

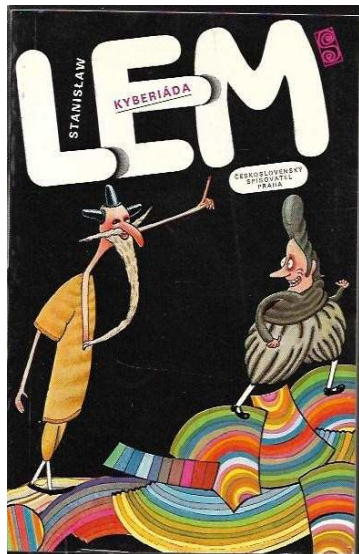
Richard Wunsch

Astronomický ústav AV ČR, richard@wunsch.cz

Stanislaw Lem: Kyberíada

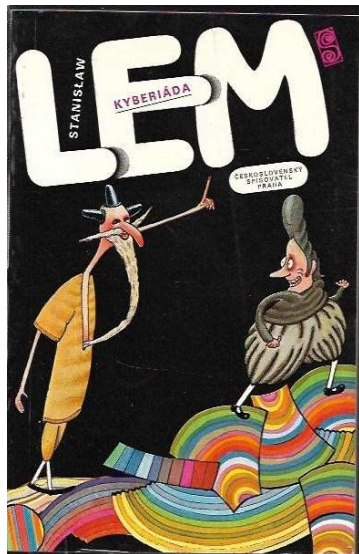
- pohádka vyprávěná malým robotům na vzdálené planetě:

vesmír stvořil supermocný stroj, který se zbláznil, a začal dělat náhodně tečky – tak vznikly hvězdy rozesteté v prázdném prostoru.



Stanislaw Lem: Kyberíada

- pohádka vyprávěná malým robotům na vzdálené planetě:
vesmír stvořil supermocný stroj, který se zbláznil, a začal dělat náhodně tečky – tak vznikly hvězdy rozesteté v prázdném prostoru.
- víme, že to tak nebylo

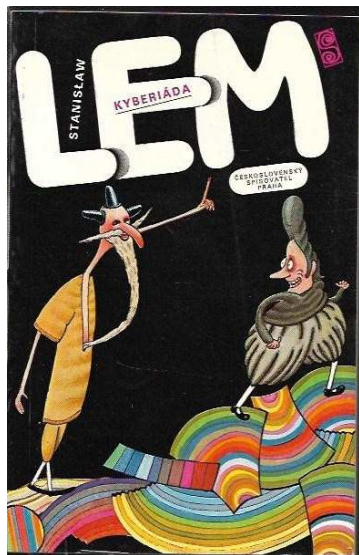


Stanislaw Lem: Kyberíada

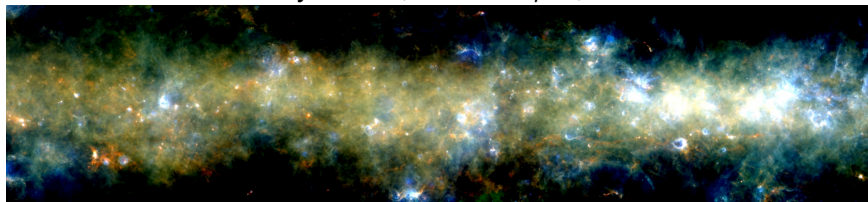
- pohádka vyprávěná malým robotům na vzdálené planetě:

vesmír stvořil supermocný stroj, který se zbláznil, a začal dělat náhodně tečky – tak vznikly hvězdy rozestě v prázdném prostoru.

- víme, že to tak nebylo
- mezihvězdný prostor není prázdný
je vyplněný plynem; probíhá v něm mnoho složitých procesů; vznikají objekty bohaté svou složitostí

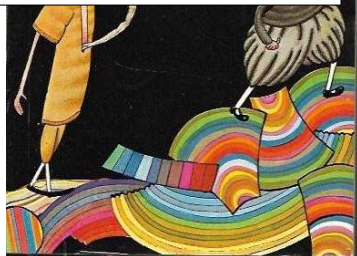


Přehlídka Mléčné dráhy Hi-Gal, 70 – 500 μ m, cca 12 $^{\circ}$

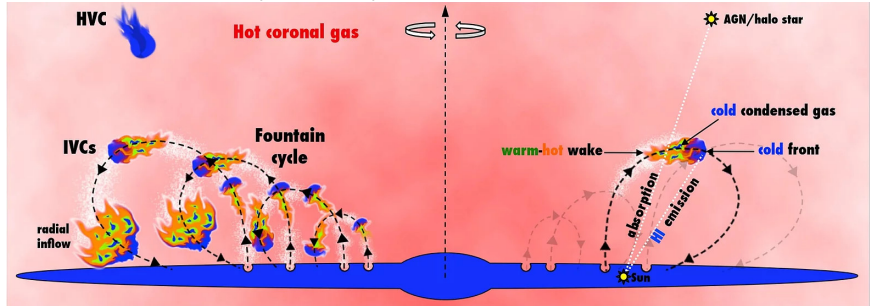


Credit obr.: ESA/Herschel space telescope)

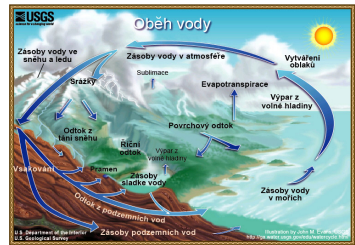
je vyplněný plynem; probíhá v něm mnoho složitých procesů; vznikají objekty bohaté svou složitostí



Galaktická fontána (ilustrace)



Credit obr.: A. Marasco (INAF)

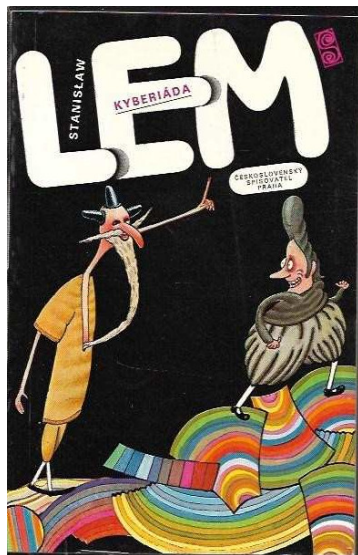


Stanislaw Lem: Kyberíada

- pohádka vyprávěná malým robotům na vzdálené planetě:

vesmír stvořil supermocný stroj, který se zbláznil, a začal dělat náhodně tečky – tak vznikly hvězdy rozestě v prázdném prostoru.

- víme, že to tak nebylo
- mezihvězdný prostor není prázdný
je vyplněný plynem; probíhá v něm mnoho složitých procesů; vznikají objekty bohaté svou složitostí

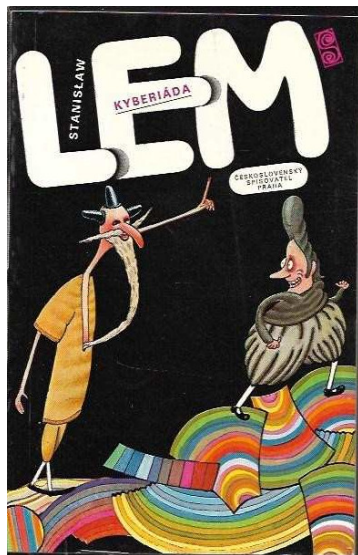


Stanislaw Lem: Kyberíada

- pohádka vyprávěná malým robotům na vzdálené planetě:

vesmír stvořil supermocný stroj, který se zbláznil, a začal dělat náhodně tečky – tak vznikly hvězdy rozesteté v prázdném prostoru.

