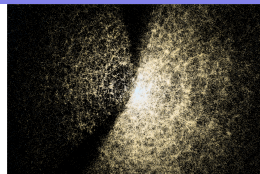
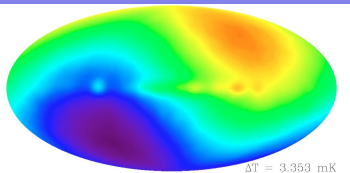


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

9 czerwca 2015



Budowa i cechy galaktyk

Galaktyka

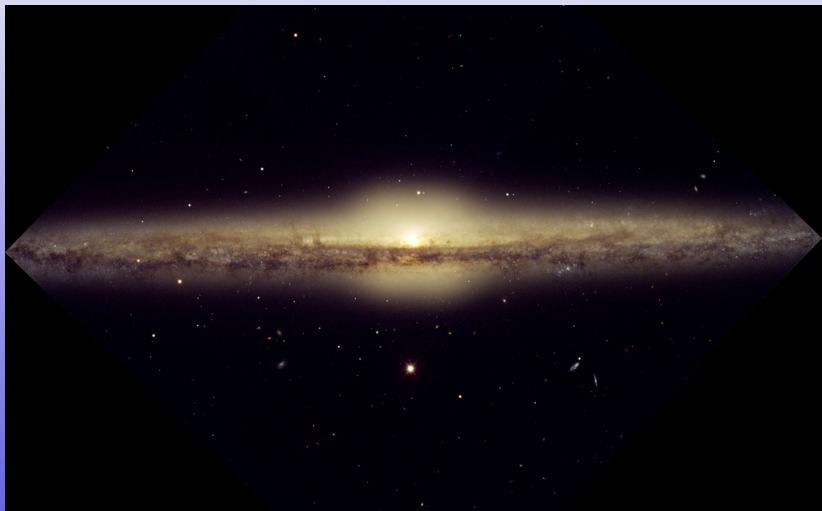
Słońce jest jedną z 200 mld gwiazd tworzących dyskopodobny system o średnicy 100 milionów lat świetlnych. Składa się z:

- płaskiego jak płyta CD dysku
- ramion spiralnych z poprzeczką
- jądra zawierającego czarną dziurę o masie 4 milionów mas Słońca
- sferycznego halo bardzo starych gwiazd
- około 150 gromad kulistych

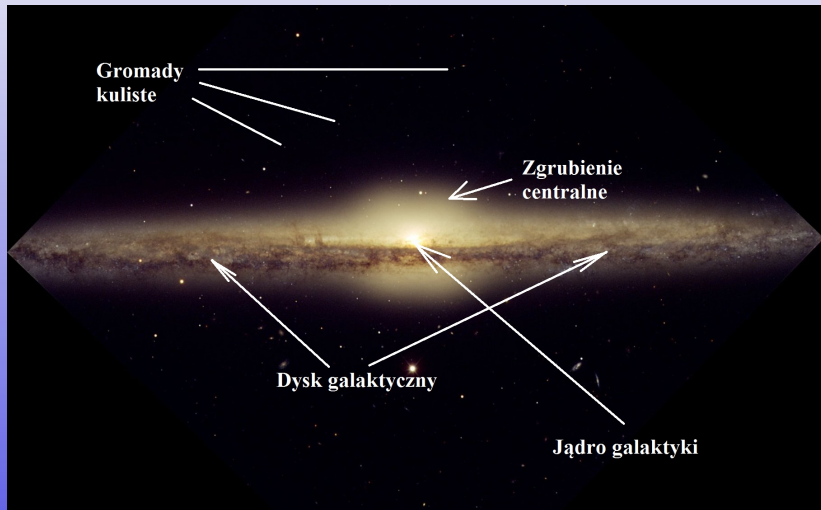
Galaktyka obraca się raz na 250 milionów lat.

Z oczywistych powodów nie można pokazać zdjęcia naszej Galaktyki (Drogi Mlecznej)! Ale są miliardy innych ...

Typowe galaktyki spiralne



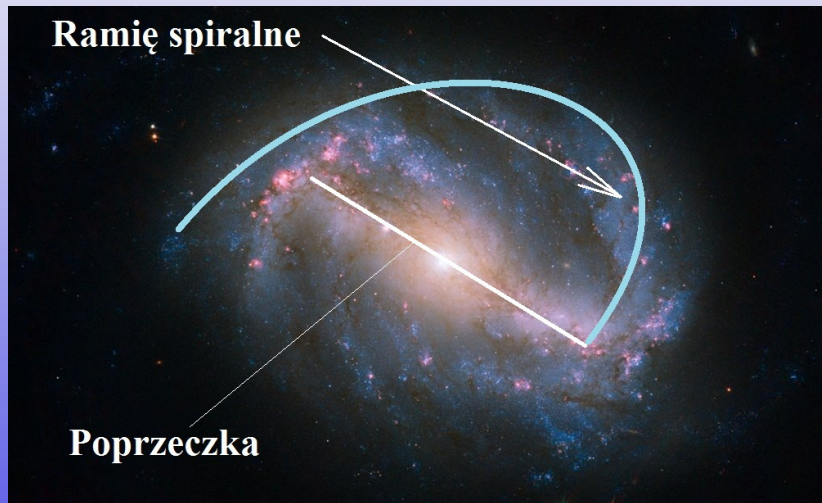
Typowe galaktyki spiralne



Typowe galaktyki spiralne



Typowe galaktyki spiralne



Pierścień Saturna vs dysk Galaktyki

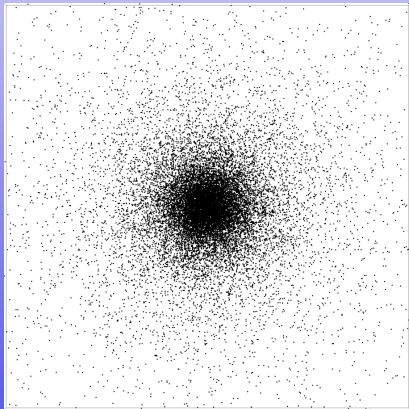


- pierścień: punkty materialne poruszają się w dominującym potencjale Saturna
- dysk galaktyczny: punkty materialne poruszają się w średnim potencjale dysku

Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

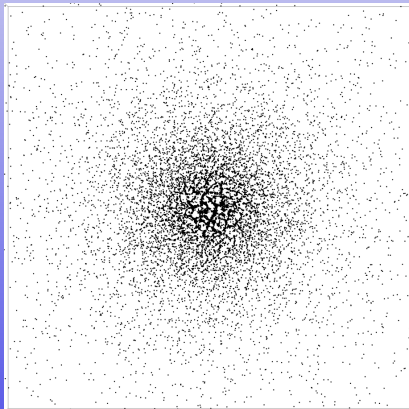
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

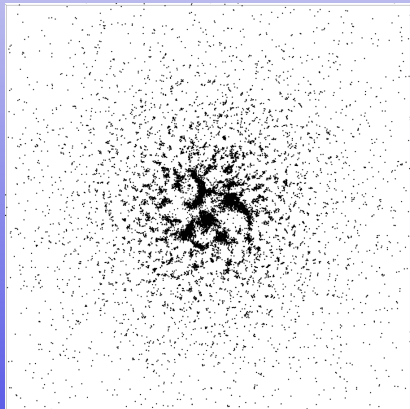
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

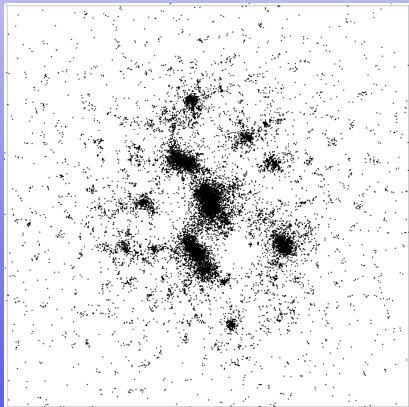
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



Samograwitacja i niestabilność cienkiego dysku

Zarówno analizy stabilności jak i symulacje N-body wykazują niestabilność dynamiczną samograwitującego cienkiego dysku. Istnieją jak dotąd dwie poważne propozycje rozwiązania tego problemu:

- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*

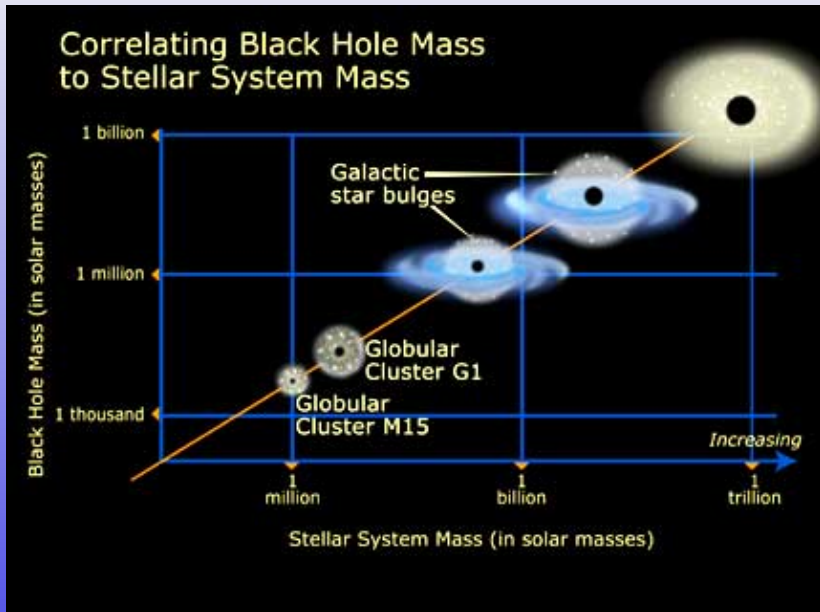


Galaktyki eliptyczne

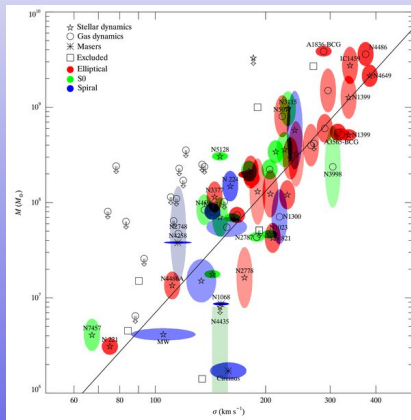
Co powstało ostatecznie w wyniku niestabilności dysku?
Elipsoidalna struktura wypełniona chaotycznie poruszającymi się gwiazdami, podobnie jak w gromadzie kulistej.

