Kosmologi – Big Bang-modellen

De tre søjler

De tre grundpiller, som teorien om Big Bang bygger på, er

1) Rødforskydningen af bølgelængder i lyset fra fjerne galakser (kosmologisk rødforskydning)
2) Den kosmologiske baggrundsstråling (eller 3 K – strålingen)
3) Universets indhold af helium

I det følgende vil disse tre hjørnestene blive kommenteret nærmere

1. Hubbles lov om Universets udvidelse – rødforskydning af lys

I 1929 opdagede astronomen Edwin Hubble, at Universet udvidede sig. Denne konklusion byggede han på, at lyset fra fjerne galakser havde ændret bølgelængde (farve): jo mere bølgelængden er øget, desto fjernere er galaksen. Lyset siges at være *rødforskudt.*
Hubbles lov om Universets udvidelse:

(1) $$v_0 = H_0 \cdot r_0$$ **Hubbles lov**

Her er v_0 galaksens (nuværende) hastighed bort fra iagttageren, r_0 er (den nuværende) afstand fra galaksen til iagttageren. Loven kan kun anvendes med rimelig sikkerhed på store (kosmologiske) afstande i Universet, fx på afstande 100 mio. lysår eller derover. Solsystemet og vor egen galakse Mælkevejen (diameter ca. 100 000 lysår) holdes sammen af tyngdekræfter og bliver derfor ikke "splittet ad" på grund af udvidelsen.
Proportionalitetskonstanten H_0 kaldes Hubble-konstanten, og den har SI-enheden

(2) $$[H_0] = \left[\frac{v_0}{r_0}\right] = \frac{\mathrm{m/s}}{\mathrm{m}} = 1/\mathrm{s}$$ **SI-enhed for Hubblekonstant**

Hubblekonstanten angiver Universets udvidelsesrate på nuværende tidspunkt.
Konstanten måles ofte i enheden

(3) $$[H_0] = \left[\frac{v_0}{r_0}\right] = \frac{\mathrm{km/s}}{\mathrm{Mlysår}}$$ og har værdien (ca.) $$H_0 = 21\frac{\mathrm{km/s}}{\mathrm{Mlysår}} = 70\frac{\mathrm{km/s}}{\mathrm{Mpc}}$$

Her er Mlysår et mega-lysår, altså en million *lysår*. Et lysår er den afstand, som lyset tilbagelægger i det tomme rum på et år. Et lysår kan nemt omregnes til meter (m), hvis man husker på, at lyset bevæger sig ca. 300.000 km/s (lysets fart i det tomme rum kaldes herefter c):

(4) $$1\ \text{lysår} = c \cdot 1\text{år} = 300.000 \cdot 10^3\ \mathrm{m/s} \cdot 365{,}24 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\mathrm{s} = 9{,}47 \cdot 10^{15}\mathrm{m}$$

Afstandsenheden 1 pc (1 parsec) er lig med 3,26 lysår.

Hubblekonstanten kan omregnes til SI-enheden på følgende måde:

(5) $$H_0 = 21\frac{\text{km/s}}{\text{Mlysår}} = 21\cdot\frac{10^3\ \text{m/s}}{10^6\cdot 9{,}47\cdot 10^{15}\,\text{m}} = 2{,}2\cdot 10^{-18}\ /\text{s}$$

Altså vokser galaksernes fart – set fra os - med 21 km/s for hver 1 million lysår, man går bort fra Solen (eller snarere Mælkevejen). Hvis afstandene i Universet er ubegrænsede, er også galaksernes fart uden begrænsning opadtil.

Eks 1: En galakse befinder sig i afstanden 300 mio. lysår fra vores galakse Mælkevejen. Hvad er dens fart bort fra os?
Svar:

$$v_0 = H_0\cdot r_0 = 21\frac{\text{km/s}}{\text{Mlysår}}\cdot 300\text{Mlysår} = 6300\text{km/s}$$

Altså er galaksens fart væk fra os hele 6300 km per sekund eller 23 mio. km/h!

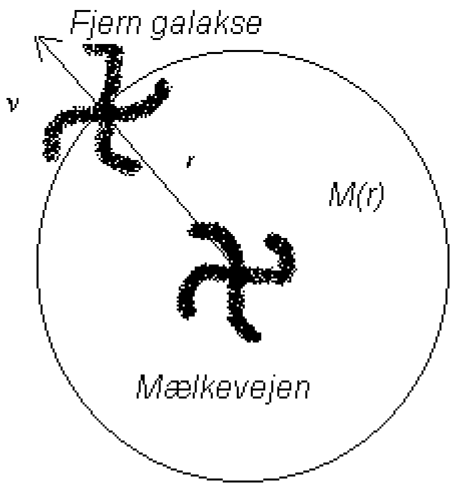
Hvordan har universet udvidet sig i fortiden, og hvordan vil det gå i fremtiden?
Svaret på dette spørgsmål er et af de ”hotte” i kosmologien også i dag. Måske har vi svaret inden for få år. Men allerede nu mener vi at have styr på, hvilke kræfter, der styrer Universets udvidelse. Der ser vi på i det følgende.
Her kommer *Newtons gravitationslov* ind i billedet:

Alle masser i Universet tiltrækker hinanden, og denne tiltrækning bremser Universets udvidelse.
Jo større gennemsnitsmassefylden i Universet er, desto større er opbremsningen.

Mere præcist kan vi opskrive størrelsen af den gravitationskraft F, der virker mellem to masser M og m i den indbyrdes afstand r:

(6) $$F = -G\cdot\frac{m\cdot M}{r^2},\qquad G = 6{,}67\cdot 10^{-11}\,\frac{\text{m}^3}{\text{s}^2\cdot\text{kg}}$$ **Newtons gravitationslov**

Det negative fortegn for kraften betyder, at kraften på massen m er rettet mod centrum af massen M (tiltrækkende kraft)



På fig.1 ses Mælkevejen, som er udgangspunkt for vores afstands-måling. Hvis vi boede i en anden galakse, ville denne være vores ud-gangspunkt.
Indenfor afstanden r til Mælke-vejen befinder sig galakser m.m.

