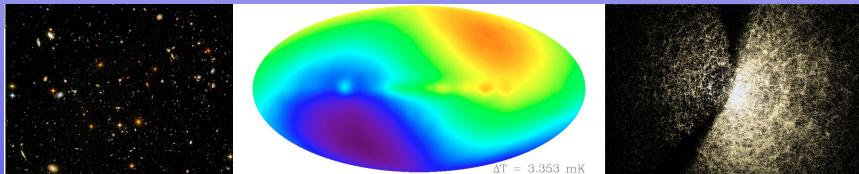


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

14 czerwca 2016



Historia Wszechświata

Pierwszy okres ewolucji Wszechświata

	Proces	czas	kT	ρ [kg/m ³]
0.	Wielki Wybuch (Big Bang)	0	∞	∞
1.	(????) skala Plancka	10^{-43} s	10^{16} TeV	10^{96}
2.	(???) łamanie GUT	10^{-36} s	10^{14} TeV	10^{80}
3.	(??) inflacja	?	?	?
4.	(?) bariogeneza			
	LHC	10^{-14} s	13 TeV	10^{37}
5.	złamanie symetrii elektrosłabej	10^{-12} s	1 TeV	10^{32}
6.	uwięzienie kwarków	10^{-4} s	100 MeV	10^{16}
7.	powstanie neutrin reliktowych	1 s	1 MeV	10^9
8.	nukleosynteza	„3 minuty”	0.2 MeV	10^4
9.	koniec ery promieniowania	50000 lat		10^{-16}
10.	oddzielenie fotonowego promieniowania tła (rekombinacja)	300000 lat	0.45 eV	10^{-17}
	wieki ciemne			

- Klasyczne (w odróżnieniu od kwantowych!) 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,
 - niejednorodnościznikają (są równe zero).

Era „kwantowej grawitacji”

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

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

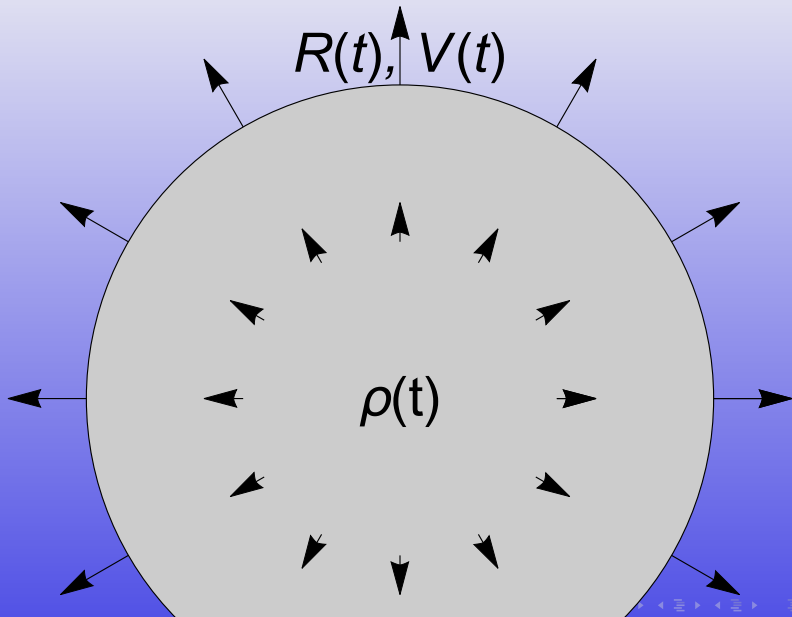
$$\rho_{Pl} = \frac{c^5}{hG^2} = 10^{96} \text{ kg/m}^3, \quad R_{Pl} = \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = 4 \times 10^{-35} \text{ m}$$

2. Era „wielkiej unifikacji”

Od lat spekuluje się na temat istnienia teorii wielkiej unifikacji obejmującej:

- oddziaływania silne (QCD czyli chromodynamikę kwantową)
- oddziaływania elektrosłabe (model Weinberga-Salama)

„Kosmologia” newtonowska



- 1 model opisuje rozszerzającą się „kulę” materii (ang: *fireball*)
- 2 w każdym punkcie gęstość jest taka sama, ale zależy od czasu

$$\rho = \rho(t)$$

- 3 w ustalonym momencie w każdym punkcie prędkość jest proporcjonalna do odległości; współczynnik proporcjonalności to **stała Hubble'a** $H(t)$:

$$\vec{v}(\vec{R}, t) = H(t)\vec{R}$$

- 4 materia podlega samograwitacji
- 5 masa „kuli ognia” jest stała

Dla rozszerzającej się kuli możemy zapisać równania

- 1 równanie Newtona:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g}_t$$

- 2 zasada zachowania energii
- 3 zasada zachowania masy

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

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

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

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

Użyteczne tożsamości:

$$H = \frac{\dot{a}}{a}, \quad \frac{dH}{dt} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a}$$