- chaotycznie poruszające się gwiazdy, głównie stare
- brak obłoków gazu i pyłu międzygwiazdowego
- supermasywna ($10^8 \dots 10^{10} M_{\odot}$) czarna dziura w centrum

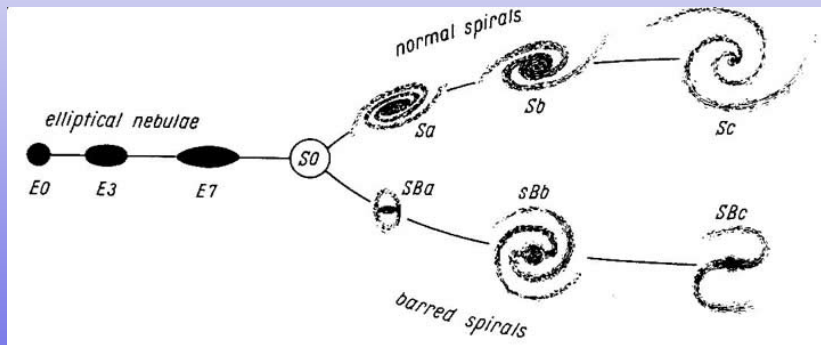




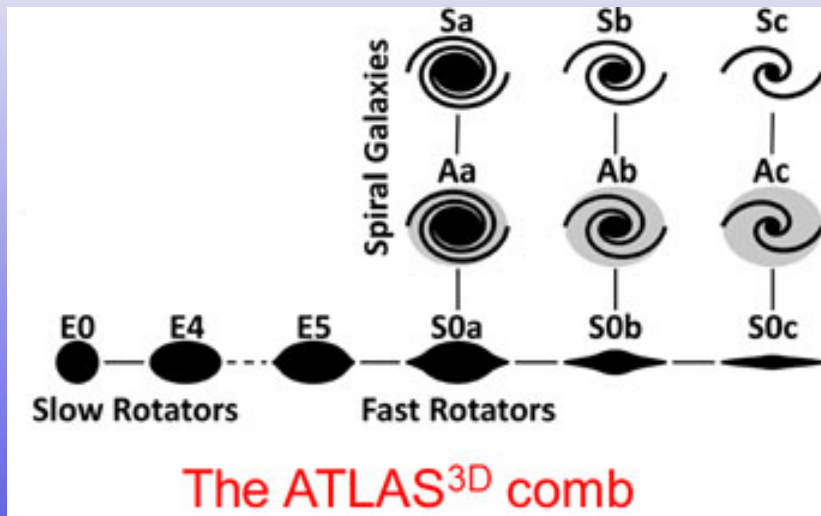
Relacje: $M - \sigma$, Tully-Fishera, Fabera-Jacksona



Klasyfikacja galaktyk



Klasyfikacja galaktyk



Podstawą są następujące fakty:

- 1 przesunięcie ku czerwieni światła z , przeliczone poprzez efekt Dopplera na prędkość ucieczki $v = cz$ daje prawo Hubble'a, przynajmniej dla $z \ll 1$

$$\vec{v} = H_0 \vec{r},$$

- 2 wiek obiektów (Układ Słoneczny, gwiazdy, gromady kuliste) jest skończony, maksymalnie kilkanaście miliardów lat
- 3 mikrofalowe promieniowanie tła oraz ilość wodoru i helu wskazują na wysokie temperatury w przeszłości
- 4 matematyczna analiza potencjalnych rozwiązań wykazuje brak stabilnych, statycznych rozwiązań
- 5 własności obserwowanego Wszechświata nie zależą od kierunku obserwacji

Do tego należy dodać założenia:

- zasada Kopernikańska (losowa, niewyróżniona, pozycja Ziemi we Wszechświecie)
- w przybliżeniu stała gęstość rozkładu materii i promieniowania w „wielkiej skali”

„Kosmologia” newtonowska

Z zasady zachowania energii mechanicznej wynika wzór:

$$H^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -k/r^2, \quad H(t) = \frac{1}{r(t)} \frac{dr(t)}{dt} \equiv \frac{\dot{r}}{r}$$

Znak wielkości k określa czy Wszechświat jest w stanie związanym. Wprowadzamy gęstość krytyczną

$$\rho_C = \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

- Dla $k < 0$, czyli $\rho < \rho_C$ Wszechświat rozszerza się wiecznie.
- Dla $k = 0$, czyli $\rho = \rho_C$ Wszechświat rozszerza się wiecznie, ale prędkość ekspansji dąży do zera.
- Dla $k > 0$, czyli $\rho > \rho_C$ Wszechświat jest związany, czyli przestanie się rozszerzać, a następnie zacznie się kurczyć

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = H(t)\vec{r}(t), \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{4}{3}\pi G\rho(t)\vec{r}$$

Równanie na dwie obserwowalne wielkości, czyli zależność gęstości $\rho(t)$ i „stałej” Hubble’a $H(t)$ od czasu t ma postać:

$$\begin{cases} \frac{dH}{dt} + H^2 + \frac{4}{3}\pi G\rho = 0 \\ \frac{d\rho}{dt} + 3H\rho = 0 \end{cases}$$

Rozwiązanie krytyczne:

$$\rho_C = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad \rho(t) = \frac{1}{6\pi G} \frac{1}{(t+T)^2}, \quad H(t) = \frac{2}{3(t+T)}$$

Dla $t \rightarrow -T$ $\rho \rightarrow \infty$. Moment $t = -T$, gdzie

$$T = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0}$$

określamy jako *Wielki Wybuch* (ang. Big Bang).