- víme, že to tak nebylo
- mezihvězdný prostor není prázdný
je vyplněný plynem; probíhá v něm mnoho složitých procesů; vznikají objekty bohaté svou složitostí
- hvězdy nejsou ve vesmíru rozmísťeny náhodně
vznikají v hvězdokupách, uvnitř galaxií; ty se sešklupují do skupin, kup a filamentů

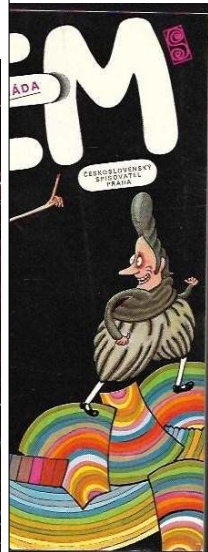


Hvězdy vznikají v hvězdokupách

(Mountains of creation, W5 in Cas)



Credit obr.: NASA/Spitzer space telescope



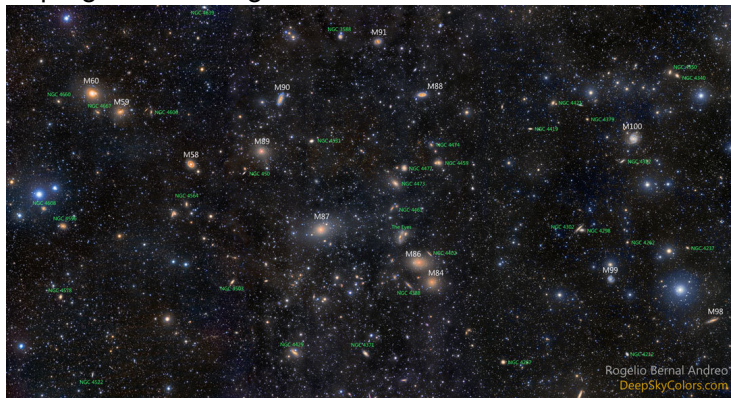
Galaxie M33 s mladými hvězdokupami



Credit obr.: NAOJ/Subaru telescope



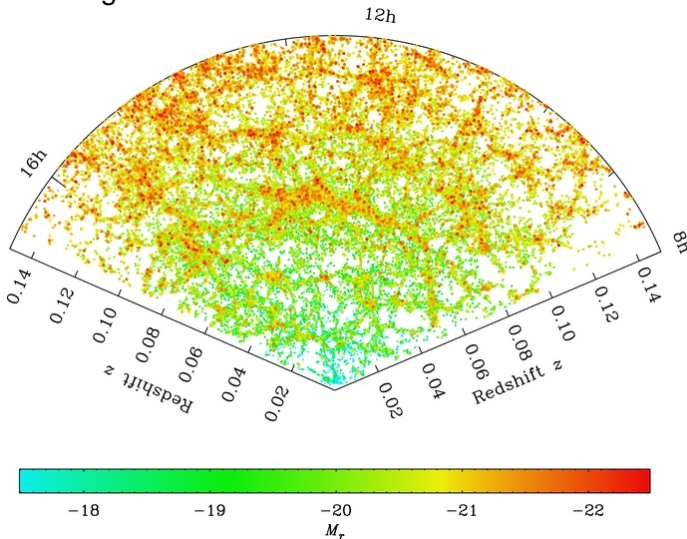
Kupa galaxií ve Virgu



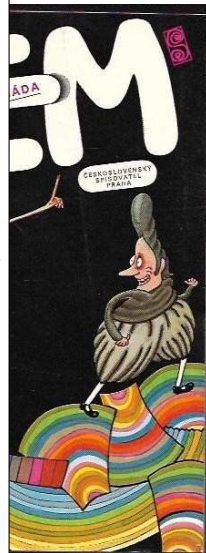
*vznikají v hvězdokupách, uvnitř galaxií; ty se se-
skupují do skupin, kup a filamentů*



Pozice galaxií v rovině zemského rovníku



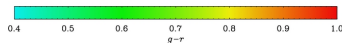
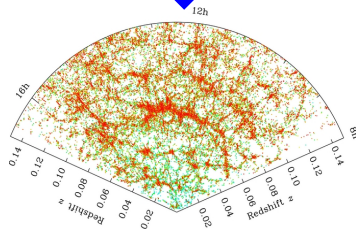
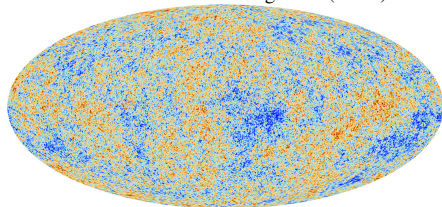
Credit obr.: SDSS, Zehavi+11



1 Současný model vesmíru

- inflace, nukleosyntéza, rekombinace, vznik galaxií/hvězd, reionizace, hierarchická tvorba galaxií, skupin a kup
- expanze vesmíru

Cosmic Microwave Background (CMB)



1

Současný model vesmíru

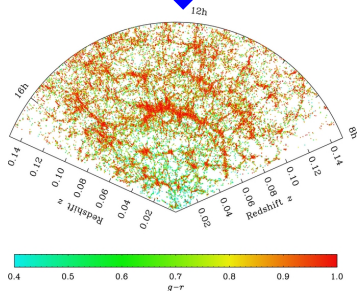
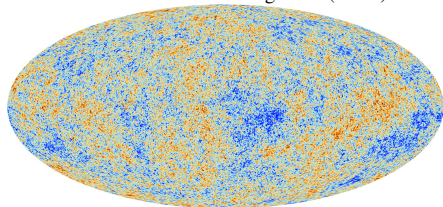
- inflace, nukleosyntéza, rekombinace, vznik galaxií/hvězd, reionizace, hierarchická tvorba galaxií, skupin a kup
- expanze vesmíru

2

Povrch rekombinace

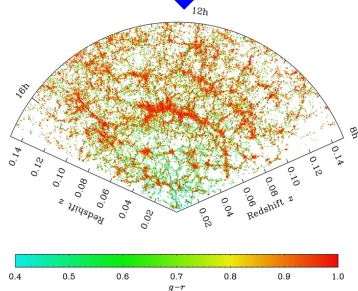
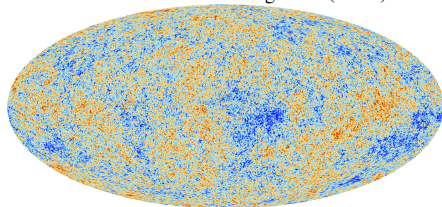
- CMB, povrch posledního rozptylu, reliktní záření
- vlastnosti, EM spektrum, spektrum poruch

Cosmic Microwave Background (CMB)



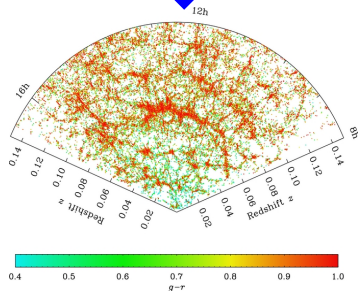
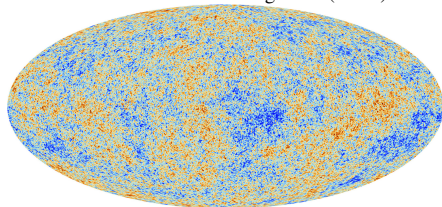
- 1 **Současný model vesmíru**
 - inflace, nukleosyntéza, rekombinace, vznik galaxií/hvězd, reionizace, hierarchická tvorba galaxií, skupin a kup
 - expanze vesmíru
- 2 **Povrch rekombinace**
 - CMB, povrch posledního rozptylu, reliktní záření
 - vlastnosti, EM spektrum, spektrum poruch
- 3 **Růst poruch, vznik protogalaxií**
 - vlastnosti gravitační nestability
 - problém amplitudy poruch
→ temná hmota

Cosmic Microwave Background (CMB)



- 1 Současný model vesmíru**
 - inlace, nukleosyntéza, rekombinace, vznik galaxií/hvězd, reionizace, hierarchická tvorba galaxií, skupin a kup
 - expanze vesmíru
- 2 Povrch rekombinace**
 - CMB, povrch posledního rozptylu, reliktní záření
 - vlastnosti, EM spektrum, spektrum poruch
- 3 Růst poruch, vznik protogalaxií**
 - vlastnosti gravitační nestability
 - problém amplitudy poruch
→ temná hmota
- 4 Simulace vývoje vesmíru**
 - jen s temnou hmotou (Millennium)
 - obsahující baryonovou fyziku
(Illustris, Eagle, ...)