Figur 1: massen *M* indenfor radius *r* påvirker den fjerne galakse med massen *m*

med den samlede masse M. En fjern galakse med massen m i afstanden r påvirkes af kraften (6) fra den samlede masse M.
Bruger vi nu også Newtons 2. lov (kraft = masse gange acceleration)

(7) $$F_{\text{res}} = m \cdot a$$ **Newtons 2. lov**

og går vi ud fra, at gravitationskraften (6) er den eneste kraft på galaksen, er de to kræfter i (6) og (7) ens. Heraf får vi så:

(8) $$m \cdot a = -G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Her kan galaksens masse m fjernes på begge sider, og galaksens acceleration bliver

(9) $$a = -G \cdot \frac{M}{r^2}$$ **Galaksens acceleration**

Afstanden r til galaksen afhænger af tiden, således at

(10) $$r = R(t) \cdot r_0$$ **Skalering (fremskrivning) af afstande**

Her er r afstanden til galaksen til tidspunktet t, r_0 er den nuværende afstand. $R(t)$ er den såkaldte **skalafaktor**, dvs. den talfaktor, som alle (store) afstande i Universet ganges med, når de skal fremskrives fra den nuværende værdi til værdien på tidspunktet t.

Box 1:
Alle (store) afstande mellem galakser frem/tilbage-skrives med den samme talfaktor *R*(*t*). Denne faktor kaldes også for skalafaktoren til tiden *t*. Skalafaktorens nuværende værdi vælges ofte til at være 1. Er således på et tidspunkt *R* = 0,5, vil alle (store) afstande i Universet være halveret.

Af sammenhængen (10) finder vi galaksens hastighed *v*:

(11) $v = R'(t) \cdot r_0$

og endelig får vi fra (11) galaksens acceleration *a*:

(12) $a = R''(t) \cdot r_0$

Vi indsætter nu (10) og (12) i accelerationsligningen (9):

$$R''(t) \cdot r_0 = -G \cdot \frac{M}{(R(t) \cdot r_0)^2}$$

Denne kan nemt omskrives til ligningen

(13) $R''(t) = -G \cdot \dfrac{M/r_0^3}{R(t)^2}$

Hvis vi betegner Universets middelmassetæthed på nuværende tidspunkt med ρ_0, har vi

(14) $M = \rho_0 \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot r_0^3$

og dermed

$$\frac{M}{r_0^3} = \tfrac{4}{3}\pi \cdot \rho_0$$

som indføres i (13):

(15) $R''(t) = -G \cdot \dfrac{\frac{4}{3}\pi \cdot \rho_0}{R(t)^2}$

Som det er fremgået af fx enhedsligning (2), er $1/H_0$ en tid. Denne størrelse kaldes Hubbletiden:

(16) Hubbletiden = $\dfrac{1}{H_0}$ **Hubbletiden**

Indsætter vi den målte værdi fra (5), finder vi

(17) Hubbletiden = $\dfrac{1}{H_0} = \dfrac{1}{2{,}2 \cdot 10^{-18}/\mathrm{s}} = 14 \cdot 10^9$ år

---

Øvelse 1: Vis, at Hubbletiden er Universets alder, hvis Universet udvider sig med konstant hastighed. Benyt formel (1) i din argumentation.

Vi deler ligning (15) med H_0^2 og ganger med den igen! Herved fås ligningen

(18) $$R''(t) = -G \cdot \frac{\left(\frac{8}{3}\pi \cdot \rho_0\right) / H_0^2}{2R(t)^2} \cdot H_0^2$$

Vi indfører betegnelsen

(19) $$\rho_{\text{kritisk}} = \frac{3H_0^2}{8\pi \cdot G}$$ **Kritisk massetæthed**

der kaldes den (nuværende) kritiske massetæthed for Universet – af grunde, der fremgår senere. Indsættes værdier for de indgående størrelser, fås

(20) $\rho_{\text{kritisk}} = 9{,}2 \cdot 10^{-27}\ \text{kg/m}^3$ (svarende til ca. 5,5 brintatomer pr. m^3)

Øvelse 2: Vis, at dette er rigtigt ved at indsætte værdier i ligning (19)

Indføres nu (19) i ligningen (18), fås

(21) $$R''(t) = -\frac{\rho_0 / \rho_{\text{kritisk}}}{2R(t)^2}$$

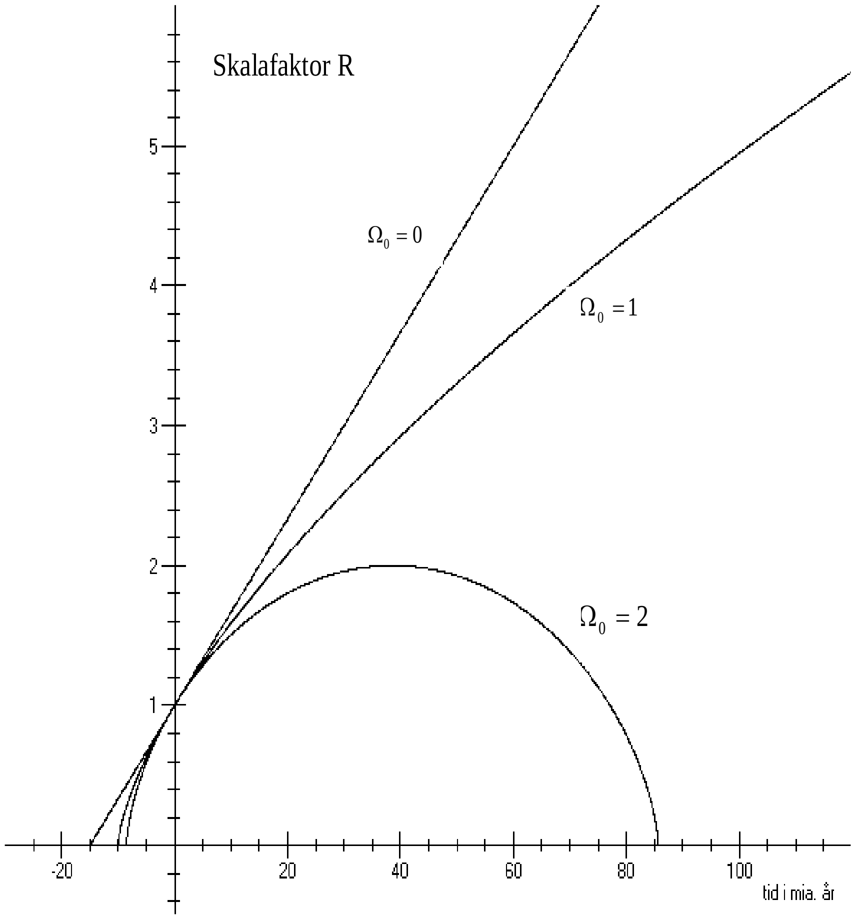
Endelig indføres betegnelsen

(22) $$\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{kritisk}}}$$ **Universets massetæthed i enheder af kritisk tæthed**

som altså er et mål for Universets nuværende (middel-)stofindhold i forhold til den kritiske massetæthed. Denne indføres i (21), og endelig får vi:

(23) $$R''(t) = -\frac{\Omega_0}{2R(t)^2} \cdot H_0^2$$ eller $$a_R = -\frac{\Omega_0}{2R(t)^2} \cdot H_0^2$$

Accelerationsligning for skalafaktor



Figur 2: skalafaktorers udvikling for forskellige kosmologiske modeller

Denne ligning er her udledt af Newtons gravitationslov, men kan også begrundes udfra Einsteins almene relativitets-teori (tyngdekraft-teori) for et stofdomineret univers. De modeller for Universet, der følger af denne ligning, kaldes *Friedmann-modeller*, opkaldt efter den russiske matematiker og meteorolog, der for første gang i 1922 fandt disse løsninger til Einsteins almene relativitetsteori.
Det fremgår af denne ligning, at skalafaktorfaktor-accelerationen er negativ, dvs. stofindholdet i Universet virker *opbremsende* på Universets udvidelse. Og jo større stofindholdet (i enheder af den kritiske massetæthed) er, dvs. jo større Ω_0 er, desto større er opbremsningen (decellerationen) i Universets udvidelse.