Kosmologia w OTW

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

Standardowy model w OTW

Istnieją trzy czasoprzestrzenie spełniające nasze założenia

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2(dr^2 + \text{sinn}^2 r d\Omega^2), \quad d\Omega^2 = \sin^2 \theta d\phi^2 + d\theta^2$$

gdzie „sinus kosmologiczny” to

$$\text{sinn}r = \begin{cases} \sin r & \text{dla } k > 0 \\ r & \text{dla } k = 0 \\ \sinh r & \text{dla } k < 0 \end{cases}$$

Równania ruchu wynikające z OTW ze stałą kosmologiczną

$$\begin{cases} 3H^2 - 8\pi G\rho + \frac{3c^2 k}{a^2} - \Lambda c^2 = 0, \quad k = -1, 0, +1 \\ \frac{\ddot{a}}{a} + \frac{4}{3}\pi G(\rho + 3P/c^2) - \frac{\Lambda c^2}{3} = 0 \\ H = \frac{\dot{a}}{a}, \quad \frac{dH}{dt} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} \end{cases}$$

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

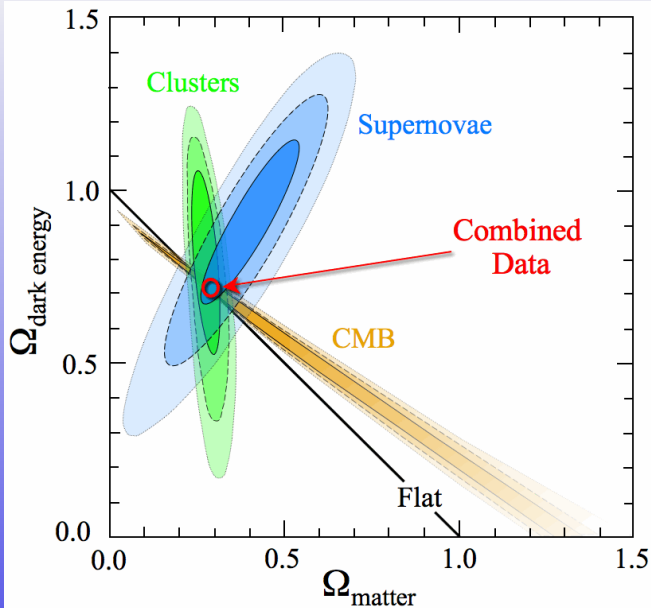
$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2/(8\pi G)}{\rho_C} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

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

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)

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

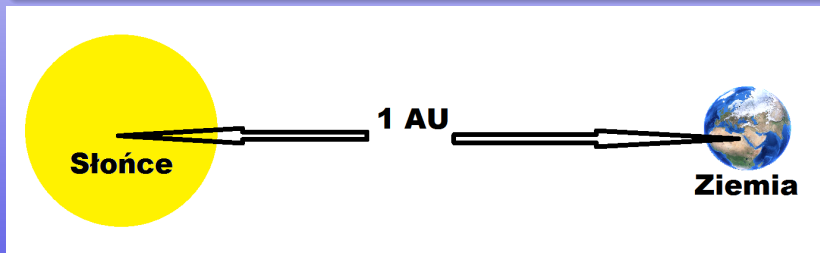
- zimna ciemna materia Ω_m i materia barionowa Ω_B

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

- promieniowanie („lekkie” neutrino, fotony)

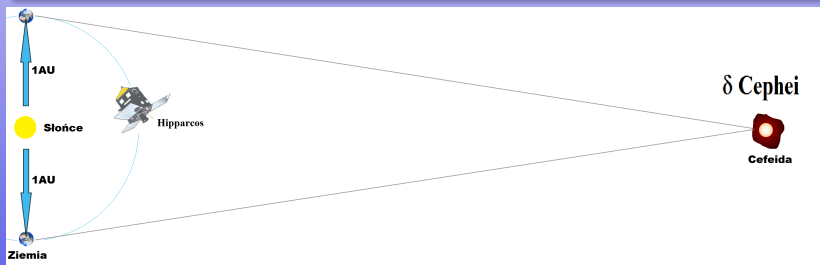
Drabina odległości kosmologicznych

- **1 AU**: rozmiar orbity Ziemskiej (jednostka astronomiczna)
- paralaksa heliocentryczna, m. in. odległość do δ – *Cephei*
- Cefeidy: zależność okres-jasność: bliskie galaktyki
- supernowe typu Ia: odległe galaktyki



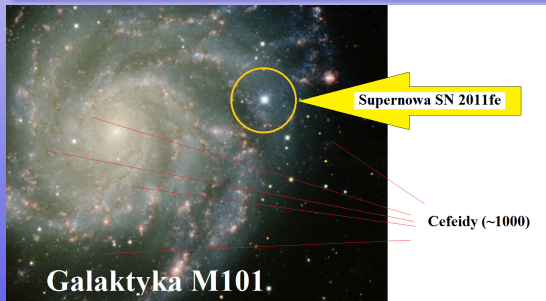
Drabina odległości kosmologicznych

- 1 AU: rozmiar orbity Ziemskiej (jednostka astronomiczna)
- **paralaksa heliocentryczna**, m. in. odległość do δ – *Cephei*
- **Cefeidy**: zależność okres-jasność: bliskie galaktyki
- **supernowe** typu Ia: odległe galaktyki



Drabina odległości kosmologicznych

- 1 AU: rozmiar orbity Ziemskiej (jednostka astronomiczna)
- paralaksa heliocentryczna, m. in. odległość do δ – *Cephei*
- **Cefeidy**: zależność okres-jasność: bliskie galaktyki
- **supernowe** typu Ia: odległe galaktyki



Zdjęcie: T.A. Rector (University of Alaska Anchorage), H. Schweiker & S. Pakzad NOAO/AURA/NSF

- **1 AU**: rozmiar orbity Ziemskiej (jednostka astronomiczna)
- **paralaksa heliocentryczna**, m. in. odległość do δ – *Cephei*
- **Cefeidy**: zależność okres-jasność: bliskie galaktyki
- **supernowe** typu Ia: odległe galaktyki



