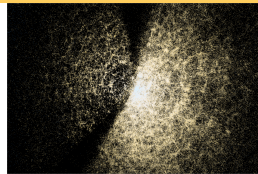
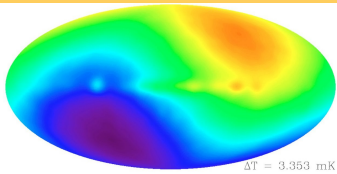


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

20 marca 2018



Standardowy model kosmologiczny Λ -CDM

Standardowy model kosmologiczny ze stałą kosmologiczną Λ
oraz zimną ciemną materią (ang. Cold Dark Matter, CDM)

Zgodnie ze współczesnymi ustaleniami, żyjemy w płaskim ($k = 0$) Wszechświecie pyłowym (ciemna materia) ze stałą kosmologiczną (ciemna energia).

Model ten posiada eleganckie rozwiązanie analityczne

$$a(t) = a_0 \sinh \left(\frac{\sqrt{3\Lambda}}{2} ct \right)^{2/3}, \quad \rho(t) = \frac{\frac{\Lambda c^2}{8\pi G}}{\sinh \left(\frac{\sqrt{3\Lambda}}{2} ct \right)^2},$$

$$H(t) = \frac{c\sqrt{\Lambda/3}}{\operatorname{tgh} \left(\frac{\sqrt{3\Lambda}}{2} ct \right)}, \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}, \quad T = \frac{2}{3H_0} \operatorname{artanh}(\sqrt{\Omega_\Lambda})/\sqrt{\Omega_\Lambda}$$

Model ten dla $t \rightarrow 0$ redukuje się do płaskiego modelu „newtonowskiego” $a(t) \rightarrow t^{2/3}$, natomiast dla $t \rightarrow \infty$ staje się „przestrzenią de Sittera” $a(t) \rightarrow e^{H_\infty t}$, $H_\infty = c\sqrt{\Lambda/3}$.

Gęstość krytyczna Wszechświata stanowi wygodną jednostkę miary ilości materii. Stosunek gęstości materii (lub jej ilości po przeliczeniu na gęstość) do gęstości krytycznej nazywamy „omegą”

$$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_C}, \quad \rho_C = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

Dla promieniowania (γ, ν) o gęstości energii ε mamy

$$\Omega_\gamma = \frac{\varepsilon/c^2}{\rho_C} = \frac{32\pi G\sigma T^4}{3c^3 H_0^2},$$

a dla stałej kosmologicznej

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2/(8\pi G)}{\rho_C} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

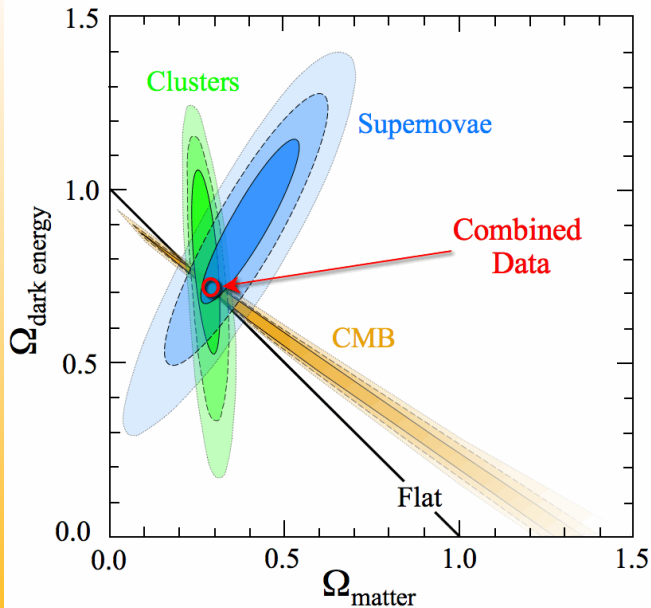
UWAGA: Ω_i jest na ogół wielkością zależną od czasu, definiujemy ją w chwili obecnej!