Det viser sig, at der er 3 væsentlig forskellige tilfælde:

a) $0 \leq \Omega_0 < 1:$

Stofindholdet er under den kritiske massetæthed.
Universet udvider sig i det uendelige. De fjerne galakser bremses ganske vist noget op med tiden, men hastigheden nærmer sig ikke 0.
Rummets krumning er negativ, og universet er uendeligt stort (åbent univers)

b) $\Omega_0 = 1:$

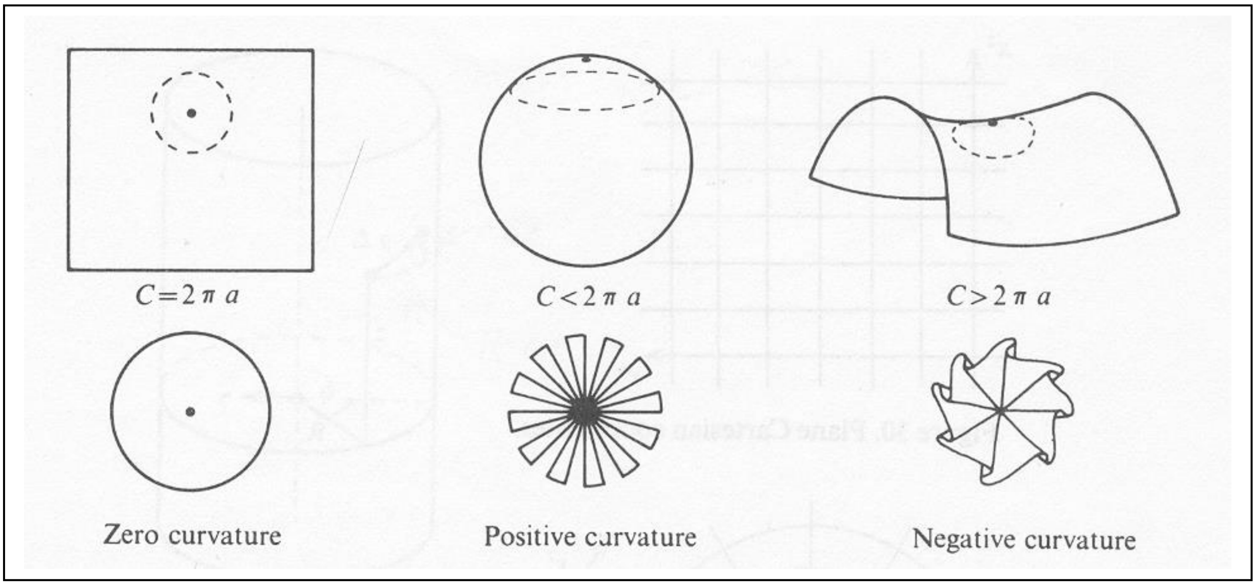
Stofindholdet er lig med den kritiske massetæthed.
Universet udvider sig i det uendelige, men udvidelsesraten og dermed galaksernes hastighed i forhold til os (og hinanden) nærmer sig 0.
Rummets krumning er 0, også kaldet fladt rum - universet er uendelig stort (åbent univers).
Sammenlign med en (flad) plan i matematik.

c) $\Omega_0 > 1:$

Universet bremses så hårdt op, at udvidelsen stopper på et tidspunkt, og udvidelsen afløses af en sammentrækning. Universets endelige skæbne er det såkaldte ”Big Crunch” – det store knus.

Rummets krumning er positiv, og rummet er endeligt stort (begrænset univers) – sammenlign med en kugleoverflade.

Rummets geometri kan sammenlignes med de todimensionale modeller på figuren nedenfor



Cirklens omkreds C er i det flade tilfælde givet ved formlen $C = 2\pi \cdot a$ hvor a er radius. Men når krumningen er positiv, er omkredsen mindre end $2\pi \cdot a$ og i tilfældet negativ krumning er omkredsen større end $2\pi \cdot a$.

Tidsudviklingen i de tre tilfælde er vist på fig. 2 ovenfor:

Graferne viser, hvordan skalafaktoren udvikler sig med tiden. På 2.aksen er skalafaktoren vist, på førsteaksen er Universets alder i mia. år. Den nuværende værdi for skalafaktoren er 1, se formel (10), og den nuværende tid er sat til 0.

Herved får Universets fortid negative værdier af tiden *t*, mens fremtiden tildeles positive værdier.

I tilfældet, hvor $\Omega_0 = 0$ er Universet tomt (stoffrit!) og udvider sig jævnt med tiden - altså ingen opbremsning. Alle galakser fjerner sig med konstant fart fra Mælkevejen, dog sådan, at jo fjernere de er, desto hurtigere bevæger de sig bort fra os og hinanden (Hubbles lov).
Men naturligvis kan et tomt univers ikke indeholde fx Mælkevejen!

Ligningen for *R* som funktion af *t* (tiden fra nu) er

(24) $$R(t) = H_0 \cdot (t + t_0)$$

hvor t_0 er Universets nuværende alder.

Øvelse 3: vis, at Universet i denne model har alderen $t_0 = 1/H_0$ *, idet du benytter, at skalafaktoren nu har værdien 1. Ved Universets start (Big Bang) var R = 0. Hvad er Universets alder i mia. år?*

I tilfældet (det *kritiske* tilfælde) hvor $\Omega_0 = 1$, er Universets (gennemsnits-)massefylde netop den kritiske massetæthed, se (22).
Det kan vises, at skalafaktoren i dette tilfælde er givet ved ligningen (*t* er tiden regnet fra nu)

(25) $$R(t) = \sqrt[3]{\left(\tfrac{3}{2}H_0\cdot(t+t_0)\right)^2} = \left(\tfrac{3}{2}H_0\cdot(t+t_0)\right)^{\frac{2}{3}}$$

hvor igen t_0 er Universets nuværende alder.

