

Big Bang Modellen

Varmestråling, rødforskydning, skalafaktor og stofsammensætning.

Jacob Nielsen¹

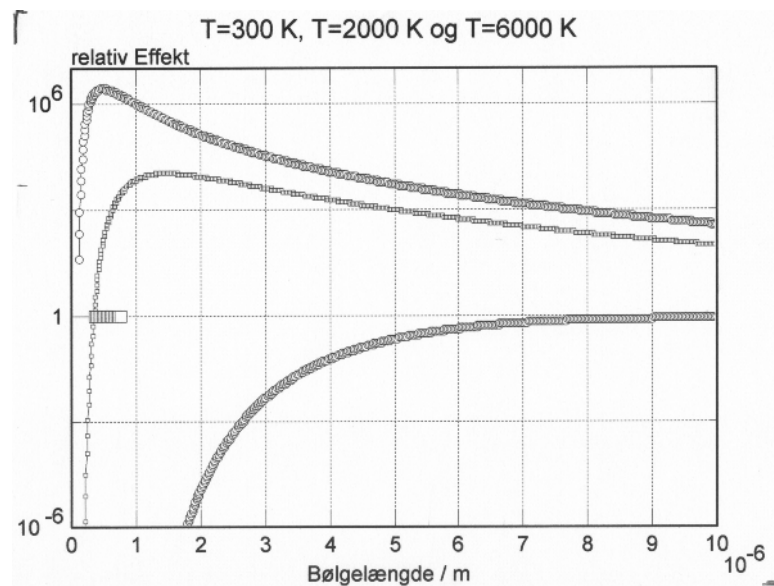
Varmestråling spiller en central rolle i forståelsen af universets stofsammensætning og udvikling. Derfor starter denne note om Big Bang modellen med omtale af Plancks strålingslov, der beskriver hvordan varmemstrålingens intensitet varierer med bølglængde og temperatur. Funktionen, der giver den effekt dP , der udstråles med bølglængder i intervallet $[\lambda; \lambda+d\lambda]$ fra en flade med areal A og temperatur T , er givet herunder.

$$dP = A * \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{c_2}{T \cdot \lambda}} - 1)} \cdot d\lambda$$

hvor:

$$c_1 = 3,7405 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \quad c_2 = 0,0143879 \text{ m} \cdot \text{K}$$

På figuren nedenfor er Planckfordelinger svarende til forskellige temperaturer tegnet.



Sortlegemestråling² svarende til tre forskellige temperaturer. Desuden er det synlige bølglængde-område markeret. Bemærk, at skalaen på andenaksen er logaritmisk.

¹E:\Fysik\QM's udvikling\Plancks Virkningskvantum 01.wpd

²Strengt taget gælder Plancks strålingslov kun for såkaldte absolut sorte legemer, men mange flader opfylder med god tilnærmelse loven. Betegnelsen absolut sort bruges faktisk normalt om overflader, der opfylder Plancks strålingslov. Fladerne behøver ikke være sorte i normal forstand. Solens overflade er med god tilnærmelse sort, hvad varmemstråling angår.

Planck fremlagde sin strålingslov år 1900. I sin udledning af strålingsloven kvantiserer Planck virkningen (strækning gange impuls). Kvantiseringsideen tages senere op af Einstein i 1905 til forklaring af den fotoelektriske effekt og af Bohr i 1913 i hans model af brintatomet.

Hvis man beregner den samlede udstrålede effekt ved alle bølgelængder ved hjælp af Plancks strålingslov, så fås **Stefan-Boltzmanns lov**, som Stefan fandt i 1879 og Boltzmann i 1884. Den samlede udstrålede effekt fra en flade med areal A og absolut temperatur T er:

$$P = A \cdot \sigma \cdot T^4$$

σ er Stefan-Boltzmanns konstant. $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ Varmestrålingen vokser kraftigt med temperaturen - pr. kvadratmeter er effekten cirka 500 W fra en 300 K varm hudoverflade, 3.5 kW fra en 500 K varm brændeovn og i størrelsesordenen 10 MW fra solens overflade!

