt) er helt urimelig, må man slutte at universet ikke er uendeligt og homogent.

#### 4. Rød-forskydning

Rød-forskydning er betegnelsen for den ændring, der sker for bølgelængden af lys, udsendt fra en lyskilde, der bevæger sig bort fra en iagttager. Da hastighederne af himmellegemerne er store, men dog ikke relativistiske, kan man anvende en urelativistisk Doppler-effekt, som også er kendt fra lydbølger. Vi giver derfor først en udledning af Doppler effekten for lydbølger.



Formlen for den urelativistiske Doppler-effekt kan lettest udledes, ud fra ovenstående tegning, hvor lyd giveren har hastigheden  $u$  mod iagttageren, og lydens udbredelseshastighed er  $v$ .

Det fremgår umiddelbart af ovenstående, at sammenhængen mellem bølgelængderne  $\lambda$  og  $\lambda'$  for lyd giver og iagttager er  $\lambda = \lambda' + uT$ . Da perioden  $T = \lambda/v$  finder man  $\lambda' = \lambda(1 - \frac{u}{v})$ , altså bølgelængden bliver kortere for iagttageren. Det kaldes for blå-forskydning, hvis det er lysbølger.

Hvis lyd giveren bevæger sig bort fra iagttageren, skal man blot erstatte  $u$  med  $-u$ , så man får

$$\lambda' = \lambda(1 + \frac{u}{v})$$

Man kan også ræsonnere på en anden måde: Hvis lyd kilden bevæger sig mod iagttageren, vil denne modtage den næste bølgetop tidligere, nemlig så meget tidligere som det tager lyden at bevæge sig stykket  $uT$ .

$$T' = T - \frac{uT}{v}, \text{ og idet } \lambda = vT \text{ og } \lambda' = vT', \text{ finder vi igen } \lambda' = \lambda(1 - \frac{u}{v})$$

Hvis der er tale om lys og ikke lyd skal  $v$  erstattes med  $c$ .

$$\lambda' = \lambda(1 + \frac{u}{c})$$

Når bølge giveren bevæger sig bort fra iagttageren, sker der en forøgelse af bølgelængden, som for lys kaldes for rød-forskydning.

Relativistisk ser formelen en del anderledes ud, når lys giveren som her bevæger sig bort fra iagttageren med hastigheden  $v$ .

$$\lambda' = \lambda \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

Måler man  $\lambda'/\lambda$  kan hastigheden beregnes af  $v = \frac{(\frac{\lambda'}{\lambda})^2 - 1}{(\frac{\lambda'}{\lambda})^2 + 1} c$

Selvom galakserne bevæger sig hurtigt, nogle 100 km/s, så er der stadig tale om en urelativistisk bevægelse  $v < 1/10c$  ( $c = 300.000 \text{ km/s}$ ). Man anvender da også for det meste den urelativistiske formel for rød-forskydningen af lys. Formlen kan da omskrives, til den relative ændring.

$$\lambda' = \lambda(1 + \frac{v}{c}) \Leftrightarrow \lambda' - \lambda = \lambda \frac{v}{c} \Leftrightarrow \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \quad (= z)$$

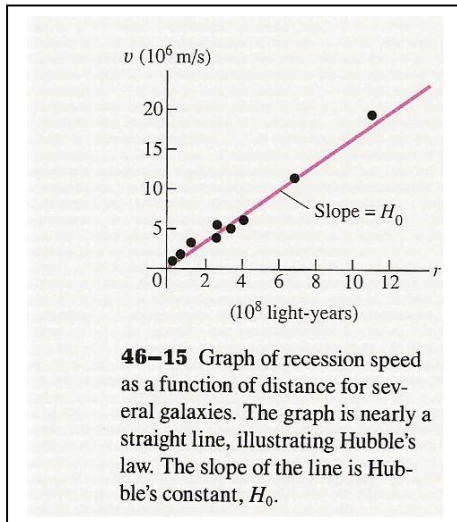
Den relative ændring i lysets bølgelængde er lig med den brøkdelen af *lyshastigheden*, som legemet bevæger sig med. I litteraturen betegnes  $v/c$  ofte med  $z$ .

En rød-forskydning på 2% vil da svare til en hastighed på  $0,02c$ .

Hvis man sammenligner spektrene fra andre galakser, med kendte atomspektre, ser man for det første, at alle spektre er udsendt fra kendte grundstoffer (universet består af de samme 92 grundstoffer, som er kendt på jorden), men også at alle spektre er mere eller mindre rød-forskudte, således at observationerne tyder på at alle galakserne bevæger sig bort fra os.

Det er vigtigt at bemærke, at noget lignende *ikke* gælder for stjernerne i vores egen galakse, hvor nogen stjerner har rød-forskydning, mens andre har blå-forskydning.

## 5. Universet udvider sig. Det kosmologiske princip.



Den amerikanske astronom Edwin Hubble foretog i 1920'erne systematiske målinger af afstandene til forskellige galakser, samtidig med at han målte rødforskydningen af lyset fra samme galakser.

Som nævnt ovenfor, fandt han at alle galakserne var rødforskydte, hvoraf han sluttede, at de alle bevægede sig bort fra os. Mere bemærkelsesværdigt, så tydede hans målinger på, at der var proportionalitet mellem galaksernes hastighed og afstanden til dem. Se figuren.

Denne meget berømte iagttagelse kaldes for Hubbles lov, og den skrives i almindelighed:

$$v = H_0 \cdot r$$

hvor  $v$  er den hastighed, hvormed en galakse bevæger sig bort fra en iagttager og  $r$  er afstanden fra iagttageren til galaksen.

$H_0$  kaldes for Hubbles konstant. Den accepterede værdi i dag er  $H_0 = 2,2 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ , med en usikkerhed på ca. 25%. Ofte skrives den i enheden  $\text{km/s}$  pr lysår. I denne enhed får man.

$$H_0 = 1,9 \cdot 10^{-5} (\text{km/s})/\text{lysår}$$

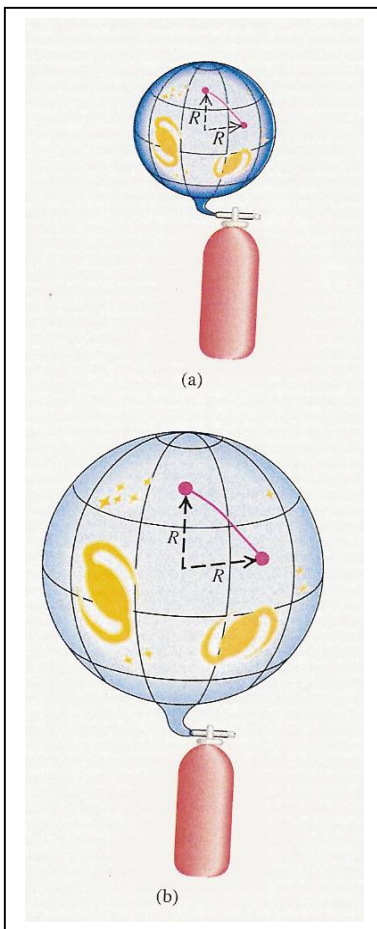
Den værdi som Hubble opnåede fra sine første målinger var kun ca. 1/5 af den nuværende værdi, ligesom den nuværende værdi er behæftet med en usikkerhed på ca. 25%. Dette skyldes naturligvis at afstandsbestemmelse til galakserne er overordentlig vanskelig.

For meget fjerne objekter, er direkte afstandsbestemmelse simpelthen umulig, og man anvender da i stedet Hubbles lov til at bestemme afstanden ved at måle rødforskydningen.

Når man har målt rødforskydningen, kan man bestemme hastigheden ud fra  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$  for derefter at finde afstande af Hubbles lov:  $v = H_0 \cdot r$

Når alle galakser bevæger sig bort fra os, kunne man måske umiddelbart tro, at vi må være centrum i universet, men en sådan antagelse kan kun underbygges metafysisk. Det er umuligt at forestille sig en fysisk begrundelse for at mennesket på jorden skulle være universets centrum.

Med Einsteins generelle relativitetsteori, er der imidlertid åbnet muligheden for et ikke Euklidisk og endeligt krumt univers, som kan forklare, hvorfor alle galakser synes at fjerne sig fra os.



Siden 1960 har stort set alle astronomer og fysikere været enige om gyldigheden af **Det kosmologiske princip**, som kan formuleres derhen, at universet i kosmologisk skala vil "se ens ud" ligegyldigt, hvor man befinder sig.

Endvidere er universet homogent (den samme rumlige fordeling af galakser) i en kosmologisk skala.