Filary modelu kosmologicznego

Współczesny model kosmologiczny, Λ -CDM (płaska geometria, stała kosmologiczna Λ i zimna ciemna materia, ang. **Cold Dark Matter**) opiera się przede wszystkim na trzech obserwacjach:

- 1 zależność odległości (jasnościowej) od przesunięcia ku czerwieni z , opartej głównie o pomiary typowych (Branch-normal) supernowych typu Ia
- 2 obserwacje mikrofalowego promieniowania tła (CMB, **Cosmic Microwave Background**), szczególnie *widma mocy* rozkładu jego fluktuacji na częstotliwości (harmoniki sferyczne)
- 3 porównanie obserwowanego rozkładu materii z symulacjami tworzenia się struktur, od skal największych (pustki, „włókna”, supergromady) do galaktyk

Precyzyjnego testu na gęstość materii barionowej dostarcza produkcja pierwiastków, głównie helu, czyli *kosmologiczna nukleosynteza*.



Parametry modelu Λ -CDM

- stała Hubble'a

$$H_0 = 67.8 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}} = 2.2 \times 10^{-18} \frac{1}{\text{s}}, \quad \frac{1}{H_0} = 14.4 \text{ mld lat}$$

- wiek Wszechświata

$$T = 13.8 \text{ mld lat}$$

- skład w chwili obecnej ($\rho_C = 8.6 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3 \sim 5$ atomów wodoru/ m^3)

- stała kosmologiczna (ciemna energia, energia próżni)

$$\Omega_\Lambda = 0.7, \quad \Lambda = 1.11 \times 10^{-52} \frac{1}{\text{m}^2}, \quad \rho_\Lambda = 6 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- zimna ciemna materia Ω_m i materia barionowa Ω_B

$$\Omega_m = 0.25, \quad \Omega_B = 0.05$$

- promieniowanie („lekkie” neutrino, fotony)

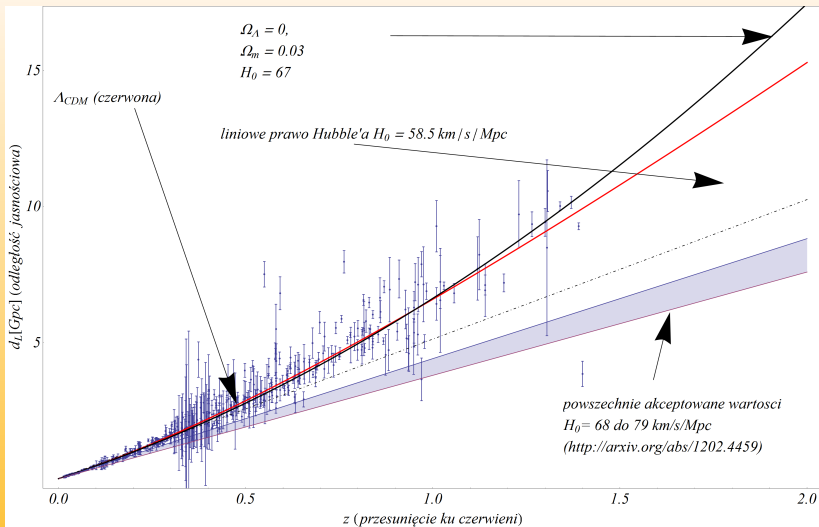
W kosmologii nie jest możliwe podanie odległości bez powiązania jej z konkretną metodą pomiaru.

- odległość jasnościowa d_L
- odległość rozmiarów kątowych d_A

$$d_L = \frac{c}{H_0} \frac{1+z}{\sqrt{1-\Omega_m-\Omega_\Lambda}} \operatorname{sinn} \int_0^z \frac{\sqrt{1-\Omega_m-\Omega_\Lambda} dz'}{\sqrt{(1+z')^2(1+\Omega_m z') - z'(z'+2)\Omega_\Lambda}}$$

W przestrzeni euklidesowej (model newtonowski) lub dla $z \ll 1$ z efektu Dopplera $\lambda/\lambda_0 = 1 + v/c$:

$$d_L = \frac{c z}{H_0} \equiv d_i$$



Formowanie się struktur

Jak z jednorodnego gazu wyłoniły się pierwsze obiekty i układy?