Øvelse 4: vis, at Universets nuværende alder i denne model er $t_0 = \frac{2}{3}\cdot 1/H_0$ *, idet du udnytter, at skalafaktoren nu har værdien 1. Hvad er Universets alder i mia. år i denne model?*

Som det fremgår af fig.2, udvider Universet sig i denne model langsommere og langsommere, dog uden at standse udvidelsen helt på noget tidspunkt.
Galakserne vil altså fjerne sig fra Mælkevejen med mindre og mindre hastighed, uden nogensinde at standse helt.

Endelig har vi tilfældet, hvor $\Omega_0 = 2$. Her er Universets (gennemsnits-)massefylde det dobbelte af den kritiske (se (22)). Som det fremgår af figur 2, vil Universet vokse til den dobbelte størrelse af det nuværende Univers (dvs. at alle store afstande er fordoblet i sammenligning med de nuværende afstande), og derefter blive mindre og mindre. Universet falder sammen og ender med "Big Crunch" (det store knus) efter en ganske lang periode.

Universets alder er i denne model endnu mindre end i tilfældene a) og b). Det kan vises (vi argumenterer ikke nøjere for det her), at Universets nuværende alder i dette tilfælde er

(26) $$t_0 = \left(\tfrac{\pi}{2} - 1\right)/H_0$$

Øvelse 5: find den nuværende alder af dette Univers i mia. år

---

Øvelse 6: begrund, at modellerne b) og især c) giver problemer, når det oplyses, at stjernemodelberegninger og på det seneste også radioaktive dateringer af stjernerne fortæller os, at de ældste stjerner (i de såkaldte kuglehobe) i vores mælkevej er mellem 12 og 14 mia. år gamle.

Det har vist sig, at ovenstående modeller måske ikke kan forklare afstandene i det nuværende Univers. Ligeledes er Universets nuværende alder i modellerne ovenfor for lille i forhold til de ældste stjerner i mælkevejen, i hvert fald for modeller med et realistisk *stof*indhold i Universet, som i dag formodes at være ca. $\Omega_m \approx 0{,}3$. Indeks *m* står for *matter* eller stof. Hvad kan der være galt med modellerne?
Astronomer har modstræbende måttet acceptere, at den af Einstein indførte og kasserede vacuum-energi (det tomme rum indeholder energi!!) måske alligevel er til stede i rummet. Dette giver en *frastødende kraft* på store (kosmologiske) afstande, således at accelerationsligningen (23) ændres til

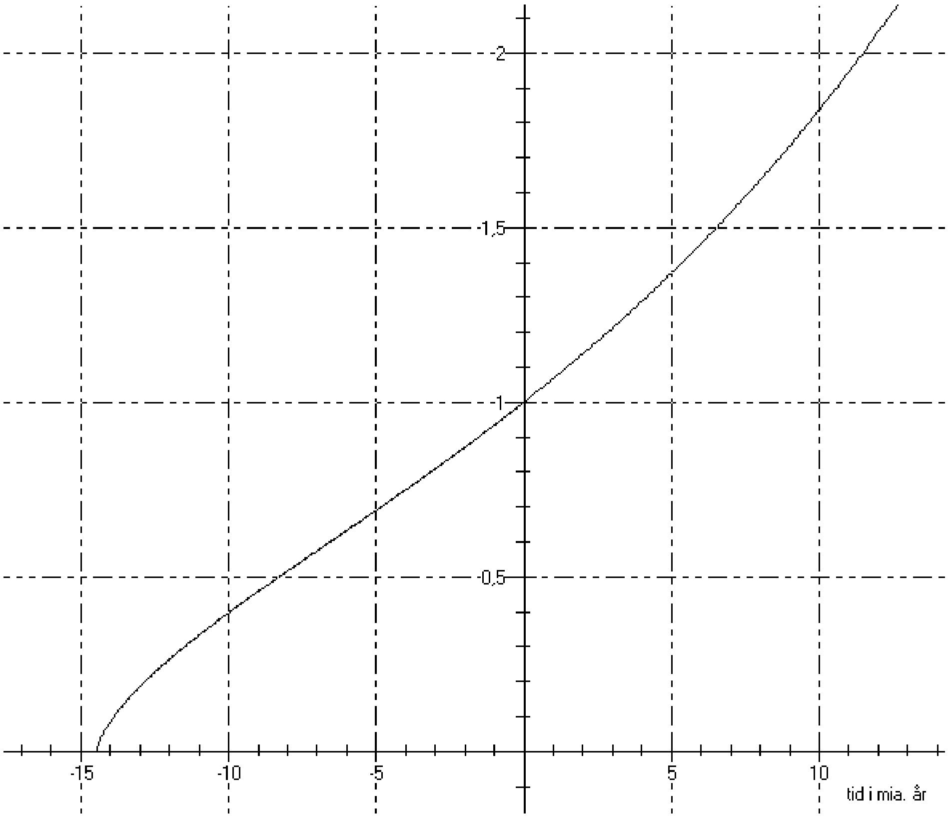
(27) $$R''(t) = \left(-\frac{\Omega_m}{2R(t)^2} + \Omega_\Lambda \cdot R(t) \right) \cdot H_0^2 \quad \text{eller} \quad a_R = \left(-\frac{\Omega_m}{2R(t)^2} + \Omega_\Lambda \cdot R(t) \right) \cdot H_0^2$$

Skalafaktor-accelerationen

Den nye konstant Ω_Λ er et udtryk for energien i det tomme rum (sort energi!). Værdien af denne antages i dag at være ca. 0,7, således at rummets samlede energiindhold svarer til den kritiske tæthed på 1 (idet energi og masse ifølge Einstein er ækvivalente: $E = m \cdot c^2$, altså energi = masse gange lysets fart i 2. potens). Den samlede massetæthed (inclusive vacuum-energien omregnet til masse) i enheder af den kritiske massetæthed (19) er nu givet ved:

(27a) $$\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Lambda$$

Denne samlede massetæthed bestemmer rummets geometri efter de principper der er nævnt ovenfor.
Det nye led i formlen (27) ovenfor giver – hvis ellers Ω_Λ er positiv – et *positivt* bidrag til skalafaktorens acceleration. Og dette positive bidrag *stiger* med skalafaktoren ifølge formel (27), i modsætning til stofbidraget, der *formindskes* ved stigende skalafaktor, fordi stoffet fortyndes, når afstandene øges. *Tomrumsenergien vinder på et tidspunkt over stoffet og afstandene mellem fjerne galakser vokser hurtigere og hurtigere!!* Universets afstande vil efterhånden vokse eksponentielt, og alle andre galakser (fjerne) forsvinder ud af syne med tiden. Kun de mere lokale galaksehobe vil kunne ses! Sådan ser Universets fremtid ud ifølge den nuværende Big-Bang-teori for Universet.