I et passende krumt univers vil enhver iagttager ligegyldigt, hvor han befinder sig i universet observere, at alle galakser bevæger sig væk fra ham med en hastighed, der er proportional med afstanden.

Hvis det kosmologiske princip gælder, så er det naturligvis udelukket, at universet kan beskrives ved almindelig (Euklidisk) rumgeometri. Tværtimod, så kan det faktum at alle galakser tilsyneladende fjerner sig fra hinanden, tages som udtryk for, at det i virkeligheden er selve universet (rummet) der udvider sig.

Teorien for ikke Euklidiske geometrier er matematisk set meget komplicerede. Bevægelser i en sådan geometri, hvor tiden indgår som en fjerde koordinat, gør et bestemt ikke mindre kompliceret, og som nævnt tidligere er den generelle relativitetsteori overordentlig svær tilgængelig.

Oftest ser man en todimensional analogi til det krumme rum, som en ballon, der er befolket af todimensionale væsner, der ikke kan bevæge sig udenfor ballonen. De vil leve i en sfærisk (og ikke Euklidisk) geometri, hvor forholdet mellem omkredsen og diameteren af en cirkel overalt vil være mindre end  $\pi$ .

De rette linier (geodæter) på en kugle er storcirkler, og forestiller man sig at lyset følger geodæterne og noterer sig at to storcirkler skærer hinanden i en tokant, så vil man i princippet kunne se samme objekt i to forskellige retninger.

Og helt teoretisk, så kan man se et objekt, der ligger bagved én, hvis man kigger fremad.

Illustrerer man, (som det er vist på figuren), det ekspanderende univers som en todimensional flade (en ballon), der pustes op, kan man (i analogien) forstå det faktum, at alle galakser synes at fjerne sig fra en iagttager, ligegyldigt, hvor man befinder sig i universet.

Da afstande på en kugle måles som radius gange radiantallet for buen, så vil alle afstande  $s$  vokse med den samme faktor  $\beta$ , som radius i kuglen forøges med. Følgelig, vil den hastighed, hvormed to punkter (galakser) på kuglen bevæger sig bort fra hinanden være proportional med radiantallet for buen og dermed afstanden i mellem dem.

Det er rimeligt nemt at opfatte en ballon, som et todimensionalt univers, der har lignende egenskaber med observationer fra det virkelige univers, men det er udenfor ens forestillingsevne, at opfatte det almindelige rum, som krumt – endsige at forstå, at galakserne ikke bevæger sig i et almindeligt geometrisk rum, men at det er selve rummet, der udvider sig.

Hvis rummet imidlertid udvider sig og altid har gjort det, så kan man forsøge at "spille filmen tilbage" og finde ud af, hvornår (og hvordan) det er skabt.

## 6. The Big Bang

**The Big Bang** er en kort formulering af den antagelse, at universet blev skabt til tidspunktet  $t = 0$  ved en gigantisk energiudladning fra et enkelt punkt. (Vakuuminflation?). Antager man at de galakser, der blev skabt omkring 30 mill. år efter Big Bang har bevæget sig med den samme hastighed  $v$  (og ikke er blevet bremsset væsentligt endnu af gravitationel tiltrækning), så vil de nu til tiden  $t_{univers}$  (lig med universets alder) være nået ud i en afstand  $r$  givet ved.

$$r = v \cdot t_{univers}$$

Sammenligner man med Hubbles lov:  $v = H_0 \cdot r$  ser man, at der må gælde:  $v \cdot t_{univers} = v / H_0$ , og dermed:

$$t_{univers} = \frac{1}{H_0}$$

Det er en næsten chokerende konklusion at det med de givne antagelser følger, at universets alder er knyttet sammen med Hubbles konstant på denne simple måde.

Indsætter man den nuværende værdi af Hubblekonstanten:  $H_0 = 2,0 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ , finder man

$$t_{univers} = 1/H_0 = 5,0 \cdot 10^{17} \text{ s} = 15,8 \text{ mia. år}$$

Som det er tilfældet med Hubble-konstanten er denne alder behæftet med en usikkerhed på ca. 25%. Andre værdier af Hubble konstanten giver universets alder til 13 – 14 mia. år, som også er den almindelige antagelse efter år 2000.

## 7. Kritisk densitet

Indtil 1950, var den gængse opfattelse stadig, at universet var statisk og fladt. I en todimensional analogi til den generelle relativitetsteori, kunne det beskrives som en uendelig (Euklidisk) plan, befolket med "dale" svarende til stjerner og galakser, nogle enkelte meget snævre og dybe huller (hvide dværge og neutronstjerner) og enkelte uendelig dybe huller, som man aldrig kunne komme op ad, hvis man faldt i dem (sorte huller).

Selv om himmellegemerne bevægede sig i forhold til hinanden og der hele tiden fødtes og forsvandt stjerner, så var universet uendeligt og havde eksisteret uendelig længe. Det var et statisk, fladt univers, som hverken udvidede sig eller trak sig sammen.

Problemet omkring antagelsen om et statisk univers er imidlertid, at det nødvendigvis vil trække sig sammen som følge af gravitationen og uundgåeligt ende med et "Big Crunch", hvor hele universet kolliderer.

Der har aldrig været foretaget observationer, som tydede på at galakserne nærmede sig hinanden, og da Hubble havde vist at galakserne tværtimod fjernede sig fra hinanden, indførte Einstein en såkaldt "Kosmologisk Konstant", der skulle kompensere for den gravitationelle tiltrækning ved kosmiske afstande og levere en forklaringen på det statiske univers.

Nu har fysiske fænomener, som aldrig tidligere er observeret, og som kun er indført for at forklare bestemte observationer, har aldrig været velanskrevne i fysikken. Da Hubbles lov var et accepteret faktum, afskrev Einstein da også den kosmologiske konstant, som "den største fejltagelse i sit liv". (Der er nu flere andre i samme vægtsklasse). Desuagtet "spøger" den kosmologiske konstant stadig i



videnskabelige artikler, og man kan læse, at observationer tyder på, at der faktisk findes en kosmologisk konstant forskellig fra nul.

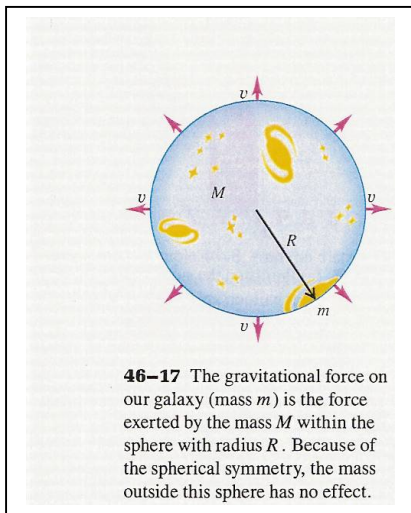
Tilbage står vi med spørgsmålet om universets krumning, som er forbundet med den gennemsnitlige massetæthed i universet.

Med en positiv krumning (lukket univers), vil udvidelsen standse, og universet vil begynde at trække sig sammen til et Big Crunch.

En negativ krumning (åbent univers) vil betyde, at udvidelse vil fortsætte med forøget hastighed.

Et fladt univers betyder, at universets krumning er nul. Universet er Euklidisk for kosmologiske afstande, og udvidelse vil fortsætte i det uendelige for så at gå i stå.

Man kan ud fra Newtons gravitations lov foretage en (ikke relativistisk beregning) af den gennemsnitlige densitet i universet på den samme måde, som man beregner undvigelsesfarten fra et homogent kugleformet legeme.



Hvis massefordelingen i universet er homogen i kosmisk skala, så kan man se på den kraft, der virker på en galakse på randen af en kugle med radius  $R$ . Kuglen tænkes at have en udstrækning som er mange gange større end galaksernes udstrækning.

Man kan vise (Gauss lov), at med en homogen massefordeling i rummet hidrører kraften på en galakse på overfladen af kuglen kun fra den masse, der befinder sig inden i kuglen, og som vist af Newton, så kan gravitationskraften (og den potentielle energi) udregnes som om hele massen befandt sig i centrum af kuglen. Betegnes densiteten med  $\rho_c$ , så gælder der:

$$M = \rho_c V = \rho_c \frac{4}{3} \pi R^3$$

Galaksen bevæger sig ifølge Hubbles lov radially ud med en hastighed, der er givet ved:

$$v = H_0 R$$

”Undvigeshastigheden” af en galakse med masse  $m$  fra gravitationskraften fra massen indenfor ”kuglen” kan beregnes ud fra energibevarelse i et kuglesymmetrisk gravitationsfelt.