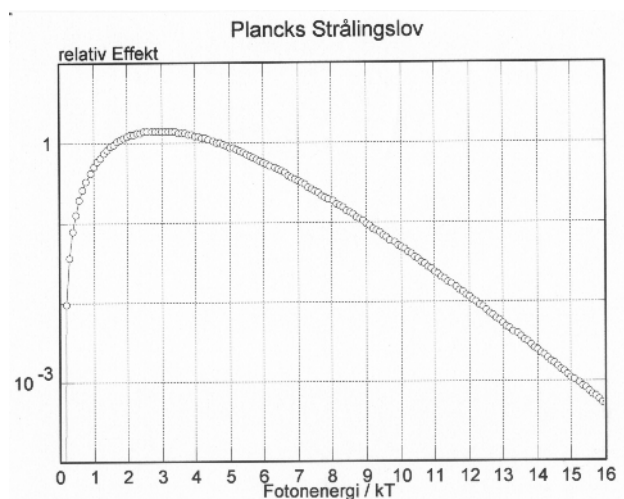
I øvrigt bruges varmemestrålingen i dag til berøringsfri temperaturmåling for eksempel, når temperaturen i kølediske skal kontrolleres.

Endelig er Planckfordelingen i overensstemmelse med **Wiens forskydningslov**, ved hjælp af hvilken man kan beregne den bølgelængde λ_{max} hvor der udstråles mest energi:

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = 2.8978 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

loven udtrykker, at bølgelængden halveres, hvis den absolutte temperatur fordobles. En konsekvens af loven er at legemer ved opvarmning først er rødglødende og siden hvidglødende. Ved lave temperaturer udsendes ikke blåt lys.

Eksempel: Planckfordeling og Kernesyntese



Plancks strålingslov kan omskrives til en funktion af fotonenergien ($E_{\text{foton}} = hf = hc/\lambda$). På figuren er energienheden kT anvendt, hvor $k = 1,38066 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ er Boltzmanns konstant. Strålingsintensiteten er stadig ca. 10% af den maksimale ved en fotonenergi på 9 kT .

Kort tid efter Big Bang var temperaturen så høj, at kerner ikke kunne hænge sammen. De blev straks splittet ad af en foton, hvis energi oversteg bindingsenergien. Som det fremgår af figuren vil et betragteligt antal fotoner have energier over 10 kT . I det følgende regner vi med, at kerner kan hænge sammen, når:

$$E_{\text{bind}} > 10 \text{ kT}$$

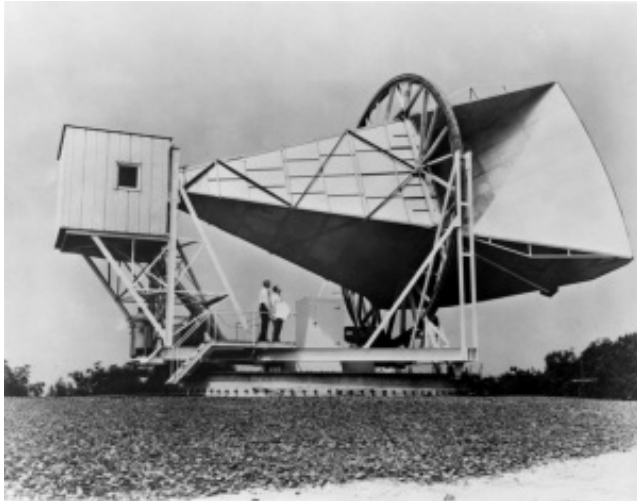
Kernernes overlevelse afhænger også af tætheden af stof og stråling, så dette kan aldrig blive mere end en "tommefingerregel". Som det fremgår af tabellen nedenfor, har deuterium H-2 en relativt lille bindingsenergi. Da deuterium skal dannes, før kernesyntesen kan komme videre, udgør stoffet en flaskehals. Dette er grunden til, at der ved Big Bang stort set kun nåede, at blive dannet brint og helium, før universet blev for koldt og tætheden for lille.

Kerne	Bindingsenergi - E_b MeV	T-syntese = $E_b/10 \cdot k$ K
H-2	2,224574	2,58E+09
H-3	8,48286	9,84E+09
He-3	7,71811	8,96E+09
He-4	28,29588	3,28E+10
	Ioniseringsenergi for brint	
	1,36E-05	1,58E+04