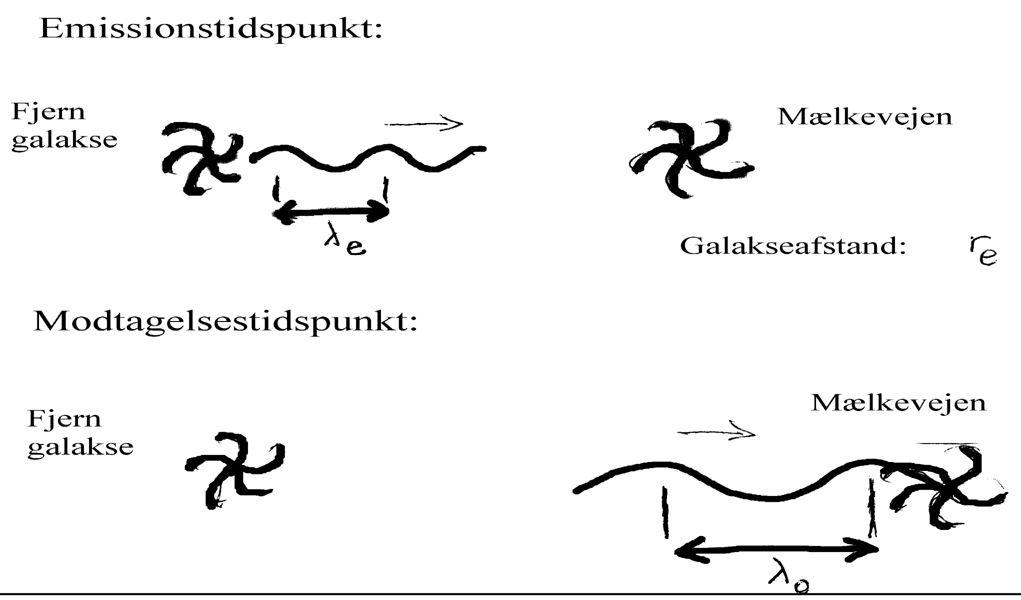
Figur 3: Skalafaktorudvikling i et Univers med $\Omega_m = 0{,}3$ **og** $\Omega_\Lambda = 0{,}7$

Øvelse 7: antag, at $\Omega_m = 0{,}3$ *og* $\Omega_\Lambda = 0{,}7$.
a) Hvilken værdi har skalafaktoren R i det øjeblik, hvor R-accelerationen er 0?
b) På hvilket tidspunkt sker/skete dette? Brug fig. 3 ovenfor.
c) Hvilket af de to accelerationsled i ligningen ovenfor dominerer for mindre værdier af skalafaktoren end denne, og hvilket led dominerer for større værdier?
d) Hvilket led dominerer i dag?

Hvordan ser så Universets udvikling ud ifølge denne sidste model?
Nedenfor ses hvordan skalafaktoren udvikler sig med tiden, idet vi har antaget værdierne fra øv.7 i modellen og sat Hubblekonstanten til 20 km/s/Mlysår.
Det fremgår af figuren, at Universet i denne model er ældre end i de foregående modeller med et realistisk stofindhold. Dette skyldes den periode med omtrent konstant udvidelseshastighed, hvor *R*-accelerationen var næsten 0. Man ser også, hvordan skalafaktoren stiger hurtigere og hurtigere også i fremtiden. Fx er Universets størrelse fordoblet om ca. 12 mia. år.

Skalafaktor og rødforskydning

I et univers, hvor afstandene vokser, vil lysbølger, der over lange tidsrum bevæger sig gennem rummet - samtidig med, at afstandene i Universet vokser - skifte bølgelængde i samme forhold som afstandene forøges. Ser vi på ikke alt for store afstande fra Mælkevejen skyldes dette, at de udsendte bølger modtages af en iagttager (os), der bevæger sig "baglæns" – altså bort fra de atomer, der har udsendt lyset (Dopplerforskydning). Lyset vil altså – fra galakse til galakse det passerer – blive mere og mere rødforskudt.
Betegnes lysets bølgelængde ved tidspunktet for emissionen (lysudsendelsen) med λ_e og den af os senere målte bølgelængde med λ_0, har vi følgende



Figur 4: Dopplerforskydninger forlænger bølgerne!

(28) $$\frac{\lambda_0}{\lambda_e} = \frac{r_0}{r_e} = \frac{R(0)}{R(t_e)}$$ **Når afstandene vokser, vokser bølgelængderne af lyset**

Her er $R(0)$ skalafaktoren nu (= 1), og $R(t_e)$ er skalafaktoren, da lyset blev udsendt i en fjern galakse for mange år siden. Jo tidligere i Universets historie, desto mindre var afstandene i Universet (og dermed $R(t_e)$), derfor vil forholdet (28) vokse med alderen af det lys, vi modtager.
Vi regner med, at lysets bølgelængde λ_e for det lys, der kan udsendes fra atomer (spektrallinier), ved udsendelsestidspunktet er den samme, som vi i dag måler fra atomerne i vore laboratorier. Men jo længere tid, lyset har bevæget sig gennem Universet, desto mere 'strakt' bliver det ifølge (28).
Er fx Universet afstande fordoblet siden lyset blev udsendt, er også bølgelængden af lyset, der i dag modtages af os, fordoblet.
Den såkaldte *rødforskydning* z for et fjernt objekt er bestemt ved

(29) $$1 + z = \frac{\lambda_0}{\lambda_e}$$

hvor λ_0 er den *målte bølgelængde* for en spektrallinie i lyset fra det fjerne objekt, λ_e er den tilsvarende målte bølgelængde fra den samme slags atomer *i laboratoriet*.
Rødforskydningen z i (29) er et mål for, hvor meget den målte bølgelængde for en (eller flere) spektrallinier for lyset fra det fjerne objekt afviser fra laboratorie-værdien af samme.

Er fx rødforskydningen 0,50, vil λ_0 være 50% større end λ_e, og ifølge (24) er afstandene i Universet – herunder vores afstand til den galakse, der udsendte lyset oprindeligt - derfor også blevet 50% større siden lysets udsendelse.