Rdzeniem teorii formowania się struktur, jest N-ciałowa, newtonowska, symulacja „cząstek” ciemnej materii o masach $10^{4-8} M_{\odot}$ w układzie współporuszającym się zgodnie z ekspansją Wszechświata.

Symulacja N-body (N-ciał): podstawy

- dla każdego i -tego punktu materialnego o masie m_i druga zasada dynamiki Newtona:

$$m_i \vec{a}_i = \sum'_{j=1}^N \vec{F}_{ij}$$

gdzie \vec{F}_{ij} to wektor siły działającej pomiędzy ciałami o masach m_i i m_j ; suma rozciąga się na wszystkie ciała, za wyjątkiem samego siebie ($i \neq j$), co zwyczajowo oznacza się apostrofem.

- moduł siły $|\vec{F}_{ij}| \equiv F_{ij}$ to newtonowskie prawo ciążenia:

$$F_{ij} = G \frac{m_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^2}$$

gdzie \vec{r}_i to wektor położenia i -tej masy.

- wektor siły \vec{F}_{ij} :

$$\vec{F}_{ij} = -Gm_i \frac{m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3} (\vec{r}_i - \vec{r}_j)$$

gdzie:

$$|\vec{r}_i - \vec{r}_j| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \vec{r}_i = \{x_i, y_i, z_i\}.$$

Ostatecznie dostajemy układ $3N$ równań różniczkowych 2 rzędu (masa m_i się skraca):

$$\frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = -G \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3} (\vec{r}_i - \vec{r}_j)$$

N-body: uwagi ogólne

- 1 dla $N > 3$ problem musi być rozwiązywany numerycznie (dla $N = 2$ prawa Keplera, dla $N = 3$ dobrze rozwinięta teoria)
- 2 siła, energia potencjalna oraz prędkość mogą dążyć do nieskończoności dla $\vec{r}_i \rightarrow \vec{r}_j$
- 3 teoria Newtona *jest* tylko przybliżeniem OTW
- 4 całkowita energia mechaniczna i kręt zachowane:
kolaps grawitacyjny i tworzenie struktur utrudnione
- 5 realistyczne symulacje wymagają dużego N (np: gromada kulista $N \sim 10^5$, galaktyka $N \sim 10^{11}$, podobnie pierścień Saturna, dyski protoplanetarne, pasy asteroidów, formowanie struktur kosmologicznych)
- 6 dokładne wyznaczenie siły (każdy z każdym) wymaga N^2 operacji matematycznych
 - algorytmy grupowania (drzewa, transformaty fouriera, rozwinięcia multipolowe)
 - użycie kart graficznych

Zmiękczenie siły newtonowskiej

Z następujących powodów:

- 1 matematycznych (dzielenie przez zero)
- 2 informatycznych (przekroczenie zakresu)
- 3 fizycznych (skończone rozmiary gwiazd)
- 4 niestosowalności teorii Newtona ($v > c$, nieograniczona z dołu energia)
- 5 istnienia czarnych dziur

w symulacjach N-ciałowych stosuje się „zmiękczenie” siły newtonowskiej:

$$\vec{F}_{ij} = -\frac{Gm_i m_j}{\sqrt{(\vec{r}_i - \vec{r}_j)^2}^3} (\vec{r}_i - \vec{r}_j) \rightarrow \vec{F}_{ij} = -\frac{Gm_i m_j}{\sqrt{(\vec{r}_i - \vec{r}_j)^2 + \epsilon^2}^3} (\vec{r}_i - \vec{r}_j)$$

Parametr ϵ na sens najmniejszej dopuszczalnej odległości pomiędzy gwiazdami.

W realistycznych symulacjach musimy wziąć pod uwagę nie tylko rozmiary, ale także ewolucję gwiazd oraz ich nieuniknione zderzenia.