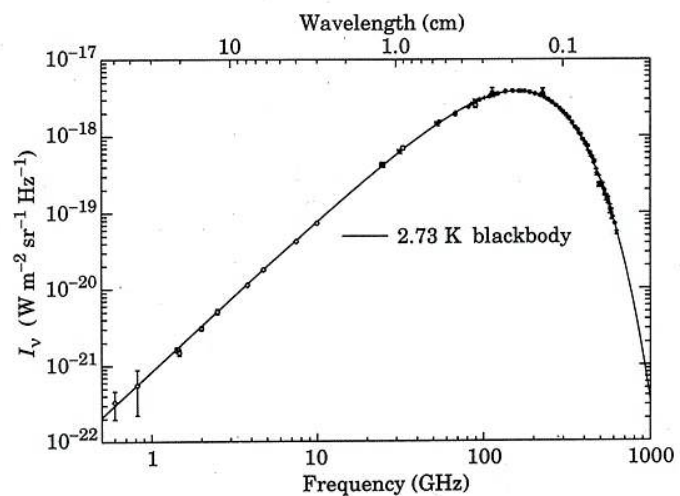
Bemærk, at atomer først kan dannes ved meget lavere temperaturer.

Den Kosmiske Baggrundsstråling.

I 1965 opdager Arno Penzias og Robert Wilson ved et tilfælde, at der kommer mikrobølgestråling fra alle dele af himmelen. I dag mener man, at strålingen stammer fra et tidspunkt 380.000 år efter Big Bang. På dette tidspunkt blev universet gennemsigtigt, så fotonerne fra varmestrålingen kunne rejse frit rundt i universet.



Penzias og Wilsons mikrobølge-antenne.



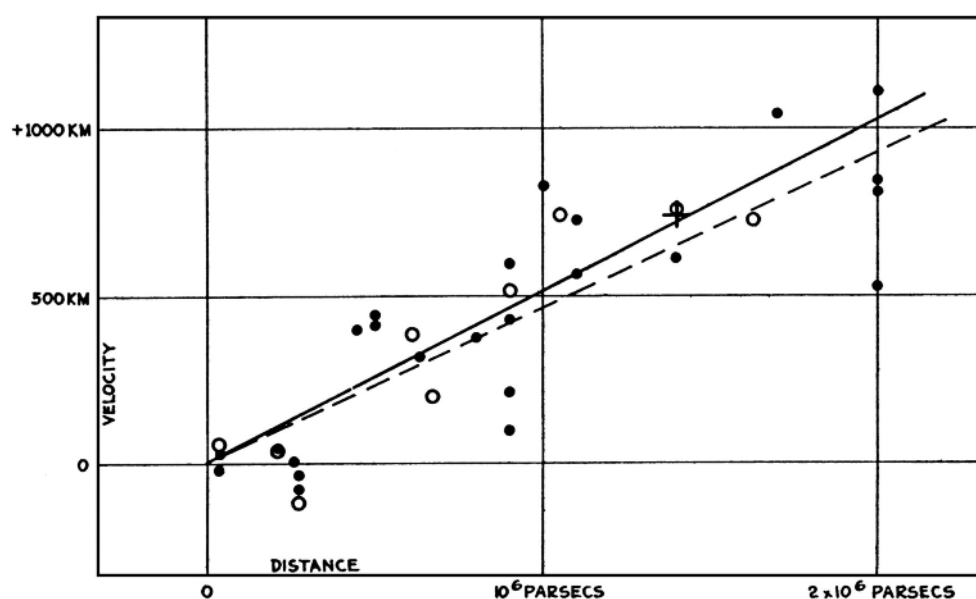
Figuren til højre viser fordelingen af den Kosmiske Baggrundsstråling. På figuren er indtegnet en Planckkurve svarende til en temperatur på 2,73 K.

Big Bang modellen forudsiger en sådan “strålingsrest” fra det tidlige univers. Den kosmiske baggrundsstråling er en af de såkaldte “søjler”, som modellen bygger på. Vi skal senere beskæftige os med to andre søjler: Universets udvidelse og universets stofsammensætning.

Universets udvidelse og skalafaktor

Edmund Hubble (1889-1953) opdagede, at alle galakser tilsyneladende fjerner sig fra os, og han publicerede resultatet i 1929. Hubble observerede, at Rødforskydningen af lyset fra galakserne vokser lineært med galaksernes afstand fra observatøren. Dette tolkede Hubble som at galaksernes flughastighed er proportional med afstanden. Proportionalitetsfaktoren har siden fået navnet Hubble-parameteren.

$$v_{\text{flugt}} = H \cdot r, \quad H = 22 \frac{(\text{km} / \text{s})}{\text{Mly}}$$



Hubbles originale diagram fra 1929. En parsec er $3.08568025 \cdot 10^{16}$ m.

