

Ranný Vesmír

Kozmológia a elementárne častice

čas (sec)

0 ⇒ **Big Bang** - nekonečne horúci a hustý vesmír (?) ($T \sim 10^{15} \text{ K}$)

↓

⇒ **Epocha kvantovej gravitácie** (?)

↓

10^{-43} Vesmír vzniká z kvantovej gravitačnej fluktuácie.

↓

⇒ **Epocha GUT**

10^{-34}

⇒ **Kozmická inflácia** (?) (každých 10^{-34} sec sa vesmír zdvojnásobil)

Obrovská energia inflatonovho poľa falošného vákua sa konvertovala na častice

↓

10^{-32}

⇒ **Kvarková epocha** (farebný svet)

↓

⇒ **Teplota $\sim 3 \cdot 10^{15} \text{ K}$ (energia $\sim 200 \text{ GeV}$):**

- Fázový prechod → Vznik Higgsovho kondenzátu → leptóny, kvarky, $W^\pm$, Z-bozóny nadobúdajú hmotnosť
- Vznik prebytku látky nad antilátkou ($\sim 1:10^{10}$)

↓

10^{-11}

⇒ **Teplota $\sim 10^{15} \text{ K}$ (energia $\sim 100 \text{ GeV}$):** ← *Súčasný experiment*

Obsah vesmíru: leptóny, kvarky, gluóny, $W^\pm$, Z-bozóny, fotóny

↓

10^{-5}

⇒ **Teplota $\sim 10^{12} \text{ K}$ (energia $\sim 200 \text{ MeV}$):**

“Confinement” kvarkov → formovanie hadrónov (protóny, neutróny, iné baryóny, mezóny → existujú len “biele” objekty .

↓

10^{-2}

⇒ **Teplota $\sim 10^{11} \text{ K}$ (energia $\sim 10 \text{ MeV}$):**

Termodynamickú rovnováhu tvoria : elektróny (e^-), pozitrony (e^+), neutrína (ν) a fotóny (γ);

Počet nukleónov je malý ($n/p = 10^{-9}$) protóny a neutróny sú v rovnováhe (50%:50%)

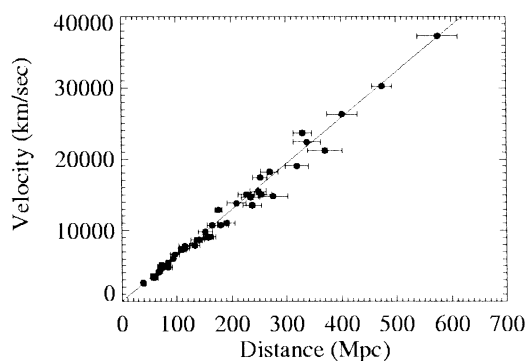
↓

10 ⁻¹	⇒ Teplota ~ 3.10 ¹⁰ K (energia ~ 3 MeV, hustota ~ 3.10 ¹⁰ Kg/m ³): Obsah vesmíru: ako predtým ale pomer protónov a neutronov sa zmenil: 38% neutróny a 62% protóny, atómové jadra ešte nevznikajú.
↓	
1	⇒ Teplota ~ 10 ¹⁰ K : (energia ~ 1 MeV, hustota ~ 3.10 ⁸ Kg/m ³): Existujú len protóny, neutróny, elektróny , pozitróny, fotóny a neutrína. Neutrína vychádzajú z termodynamickkej rovnováhy – na nej sa podieľajú len e⁻, e⁺, γ . Pomer N:P =24:76 . Nukleosyntéza ľahkých jadier (D, He)
↓	
60	⇒ Teplota ~ 5.10 ⁹ K : (energia ~ 0.5 MeV,): elektróny a pozitróny. vychádzajú z termodynamickkej rovnováhy (vesmír je pod prahom produkcie e⁻, e⁺). e⁻, e⁺ rýchlo anihilujú a energia uvoľnená pri ich anihilácii spomalila ochladzovanie vesmíru. Pomer N:P =17:83 .
↓	
2.10 ²	⇒ Koniec nukleosyntézy
↓	
.	
.	
.	
10 ⁵ yr	⇒ Teplota ~ 10 ⁴ K (energia ~ 1 eV): látka a žiarenie majú rovnaké hustoty energie
↓	
3.10 ⁵ yr	⇒ Teplota ~ 3.10 ³ K (energia ~ 0.3 eV): elektróny a jadrá vytvarajú neutrálne atómy. Fotóny vychádzajú z rovnováhy (photons decoupling) – vzniká reliktové žiarenie
↓	
.	
.	