Kosmologia
newtonowska

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

$$H^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{kc^2}{a^2}$$

$$\frac{d\rho(t)}{dt} + 3H\rho = 0$$

Kosmologia OTW

$$\frac{dH}{dt} + H^2 + \frac{4}{3}\pi G \left(\rho + \frac{3P}{c^2} \right) - \frac{\Lambda c^2}{3} = 0$$

$$H^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{\Lambda c^2}{3} = -\frac{kc^2}{a^2}$$

$$\frac{d\rho(t)}{dt} + 3H(\rho + P/c^2) = 0$$

3. Wszechświat inflacyjny

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:

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

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!

Identyczne formuły opisują nasz Wszechświat w odległej przyszłości!

4. Brak antymaterii: bariogeneza

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

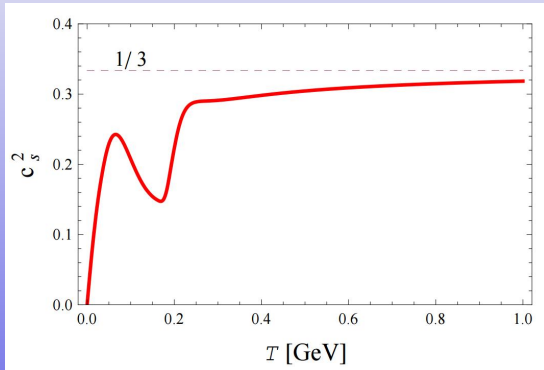
$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} = 6 \times 10^{-10}$$

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

Kryteria Sacharowa

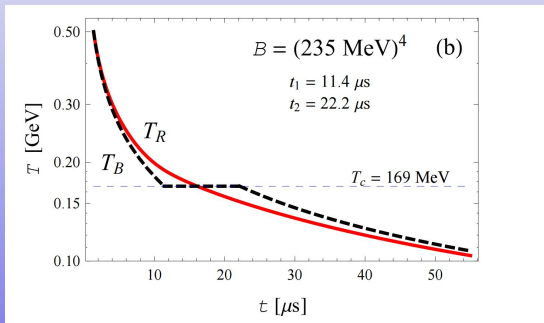
- 1 brak zachowania liczby barionowej B
- 2 łamanie parzystości ładunkowej C oraz parzystości kombinowanej CP
- 3 brak równowagi termodynamicznej

6. Rekombinacja plazmy kwarkowo-gluonowej



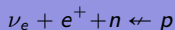
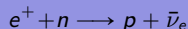
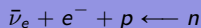
Źródło: Wojciech Florkowski, The realistic QCD equation of state in relativistic heavy-ion collisions and the early Universe, Nuclear Physics A Volume 853, Issue 1, 1 March 2011, Pages 173-188

6. Rekombinacja plazmy kwarkowo-gluonowej



Źródło: Wojciech Florkowski, The realistic QCD equation of state in relativistic heavy-ion collisions and the early Universe, Nuclear Physics A Volume 853, Issue 1, 1 March 2011, Pages 173-188

Proces URCA z udziałem nukleonów



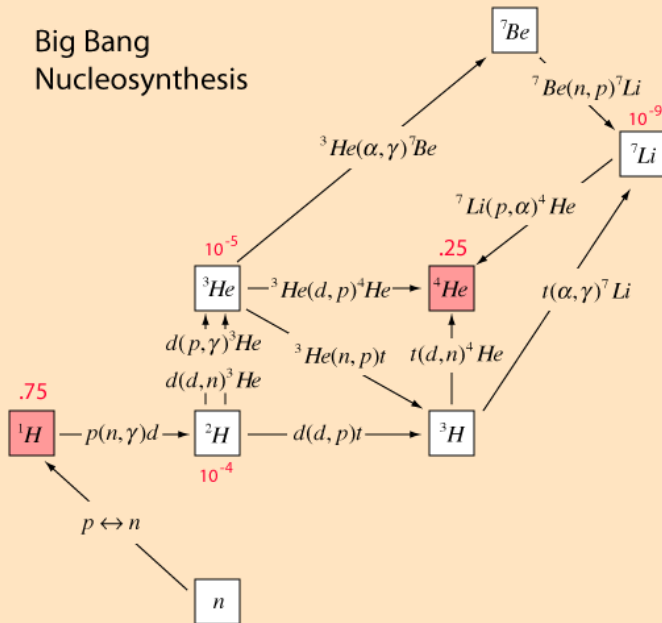
Różnica masy $\Delta Q = 1.3 \text{ MeV}$ (neutron jest cięższy!) W momencie gdy tempo ekspansji Wszechświata staje się większe niż tempo reakcji z udziałem neutrin, stosunek ilości protonów zostaje „zamrożony” na wartości:

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\Delta Q/kT}.$$

Od momentu gdy neutrina przestają być w równowadze z nukleonami, poruszają się swobodnie tworząc hipotetyczne *neutrinowe promieniowanie tła*. Stosunek neutronów do protonów stanowi warunki początkowe dla kolejnego etapu: kosmologicznej nukleosyntezy.