Hvis hastigheden er lig med undvigeshastigheden, så vil såvel den kinetiske energi som den potentielle energi være nul i det uendelig fjerne. På grund af energibevarelsen, må summen af den kinetiske energi og potentielle energi være nul ved ”opsendelsen”.

$$\frac{1}{2}mv^2 - G \frac{mM}{R} = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{2}v^2 - G \frac{M}{R} = 0 \Leftrightarrow M = \frac{v^2 R}{2G}$$

Indsætter vi nu  $v = H_0 R$  og  $M = \rho_c \frac{4}{3} \pi R^3$ , vil  $\rho_c$  være den ”kritiske densitet”, nemlig den densitet, som vil resultere i et ”fladt univers”, hvor udvidelsen vil fortsætte, men går i stå efter uendelig lang tid.

Hvis densiteten er større end  $\rho_c$ , har universet positiv krumning (et lukket univers). Udvidelsen vil standse, og blive afløst af en kontraktion, som afsluttes med et Big Crunch. Som muligvis igen vil

give anledning til et Big Bang. (Det pulserende univers). Hvis densiteten derimod er mindre end  $\rho_c$  har universet negativ krumning (et åbent univers). Udvidelsen vil fortsætte med forøget hastighed. Indsættes de to udtryk ovenfor i ligningen, finder man

$$\rho_c \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{(H_0 R)^2 R}{2G} \Rightarrow \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

Hvis man indsætter de kendte værdier for konstanterne finder man  $\rho_c = 7,2 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ .

Massen af hydrogen atomet er ca.  $1u = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , så det svarer til omkring 4 hydrogen atomer pr. kubikmeter.

Man har gjort forsøg på at "veje" et område af universet, ved at medtage såvel lysende objekter, interstellar gas, neutrinoer og sorte huller.

Et kvalificeret estimat giver en massetæthed som er af størrelsesorden 1/100 af  $\rho_c$ .

Mange teoretikere er af den opfattelse, at universet er lukket eller fladt, og også det har ført til spekulationer om "mørkt stof". Måler man (så godt som det nu er muligt) stjernernes rotationshastigheder i galakserne, og sammenligner man (så godt som det nu er muligt) med den masse, der befinder sig indenfor stjernes bane, finder man også en markant afvigelse, forstået således at den vurderede masse er alt for lille til at holde stjernerne i rotation. Forklaringen kan være Mørkt stof.

Forestillingerne om af det "mørke stof" består af er foreløbig ligeså spekulative som ideen om en kosmologisk konstant.

## 8. Mørkt stof, kvasarer, sorte huller (og anden sort mystik i universet)

Vi har ovenfor omtalt, at astrofysikerne i løbet af 1990'erne er blevet overbeviste om eksistensen af "mørkt stof" i universet. "Mørkt" refererer til, at stoffet ikke udsender elektromagnetisk stråling.

Hverken som Planck-stråling, på grund af en høj temperatur (som det er tilfældet med stjernerne) eller som sekundært lys, som det er tilfældet med de interstellare gasser.

Observationer tyder således på, at kun en brøkdel af den masse, der befinder sig i universet består af almindeligt stof, resten er "mørkt stof".

Skal man stole på observationerne, så udsender mørkt stof ikke elektromagnetisk stråling, og det må følgelig bestå af neutrale partikler. Et forslag har været "massive" neutrinoer, en antagelse man efterhånden har forladt. En anden antagelse har været en ukendt type elementarpartikler. Noget som teoretikerne inden for partikelfysikken bestemt ikke er glade for (især efter 1995, hvor man har fundet W, og Z bosonerne og især tau-mesonen, som fuldender det teoretiske grundlag for Standardmodellen i partikelfysikken).

Hvorfor det mørke stof ikke blot kan være gas ansamlinger af protostjerner, som f.eks. Jupiter og Saturn med masser mindre en 0,07 solmasser, (som er den nedre grænse for at fusionsprocesser går i gang og danner en lysende stjerne), og som blot ikke kan ses på de enorme afstande, har jeg ikke noget egentligt svar på.

At der må være mere masse i en galakse end det synlige stof, kan man imidlertid godt argumentere for, hvis man kan måle rotationshastigheden af stjernerne som funktion af afstanden fra akse.

Alle målinger er behæftet med stor usikkerhed, men viser alligevel ret entydigt, at stjernerne roterer for hurtigt i forhold til den synlige masse. Det har man tidligere forklaret med, at der i galaksens kerne befinder sig et massivt "sort hul" svarende til 3 – 4 mill. solmasser!

Denne forklaring er imidlertid ikke i overensstemmelse med observationerne. For bevægelse omkring et centrallegeme, gælder som bekendt Keplers 3. lov  $a^3/T^2 = \text{konstant}$ , som er en konsekvens af Newtons gravitationslov.

For sådanne bevægelser gælder, at det er gravitationskraften, som leverer centripetalkraften. Hvis centrallegemet har masse  $M$  (galaksens kerne) og stjernen har masse  $m$ , gælder for en cirkulær bevægelse:

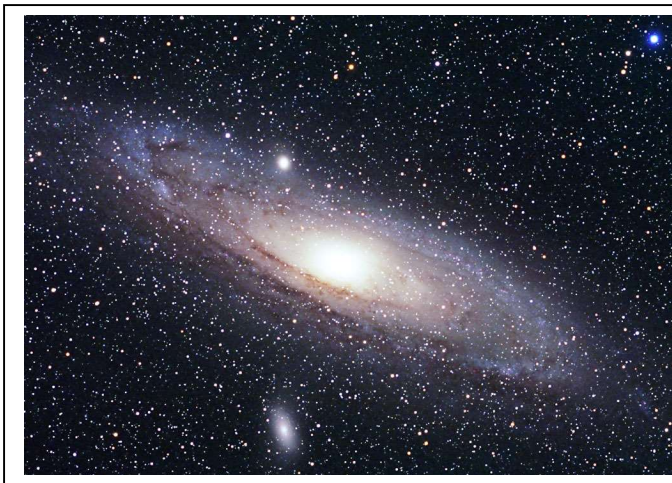
$$F_c = F_G \Leftrightarrow m\omega^2 r = G \frac{mM}{r^2} \Leftrightarrow \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 r = G \frac{M}{r^2} \Leftrightarrow \frac{r^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2} = \text{konst}$$

Benytter vi at  $T = 2\pi/\omega$  (hvor  $\omega$  er vinkelhastigheden) finder man derefter:

$$r^3 \omega^2 = k \quad \text{eller} \quad \omega = \frac{k}{r^{\frac{3}{2}}}$$

Hvis det meste af galaksens masse var samlet i kernen, vil stjernernes vinkelhastighed aftage med radius i potensen  $3/2$ , hvilket ikke er i overensstemmelse med observationerne.

At stjernernes vinkelhastighed faktisk aftager med afstanden fra galaksens kerne, kan direkte observeres, hvis man betragter en spiralgalakse.



Se f.eks. billedet af Andromeda galaksen til venstre, hvor de spiralformede bagud vendte arme, umiddelbart tyder på en aftagende vinkelhastighed med forøget radius.

Antager vi derimod, at galaksens masse  $M_0$  er fordelt i en homogen skive med radius  $r_0$ , så er den masse  $M(r)$ , der befinder sig indenfor en skive med radius  $r$  lig med

$$M(r) = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 M_0$$

Massetætheden af skiven er nemlig  $\rho = M_0/\pi r_0^2$ , så  $M(r) = \rho\pi r^2$ , som giver udtrykket ovenfor. På samme måde, som da vi beregnede den kritiske masse kan vi anvende, at for en rotationssymmetrisk massefordeling, er det kun den masse, der ligger indenfor cirklen (kugleskallen), der giver bidrag til centripetalkraften. Gennemfører vi den samme beregning af "Keplers 3. lov" som ovenfor finder man:

$$F_c = F_G \Leftrightarrow m\omega^2 r = G \frac{mM(r)}{r^2} \Leftrightarrow \omega^2 r = G \frac{\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 M_0}{r^2} \Rightarrow \omega^2 r = \frac{GM_0}{r_0^2} = k \Leftrightarrow \omega = \frac{k_1}{\sqrt{r}}$$

I dette tilfælde aftager vinkelhastigheden (kun) med kvadratroden af afstanden fra centrum af galaksen. Dette er langt bedre i overensstemmelse med observationerne, men stadig bevæger

stjernerne sig med vinkelhastigheder, svarende til en masse, der er ca. 60% større end den observerede.

Eksistensen af "Det mørke stof" er fortsat et mysterium. En stor negativ (tiltrækkende) kosmologisk konstant, kunne være en forklaring, men denne forklaring passer ikke med talrige andre observationer. Et sort hul på 1 mill. solmasser, kunne give en forklaring på stjernes hastighed, men er i modstrid med vinkelhastighedens afhængighed af afstanden til galaksens centrum.