Cosmic Microwave Background (CMB)



- předpoklad: homogenní a isotropní
(nevíme jestli konečný nebo nekonečný)
- založen na obecné teorii relativity (OTR)
což je teorie gravitace, popisuje ji jako zakřivení prostoročasu:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

(obdoba $\nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$, což je ekvivalent $F_g = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$)

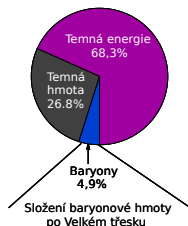
- vesmír má horký počátek - velký třesk, BB
- rozpíná se podle Hubbleova zákona:

$$v_r = H(t) \times D \approx c \times z$$

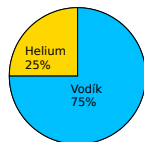
kde $H \doteq 70$ km/s/Mpc je Hubbleova konstanta, z je redshift (červený posun), D je vzdálenost

- rychlost rozpínání se v současnosti zvětšuje
(souvisí s kosmologickou konstantou Λ)

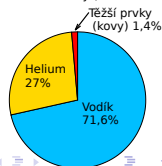
Složení vesmíru



Složení baryonové hmoty po Velkém třesku

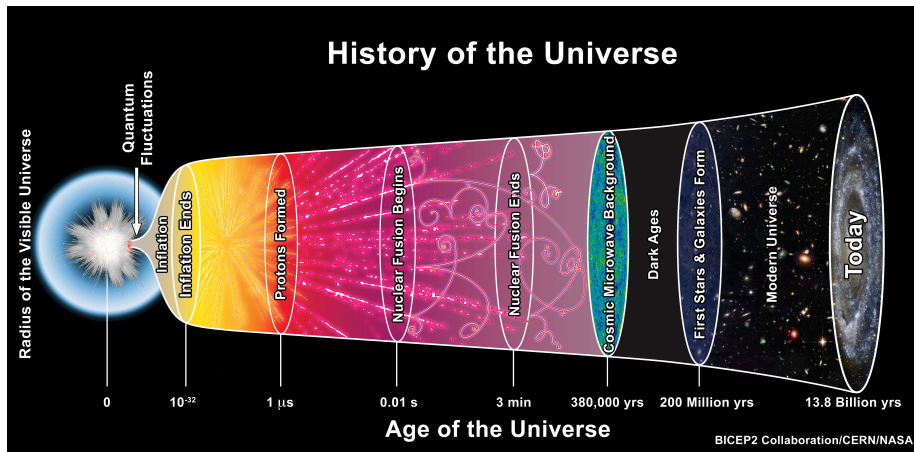


Složení baryonové hmoty před 4.5 mld. lety (vznik Slunce)



Vývoj vesmíru

- raný vesmír: inflace, nukleosyntéza, **ekvivalence hmoty a energie** ($\rho_{\text{hmota}} \propto R^{-3}$ vs. $\rho_{\text{zarení}} \propto R^{-4}$), rekombinace
- po rekombinaci: temné období, reionizace (hvězdy/AGN?), vznik galaxií, hierarchický růst

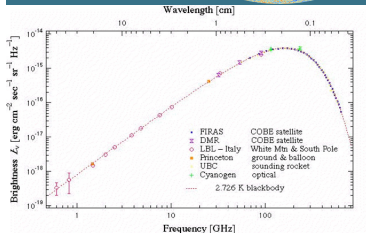
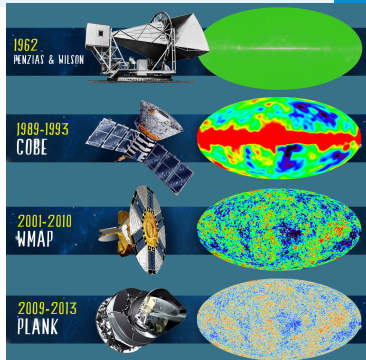


Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

- záření ze všech směrů

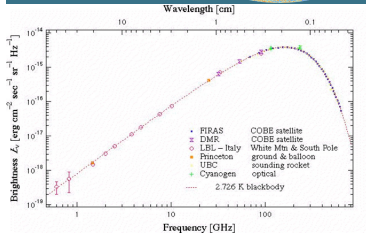
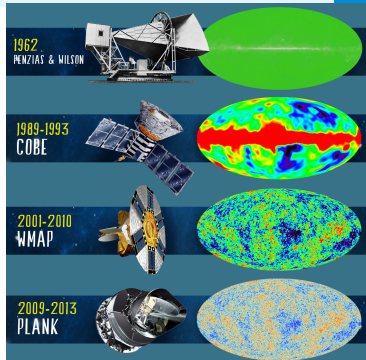
z. černého tělesa (velmi přesně) s $T = 2.73\text{ K}$

- předpovězeno 1948 (Alpher, Herman, Gamow)
- pozorováno 1976 (Penzias, Wilson)



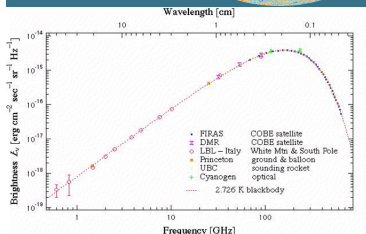
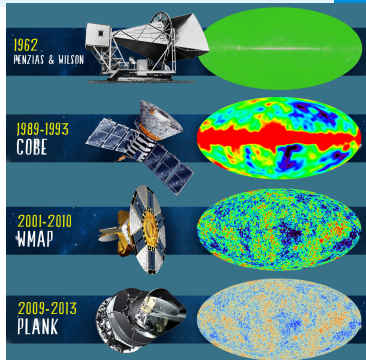
Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

- záření ze všech směrů
 - z. černého tělesa (velmi přesně) s $T = 2.73\text{ K}$
 - předpovězeno 1948 (Alpher, Herman, Gamow)
 - pozorováno 1976 (Penzias, Wilson)
- ionizovaný plyn ($T \approx 3000\text{ K}$)
 - horký počátek vesmíru („ohnivá stěna“), který přímo pozorujeme



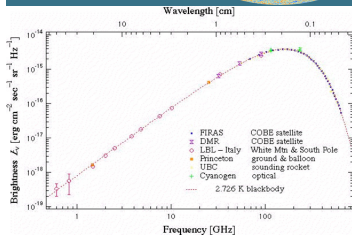
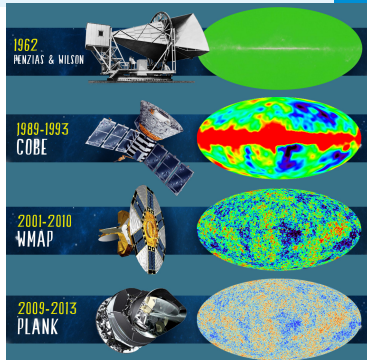
Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

- záření ze všech směrů
 - z. černého tělesa (velmi přesně) s $T = 2.73\text{ K}$
 - předpovězeno 1948 (Alpher, Herman, Gamow)
 - pozorováno 1962 (Penzias, Wilson)
- ionizovaný plyn ($T \approx 3000\text{ K}$)
 - horký počátek vesmíru („ohnivá stěna“), který přímo pozorujeme
- posunuto $\sim 1100\times$ do červené části spektra díky expanzi vesmíru



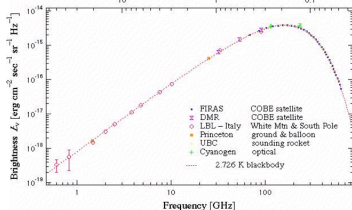
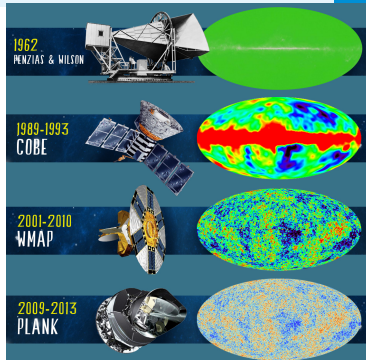
Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