Hvis universet udvider sig således, at alle afstande mellem galakser forstørres med den samme faktor i løbet af et givet tidsrum, fører det netop til en rødforskydning, der er proportional med afstanden. Universets udvidelse beskrives med den såkaldte skalafaktoren $R(t)$, som er givet ved:

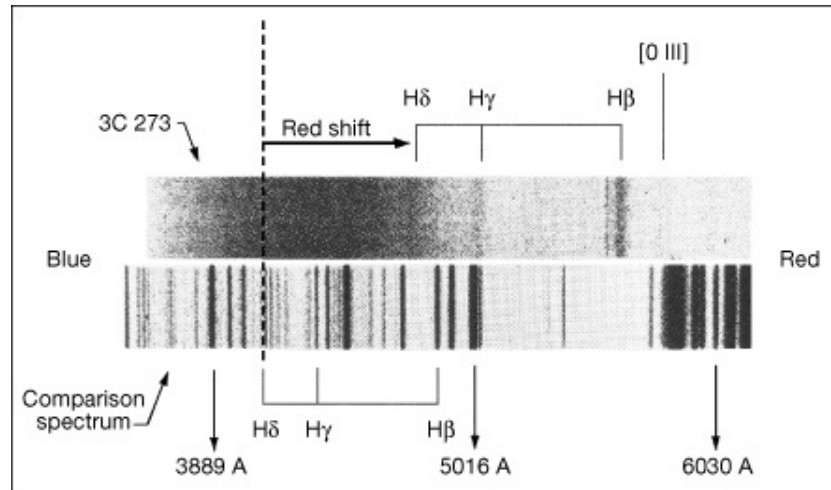
$$R(t) \equiv \frac{\text{Afstand til tiden } t}{\text{Afstand nu}}$$

I det såkaldte år 2003 univers er universets udvidelse siden Big Bang beskrevet med funktionen:

$$R(t) = 0,452 \cdot (2 \cdot \sinh(0,0929 \cdot t))^{(\frac{2}{3})}$$

hvor tiden måles i Gy.

Rødforskydning og skalafaktor



Figuren viser, hvordan de blå og violette brintlinjer H_β , H_γ og H_δ i lyset fra galaksen 3c273 er rødforskudt - det vil sige forskudt mod større bølgelængder..

Rødforskydningen z er defineret som:

$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{lab}} - 1$$

λ_{obs} kan være den målte bølgelængden af en brintlinje udsendt fra en galakse, hvor linjen fra brint i laboratoriet har bølgelængden λ_{lab} . Rødforskydningen af lys fra fjerne objekter skyldes universets udvidelse, og der gælder sammenhængen:

$$R(t) = \frac{\lambda_t}{\lambda_{nu}} = \frac{\lambda_{lab}}{\lambda_{obs}} = \frac{1}{z + 1}$$

Vi kan således beregne universets skalafaktor på det tidspunkt, hvor fotonen rejste fra galaksen ud fra rødforskydningen af fotonen.

Universets temperatur og skalafaktor.

Temperatur af det sene univers defineres som temperaturen af den Planckfordeling, der beskriver den kosmiske baggrundsstråling. Temperaturen af det tidlige univers er temperaturen af Planckfordelingen for de fotoner, der fyldte universet, og var i termodynamisk ligevægt med stoffet.

Wiens forskydningslov giver sammenhængen mellem skalafaktoren og universets temperatur.

$$\lambda_{\max}(t) \cdot T(t) = \lambda_{\max}(nu) \cdot T(nu)$$

$$\Downarrow$$

$$T(t) = T(nu) \cdot \frac{\lambda_{\max}(nu)}{\lambda_{\max}(t)} = \frac{T(nu)}{R(t)} = \frac{2,73K}{R(t)}$$

Sammenhængen mellem skalafaktor og temperatur er således enkel. Dengang skalafaktoren var det halve, da var temperaturen dobbelt så stor.

Eksempel *rødforskudt lys fra galaksen 3c273*

Brintlinjen H_{δ} har i laboratoriet bølgelængden 410,17 nm. Linjen optræder i spektret fra galaksen, men her er den rødforskudt til bølgelængden 475,12 nm. Linjens rødforskydning bliver:

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{lab}}{\lambda_{lab}} = \frac{475,12 \text{ nm} - 410,17 \text{ nm}}{410,17 \text{ nm}} = 0,15834$$

Skalafaktoren på udsendelsestidspunktet var:

$$R(t) = \frac{1}{1+z} = 0,86331$$

Galaksernes afstand var således ca. 86 % af, hvad de er i dag, da lyset blev udsendt. Tidspunktet for lysets udsendelse bliver ifølge univers2003-modellen 11,7 Gy. Ifølge univers2003 modellen er universets alder i dag 13,7 Gy, så lyset har været undervejs i ca. 2 Gy.