## 8.2 Kvasarer

I midten 1960'erne observerede man nogle objekter, med ekstrem stor rød-forskydning.  $z > 0,5$ , hvilket altså betyder, at de bevæger sig bort fra os med hastigheder, der nærmer sig lysets hastighed. Ifølge Hubble-ligningen gælder nemlig:

$$v = H_0 \cdot r \quad \text{med} \quad H_0 = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ (km/s)/lysår.}$$

Indsætter man  $v = 0,5c$ , hvor  $c = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$  finder man:  $r = \frac{v}{H_0} = \frac{1,5 \cdot 10^5}{1,9 \cdot 10^{-5}} \text{ lysår} = 7,8 \text{ mia lysår} .$

Man har observeret kvasarer, der er mere end 10 mia. lysår borte.

Det andet bemærkelsesværdige ved kvasarerne er, at man faktisk kan se dem, hvilket igen betyder, at de udsender langt mere lys end en almindelig galakse.

En kvasar kan udsende mere lys end 1000 galakser fra et område, hvis udstrækning er mindre end et lysår. Det menes, at kvasarerne får deres kolossale mængder af energi fra stof, der falder ind mod et sort hul i centrum af en galakse. For at få tilstrækkelig med energi skal det sorte hul have en masse på 100 mio. gange Solens masse.

Den enorme energiudstråling kommer fra en såkaldt aktiv galaksekerne, som er den centrale del af galakser i hvilken nogle af de mest energirige processer i universet foregår. Ca. 1% af alle galakser indeholder en aktiv kerne. Med aktiv menes, at området omkring galaksens centrum udsender langt mere energi, end man ville forvente ud fra antallet af stjerner i området.

Mange aktive galaksekerne udsender mere energi, end der tilsammen udsendes af de mange milliarder stjerner i galaksen.

De kraftigste kaldes kvasarer. De fleste astronomer føler sig overbevist om, at energiudsendelsen i de aktive galaksekerne skyldes, at stof falder ind mod et sort hul. Ved faldet mister stoffet potentiel energi og opnår enorme hastigheder. Stoffet bliver opvarmet til høje temperaturer. Derved udsender stoffet energirige fotoner, og disse er i stand til at få stof, som er længere væk fra det sorte hul til at lyse op. Det omgivende stof udsender lys med ganske bestemte bølgelængder (emissionslinjer), og det er disse, vi observerer med vore kikkerter på Jorden.

For at kunne forklare den kolossale energiudsendelse fra kvasarer må man antage, at der på årsbasis falder stof ind mod det sorte hul svarende til en stjerne som Solen. (vores sol vil leve i ca. 9 mia. år) Det sorte hul må endvidere antages at være 100 til 1000 mio. gange så tungt som Solen.

Kvasarer er dog ekstreme eksempler på aktive galaksekerne, og meget tyder på, at der i centret af vor galakse findes et sort hul, som kun er ca. tre mio. gange solens masse.

Man skal være opmærksom på, at når vi studerer kvasarerne, så ser vi 10 mia. år tilbage i tiden, og betragter et virkelig billede af universet, som det så ud dengang. Desværre er vi afskåret fra at se detaljer

### 8.3 Neutronstjerner og sorte huller

Når en stjerne har opbrugt sin evne til at producere energi (ved fusion af lettere grundstoffer til tungere), kan den ikke længere opretholde et modtryk, mod gravitationen fra de øverste lag, hvorefter der sker en hurtig kontraktion ledsaget af udsendelse af de ydre lag i rummet.

Hvor voldsom kontraktionen er, afhænger af massen af stjernen.

Hvis massen er mindre end 1,4 solmasser, ender stjernen som en ”hvid dværg”, som er en lille (på størrelse med jorden) meget varm stjerne. Massefylden er typisk  $10^{10} - 10^{11} \text{ kg/m}^3$ .

Hvis massen af stjernen er større end 2 solmasser ender stjernes liv som en supernovæeksplosion, hvor de ydre lag slynges ud i rummet. Kontraktionen af kernen vil være så voldsom og kortvarig, at elektronerne bliver presset ind i atomerne og resultatet bliver en gigantisk atomkerne, der består af lutter neutroner. Heraf navnet ”neutronstjerne”. Massefylden er af størrelsesordenen  $10^{18} \text{ kg/m}^3$ , mens radius er omkring 10 km.

Hvis massen af stjernen er større end 3 solmasser ender stjernes liv også med en supernovæeksplosion, men kontraktionen af kernen vil fortsætte i en ”gravitationelt kollaps”. Resultatet er et sort hul.

Indtil slutningen af 1960'erne, fandtes såvel neutronstjerner og sorte huller kun på teoretikernes skriveborde. Schwarzschild havde ud fra Einsteins generelle relativitetsteori forudsagt eksistensen af sorte huller, som en ”singularitet” (en uendelig dyb og smal brønd) i rummet, men på det tidspunkt, troede ingen rigtig på at en matematisk singularitet i Einsteins ligninger kunne have fysisk relevans.

Før den tid havde man i øvrigt ingen formodning om, hvorledes man skulle kunne observere neutronstjerner eller sorte huller, da de jo er usynlige, og begge fænomener blev i lang tid helt afvist af astronomer og det fysiske samfund.

Men det ændrede sig, da man opdagede pulsarerne. En pulsar er et usynligt objekt, der udsender radiostråling med en konstant periode på nogle ms.

Man antager at pulsarernes frekvens, kommer fra magnetfelter, der udsender elektromagnetisk stråling på grund af en ekstremt hurtig omløbstid.

Den første pulsar blev fundet i centrum af Krabbetågen, som er resterne af en i Kina observeret supernovæeksplosion i 1054. Pulsaren blev opdaget i 1967 af forskerstudenten Jocelyn Bell og hendes vejleder Anthony Hewish, (hvor kun sidstnævnte fik nobelprisen i fysik i 1974 for opdagelsen). Ved et veltilrettelagt eksperiment lykkedes det for forsker teamet at lokalisere radio kilden i centrum af Krabbe tågen og identificere den som en neutron stjerne.

Siden har man observeret mere end 1000 pulsarer. Strålingen fra dem passer efterhånden godt med de teoretiske beregninger. Ingen tvivler længere alvorligt på neutronstjernernes eksistens.

### 8.4 Sorte huller

Sorte huller har altid været omgivet en mytisk interesse uden for kosmologiske fagkredse.

Vi vil nu udføre en - ikke relativistisk – beregning af sammenhængen mellem radius og masse af et sort hul.

Vi har flere gange set på formlen for undvigelseshastigheden  $v$  af et legeme med masse  $m$  fra et kugleformet legeme med masse  $M$  og radius  $R$ . Massen  $m$  af det legeme, der opsendes med hastigheden  $v$ , går ud i beregningen (alle legemer ”falder” med den samme acceleration).

Når hastigheden er lig med undvigelseshastighed er såvel den kinetiske som den potentielle energi lig med nul uendelig borte. Energibevarelse kræver derfor at summen af kinetisk og potentiel energi er nul ved opsendelsen

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{mM}{R} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{2GM}{v^2}$$

Indsætter vi her  $v = c$  (lysets hastighed) finder man et (urelativistisk og som dermed burde være forkert) udtryk for sammenhængen mellem radius  $r_s$  og massen  $M$  af et sort hul.

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Udtrykket for undvigelseshastigheden er opstillet for et legeme med masse  $m$ .

I den klassiske fysik, ville man dog ikke forvente nogen gravitationskraft på lys – opfattet som elektromagnetisk stråling.

Heller ikke kvantefysisk, hvor lys består af fotoner med hvilemasse 0. Udledningen ovenfor er i den henseende meget vidtløftig, og det er således et forunderligt tilfælde, at man opnår det samme udtryk, som Schwarzschild gjorde ved en overordentlig mere kompliceret beregning ud fra den generelle relativitetsteori.

I den generelle relativitetsteori er der ikke noget overraskende i at lyset med hensyn til gravitation opfører sig som partikler, idet alle legemer i fri bevægelse er bundet til at følge rummets krumning. Rummets krumning omkring et sort hul er netop så stor, at selv ikke lys kan undvige.

Formlen ovenfor giver dog ingen umiddelbar forklaring på hvor stort eller massivt et ”almindelig sort hul” er.

Her kan vi imidlertid anvende, at en tilstrækkelig massiv neutronstjerne, vil kollapse til et sort hul. En neutronstjerne, kan opfattes som en gigantisk atomkerne, og den kan derfor antages at have omtrent samme massefylde som neutronen.