8. Nukleosynteza kosmologiczna

Big Bang Nucleosynthesis



9. Koniec Wszechświata radiacyjnego

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

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

Czas t można przeliczyć na temperaturę (lub kT) ze wzoru $\rho c^2 = N(T)aT^4$ (gdzie $a = 4\sigma/c$):

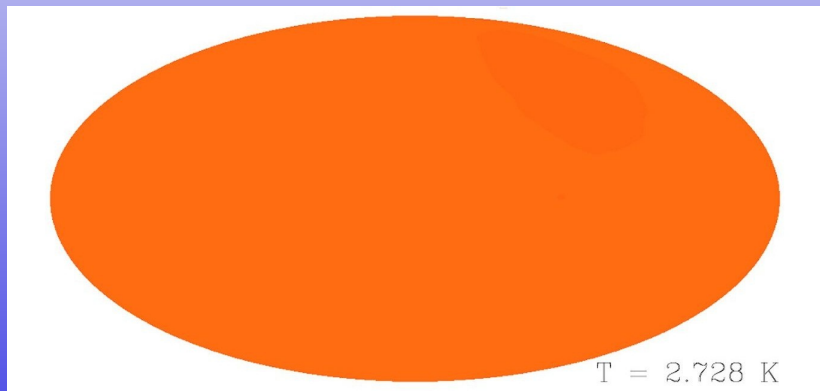
$$t = \frac{1}{8T^2} \sqrt{\frac{3c^3}{2\pi G\sigma N(T)}}, \quad N(T) = \sum_i \frac{7}{8} N_{Fermion} + N_{Boson}$$

Gęstość energii „promieniowania” maleje jak $\frac{1}{a^4}$ (spada zarówno gęstość cząstek jak $1/a^3$ jak ich energia jak $1/a$), co w sposób nieunikniony doprowadza do sytuacji, w której gęstość energii spoczynkowej cząstek „wygrywa”.

10. Mikrofalowe promieniowanie tła

Obniżająca się temperatura doprowadza w końcu do rekombinacji protonów i elektronów w neutralne atomy wodoru: $p^+ + e^- \rightarrow H$. Od tego momentu fotony poruszają się bez przeszkód: oddziela się kosmologiczne promieniowanie tła.

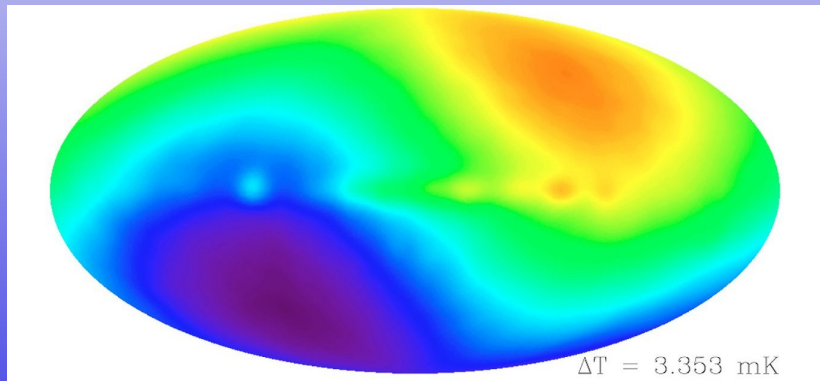
- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol, $v = 600$ km/s)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



10. Mikrofalowe promieniowanie tła

Obniżająca się temperatura doprowadza w końcu do rekombinacji protonów i elektronów w neutralne atomy wodoru: $p^+ + e^- \rightarrow H$. Od tego momentu fotony poruszają się bez przeszkód: oddziela się kosmologiczne promieniowanie tła.