A) Experimentálne svedectvá

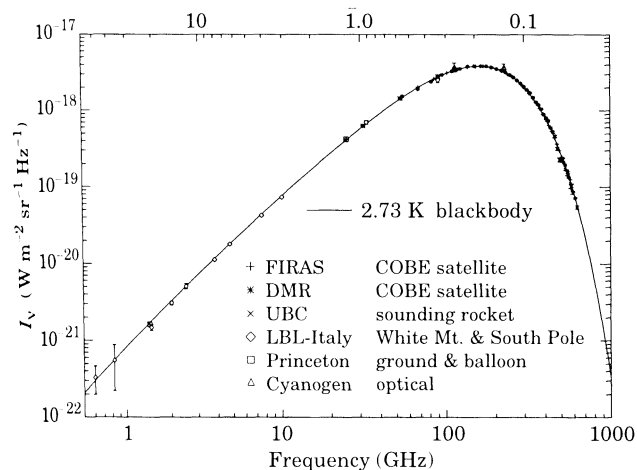
- Vesmír sa rozpína, pritom vo všetkých smeroch rovnako - nerovnorodosť je nie väčšia ako 1:10000. Je to fakt známy z červeného posuvu čiarových spektier. Rýchlosť rozpínania vesmíru je daná **Hubbleovou konštantou**:

$$H_0 = 100 \cdot h_0 \left[\frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}} \right] \quad h_0 = 0.65 \pm 0.05, \quad 1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{16} \text{ m} = 3.26 \text{ ly}$$



Obr. 1: Závislosť rýchlosti vzdialovania galaxií od ich vzdialenosti, výsledok experimentálnych meraní

- Existencia reliktového žiarenia – je izotropné a má teplotu 2.7 K. Hustota žiarenia je 400 fotónov na 1 cm^3 .



Obr. 1: Kozmické reliktové žiarenie: experimentálne merania vs. teoretická krivka zodpovedajúca žiareniu s teplotou 2.73 K

- Zastupenie ^4He a iných ľahkých jadier hovorí o ich syntéze v horúcej fáze vesmíru. ^4He : H = 0.22-0.24:1