Neutronen masse er  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  og radius  $r_n = 1,4 \text{ fm} = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ .

$$\rho_n = \frac{m_n}{\frac{4}{3}\pi r_n^3} = 1,46 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

For at forstå denne massefylde, kan man bemærke at et knappenålshoved på  $1 \text{ mm}^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$  vil veje 146.000 ton.

Sammenhængen mellem masse  $M$ , radius  $r_s$  og densitet  $\rho_n$  for en kugleformet neutronstjerne er givet ved:  $M = \frac{4}{3}\pi r_s^3 \rho_n$ . Indsættes dette i formelen for et sort hul, får man:

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} = \frac{2G \frac{4}{3}\pi r_s^3 \rho_n}{c^2} \quad , \text{ som kan løses med hensyn til } r_s.$$

$$r_s = \frac{c}{\sqrt{\frac{8}{3}\pi G \rho_n}} \quad \text{Med de indsatte værdier finder man } r_s = 33 \text{ km}.$$

Endelig kan man beregne massen af en sådan neutronstjerne (på grænsen til et sort hul)

$$M = 4/3\pi r_s^3 \rho_n = 2,25 \cdot 10^{31} \text{ kg} \text{ (sammenlign med } M_{sol} = 2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg)}.$$

Så massen af et sort hul beregnes til ca. 10 solmasser

De fundne værdier har den rigtige størrelsesorden, men er en faktor 3 -5 for store i forhold til en relativistisk beregning, hvilket ikke er overraskende.

Mange fysikere afviste helt op til begyndelsen af 70'erne at beskæftige med sorte huller af den simple grund, at "fysikken ikke beskæftiger sig med fænomener, der ikke kan observeres".

Siden har man dog fundet adskillige indirekte vidnesbyrd om sorte huller. Det skyldes især, at man har kunnet få observatorier uden for jordens atmosfære, som er i stand til at detektere røntgenstråling, som ellers bliver absorberet i atmosfæren.

Når et sort hul suger interstellart stof eller stof fra en nærliggende stjerne til sig, er det så voldsomt, at elektronerne bliver revet ud af atomerne og de herefter ladede partikler opnår så store accelerationer, at der udsendes røntgenstråling.

Nogle galaksekerner kaldes aktive, fordi de udsender uforholdsmæssig meget energi som stråling (også røntgenstråling) i forhold til deres udstrækning. Man har formodninger om, at disse aktive galaksekerner er gigantiske sorte huller med en masse på flere millioner solmasser.

Et af de mere direkte vidnesbyrd om et sort hul er Cygnus X-1, som er en stjerne, som roterer om en usynlig ledsager. Da ledsagerens masse nødvendigvis er større end Cygnus X-1 (og usynlig), er det nærliggende at antage, at ledsageren er et sort hul. Observation af røntgen stråling udsendt fra "ledsageren" synes også at bekræfte, at det drejer sig om et sort hul.

Et andet vidnesbyrd om eksistensen af sorte huller er de såkaldte gravitationslinser.

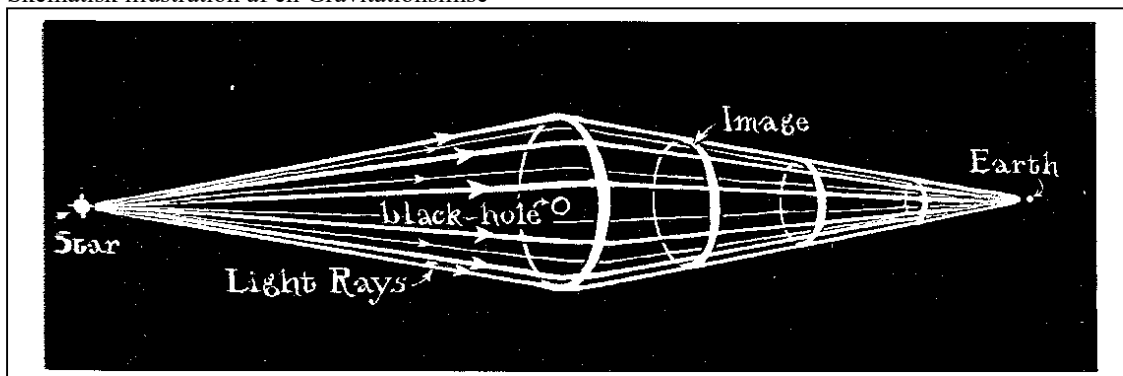
De bevirker at det samme objekt kan ses i to forskellige retninger. Illustreret (stærkt fortegnet) på figuren nedenfor.

Man har i de senere år med sikkerhed kunnet observere adskillige gravitationslinser, hvis eneste forklaring synes at være et massivt sort hul.

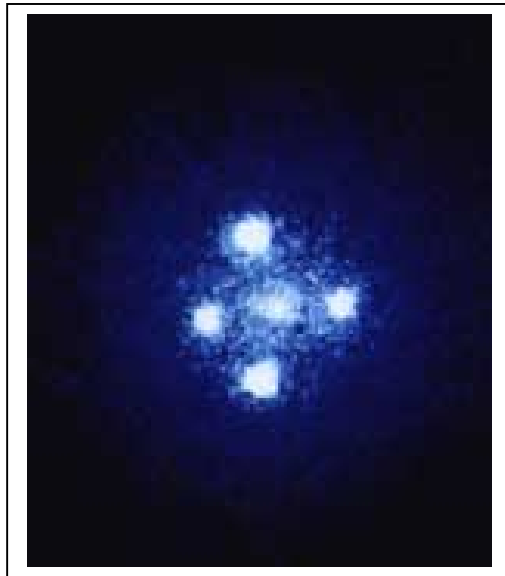
Et af eksemplerne er det såkaldte Einsteins kors (vist nedenfor), som tilsyneladende viser en galakse med ikke mindre end 4 galaksekerner.

En bedre forklaring er, at de 4 lysende kerner i virkeligheden er lys fra en bagvedliggende kvasar. Galaksen virker som en linse, der afbøjer lyset på forskellige måder, så samme kvasar kan ses 4 forskellige steder.

Skematisk illustration af en Gravitationslinse



Einsteins kors



## 9. Partikelfysik. The Big Bang. Den kosmiske baggrundsstråling.

Ifølge Standard Modellen for partikelfysikken, som blevet almindelig accepteret i 1990'erne er det muligt at teoretisk vej at beskrive universets udvikling helt ned til  $10^{-43}$  s efter The Big Bang (vakuuminflationen).

Det er udelukket her, at give en blot nogenlunde dækkende beskrivelse af standardmodellen, men den bygger på nogle fundamentale og eksperimentelt underbyggede antagelser.

### 9.1 De 4 vekselvirkninger:

Der findes 4 "naturkræfter", som man i partikelfysikken kalder for vekselvirkninger, idet de to af dem ingen lighed overhovedet har med makroskopiske kræfter. Nedenfor er de angivet efter voksende styrke. (bortset fra de svage)

1. Gravitationskræfter. Gravitationskraften er ansvarlig for at holde universet sammen. Gravitationskraften holder planetsystemet, stjernerne, galakserne, og galaksehobene sammen. Gravitationskræfterne er beskrevet ved Newtons gravitationslov. Alle partikler (også masseløse fotoner) er påvirket af gravitationskræfter. Gravitationskræfterne har uendelig rækkevidde.
2. De svage vekselvirkninger. Er langt svagere end de elektromagnetiske vekselvirkninger. Rækkevidden er af størrelsesorden  $10^{-15}$  m. De er årsagen til  $\beta$ -henfaldet af atomkerner.
3. Elektromagnetiske vekselvirkninger. De elektriske kræfter er ansvarlige for at holde atomerne sammen. De er endvidere ansvarlige for hele spektret af elektromagnetisk stråling. Såvel gravitationskræfterne som de elektromagnetiske kræfter er kendte fra den makroskopiske verden. De elektromagnetiske kræfter er langt stærkere end gravitationskræfterne med en faktor, der groft set er den samme som det omvendte forhold mellem størrelsen af et atom og udstrækningen af planetsystemet. Elektromagnetiske vekselvirkninger virker mellem alle ladede partikler og partikler med et magnetisk moment (som f.eks. neutronen). Rækkevidden af de elektromagnetiske vekselvirkninger er uendelig.



Vores fuldstændige forståelse af de elektromagnetiske vekselvirkninger er givet ved Maxwells ligninger (og kvanteelektrodynamikken).