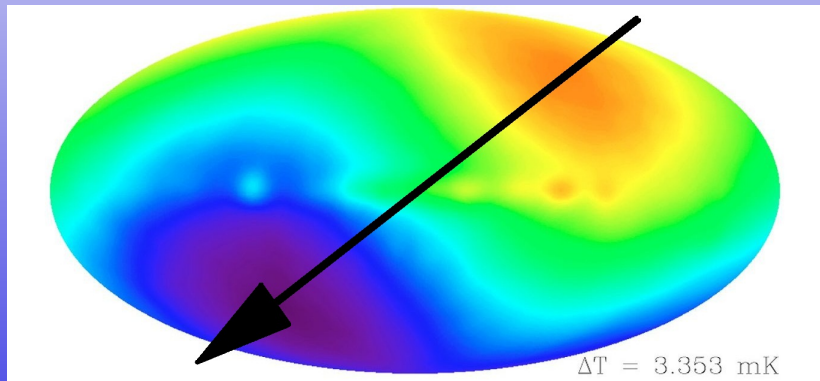
- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol, $v = 600$ km/s)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



10. Mikrofalowe promieniowanie tła

Obniżająca się temperatura doprowadza w końcu do rekombinacji protonów i elektronów w neutralne atomy wodoru: $p^+ + e^- \rightarrow H$. Od tego momentu fotony poruszają się bez przeszkód: oddziela się kosmologiczne promieniowanie tła.

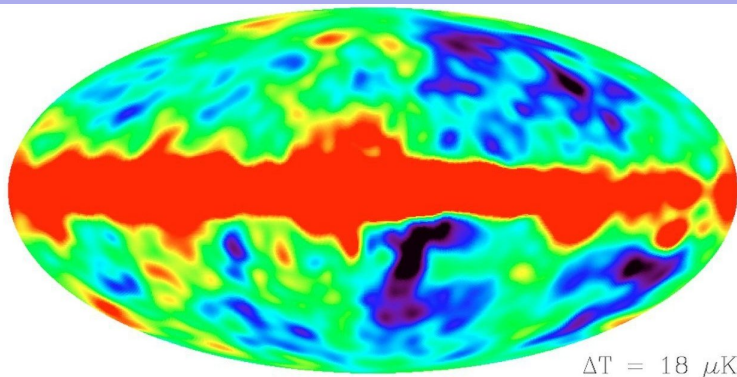
- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol, $v = 600$ km/s)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



10. Mikrofalowe promieniowanie tła

Obniżająca się temperatura doprowadza w końcu do rekombinacji protonów i elektronów w neutralne atomy wodoru: $p^+ + e^- \rightarrow H$. Od tego momentu fotony poruszają się bez przeszkód: oddziela się kosmologiczne promieniowanie tła.

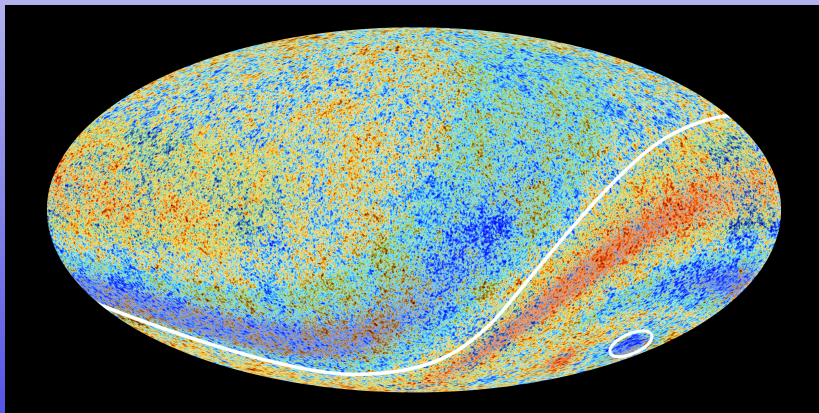
- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol, $v = 600$ km/s)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



10. Mikrofalowe promieniowanie tła

Obniżająca się temperatura doprowadza w końcu do rekombinacji protonów i elektronów w neutralne atomy wodoru: $p^+ + e^- \rightarrow H$. Od tego momentu fotony poruszają się bez przeszkód: oddziela się kosmologiczne promieniowanie tła.

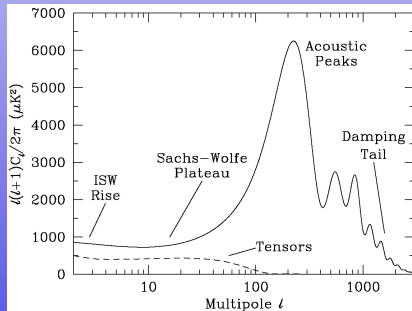
- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol, $v = 600$ km/s)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu



10. Mikrofalowe promieniowanie tła

Obniżająca się temperatura doprowadza w końcu do rekombinacji protonów i elektronów w neutralne atomy wodoru: $p^+ + e^- \rightarrow H$. Od tego momentu fotony poruszają się bez przeszkód: oddziela się kosmologiczne promieniowanie tła.

- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol, $v = 600$ km/s)
- 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 . Czynnikiem skali a i temperatura CMB wiąże się z następująco

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

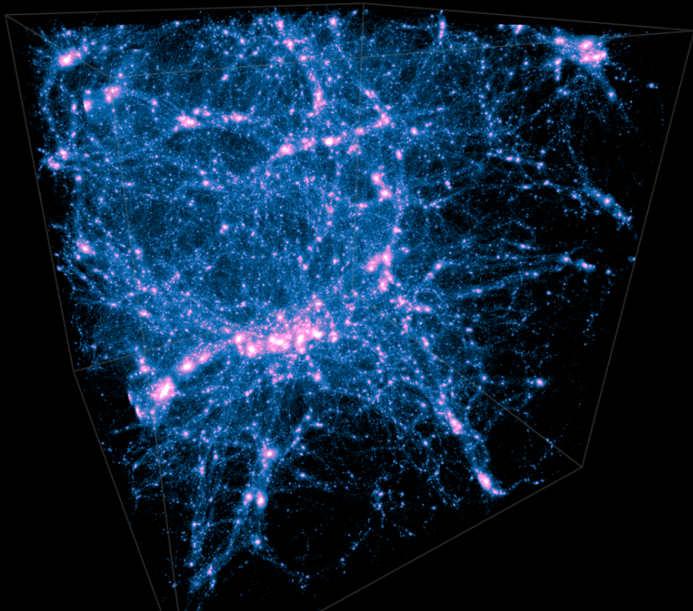
Przykłady: Wielki Wybuch $z = \infty$; koniec dominacji promieniowania $z = 3600$; rekombinacja/powstanie CMB $z = 1000$; całkowita rejonizacja $z = 6$, obecnie $z = 0$.

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.

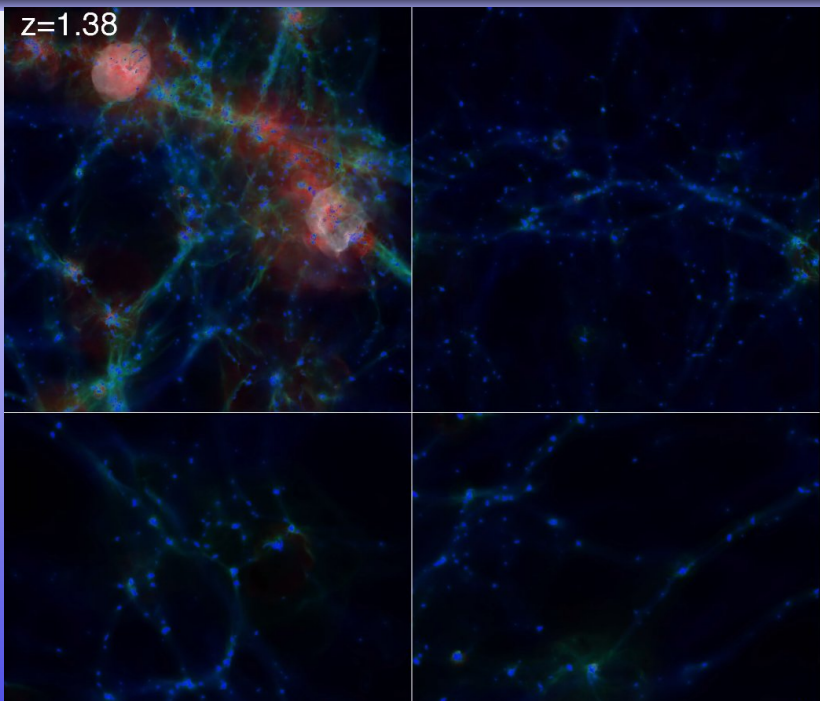
Najbardziej ambitny projekt symulowanej ewolucji Wszechświata.

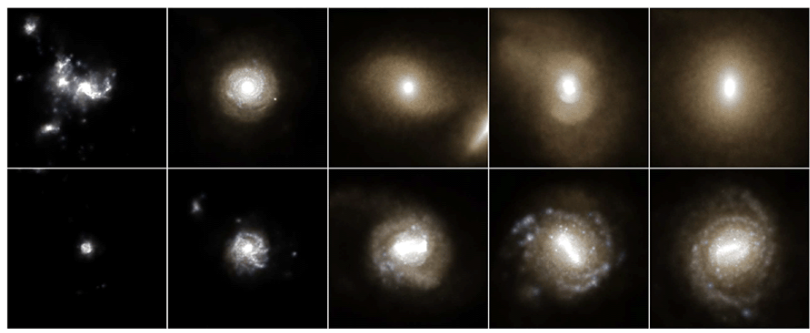
- $1820^3 \simeq 6 \times 10^9$ „cząstek” ciemnej materii
- masa „cząstki” ciemnej materii $6.26 \times 10^6 M_{\odot}$
- masa „cząstki” materii barionowej $1.26 \times 10^6 M_{\odot}$
- rozdzielczość 48 pc
- zmiękczenie siły newtonowskiej $\varepsilon = 710$ pc
- „wytworzono” 41416 galaktyk z min. 500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