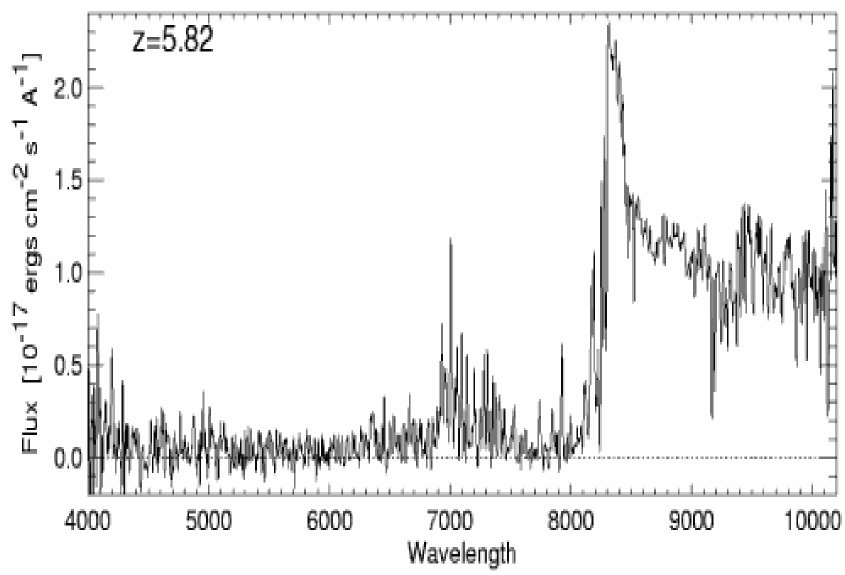
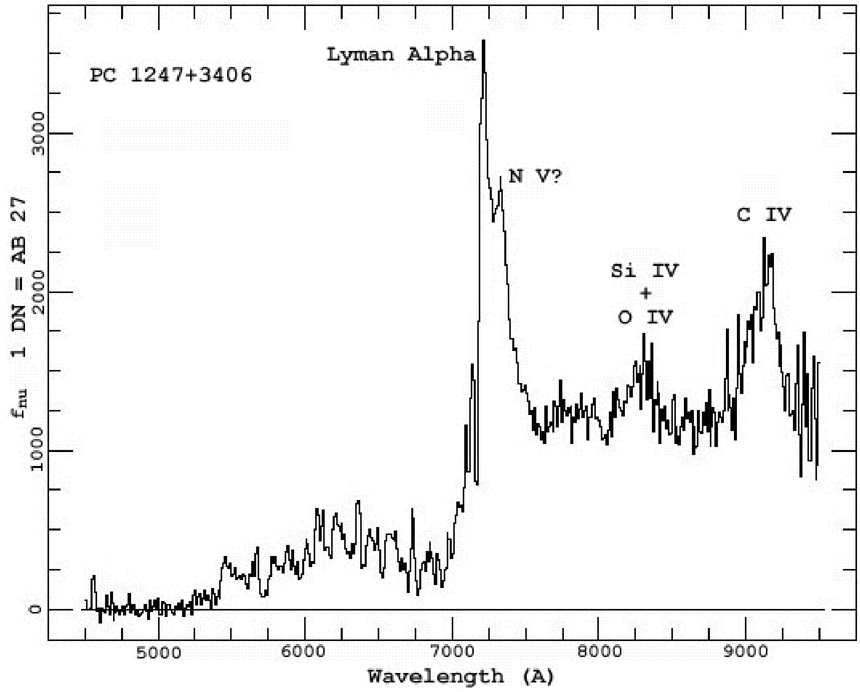


Fig. 5: Kvasarspektrum med rødforskydning 5,82. Afstandene i Universet er blevet 6,82 gange større siden dette lys blev udsendt!! Enheden på x-aksen er Ångstrøm (1Å = 0,1 nm)

Tilsvarende hvis rødforskydningen *z* er 5, vil bølgelængdeforholdet i (29) være 6, og derfor vil afstandene i rummet ifølge (28) være blevet 6 gange større siden lyset blev udsendt.

På fig.5 ses en kraftig spektrallinie ved ca. 8200 Å. Denne linie ses i laboratoriet ved ca. 1200 Å (*Lyman-alfa-linien fra brint*). Bølgelængdeforholdet i (29) er derfor 8200/1200 = 6,82, derfor er rødforskydningen *z* = 6,82 – 1 = 5,82.

Øvelse 8: bestem rødforskydningen for den kvasar, hvis spektrum ses på nedenstående figur.



Figur 6: Kvasarspektrum med bl.a Lyman-alfa emissionslinie

Øvelse 9: antag, at vi ser en galakse med rødforskydningen 4. Hvilken værdi havde skalafaktoren på det tidspunkt, hvor lyset, som vi ser nu, blev udsendt? Find den rejsetid, lyset har brugt for at nå os i modellen ovenfor – men også i de modeller, der er vist på fig.2. Brug evt. programmet Hubble-kosmografen hvis du vi se graferne i større detalje.

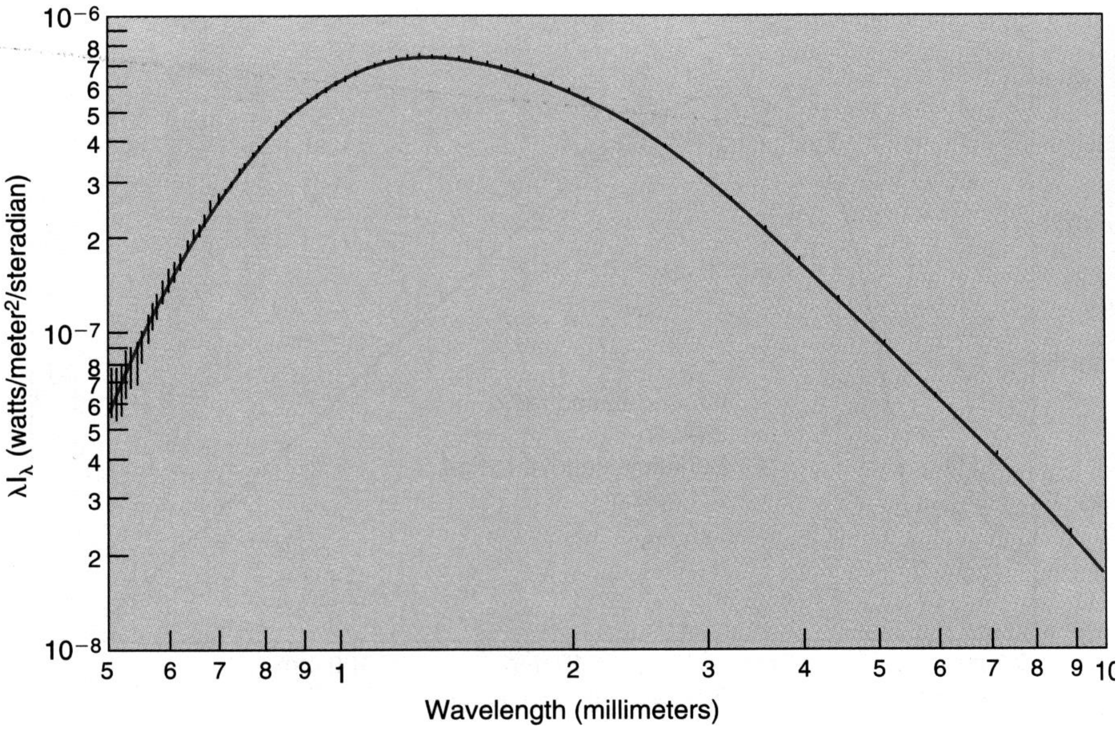
Øvelse 10: Brug resultatet fra øvelse 9 til at begrunde, at galakser med rødforskydning fx 4 til se lys-svagere ud i modellen på fig. 3 end modellen med $\Omega_m = 1$ *og* $\Omega_\Lambda = 0$ *(se fig. 2). Hvad gælder der om afstandene til galaksen i de to modeller?*