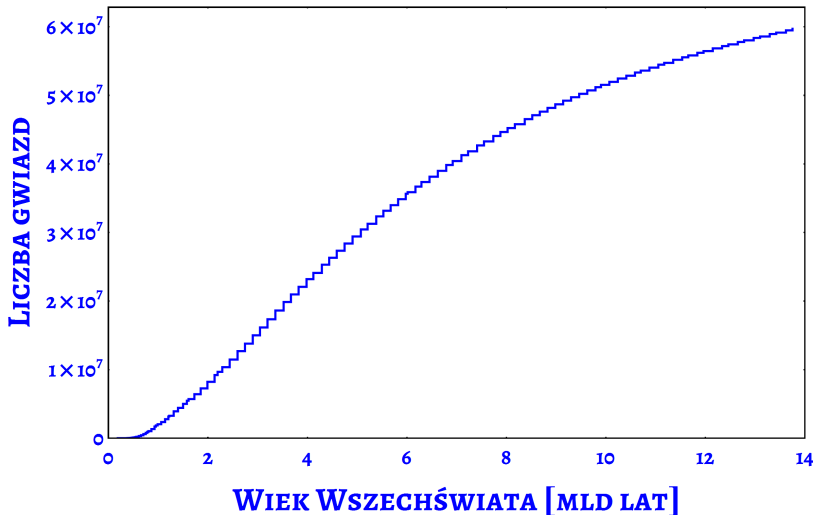
Najbardziej ambitny projekt symulowanej ewolucji Wszechświata.

- $1820^3 \simeq 6 \times 10^9$ „cząstek” ciemnej materii
- masa „cząstki” ciemnej materii $6.26 \times 10^6 M_{\odot}$
- masa „cząstki” materii barionowej $1.26 \times 10^6 M_{\odot}$
- rozdzielczość 48 pc
- zmiękczenie siły newtonowskiej $\varepsilon = 710$ pc
- „wytworzono” 41416 galaktyk z min. 500 „gwiazd”
- parametryczne tworzenie supermasywnych czarnych dziur, 2 tryby „pracy” AGN (kwazar lub radioźródło)
- warunki początkowe, Λ -CDM dla $z = 127$, $T = 245K$

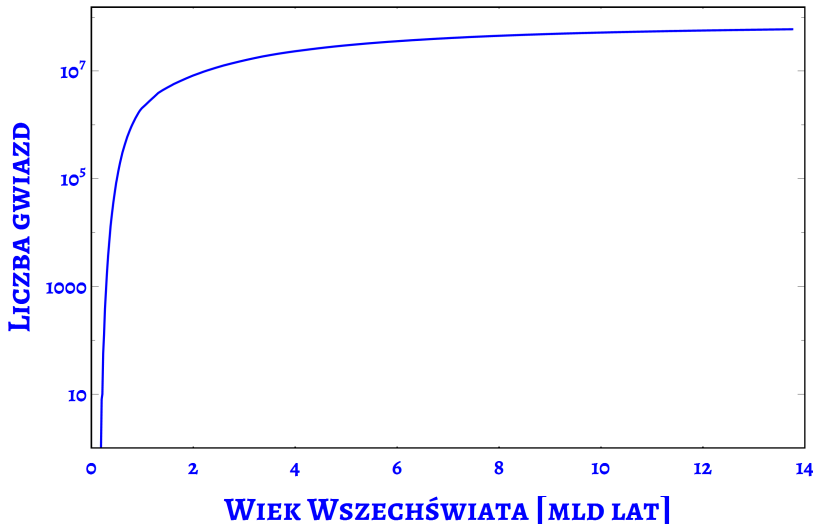
Druga odsłona projektu symulowanej ewolucji Wszechświata.

- $910^3 \simeq 7 \times 10^8$ „cząstek” ciemnej materii
- masa „cząstki” ciemnej materii $5 \times 10^7 M_{\odot}$
- masa „cząstki” materii barionowej $1.26 \times 10^6 M_{\odot}$
- rozdzielczość 48 pc
- zmiękczenie siły newtonowskiej $\varepsilon = 710$ pc
- „wytworzono” 41416 galaktyk z min. 500 „gwiazd”
- parametryczne tworzenie supermasywnych czarnych dziur, 2 tryby „pracy” AGN (kwazar lub radioźródło)
- warunki początkowe, Λ -CDM dla $z = 127$, $T = 245K$