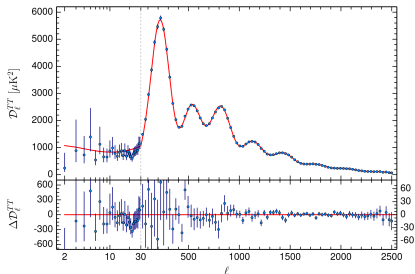
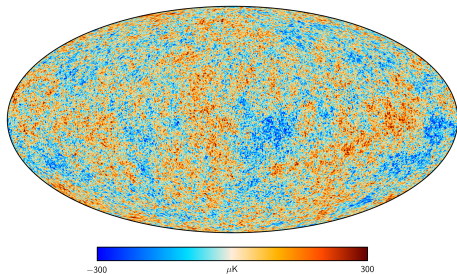
- záření ze všech směrů
 - z. černého tělesa (velmi přesně) s $T = 2.73$ K
 - předpovězeno 1948 (Alpher, Herman, Gamow)
 - pozorováno 1962 (Penzias, Wilson)
- ionizovaný plyn ($T \approx 3000$ K)
 - horký počátek vesmíru („ohnivá stěna“), který přímo pozorujeme
- posunuto $\sim 1100\times$ do červené části spektra díky expanzi vesmíru
- povrch rekombinace, $t = 380$ tis. let, $z = 1100$, $\Delta z \approx 90$ ($\leftrightarrow 50$ tis let)



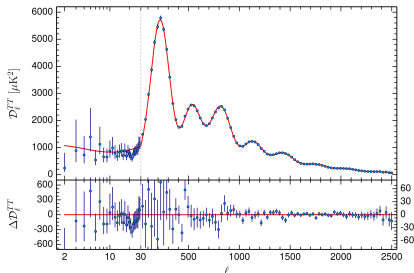
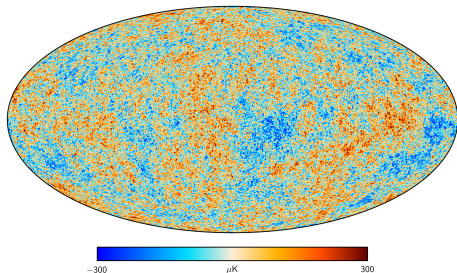
Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB)

- záření ze všech směrů
 - z. černého tělesa (velmi přesně) s $T = 2.73\text{ K}$
 - předpovězeno 1948 (Alpher, Herman, Gamow)
 - pozorováno 1962 (Penzias, Wilson)
- ionizovaný plyn ($T \approx 3000\text{ K}$)
 - horký počátek vesmíru („ohnivá stěna“), který přímo pozorujeme
- posunuto $\sim 1100\times$ do červené části spektra díky expanzi vesmíru
- povrch rekombinace, $t = 380\text{ tis. let}$, $z = 1100$, $\Delta z \approx 90$ ($\leftrightarrow 50\text{ tis let}$)
- vesmír se stal neutrálním a průhledným

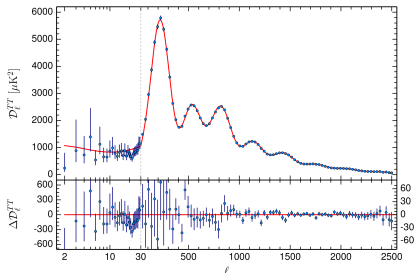
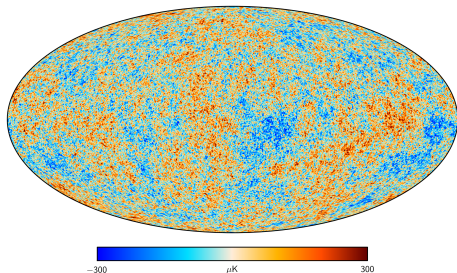




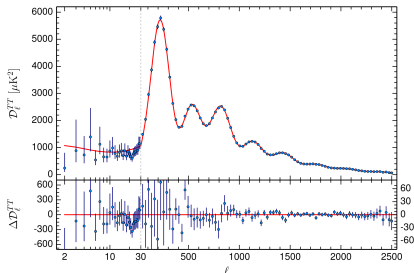
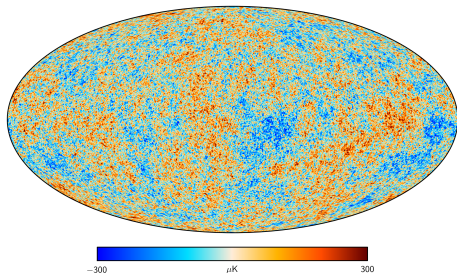
- poruchy (anisotropie) teploty s relativní velikostí $\delta T/T \sim 10^{-5}$



- poruchy (anisotropie) teploty s relativní velikostí $\delta T/T \sim 10^{-5}$
- původ: kvantové fluktuace, na konci inflace:
 $P(k) \propto k^n$ (with $n = 1$: Harrison-Zeldovich spectrum)



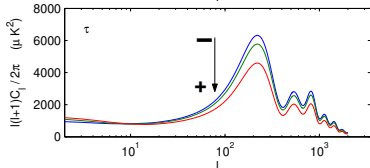
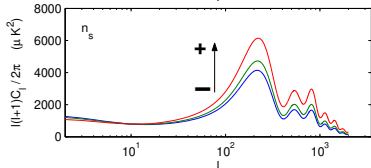
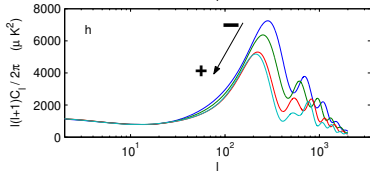
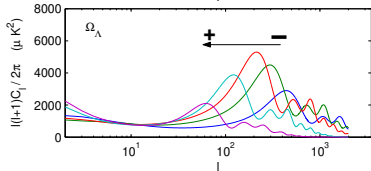
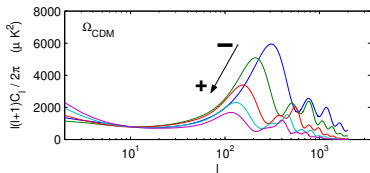
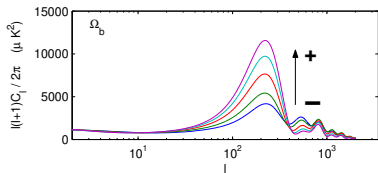
- poruchy (anisotropie) teploty s relativní velikostí $\delta T/T \sim 10^{-5}$
- původ: kvantové fluktuační, na konci inflace:
 $P(k) \propto k^n$ (with $n = 1$: Harrison-Zeldovich spectrum)
- zvukové vlny modifikované gravitací



- poruchy (anisotropie) teploty s relativní velikostí $\delta T/T \sim 10^{-5}$
- původ: kvantové fluktuační, na konci inflace:
 $P(k) \propto k^n$ (with $n = 1$: Harrison-Zeldovich spectrum)
- zvukové vlny modifikované gravitací
- spektrum poruch možno srovnat s předpovědí modelů

Závislost spektra poruch na kosmologických parametrech

Credit

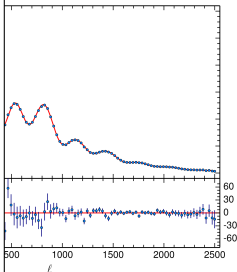
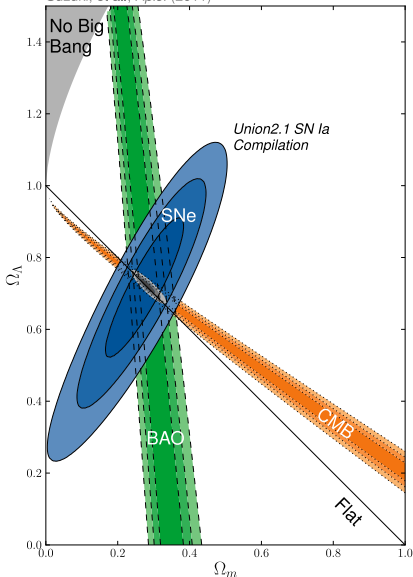


obr.: Martínez-González & Vielva (2005)

60
30
0
-30
-60
0

Měření parametrů vesmíru

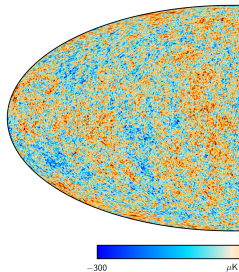
Supernova Cosmology Project
Suzuki, et al., *Ap.J.* (2011)



$$\sigma_8 / T \sim 10^{-5}$$

delů

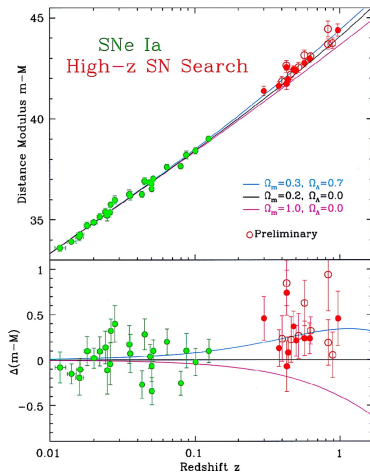
- poruchy (anisotropy)
- původ: kvantové fluktuace
 $P(k) \propto k^n$ (with $n = 1$)
- zvukové vlny měřítko
- spektrum poruch