---

2. Den kosmologiske baggrundsstråling

Det ældste lys, vi nogensinde har set, er en reststråling, der formodentlig stammer helt tilbage fra ca. 380.000 år efter Big Bang. Før dette tidspunkt var rummet fyldt med *plasma* (atomkerner – især H og He - og elektroner) og temperaturen var høj. Denne plasma er meget uigennemsigtig for lys, og derfor ser vi ikke lys fra denne periode. Først da strålingens temperatur var faldet til ca. 3000 K, kunne atomkernerne indfange elektroner og danne atomkerner. Herefter var Universet næsten gennemsigtigt, og vi modtager i dag ”lys” direkte fra denne periode. Denne stråling kaldes *den kosmologiske mikrobølge baggrundsstråling* (CMBR).
På tidspunktet for denne strålings udsendelse var der tale om *synligt* lys, men da afstandene i rummet er blevet ca. 1000 gange større siden, er lyset nu ikke længere synligt for vore øjne. Bølgelængderne er jo blevet ca. 1000 gange større. Heldigvis har vi så bl.a. radioteleskoper, der i dag er i stand til at opfange denne svage mikrobølgestråling.

Denne stråling har en karakteristisk temperatur, der er *omvendt proportional* med afstandenes udvidelse, således at temperaturen er blevet 1000 gange *mindre* end ved strålingens udsendelse, og altså nu er ca. 3000 K/1000 = 3 K. Mere præcist er strålingens temperatur målt til 2,726 K. Denne stråling kommer til os fra alle retninger i rummet, og temperaturen er den samme i alle retninger. Der er kun ganske små afvigelser, omkring 0,00001 K i de forskellige retninger.
Ikke desto mindre er det disse meget små variationer i strålingens temperatur (og dermed intensitet), der forsøges målt fra balloner højt i atmosfæren over fx sydpolen eller fra satellitter. Disse variationer kan nemlig fortælle os næsten alt om Universets fortid (og fremtid), fordi Universets udvidelseshastighed, Universets stofindhold, energi i det tomme rum(!!) m.v. har sat sig små spor i denne stråling. Det er disse spor, mange astronomer (kosmologer) er på jagt efter.

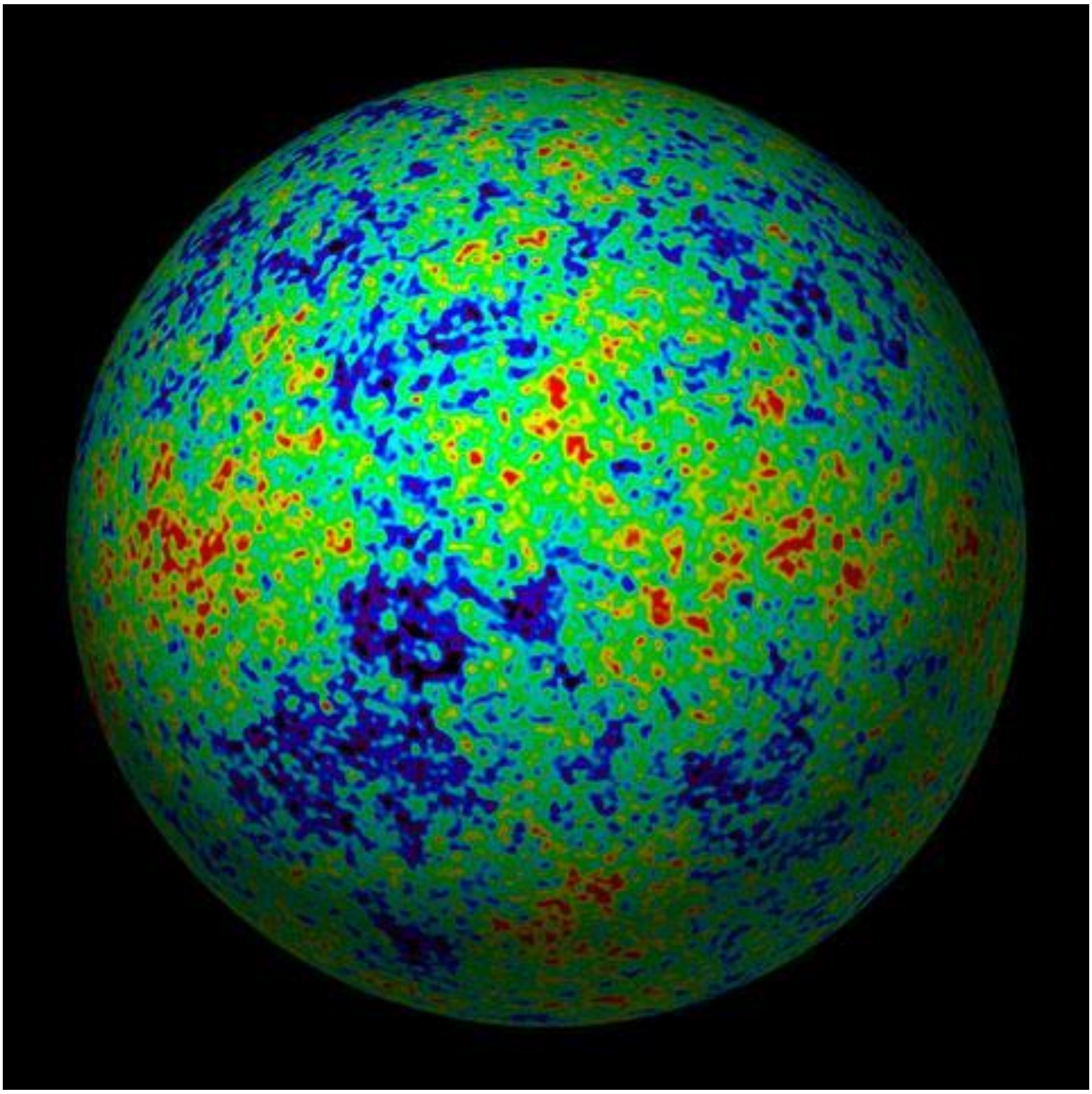


På fig.7 ses målinger af den kosmologiske baggrundsstråling sammen med en teoretisk kurve, der svarer til temperaturen 2,7279 K (fuldt optrukken). Det ses, at overensstemmelsen er slående.