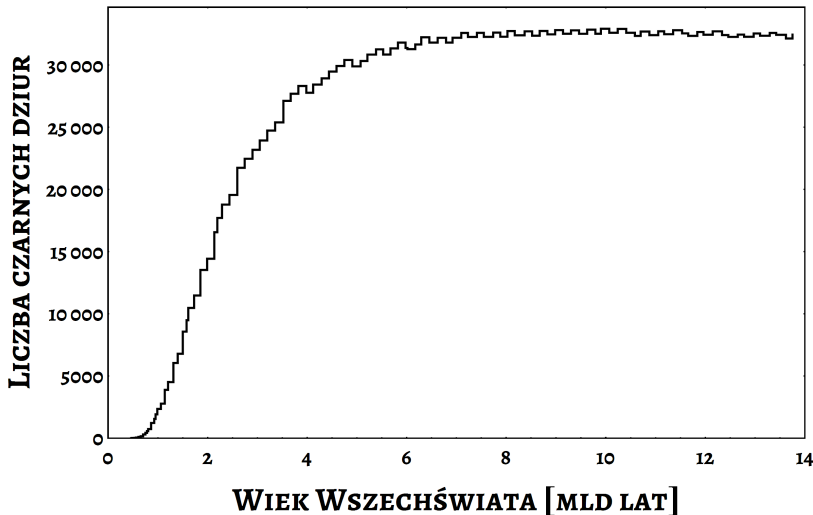
ILLUSTRIS TNG



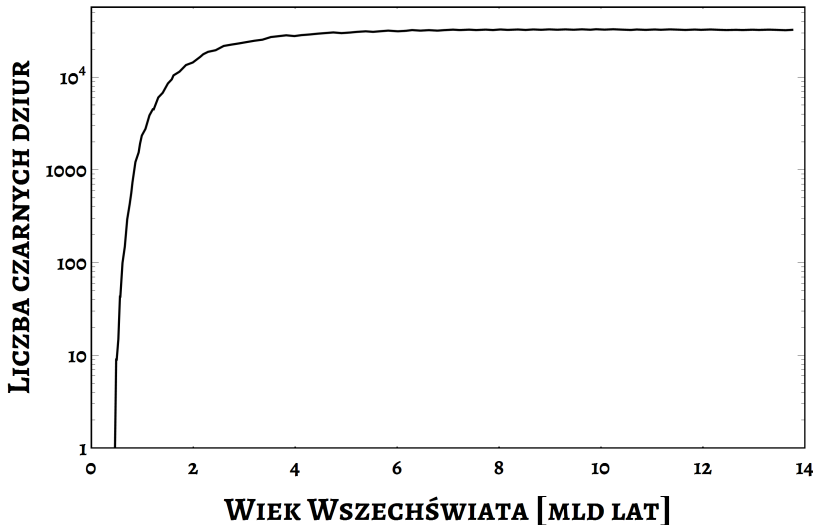
ILLUSTRIS TNG



ILLUSTRIS TNG

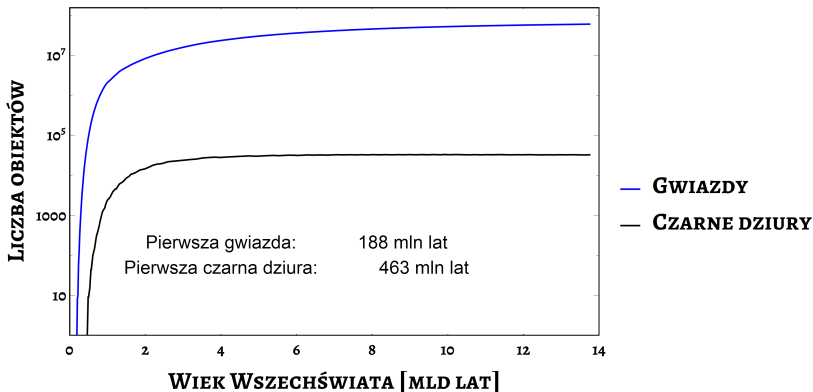


ILLUSTRIS TNG



Pierwsze gwiazdy i czarne dziury

ILLUSTRIS TNG



Chcesz wiedzieć więcej?



Seminarium Astrofizyczne, każda środa 13:15, A-1-08