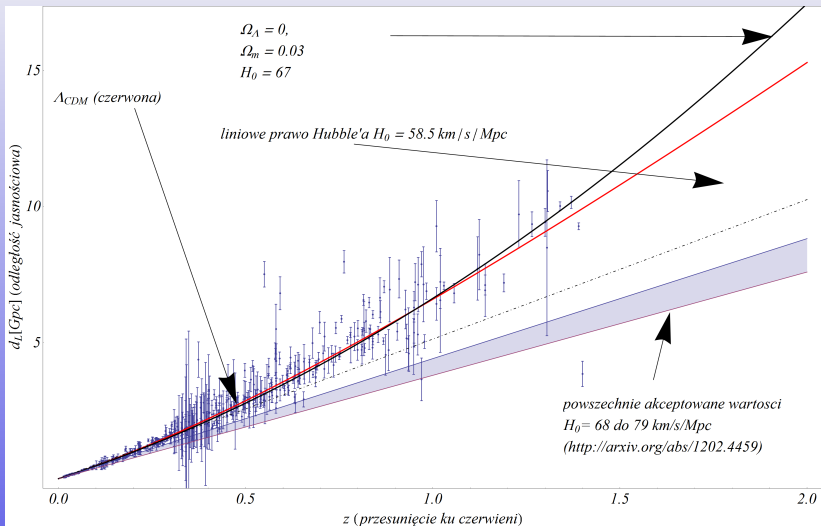
- **1 AU**: rozmiar orbity Ziemskiej (jednostka astronomiczna)
- **paralaksa heliocentryczna**, m. in. odległość do δ – *Cephei*
- **Cefeidy**: zależność okres-jasność: bliskie galaktyki
- **supernowe** typu Ia: odległe galaktyki



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

- odległość jasnościowa d_L
- odległość rozmiarów kątowych d_A

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



Historia Wszechświata

Pierwszy okres ewolucji Wszechświata

Proces	czas	kT	ρ [kg/m ³]
(????) skala Plancka	10^{-43} s	10^{16} TeV	10^{96}
(???) łamanie GUT	10^{-36} s	10^{14} TeV	10^{80}
(??) inflacja	?	?	?
(?) bariogeneza			
LHC	10^{-14} s	13 TeV	10^{37}
złamanie symetrii elektrosłabej	10^{-12} s	1 TeV	10^{32}
uwięzienie kwarków	10^{-4} s	100 MeV	10^{16}
powstanie neutrin reliktowych	1 s	1 MeV	10^9
nukleosynteza	„3 minuty”	0.2 MeV	10^4
koniec ery promieniowania	50000 lat		10^{-16}
oddzielenie fotonowego promieniowania tła (rekombinacja)	300000 lat	0.45 eV	10^{-17}
wieki ciemne			

Klasyczne modele kosmologiczne przewidują *osobliwość* dla $t = 0$, czyli stan w którym krzywizna przestrzeni, stała Hubble'a, gęstość, temperatura dążą do nieskończoności. Warunki początkowe są nieznane, ale powszechnie przyjmuje się, że parametry takie jak: liczba barionowa, ładunek elektryczny, liczba leptonowa, moment pędu, niejednorodności znikają.

Za pomocą analizy wymiarowej można utworzyć *jednostki Plancka*, których wartości często podaje się jako panujące „na początku” Wielkiego Wybuchu.

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{hG}{c^5}} = 1.4 \times 10^{-43} \text{ s}, \quad kT_{Pl} = \sqrt{\frac{hc^5}{G}} = 3 \times 10^{19} \text{ GeV},$$

$$\rho_{Pl} = \frac{c^5}{hG^2} = 10^{96} \text{ kg/m}^3, \quad R_{Pl} = \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = 4 \times 10^{-35} \text{ m}$$

Wszechświat radiacyjny

Początkowo można założyć, że:

- dla $t \rightarrow 0$, $\Omega_\Lambda \rightarrow 0$, bo jednostkach Plancka wartość stałej kosmologicznej $\Lambda_{Pl} = 10^{-122}$
- wszystkie znane cząstki elementarne poruszają się z prędkościami skrajnie relatywistycznymi, co pozwala je traktować jak **bezmasowe**
- równanie stanu materii to

$$P = \varepsilon/3$$

- na tym etapie geometria jest nieodróżnialna od płaskiej

Równania Friedmanna redukują się do

$$\begin{cases} \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 &= \frac{8\pi G\rho}{3} \\ \ddot{a} &= -\frac{8\pi G\rho}{3} \end{cases} \rightarrow \rho(t) = \frac{3}{32\pi Gt^2}, H(t) = \frac{1}{2t}, a(t) \propto \sqrt{t}$$

Czas t można przeliczyć na temperaturę (lub kT) ze wzoru

$$t = \frac{1}{8T^2} \sqrt{\frac{3c^3}{2\pi G\sigma N(T)}}, \quad N(T) = \sum_i \frac{7}{8} N_{Fermion} + N_{Boson}$$

Jeżeli na pewnym etapie pojawi się materia (np: pole skalarne) o równaniu stanu równoważnym dużej stałej kosmologicznej (w porównaniu z ρ) to równania Friedmanna redukują się do:

$$\begin{cases} H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 & = \frac{\Lambda c^2}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} & = \frac{\Lambda c^2}{3} \end{cases} \rightarrow H(t) = H_\infty = c\sqrt{\frac{\Lambda}{3}}, a(t) \propto e^{\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} ct}$$

Wykładniczy wzrost powoduje:

- wygładzenie niejednorodności
- rozwiązanie tzw. „problemu horyzontu”
- płaską geometrię
- powiększenie kwantowych fluktuacji do rozmiarów makroskopowych
- wyjaśnienie braku monopoli magnetycznych

Pole skalarne musi zaraz po inflacji zaniknąć!