- vesmír se rozpíná a urychluje

$$v_r = H(t) \times D \approx c \times z$$

víme díky měření jasů SNIa

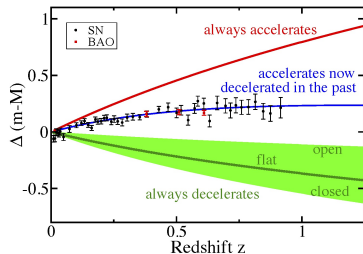


Kirshner et al. (1999)

- vesmír se rozpíná a urychluje

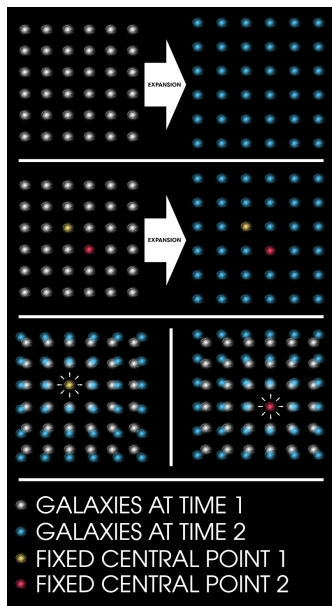
$$v_r = H(t) \times D \approx c \times z$$

víme díky měření jasů SNIa

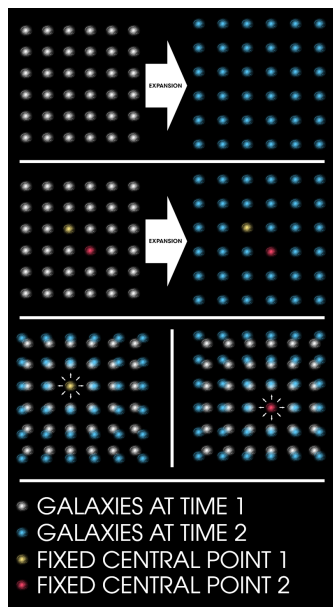


Huterer & Shafer (2017)

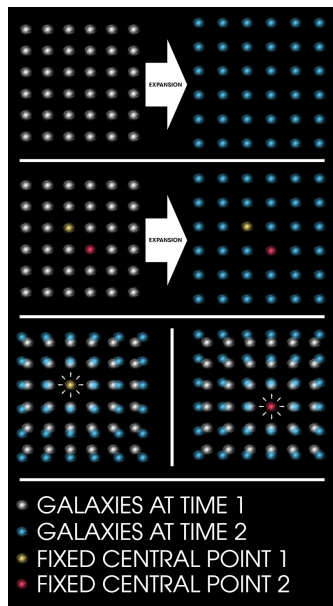
- vesmír se rozpíná a urychluje
 $v_r = H(t) \times D \approx c \times z$
víme díky měření jasů SNIa
- rozpínání nemá střed, vesmír nemá hranice (spor s homogenitou)



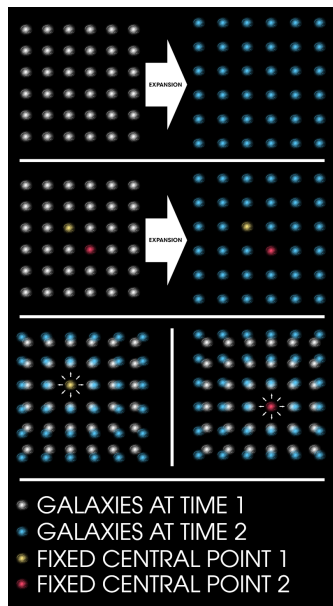
- vesmír se rozpíná a urychluje
 $v_r = H(t) \times D \approx c \times z$
víme díky měření jasů SNIa
- rozpínání nemá střed, vesmír nemá hranice (spor s homogenitou)
- vzdalování povrchu rekombinace \neq vzdalování hmoty na povrchu rekombinace



- vesmír se rozpíná a urychluje
 $v_r = H(t) \times D \approx c \times z$
víme díky měření jasů SNIa
- rozpínání nemá střed, vesmír nemá hranice (spor s homogenitou)
- vzdalování povrchu rekombinace \neq vzdalování hmoty na povrchu rekombinace
- expanze (vzdalování hmoty) může být (a nyní je) nadsvětelná



- vesmír se rozpíná a urychluje
 $v_r = H(t) \times D \approx c \times z$
víme díky měření jasů SNIa
- rozpínání nemá střed, vesmír nemá hranice (spor s homogenitou)
- vzdalování povrchu rekombinace \neq vzdalování hmoty na povrchu rekombinace
- expanze (vzdalování hmoty) může být (a nyní je) nadsvětelná
- množství hmoty pod horizontem se nyní zmenšuje



- Jak se chová porucha v homogenní tekutině s gravitací?

Rovnice pro tekutinu s gravitací

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \text{z. z. hmoty}$$

casova zmena tok

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} : \mathbf{v}) = -\rho \nabla \Phi - \nabla p + \dots \quad \text{z. z. hybnosti}$$

grav. sila tlak. sila dalsi sily

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \dots \quad \text{z. z. energie}$$

kompres. teplo dalsi zdroje energie

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \quad \text{gravitace}$$

- Jak se chová porucha v homogenní tekutině s gravitací?

- porucha hustoty:

$$\delta = (\rho - \rho_0)/\rho_0 = \delta_a \sin(2\pi x/\lambda)$$

Rovnice pro tekutinu s gravitací

casova zmena

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

z. z. hmoty

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\rho \nabla \Phi - \nabla p + \dots$$

z. z. hybnosti

grav. sila tlak. sila dalsi sily

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \dots$$

z. z. energie

kompres. teplo dalsi zdroje energie

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

gravitace

- Jak se chová porucha v homogenní tekutině s gravitací?
- porucha hustoty:
 $\delta = (\rho - \rho_0)/\rho_0 = \delta_a \sin(2\pi x/\lambda)$
- δ_a může růst, klesat nebo oscilovat (gravitační vs. tlaková síla)

Rovnice pro tekutinu s gravitací

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad \text{z. z. hmoty}$$

casova zmena (pointing to $\frac{\partial \rho}{\partial t}$) and *tok* (pointing to $\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$) are circled in red in the original image.

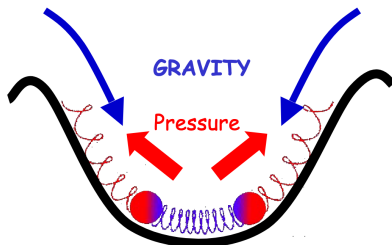
$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} : \mathbf{v}) = -\rho \nabla \Phi - \nabla p + \dots \quad \text{z. z. hybnosti}$$

grav. sila (pointing to $-\rho \nabla \Phi$), *tlak. sila* (pointing to $-\nabla p$), and *dalsi sily* (pointing to \dots) are circled in red in the original image.

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \dots \quad \text{z. z. energie}$$

kompres. teplo (pointing to $-p \nabla \cdot \mathbf{v}$) and *dalsi zdroje energie* (pointing to \dots) are circled in red in the original image.

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \quad \text{gravitace}$$



Credit: Pearson (Observational cosmology 3)

- Jak se chová porucha v homogenní tekutině s gravitací?