Universets temperatur var på dette tidspunkt:

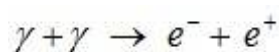
$$T(t) = \frac{1}{R(t)} = \frac{2,73}{0,86331} = 3,16K$$

Universets stofsammensætning.

Vi har i det forgående set, hvordan fotoner fra den kosmiske baggrundstråling kan bryde bindinger i atomer og kerner. Vi går nu tilbage til de første sekunder efter BB, hvor temperaturen og dermed fotonenergien var meget høj. Dengang kunne energien fra to fotoner danne et partikel-antipartikel-par jvf. Einsteins lov om ækvivalens mellem energi og masse $E = m c^2$.

Eksempel dannelse af elektron - positron par.

To gammafotoner kan danne et elektron positron par.



Energien svarende til to elektronmasser beregnes, og sættes lig med middelfotonenergien, der er 3/2 kT:

$$2 \cdot m_e \cdot c^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

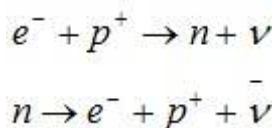
$$\Downarrow$$

$$T = \frac{4 \cdot m_e \cdot c^2}{3k} = 7,9 \cdot 10^9 \text{ K}$$

Det kræver således en temperatur på cirka otte milliarder Kelvin at danne et elektron positron par.

Da temperaturen blev for lav til dannelse af et elektron-positron par; og dermed også meget for lav til dannelse af et proton-antiproton par, forsvandt antipartiklerne ved annihilation med den tilsvarende partikel. Vi ved endnu ikke, hvorfor der var lidt mere stof end antistof, således at der blev en rest af stof tilbage efter annihilationen.

Temperaturen var dog stadig høj nok til, at protoner kunne omdannes til neutroner. Neutronen er lidt tungere end en protonen og en elektron tilsammen. Derfor kræver det energi at omdanne en proton og en elektron til en neutron. Den modsatte proces - β^- -henfaldet kan forløbe spontant.



Når temperaturen kommer under ca. 10^9 K, kan der ikke dannes nye neutroner. Frie neutroner er ustabile og henfalder med en halveringstid på 10,3 minutter. Men ifølge tabellen side 3 er temperaturen nu lav nok til dannelse af kerner. Kernesyntesen er overstået efter cirka fire minutter - altså inden en stor del af neutronerne er henfaldet.

Big Bang modellen forudsiger, at der ved begyndelsen af kernesyntesen blandt 100 nukleoner er en fordeling på cirka 88 protoner og 12 neutroner. Af tolv neutroner kan vi danne seks heliumkerner, der tilsammen vejer cirka 24 u. Så er der kun protoner tilbage, og af dem kan vi kun danne brint. Så BB modellen forudsiger, at cirka 24 % af stoffet i universet er helium. Det er i god overensstemmelse med, hvad der observeres i dag.

Universet bliver gennemsigtigt.

Omkring 380000 år efter BB var temperaturen blevet så lav, at fotonerne ikke kunne ionisere brint, så elektroner og protoner gik sammen og dannede brint. Herved blev universet gennemsigtigt. Brint absorberer kun fotoner med bølgelængder svarende til spring mellem energiniveauerne og ikke alle de andre fotoner. Fotonerne i den kosmologiske baggrundsstråling stammer fra dette tidspunkt. Baggrundsstrålingen er i denne forstand et billede af universet år 380000 efter BB.

Stjerner og galakser.

Efter nogle hundrede millioner år er de første stjerne dannet, og de samler sig i galakser. På den store skala er universet isotropt og homogent, så det giver mening at tale om en skalafaktor, der har vokset siden BB. Det afhænger så af stof/energi tætheden i universet, om denne ekspansion vil fortsætte i al evighed.

Konklusion

BB-modellen understøttes af observationer - de såkaldte søjler. De tre af søjlerne har vi været inde på.

- 1.** Vi observerer den baggrundsstråling, som BB-modellen forudsiger.
- 2.** Vi observerer en rødforskydning, der vokser med afstanden - ligeledes i overensstemmelse med modellen.
- 3.** Vi observerer som forventet, at cirka en fjerdedel af universets stof er helium - resten brint.

På næste side ses to oversigtsfigurer over universets udvikling.