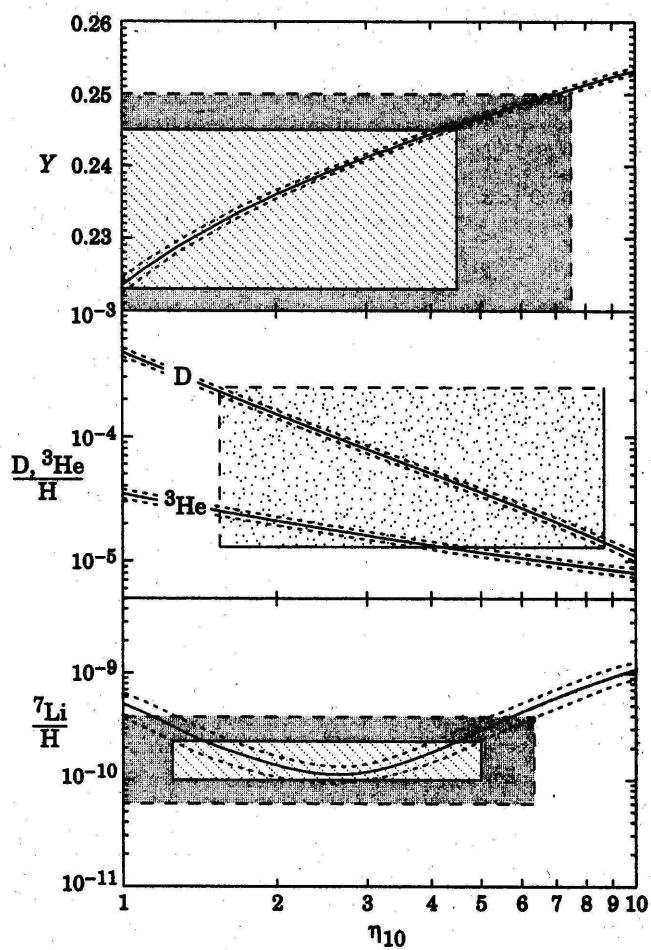


Figure 1 : Výskyt D, ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$ a ${}^7\text{Li}$ predpovedaný štandardným modelom big bangovej nukleosyntézy. Obdĺžnik predstavuje experimentálne zistený fakt.

η_{10} je pomer fotónov k nukleónom $\cdot 10^{10}$

B) Teplota vesmíru vs čas

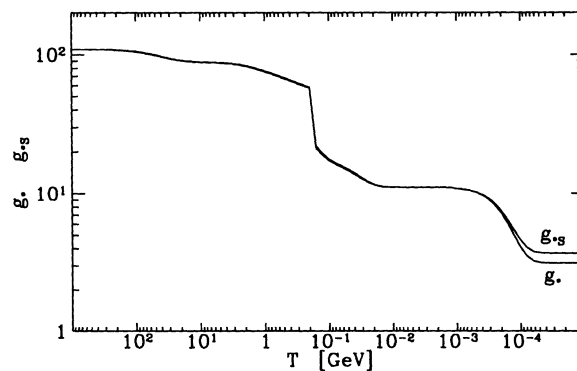
Na vesmír sa dívame ako na termodynamický systém častíc, ktorý sa rozpína.
Vzťah medzi časom (vekom) vesmíru a jeho teplotou:

$$t(\text{sec}) = \frac{2.42}{\sqrt{N(T)}} \left(\frac{1 \text{ MeV}}{kT} \right)^2$$

Kde

$N(T)$ je faktor udávajúci počet efektívne nehmotných stupňov voľnosti fermiónov a bozónov:

- pre $m_\pi > kT > m_\mu \rightarrow N(T) = 57/4$ *termodynamická rovnováha*: mióny ($\mu^+ \mu^-$), elektróny (e^-), pozitrony (e^+), neutrína (ν) a fotóny (γ);
- pre $m_\mu > kT > m_e \rightarrow N(T) = 43/4$ *termodynamická rovnováha*: ako predtým no bez miónov.
- Pri teplotách $< 1 \text{ MeV}$ – neutrína vychádzajú z termodynamickej rovnováhy – na nej sa podieľajú len e^+ , e^- , $\gamma \rightarrow N(T) = 11/2$, atď.



C) Ako blízko môžeme ísť k singularite

Do ktorého momentu je extrapolácia evolúcie vesmíru na základe známých fyzikálnych zákonov oprávnená?

- **Skepticizmus:** do teploty $T=10^{11}$ K, tepelná energia častice $kT=10$ MeV, vek vesmíru $t=0.01$ sec. Na termodynamickú rovnováhu sa podieľajú: e^+ , e^- , γ , ν a $\bar{\nu}$. Pomer $n_\gamma/n_p \approx 10^9$.
- **Realizmus:** do $T=10^{15}$ K, tepelná energia častice $kT=100$ GeV vek vesmíru $t=10^{-11}$ sec. Na termodynamickú rovnováhu sa podieľajú: leptóny, kvarky, gluóny, $W^\pm$, Z a γ . Pomer $n_\gamma/n_p \approx 10^9$.
- **Optimizmus:** do $T=10^{32}$ K, tepelná energia častice $kT \approx 10^{19}$ GeV vek vesmíru $t=10^{-43}$ sec. Existuje jedna univerzálna interakcia, z ktorej sa vydeľuje gravitácia.
- **Superoptimizmus:** do $t=0$: S. Hawking a J. Halliwell: Stav vesmíru je daný súčtom cez určitú triedu histórií. Táto trieda pozostáva z nesusingularných priestoročiasov, ktoré majú konečný objem no sú neohraničené. Tento súčet sa robí v imaginárnom čase. Vedie to k tomu, že vesmír nemá singularitu = tá existuje len v projekcii do reálneho času