Brak antymaterii w naszym otoczeniu jest oczywistym faktem obserwacyjnym. Liczba fotonów w porównaniu do liczby barionów

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} = 6 \times 10^{-10}$$

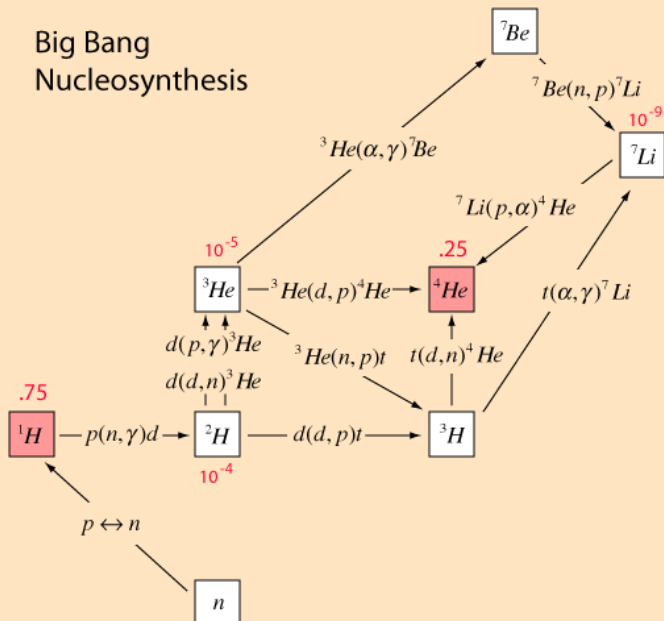
wskazuje na niemal 100% anihilację. Teoria bariogenezy musi wyjaśnić, dlaczego nie doszło do całkowitej anihilacji.

Kryteria Sacharowa

- 1 brak zachowania liczby barionowej B
- 2 łamanie parzystości ładunkowej C oraz parzystości kombinowanej CP
- 3 brak równowagi termodynamicznej