- porucha hustoty:

$$\delta = (\rho - \rho_0)/\rho_0 = \delta_a \sin(2\pi x/\lambda)$$

- δ_a může růst, klesat nebo oscilovat (gravitační vs. tlaková síla)

- **statický případ (bez expanze):**

$\lambda > \lambda_J \dots$ exponenciální růst

$\lambda < \lambda_J \dots$ oscilace

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{15k_B T}{4\pi G m_p \rho}} \text{ (Jeansova délka)}$$

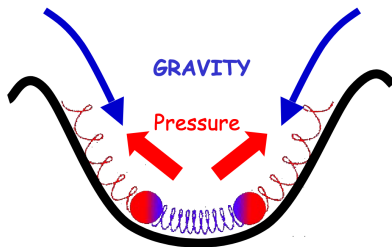
Rovnice pro tekutinu s gravitací

$$\overset{\text{casova zmena}}{\frac{\partial \rho}{\partial t}} + \overset{\text{tok}}{\nabla \cdot (\rho \mathbf{v})} = 0 \quad \text{z. z. hmoty}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} : \mathbf{v}) = \overset{\text{grav. sila}}{-\rho \nabla \Phi} - \overset{\text{tlak. sila}}{\nabla p} + \dots \quad \text{z. z. hybnosti}$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{v}) = \overset{\text{kompres. teplo}}{-p \nabla \cdot \mathbf{v}} + \overset{\text{dalsi zdroje energie}}{\dots} \quad \text{z. z. energie}$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho \quad \text{gravitace}$$



Credit: Pearson (Observational cosmology 3)

- expanze změní exponenciální růst na mocninný:

$$\delta_a \propto t^n \propto (z + 1)^{-n} \text{ (v plochém vesmíru je } n = 1 \text{)}$$

- expanze změní exponenciální růst na mocninný:

$$\delta_a \propto t^n \propto (z + 1)^{-n} \quad (\text{v plochem vesmíru je } n = 1)$$

- **problém: růst je moc pomalý**

(víme, že $\delta_{a,1000} \sim 10^{-5}$ (z CMB), a že na $z=6$ už existují galaxie $\Rightarrow \delta_6 > 1$,

teorie ale předpovídá: $\delta_{a,6} = \frac{1000+1}{6+1} \delta_{a,1000} \sim 0.0014$

Gravitační kolaps v rozpínajícím se vesmíru

- expanze změní exponenciální růst na mocninný:

$$\delta_a \propto t^n \propto (z + 1)^{-n} \quad (\text{v plochem vesmíru je } n = 1)$$

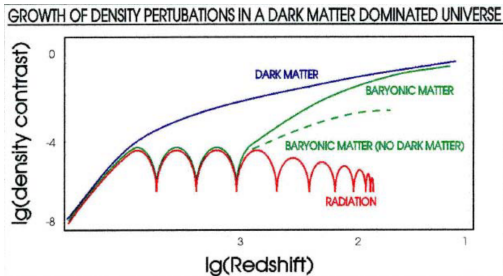
- **problém: růst je moc pomalý**

(víme, že $\delta_{a,1000} \sim 10^{-5}$ (z CMB), a že na $z=6$ už existují galaxie $\Rightarrow \delta_6 > 1$,

teorie ale předpovídá: $\delta_{a,6} = \frac{1000+1}{6+1} \delta_{a,1000} \sim 0.0014$

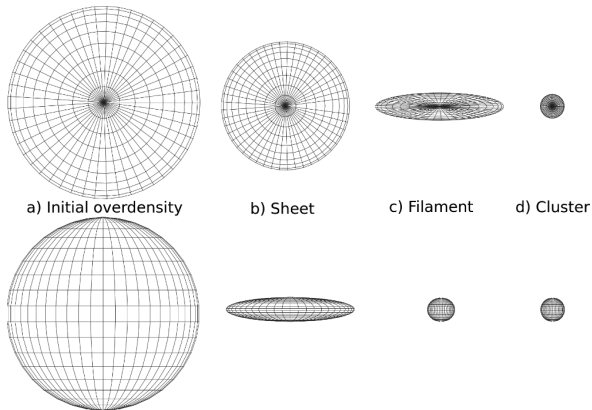
- **řešení: temná hmota**

- hustota záření klesá rychleji než hustota hmoty ($\rho_{\text{hmota}} \propto R^{-3}$ vs. $\rho_{\text{záření}} \propto R^{-4}$)
- hmota a záření se vyvíjely spolu do období ekvivalence ($z = 3500$)
- od období ekvivalence mohly poruchy temné hmoty růst, ale baryonová hmota byla stále svázána se zářením EM interakcí (Silk dumping)
- po rekombinaci baryonová hmota začala sledovat temnou hmotu



- gravitační kolaps je nejrychlejší podél nejkratší osy
- kolaps nesférické poruchy:

- a) tří-osý elipsoid
- b) vrstva
- c) filament
- d) kupa (cluster)



Jeansova délka: $\lambda_J \propto \sqrt{T/\rho}$
Horká temná hmota (HDM)

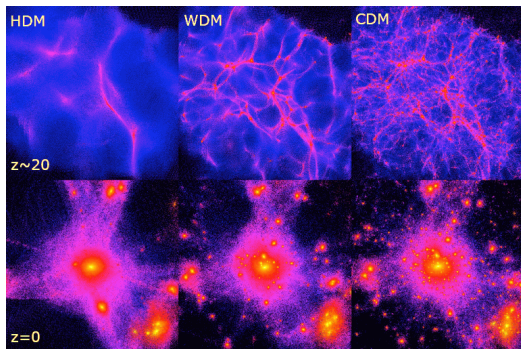
→ (ultra-)relativistická

→ vysoká teplota ⇒ velké struktury

Chladná temná hmota (CDM)

→ nerelativistická

→ nízká teplota ⇒ malé struktury



Jeansova délka: $\lambda_J \propto \sqrt{T/\rho}$
Horká temná hmota (HDM)

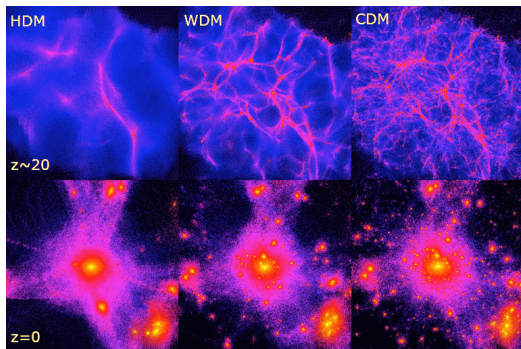
→ (ultra-)relativistická

→ vysoká teplota ⇒ velké struktury

Chladná temná hmota (CDM)

→ nerelativistická

→ nízká teplota ⇒ malé struktury



- temná hmota kolabuje adiabaticky

→ teplota roste díky kompresi, nefragmentuje, vznikají temná hala

- baryonová hmota se může chadit zářením

→ nejdříve sleduje kolaps temné hmoty, později její kolaps pokračuje uvnitř temných hal, vznikají galaxie a hvězdy

Vliv CDM vs. HDM na spektrum struktur

Jeanson
Horká t

→ (ultra-)r

→ vysoká

Chladná

→ nerelati

→ nízká te

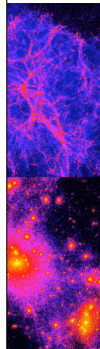
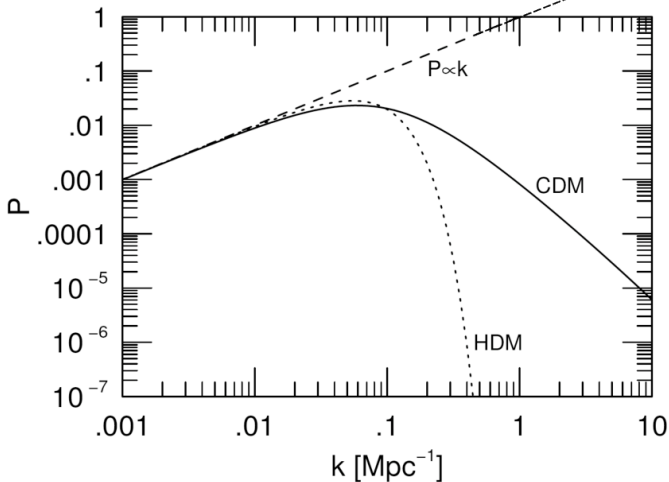
- temná