4. De Stærke vekselvirkninger er ukendte i den makroskopiske verden, men de er de kræfter, er holder atomkernerne sammen. De er ansvarlige for  $\alpha$ -henfaldet af atomkerner. Groft taget så er de 1 million gange stærkere end de elektriske kræfter. Ligesom de svage vekselvirkninger er rækkevidden af samme størrelsesorden som atomkernen ca.  $10^{-15} m$ .

Nedenfor er vekselvirkningernes egenskaber vist i en tabel

**TABLE 46-1 The Four Interactions of Nature**

Interaction	Strength	Range	Mediating particle			
			Name	Rest mass	Charge	Spin
Strong	1	Short ( $\sim 1$ fm)	Gluon	0	0	1
Electromagnetic	$\frac{1}{137}$	Long ( $1/r^2$ )	Photon	0	0	1
Weak	$10^{-9}$	Short ( $\sim 0.001$ fm)	$W^\pm, Z^0$	81, 91 $\text{GeV}/c^2$	$\pm e, 0$	1
Gravitational	$10^{-38}$	Long ( $1/r^2$ )	Graviton	0	0	2

I slutningen af 1960'erne lykkedes det at opstille en teori. "Den elektrosvage teori", som ved meget høje energier ( $10^9$  Gev) forenede de elektromagnetiske og svage vekselvirkning til en samlet vekselvirkning den "elektrosvage".

Op gennem 1970'erne lykkedes det så endelig at forene de elektrosvage vekselvirkninger med de stærke til en Grand Unified Theory (GUT), som ved ekstremt høje energier ( $10^{16}$  Gev), forenede de 3 vekselvirkninger til én.

Energier, hvor de 3 (eller blot 2) af vekselvirkninger er forenede er udelukket i laboratorieforsøg. Faktisk er det eneste sted, hvor man (indirekte) kan afprøve teorien er de første  $10^{-36}$  s efter Big Bang (GUT) og de elektrosvage fra  $10^{-36}$  s til  $10^{-12}$  s.

## 9.2 Elementarpartikler og Quarks

Af de elementarpartikler, vi kender i naturen er protonen og neutronen såkaldte hadroner. De har både stærke, elektromagnetiske og svage vekselvirkninger.

Elektronen har derimod kun elektromagnetiske og svage vekselvirkninger. Elektronen er sammen med neutrinoen leptoner, men neutrinoen har udelukkende svage vekselvirkninger, hvorfor neutrinoer er (næsten) umulige at detektere.

Indtil omkring 1950 betragtede man disse kendte elementarpartikler som de fundamentale, men siden fandt man i acceleratorforsøg en mængde nye partikler, heraf pi-mesoner, som er hadroner og myonen, som er en tung lepton (masse ca. 200 gange elektronens masse), samt nogle såkaldte "strange particles". Den første var  $\Lambda_0$  hyperonen.

Fra et teoretisk synspunkt var det uholdbart, at der fandtes mere end 100 "fundamentale partikler".

Murray Gell-Mann foreslog derfor i 1964, at alle hadronerne var opbygget af 3 fundamentale partikler, som han kaldte Quarks (med en høj litterær henvisning til en roman af James Joyce). Han antog, at der fandtes 3 quarks, som han navngav med de pittoreske navne: *up*, *down* og *strange*.

Disse quarks viste sig tilstrækkelige til at forklare eksistensen af alle de partikler, der var kendt på dette tidspunkt. Partiklerne samlede sig i multipler, svarende til gruppeteoriens  $SU_3$ .

Quarkene var eksotiske på den måde, at de havde ladninger, som var  $\frac{2}{3}e$ ,  $-\frac{1}{3}e$  og  $-\frac{1}{3}e$ , hvor  $-e$  betegner elektronens ladning samt et baryontal som var  $\frac{1}{3}$ . Men ingen af delene er nogensinde observeret i naturen.

For at forklare  $\Lambda_0$ -hyperonens lange levetid, måtte Gell-mann indføre et nyt kvantetal "Strangeness", som sammen med ladning og baryontal er bevarede i stærke vekselvirkninger. Idet der ikke findes "strange particles" med masse lavere end  $\Lambda_0$ , så kan den ikke henfalde via stærke vekselvirkninger, men må henfalde ved svage vekselvirkninger, som giver en langt større levetid.

Man antager i dag, at Quark'erne ikke kan eksistere, som frie partikler, undtagen under så ekstreme energiforhold, som var tilfældet i de første  $10^{-36}$  s efter Big bang. Siden har man (som følge af acceleratorforsøg og af teoretiske grunde) været tvunget til at tilføje endnu 3 quarker med lige så pittoreske navne: *Charm*, *Top* og *Bottom*. En baryon består af 3 quarker, mens en meson består af en quark og en anti-quark. Beskrivelsen af quarkernes fysik kaldes for Quantum Chromodynamics, som er en del af standardmodellen. Standard Modellen teori er i øvrigt (mindst) lige så matematisk kompleks som den generelle relativitetsteori.

Man har i teorien også været nødt til at tilføje endnu en lepton: tau-mesonen, hvis eksistens først blev bekræftet i 1995, ved LHC (large hadron collider) i CERN, således at man nu har en smuk teoretisk symmetri med 6 quarker og deres anti-qvarker og 6 leptoner ( $e, \mu, \tau$ ) og deres neutrinoer ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) samt deres antipartikler. Nedenfor er vist en liste over de 6 leptoner og deres egenskaber, samt en liste over de 6 quarker.

**TABLE 46-2 The Leptons**

Particle name	Symbol	Anti-particle	Rest mass (MeV/c <sup>2</sup> )	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	Lifetime (s)	Principal Decay Modes
Electron	$e^-$	$e^+$	0.511	+1	0	0	Stable	
Neutrino (e)	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0(?)	+1	0	0	Stable	
Muon	$\mu^-$	$\mu^+$	105.7	0	+1	0	$2.20 \times 10^{-6}$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
Neutrino ( $\mu$ )	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0(?)	0	+1	0	Stable	
Tau	$\tau^-$	$\tau^+$	1784	0	0	+1	$<4 \times 10^{-13}$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau, e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$
Neutrino ( $\tau$ )	$\nu_\tau$	$\bar{\nu}_\tau$	0(?)	0	0	+1	Stable	

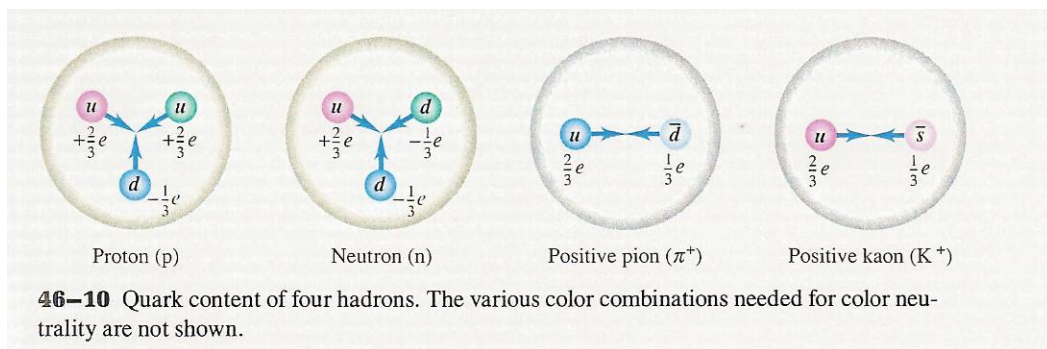
TABLE 46-5 Properties of Quarks

Symbol	$Q/e$	Spin	Baryon number, $B$	Strangeness, $S$	Charm, $C$	Bottomness, $B'$	Topness, $T$
$u$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
$d$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
$s$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
$c$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	+1	0	0
$b$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	+1	0
$t$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1

Nedenfor er vist en liste over nogle af de kendteste hadroner, som man tidligere kaldte elementarpartikler, og nedenunder dette nogle skematiske eksempler, på, hvorledes de er tænkt opbygget af quarker.