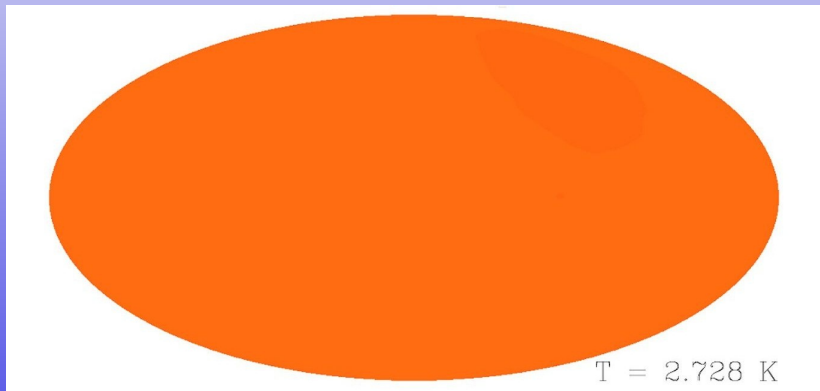
Nukleosynteza kosmologiczna

Big Bang Nucleosynthesis



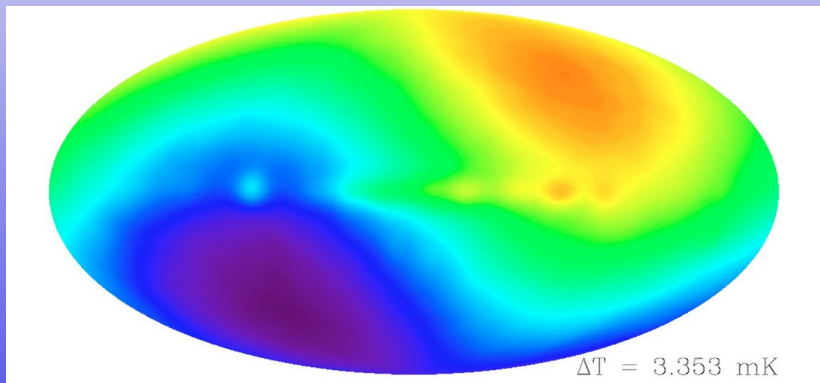
Mikrofalowe promieniowanie tła

- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



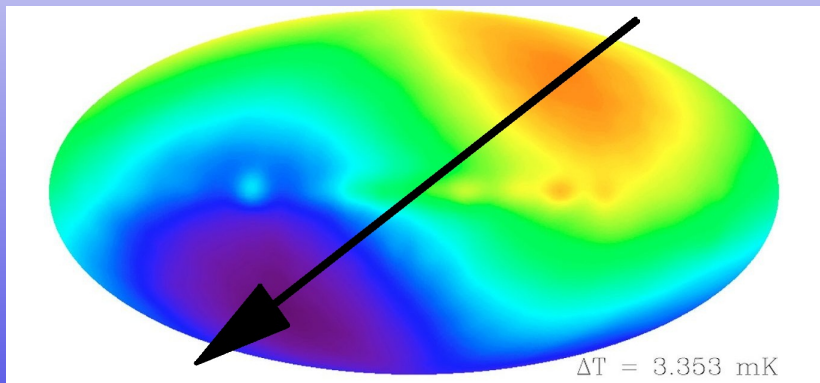
Mikrofalowe promieniowanie tła

- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



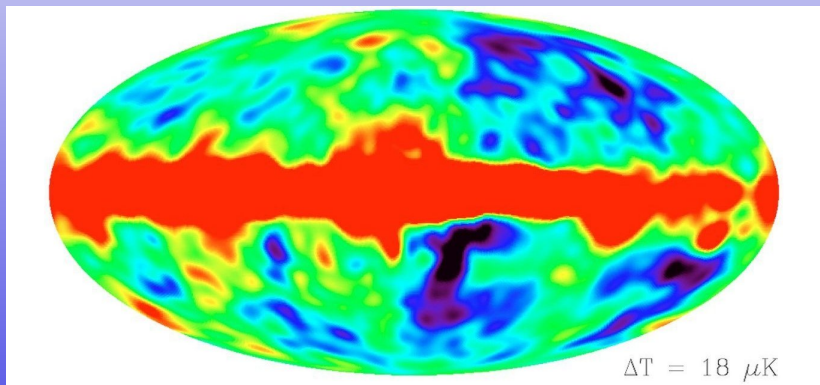
Mikrofalowe promieniowanie tła

- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



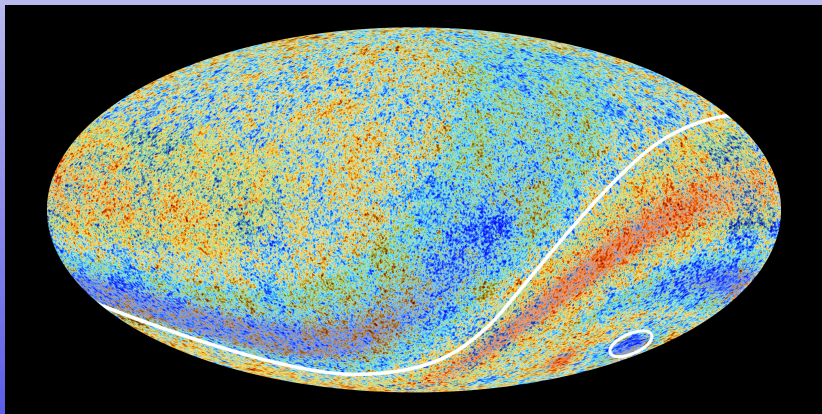
Mikrofalowe promieniowanie tła

- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



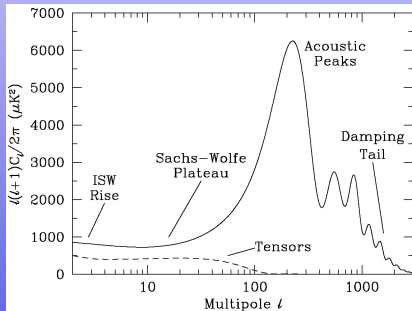
Mikrofalowe promieniowanie tła

- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



Mikrofalowe promieniowanie tła

- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



Po rekombinacji, kiedy protony i elektrony połączyły się w neutralne atomy wodoru $p + e^- \rightarrow H$, nastąpiła epoka, w której nie było żadnych źródeł promieniowania.

Jedynym procesem, który nadal zachodził, była N-ciałowa ewolucja „cząstek” ciemnej materii w wyniku której tworzą się zagęszczenia i rozrzedzenia masy

Rozmiary Wszechświata

O ile we wczesnym Wszechświecie, ewolucję kosmosu opisuje się w terminach czasu lub temperatury (ewentualnie kT), po powstaniu CMB powszechnie używa się *przesunięcia ku czerwieni* z . Czynniki skali a i temperatura CMB wiąże się z z następująco

$$a(z) = \frac{a(0)}{1+z}, \quad T(z) = T(0)(1+z).$$

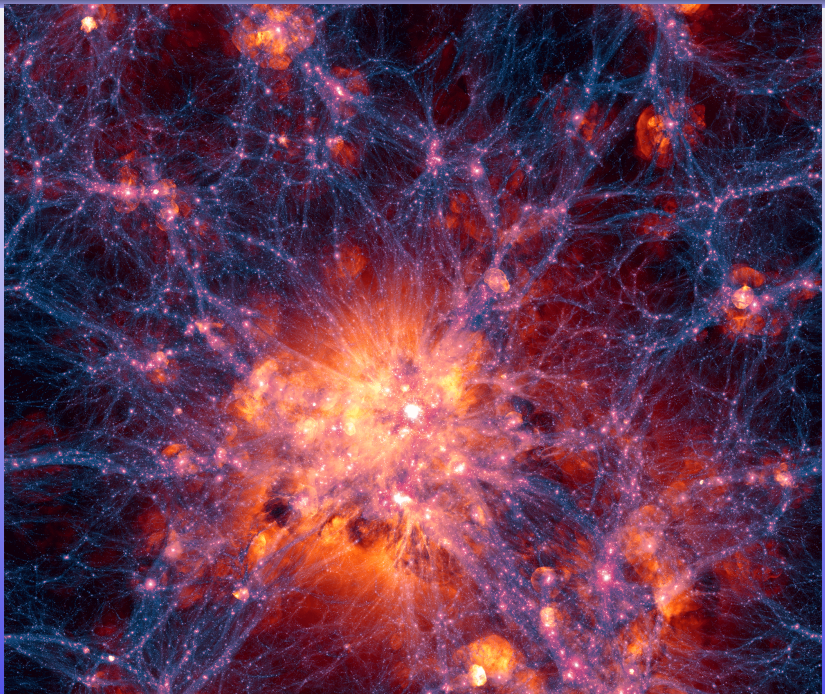
Przykłady: Wielki Wybuch $z = \infty$; koniec dominacji promieniowania $z = 3600$; rekombinacja/powstanie CMB $z = 1000$; całkowita rejonizacja $z = 6$.