Figur 7: Den kosmologiske mikrobølgebaggrundsstråling (CMBR)

Den amerikanske satellit COBE (Cosmic Background Explorer) målte dette spektrum af baggrundsstrålingen (CMB = Cosmic Microwave Background Radiation) i 1989. Senere missioner, bl.a. ballonmålinger fra Sydpolen (fx BOOMERANG) og satellitten WMAP samt den kommende

Planck-mission (start 2008) måler og vil måle de små afvigelser fra den ovenfor nævnte temperatur i forskellige retninger i rummet. Find evt. data om disse missioner på internettet.

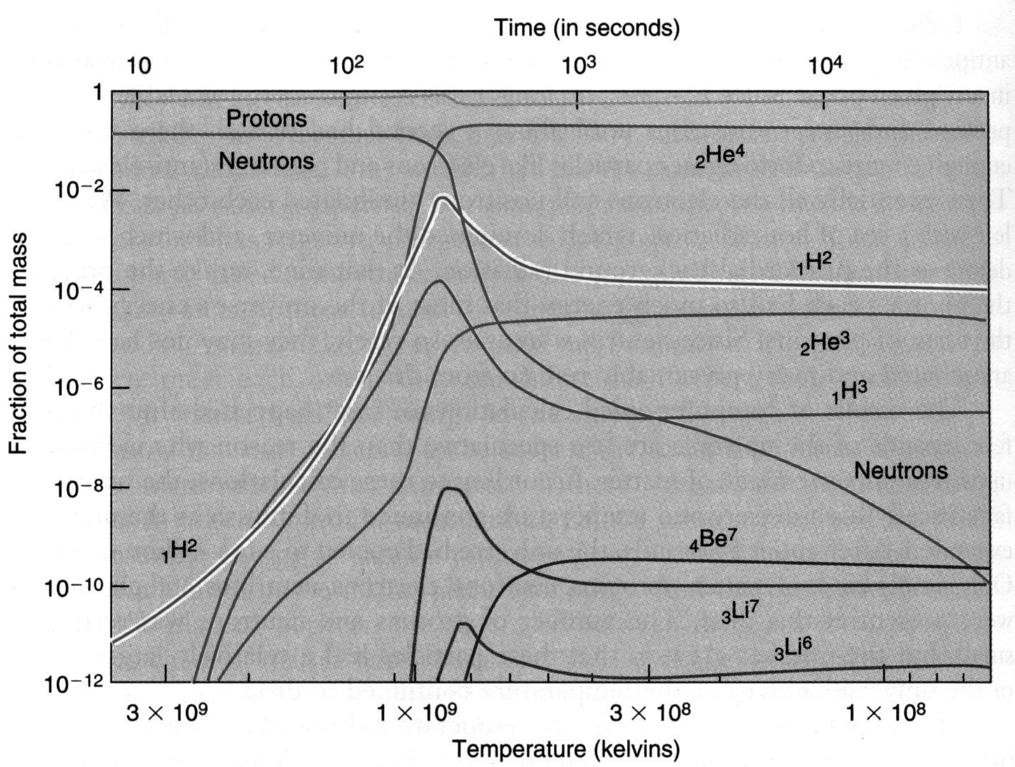


Figur 8: Satellitten WMAP's måling af de ganske små variationer i temperaturen i den kosmologiske baggrundsstråling. Røde områder er lidt varmere end 2,7279 K, blå områder lidt koldere. Dette kort viser begyndelsen til struktur-dannelse i Universet. Størrelsen af disse ”farveklatter” er i dag større end fx galaksehoben Virgo eller Coma.

3. Universets indhold af helium

Det viser sig, at det er vanskeligt at forklare fx Solens indhold af grundstoffet helium. I masseprocent en dette indhold ca. 27%. Andre målinger på stjerner eller interstellare gasser giver mellem 25 og 30%. Men stjernerne har efter teorierne om stjernes fusionsprocesser i hele deres

levetid kun produceret nogle få procent af denne helium. Når en stjerne i sin levetid har opbygget tungere grundstoffer som fx helium, vil en del af dette blive smidt ud i rummet i stjernens sidste livsfaser, hvor det indgår i det stof, der danner de nye stjerner, der igen beriger stoffet med nydannede grundstoffer osv. Men altså i alt kun nogle få procent helium. Spørgsmålet er derfor, hvor størstedelen af heliumindholdet kommer fra?
Her har Big Bang teorien et svar: det meste helium (masseprocent ca. 25) opstod ved fusionsprocesser i de første minutter af Universets eksistens.
En beregning af dannelsen af grundstoffer i de første minutter ses på figur 9 nedenfor. Det fremgår, at der i det væsentlige kun blev dannet helium – der var ikke tid til at danne de tungere grundstoffer før temperaturen var blevet for lav til, at dette kunne foregå.



Figur 9: beregnet nukleo-syntese i det tidlige Univers. Tiden øverst på figuren er tiden siden Big Bang. Figuren viser, hvordan forskellige partikler og atomkerner bidrager til den samlede masse på forskellige tidspunkter kort tid efter Big Bang.

På denne figur ses afbildet masseandelen af de forskellige elementarpartikler og atomkerner på forskellige tidspunkter efter Big Bang. Skalaen øverst giver tiden efter Big Bang i sekunder. Skalaen nederst giver temperaturen til de forskellige tidspunkter. Man ser, at temperaturen falder fra 3 mia. Kelvingrader til 100 mio. Kelvingrader i tidsrummet fra 10 sekunder til 10000 sekunder efter Big Bang. I denne periode forsvinder næsten alle neutroner, og langt de fleste bliver indbygget i helium-4 atomkerner, som består af 2 protoner og 2 neutroner. Af figuren ses det også, at der kun dannes mindre mængder af de tungere grundstoffer. De tungere grundstoffer som fx C, N, O, Fe dannes så ved senere fusionsprocesser i stjernerne langt senere i Universets historie – stjernerne (og galakserne!) er på dette tidlige tidspunkt slet ikke dannet.
Big Bang teorien tilbyder altså en forklaring på, hvor det meste af grundstoffet helium kommer fra!