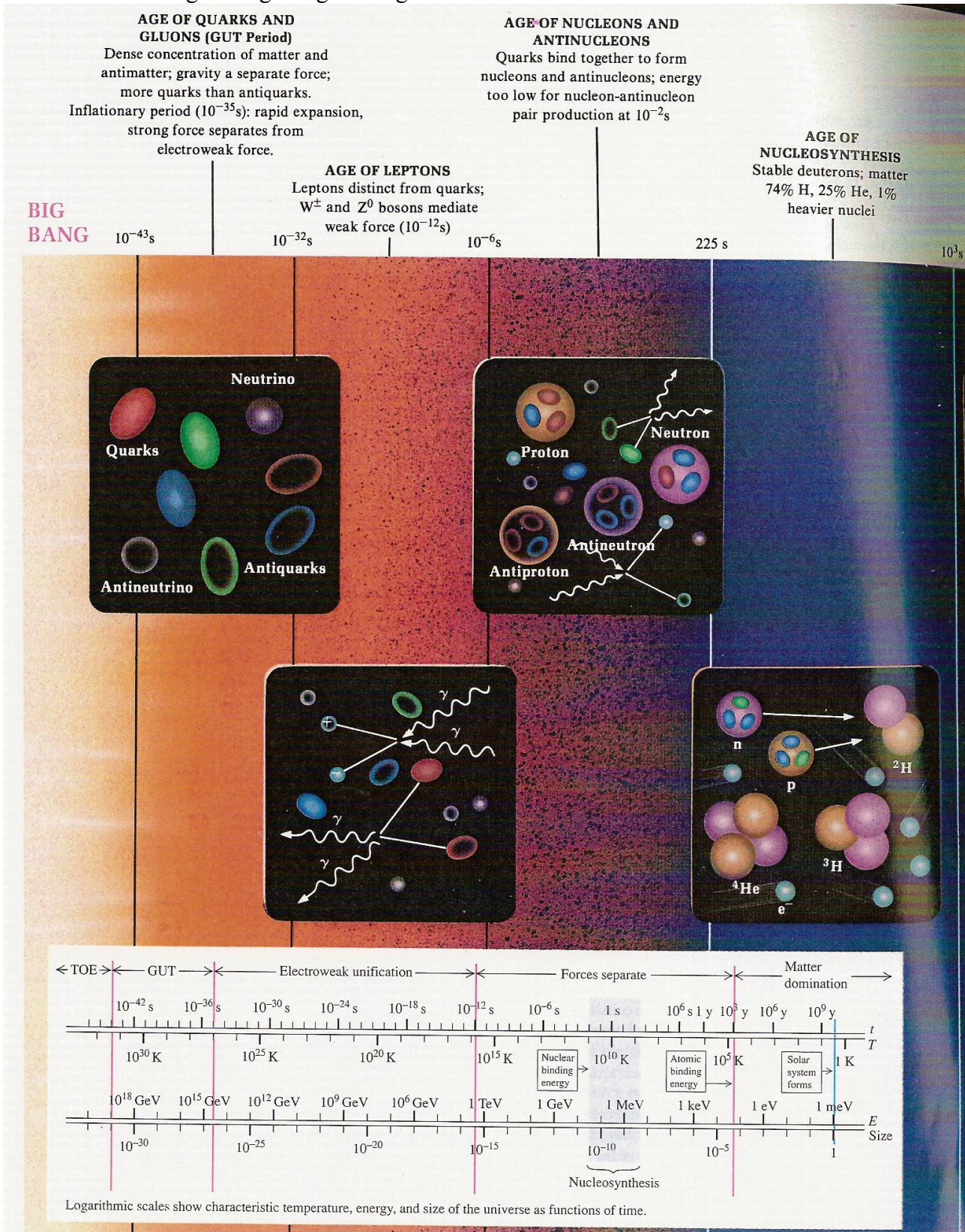
TABLE 46-3 Some Known Hadrons and Their Properties

Particle	Mass (MeV/c <sup>2</sup> )	Charge ratio, $Q/e$	Spin	Baryon number, $B$	Strangeness, $S$	Mean lifetime (s)	Typical decay modes	Quark content
Mesons	$\pi^0$	135.0	0	0	0	$0.87 \times 10^{-16}$	$\gamma\gamma$	$u\bar{u}, d\bar{d}$
	$\pi^+$	139.6	+1	0	0	$2.6 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu$	$u\bar{d}$
	$\pi^-$	139.6	-1	0	0	$2.6 \times 10^{-8}$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\bar{u}d$
	$K^+$	493.7	+1	0	0	$1.24 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu$	$u\bar{s}$
	$K^-$	493.7	-1	0	0	$1.24 \times 10^{-8}$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\bar{u}s$
	$\eta^0$	548.8	0	0	0	$\approx 10^{-18}$	$\gamma\gamma$	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$
Baryons	p	938.3	+1	$\frac{1}{2}$	1	Stable	—	$uud$
	n	939.6	0	$\frac{1}{2}$	1	898	$p e^- \bar{\nu}_e$	$udd$
	$\Lambda^0$	1116	0	$\frac{1}{2}$	1	$2.63 \times 10^{-10}$	$p\pi^-$ or $n\pi^0$	$uds$
	$\Sigma^+$	1189	+1	$\frac{1}{2}$	1	$0.799 \times 10^{-10}$	$p\pi^0$ or $n\pi^+$	$uus$
	$\Sigma^0$	1193	0	$\frac{1}{2}$	1	$7.4 \times 10^{-20}$	$\Lambda^0 \gamma$	$uds$
	$\Sigma^-$	1197	-1	$\frac{1}{2}$	1	$1.48 \times 10^{-10}$	$\eta\pi^-$	$dds$
	$\bar{\Lambda}^0$	1315	0	$\frac{1}{2}$	1	$2.90 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 \pi^0$	$uss$
	$\bar{\Lambda}^-$	1321	-1	$\frac{1}{2}$	1	$1.64 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 \pi^-$	$dss$
	$\Delta^{++}$	1232	+2	$\frac{3}{2}$	1	$10^{-23}$	$p\pi^+$	$uuu$
	$\Omega^-$	1672	-1	$\frac{3}{2}$	1	$0.822 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 K^-$	$sss$
	$\Lambda_c^+$	2285	+1	$\frac{1}{2}$	1	$1.91 \times 10^{-13}$	$\Sigma^+ \pi\pi\pi$	$udc$



### 9.3 Universets udvikling i billeder

På de to følgende sider er grafisk illustreret, hvorledes man ud fra partikelfysikken forestiller sig universets udvikling fra Big Bang til i dag.