$z=1.38$





- 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

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”

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

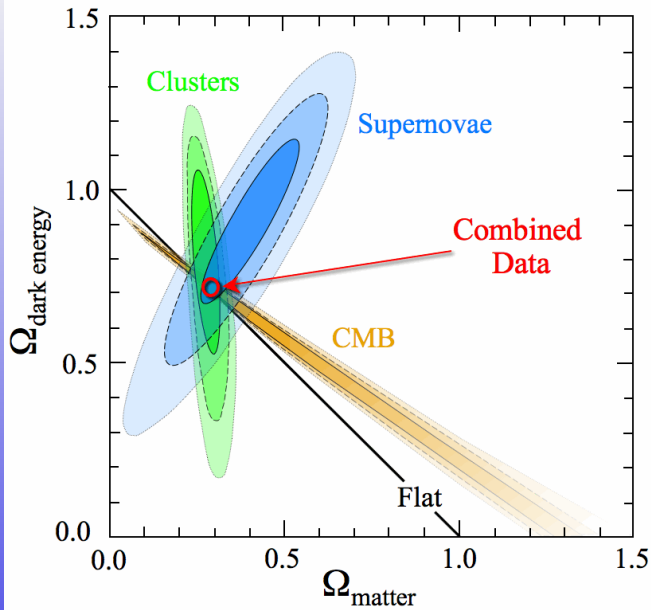
$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2 / (8\pi G)}{\rho_c} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

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*.



- 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)

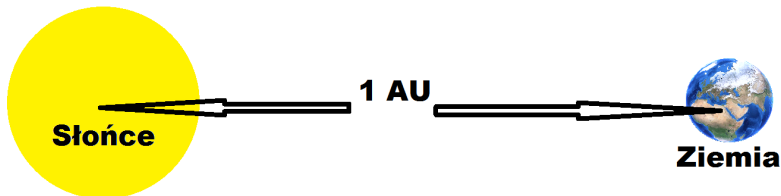
$$\Omega_\Lambda = 0.7, \quad \Lambda = 1.11 \times 10^{-52} \frac{1}{\text{m}^2}, \quad \rho_\Lambda = 6 \times 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- zimna ciemna materia Ω_m i materia barionowa Ω_B

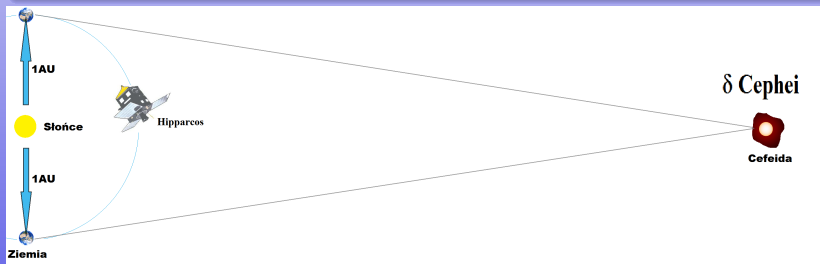
$$\Omega_m = 0.25, \quad \Omega_B = 0.05$$

- promieniowanie („lekkie” neutrino, fotony)

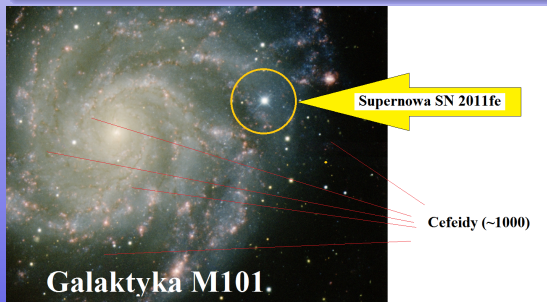
- **1 AU**: rozmiar orbity Ziemskiej (jednostka astronomiczna)
- paralaksa heliocentryczna, m. in. odległość do δ – *Cephei*
- Cefeidy: zależność okres-jasność: bliskie galaktyki
- supernowe typu Ia: odległe galaktyki