→ teplo

- baryo

→ nejd

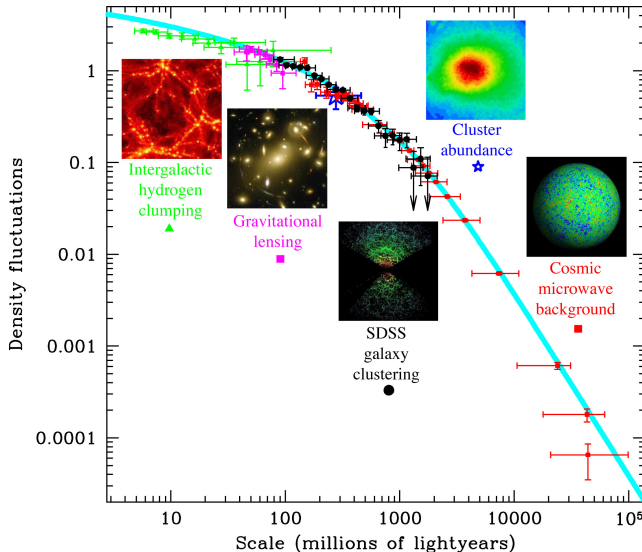
vznikají



n hal,

Spektrum struktur ve vesmíru (BAO)

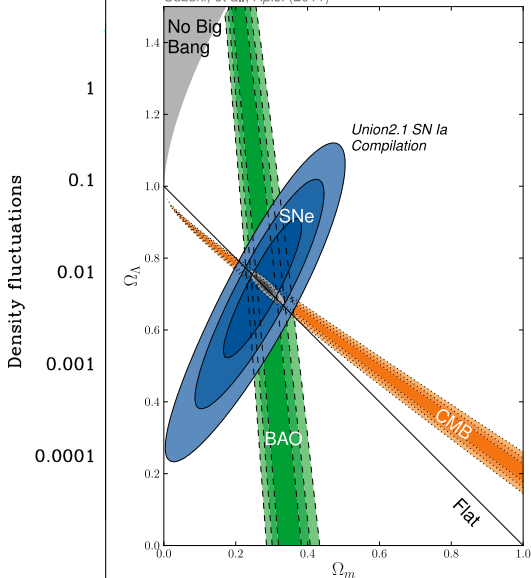
- modrá křivka odpovídá Λ CDM: $\Omega_{\Lambda} = 69\%$, $\Omega_{\text{CDM}} = 26\%$, $\Omega_b = 5\%$



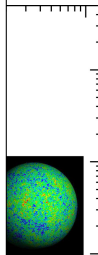
Měření parametrů vesmíru

- modrá křivka od

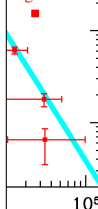
Supernova Cosmology Project
Suzuki, et al., *Ap.J.* (2011)



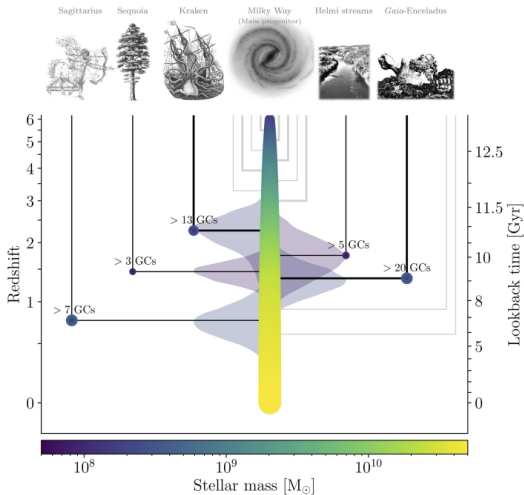
$\Omega_\Lambda = 26\%$, $\Omega_b = 5\%$



Cosmic microwave background



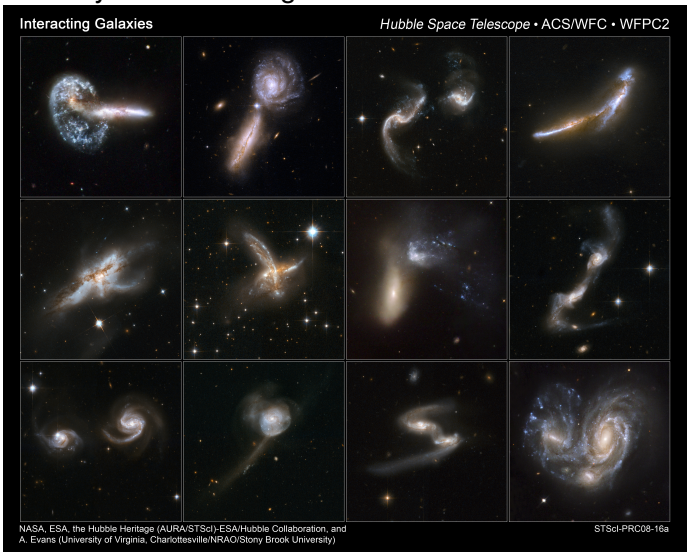
- temná hmota zkondenzovala do hal ($10^5 - 10^6 M_{\odot}$)
- baryon. hmota následuje
→ vznikají první hvězdy a galaxie (trpasličí, nepravidelné, dominované plynem)
- galaxie se srážejí/splývají:
 - „mokré“ srážky
→ disipativní, převažuje plyn, vznikají diskové galaxie
 - „suché“ srážky
→ převažují hvězdy, vznikají eliptické galaxie
- galaxie se shromažďují do kup



Hierar

Příklady srážících se galaxií

- temná
- vala d
- baryc
- vzn
- (trpaslič
- plynem
- galax
- „m
- d
- kají
- „SU
- p
- tické
- galax
- kup

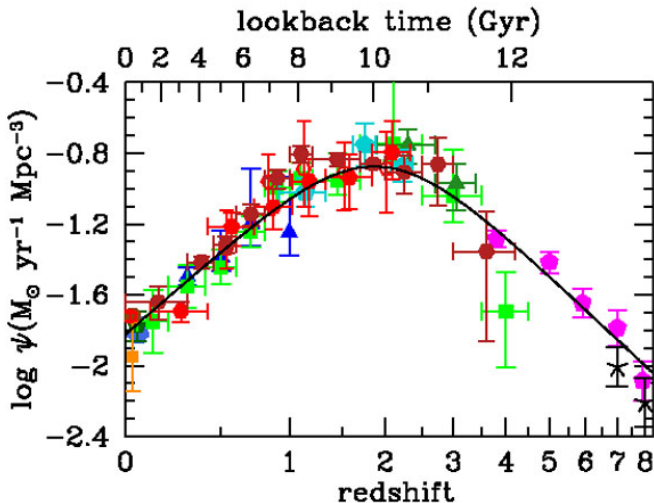


Hierar

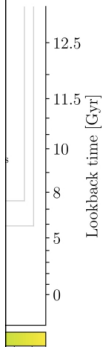
Vývoj rychlosti tvorby hvězd

(žijeme v kosmickém soumraku)

- temná
- vala d
- baryc
- vzn
- (trpaslič
- plynem
- galax
- „m
- d
- kají
- „SU
- p
- tické
- galax
- kup