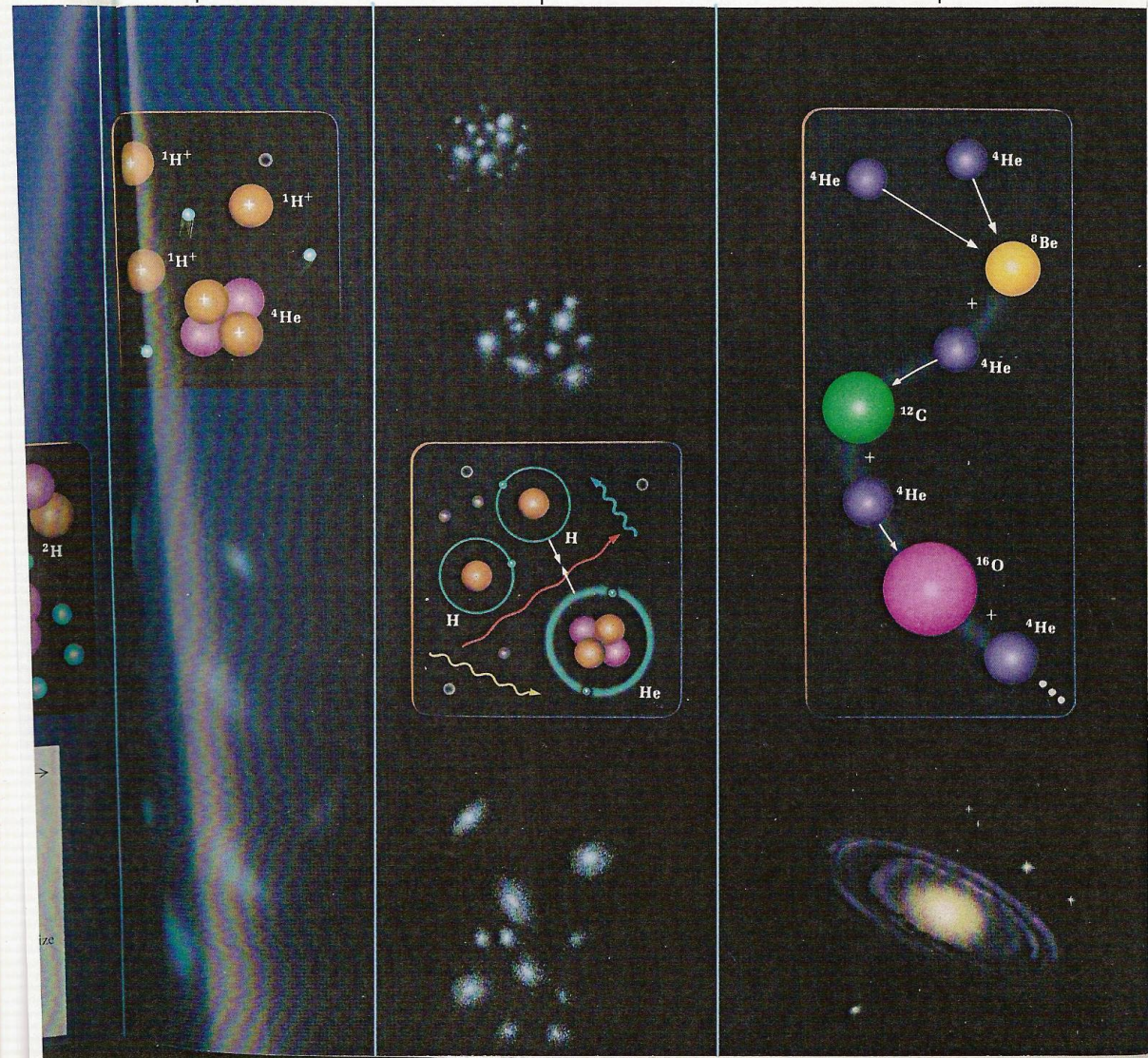
# A Brief History of the Universe

**AGE OF IONS**  
Expanding, cooling  
gas of ionized  
H and He

**AGE OF ATOMS**  
Neutral atoms form, pulled  
together by gravity; universe becomes  
transparent to most light

**AGE OF STARS  
AND GALAXIES**  
Thermonuclear fusion  
begins in stars, forming  
heavier nuclei

10<sup>3</sup>s      10<sup>13</sup>s      10<sup>15</sup>s      NOW



Hvorfor man ikke kan sige noget om universet før  $10^{-43}$  s, har en teoretisk forklaring. Med de partikelenergi, der råder fra  $10^{-42}$  s til  $10^{-36}$  s har man en teori (GUT) som forener den stærke den elektromagnetisk og den svage vekselvirkning til én vekselvirkning.

Man forestiller sig, at ved højere energier vil de 3 nævnte vekselvirkninger også kunne forenes med gravitationen. Der findes imidlertid ingen kvantefeltteori for gravitationen, og man har i dag ingen såkaldt TOE (Theory Of Everything), og de fleste tvivler på, at man finder den på et kvante felteoretisk grundlag.

Man forventer imidlertid (af teoretiske grunde), at foreningen af de 4 vekselvirkninger sker ved afstande på  $10^{-35}$  m.

Sammenligner man med kerneradius  $10^{-14}$  m og 1 lysår =  $9,46 \cdot 10^{15}$  m, så er denne afstand i det samme forhold til neutronens radius, som neutronen er i forhold til en galakse.

Denne længde kaldes for Planck-længden  $l_P$  og den kan udtrykkes ved naturkonstanter som:

$$l_P = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}} = 1,616 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Den tid det tager lyset at tilbagelægge Planck-længden er:

$$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c}} = 0,593 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

Vi har derfor ingen muligheder for at udtale os om, hvad der skete med universet før Planck tiden, da universet var mindre en Planck-længden

## 10. Vidnesbyrd om Big Bang. Baggrundsstrålingen.

Selv om Big Bang teorien har været kendt siden 1930 med Hubbels lov, så var teorien indtil omkring 1970 af spekulativ natur, og man forventede – af indlysende grunde – ikke nogen afgørende eksperimentelle vidnesbyrd, der kunne bekræfte teorien.

Dette ændrede sig imidlertid, da de to ingeniører Arno Penzias og Robert Wilson i 1965 opdagede (i deres bestræbelser med at eliminere baggrundsstøj i radiostråling) en mikrobølgestråling, af ukendt oprindelse og som tilsyneladende var ens i alle retninger.

Senere fandt man ud af at strålingen nøjagtig svarede til, hvad man ville forvente ud fra Plancks strålingslov, svarende til temperaturen 2,7 K.

Da kosmologerne hørte om denne opdagelse, opfattede de det hurtigt som det afgørende vidnesbyrd om Big Bang, idet de opfattede strålingen som et "ekko" fra Big Bang.

Det er ikke umiddelbart at forstå, at vi kan modtage stråling nu, som er udsendt for 13 mia. år siden, men det er fordi vi opfatter rummet som uendeligt, mens det i virkeligheden er krumt, således at stråling udsendt i rummet aldrig vil kunne undslippe dette rum.

For at forstå dette lidt nærmere, må man redegøre for nogle begreber.

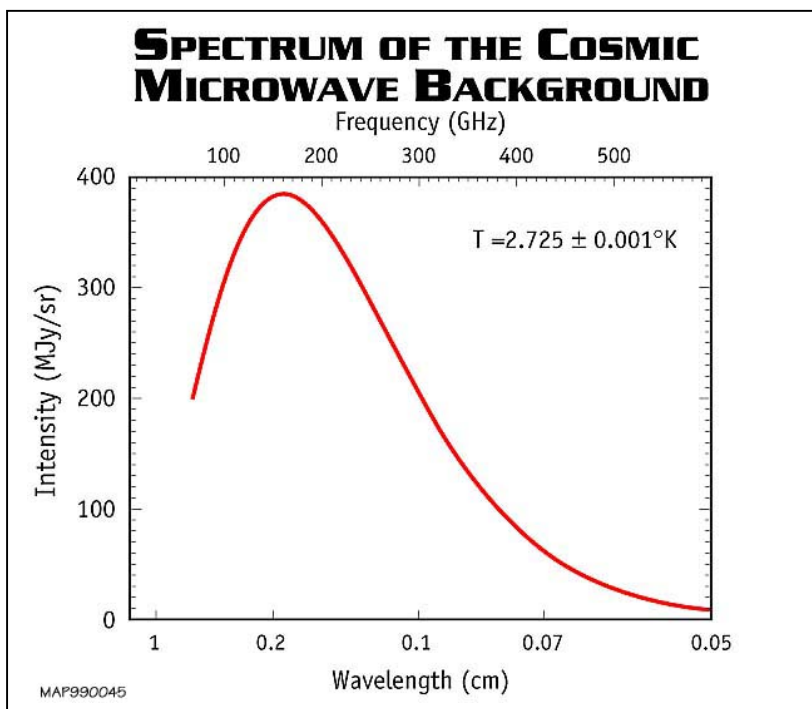
### Plancks strålingslov (den første kvantefysiske formel).

Alle legemer i termodynamisk ligevægt med temperatur  $T$  udsender stråling givet ved Plancks strålingslov:

Den brøkdelt  $I(\nu)d\nu$  af strålingen, der pr. rumfangsenhed af stoffet udsendes i frekvensintervallet  $d\nu$ , er givet ved formlen, hvor  $h$  er Plancks konstant og  $k$  er Boltzmanns konstant  $8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

$$I(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 \left( e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)}$$

Nedenfor er vist den observerede kurve for baggrundsstrålingen. Det viser sig at den passer overordentlig godt med Planck kurven, svarende til  $2,7 \text{ K}$



### Ækvipartitionsprincippet

Boltzmanns konstant er kendt fra den kinetiske molekylteori, som ”omregningsfaktoren” mellem den middelkinetiske energi af frie atomer og gassens temperatur.

$$\langle \frac{1}{2}mv^2 \rangle = \frac{3}{2}kT \quad (\text{Ækvipartitionsprincippet})$$

Der er således en entydig sammenhæng mellem partikel- og fotonenergier og temperatur, og nogen gange omtales de to begreber synonymt.

Hvis man ser på oversigten over universets udvikling, vil man f.eks. se, at det i starten af ”GUT” perioden er temperaturen  $10^{30} \text{ K}$  og partikelenergien  $10^{18} \text{ GeV}$ .

Ca 1 sek. Efter Big Bang er fotonenergien faldet til omkring 1 Mev, og partikeldannelsen ophørte. Universet kunne på dette tidspunkt opfattes som et Planck legeme med temperaturen  $T = 10^{10} \text{ K}$ .

Når rummet udvider sig, udvider strålingen i rummet sig også. Man må ikke opfatte rummet som en boks, der udvider og som holder på strålingen.

Det giver ingen mening at spørge, hvad der er bagved rummet.

Opdagelsen af baggrundsstrålingen, som Planck stråling i god overensstemmelse med eksistensen af en Planck-stråling, der opfyldte universet svarende til temperaturen  $10^{10} - 10^5 K$ , som er blevet "afkølet", har mistet energi, har fået kortere bølgelængde.

Man kan opfatte universet som et Planck-legeme med temperaturen  $2,7 K$ . Tilstedeværelsen af baggrundsstrålingen anses stadig for det mest direkte vidnesbyrd om "The Big Bang".