- 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



- 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



Odległa galaktyka

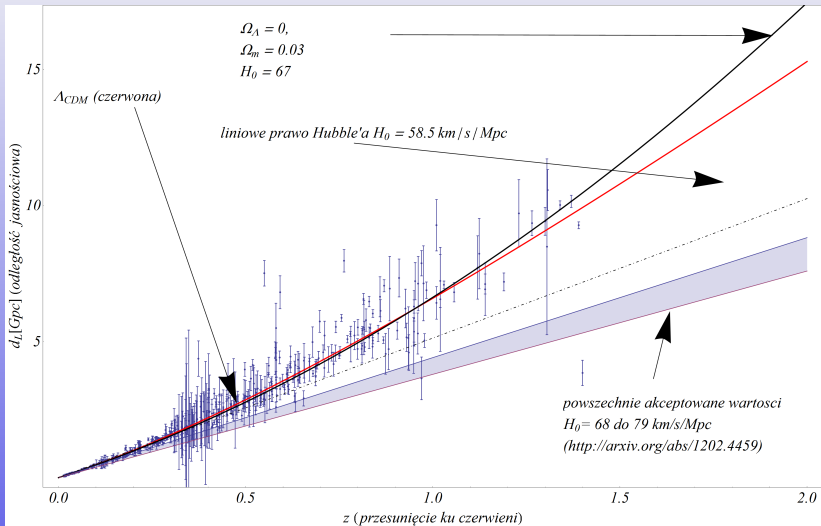
- 1 AU: rozmiar orbity Ziemskiej (jednostka astronomiczna)
- paralaksa heliocentryczna, m. in. odległość do δ – *Cephei*
- Cefeidy: zależność okres-jasność: bliskie galaktyki
- supernowe typu Ia: odległe galaktyki



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

- odległość jasnościowa d_L
- odległość rozmiarów kątowych d_A

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



Obiekty zbudowane z milionów ciał: gromady kuliste, galaktyki

Gromady kuliste gwiazd

Sztandarowym przykładem astrofizycznego obiektu zbudowanego z $N \sim 10^4 \dots 10^6$ gwiazd jest gromada kulista gwiazd.



Pouczające jest porównanie energii wiązania grawitacyjnego:

- „gromady kulistej” ($M \simeq 10^5 M_{\odot}$, $R \simeq 10$ pc)

$$E_g \sim \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} \simeq 5 \times 10^{42} \text{ J}$$

- układu podwójnego pary białych karłów o masie $M = 1.44 M_{\odot}$ w odległości Ziemia-Księżyc $R \simeq 384400$ km

$$E_g \sim \frac{GM^2}{R} \simeq 1.5 \times 10^{42} \text{ J}$$

Wystarczy kilka bliskich spotkań zwartych 3 ciał, aby wprowadzić do układu energię kinetyczną wystarczającą do odparowania całej gromady!

Model sferycznej gromady kulistej o gęstości

$$\rho(r) = \rho_C \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{a^2}}^5}, \quad \rho_C = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi a^3}$$

odpowiadającej funkcji Lane-Emdena z $n = 5$ $w_5(z) = 1/\sqrt{1 + z^2/3}$.
Rozkład prawdopodobieństwa znalezienia w położeniu \vec{r} jednej z identycznych gwiazd o masie m i prędkości \vec{v} ma postać:

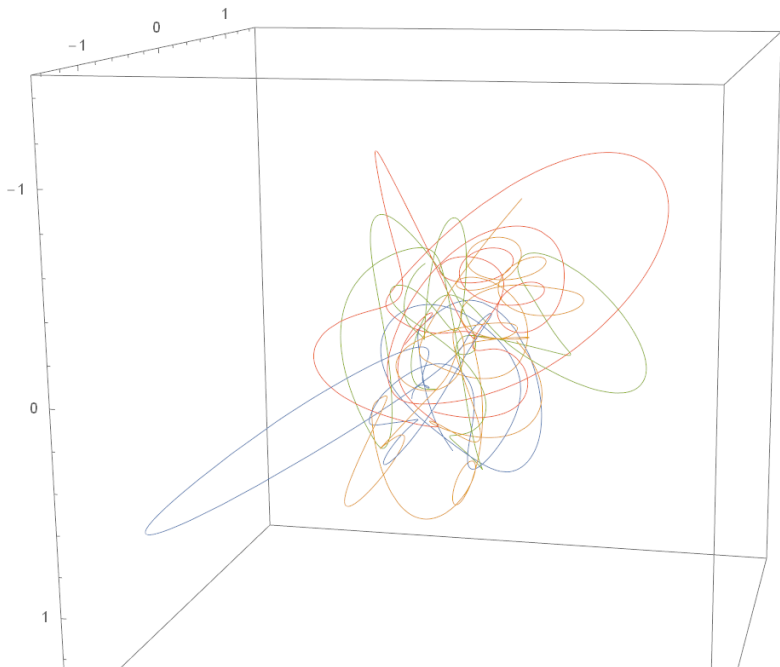
$$f(\vec{r}, \vec{v}) d^3\vec{r} d^3\vec{v} = f(E) 4\pi r^2 dr 4\pi v^2 dv, \quad E = E(r, v)$$