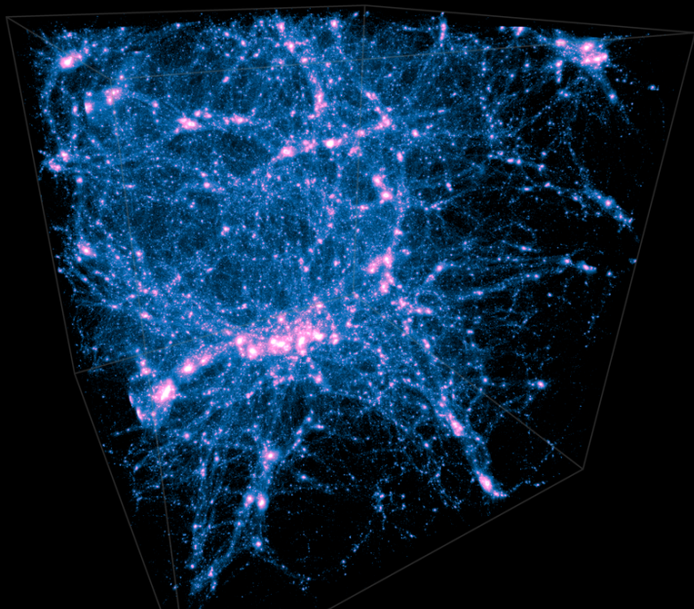
Formowanie się struktur: N-body

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.

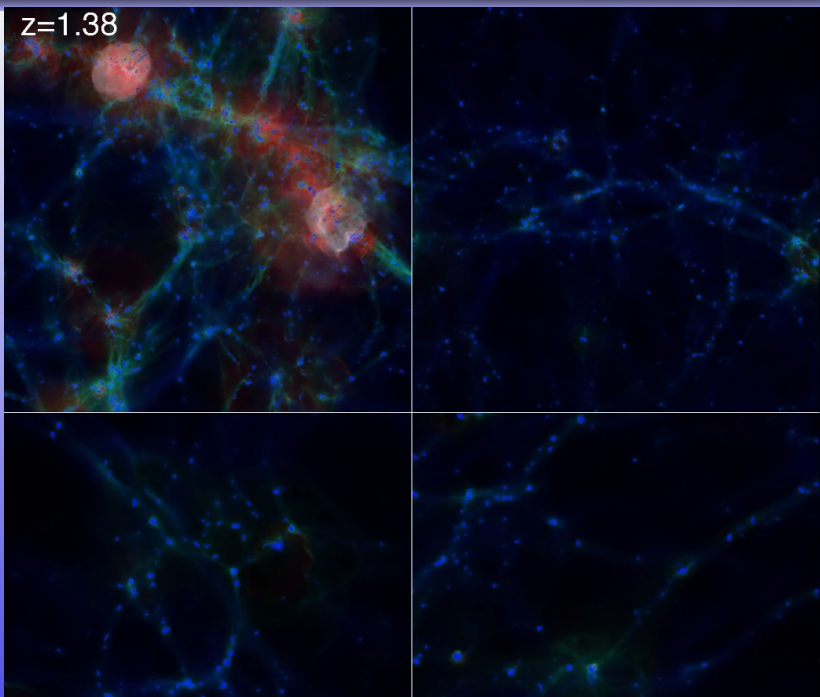
Najbardziej ambitny projekt symulowanej ewolucji Wszechświata.

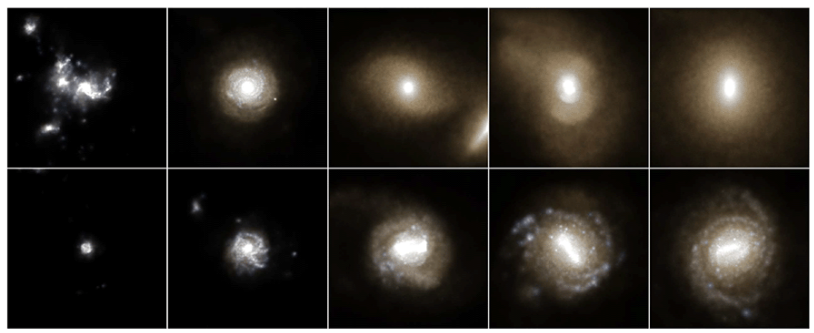
- $1820^3 \simeq 6 \times 10^9$ „cząstek” ciemnej materii
- masa „cząstki” ciemnej materii $6.26 \times 10^6 M_{\odot}$
- masa „cząstki” materii barionowej $1.26 \times 10^6 M_{\odot}$
- rozdzielczość 48 pc
- zmiękczenie siły newtonowskiej $\varepsilon = 710$ pc
- „wytworzono” 41416 galaktyk z min. 500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





$z=1.38$





Formowanie się struktur

- 1 w zagęszczenia ciemnej materii wpływa materia barionowa
- 2 tworzą się pierwsze supermasywne gwiazdy oraz czarne dziury
- 3 gwiazdy i kwazary dokonują stopniowej rejonizacji wodoru
- 4 centralne czarne dziury i supernowe generują przepływy materii silnie wpływające na dalszą ewolucję materii
- 5 największe skupiska materii tworzą załączki gromad galaktyk, obszary o gęstości niższej niż średnia tworzą pustki (ang. voids)
- 6 galaktyki tworzą się poprzez łączenie mniejszych
 - o złączenia (ang. mergers) porównywalnych fragmentów, prowadzące do powstania supermasywnej czarnej dziury i aktywnego jądra galaktyki (AGN, **A**ctive **G**alactic **N**uclei, np: kwazara) powodują zniszczenie struktury, usunięcie gazu i uformowanie galaktyki eliptycznej
 - o dołączanie do galaktyki licznych, ale mniejszych „halo” prowadzi do powstania galaktyki spiralnej lub soczewkowatej

Co pominięto?

- promieniowanie kosmiczne
- ośrodek międzygwiazdowy z polami magnetycznymi
- nukleosynteza
- czarne dziury Kerra i dyski akrecyjne
- dżety
- ...

Chcesz wiedzieć więcej?



Seminarium ZTWiA, każda środa 10:15, D-2-02