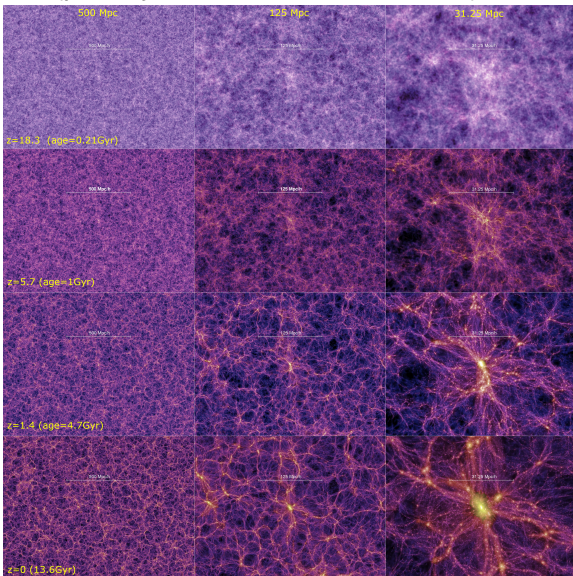


adus

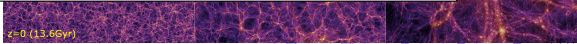
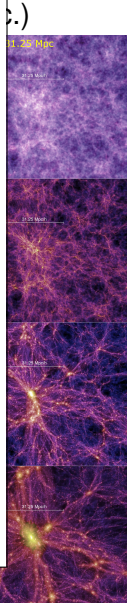
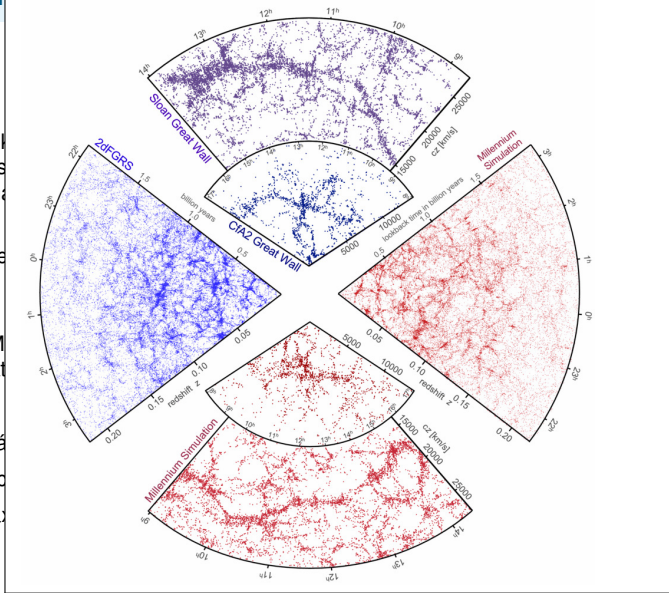


- kostka 2 mld. ly, 10^{10} částic (později MXXL s 3×10^{11} částic.)

- vnitřně konzistentní model vesmíru spočtený od povrchu rekombinace do současnosti
- porovnatelný s přehlídkami galaxií
- objem MXXL srovnatelný s pozorovatelným vesmírem
- jen temná hmota \Rightarrow problémy na škálách galaxií (tvary hal, typy galaxií, počet trpasličích galaxií)



- kostka
- vnitřně homogenní vesmír s rekombinací
- porovnání galaxií
- objem Mpc³ pozorování
- jen temná hmota na škálách
- typy galaxií



- obsahuje plyn, tvorbu hvězd, superhmotné černé díry, ...

- vesmír má horký počátek, který můžeme přímo vidět
(na vlastní mikrovlnné oči)

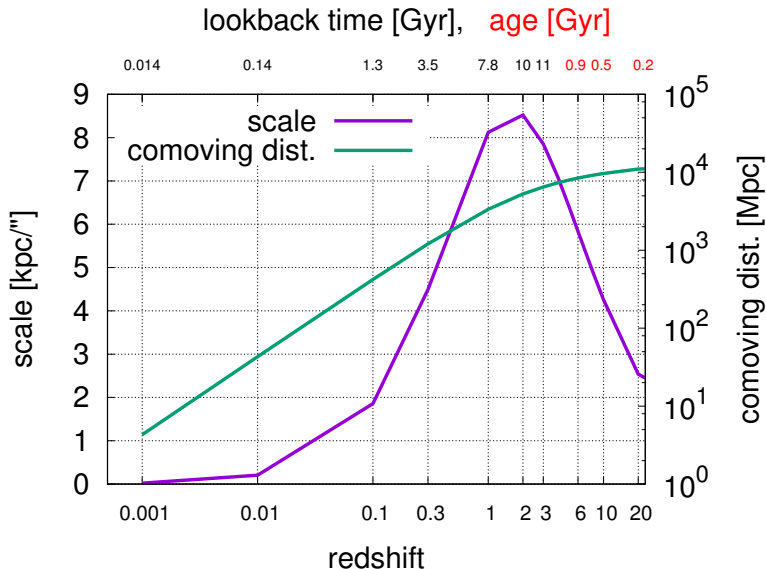
- vesmír má horký počátek, který můžeme přímo vidět
(na vlastní mikrovlnné oči)
- nejúspěšnější současný model – Λ CDM:
 - temná energie (akcelerace), chladná temná hmota (mj. aby mohly vzniknout galaxie), jen 5% baryonové hmoty
 - funguje dobře na všech (malých i velkých) škálách
 - existují alternativy a problémy (např. Hubbleova konstanta z CMB vs. všeho ostatního) \Rightarrow možná bude vylepšen / nahrazen

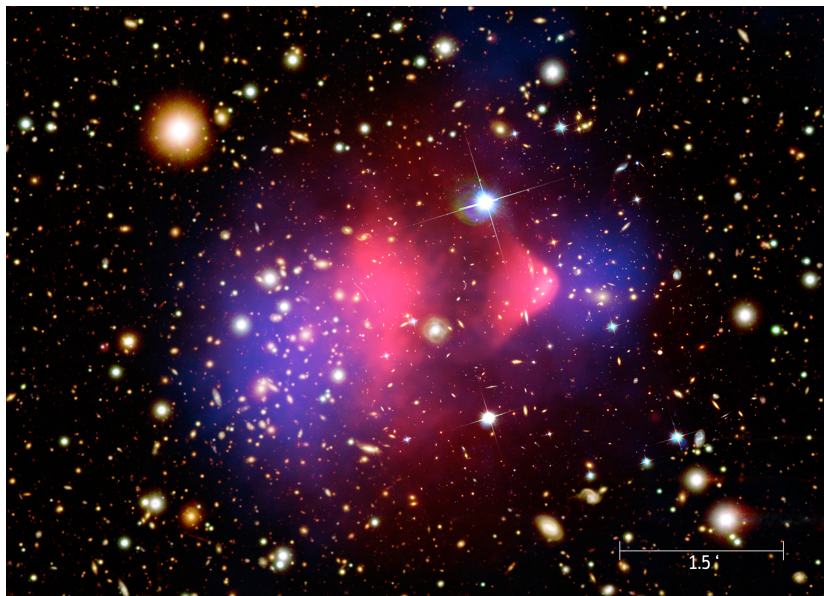
- vesmír má horký počátek, který můžeme přímo vidět
(na vlastní mikrovlnné oči)
- nejúspěšnější současný model – Λ CDM:
 - temná energie (akcelerace), chladná temná hmota (mj. aby mohly vzniknout galaxie), jen 5% baryonové hmoty
 - funguje dobře na všech (malých i velkých) škálách
 - existují alternativy a problémy (např. Hubbleova konstanta z CMB vs. všeho ostatního) \Rightarrow možná bude vylepšen / nahrazen
- struktury vesmíru vznikly gravitační nestabilitou (temné hmoty, baryonová jí následovala); grav. nestabilita tvoří filameny

- vesmír má horký počátek, který můžeme přímo vidět
(na vlastní mikrovlnné oči)
- nejúspěšnější současný model – Λ CDM:
 - temná energie (akcelerace), chladná temná hmota (mj. aby mohly vzniknout galaxie), jen 5% baryonové hmoty
 - funguje dobře na všech (malých i velkých) škálách
 - existují alternativy a problémy (např. Hubbleova konstanta z CMB vs. všeho ostatního) \Rightarrow možná bude vylepšen / nahrazen
- struktury vesmíru vznikly gravitační nestabilitou (temné hmoty, baryonová jí následovala); grav. nestabilita tvoří filameny
- galaxie se tvoří hierarchicky: malá temná hala \rightarrow trpasličí galaxie \rightarrow velké galaxie \rightarrow skupiny a kupy galaxií

- vesmír má horký počátek, který můžeme přímo vidět
(na vlastní mikrovlnné oči)
- nejúspěšnější současný model – Λ CDM:
 - temná energie (akcelerace), chladná temná hmota (mj. aby mohly vzniknout galaxie), jen 5% baryonové hmoty
 - funguje dobře na všech (malých i velkých) škálách
 - existují alternativy a problémy (např. Hubbleova konstanta z CMB vs. všeho ostatního) \Rightarrow možná bude vylepšen / nahrazen
- struktury vesmíru vznikly gravitační nestabilitou (temné hmoty, baryonová jí následovala); grav. nestabilita tvoří filameny
- galaxie se tvoří hierarchicky: malá temná hala \rightarrow trpasličí galaxie \rightarrow velké galaxie \rightarrow skupiny a kupy galaxií
- dva typy srážek galaxií (v praxi kombinace):
 - „mokrý“ (převažuje plyn) tvoří diskové galaxie
 - „suchý“ (převažují hvězdy) tvoří eliptické galaxie

Děkuji za pozornost





1.5'