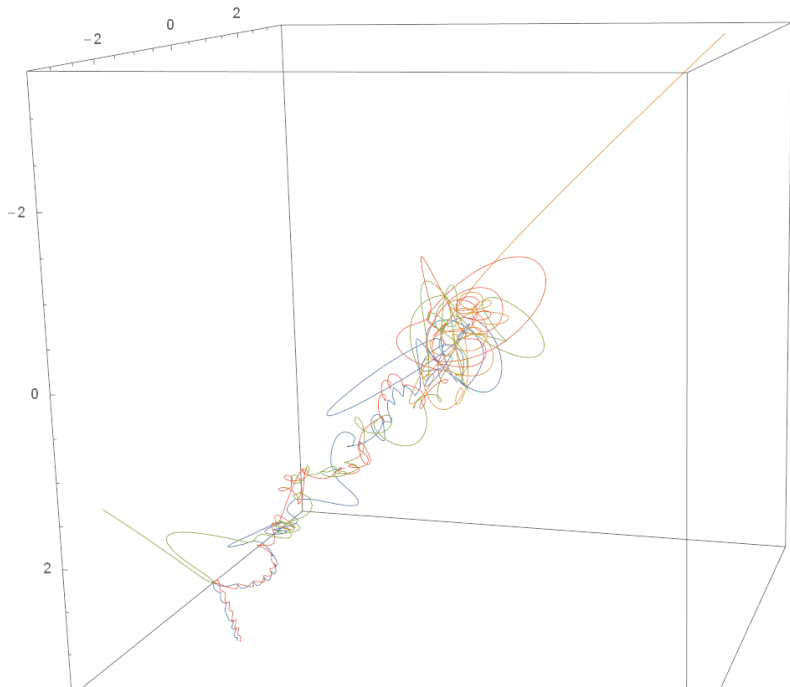
$$f(E) = \frac{24\sqrt{2}}{7\pi^3} \frac{a^2}{G^5 M^4} (-E/m)^{7/2}$$

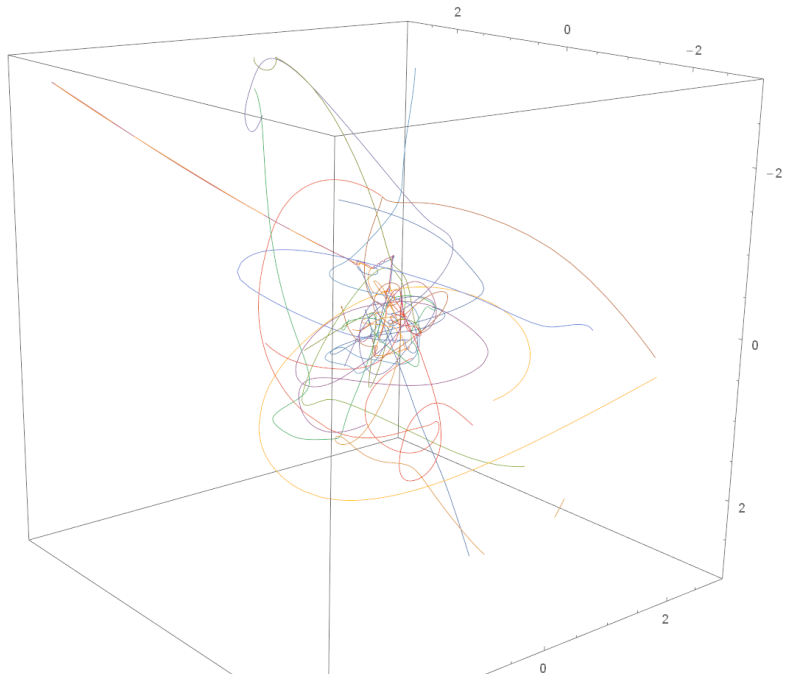
- 1 dysponując rozkładem gęstości i rozkładem prawdopodobieństwa w przestrzeni fazowej możemy wylosować warunki początkowe odpowiadające sferze Plummera
- 2 korygujemy współrzędne środka masy i całkowity pęd, tak aby wynosiły zero
- 3 skalujemy współrzędne i prędkość tak, aby dokładnie było spełnione twierdzenie wirialne $2E_{kin} = |E_{pot}|$
- 4 uruchamiamy symulację N-body i obserwujemy

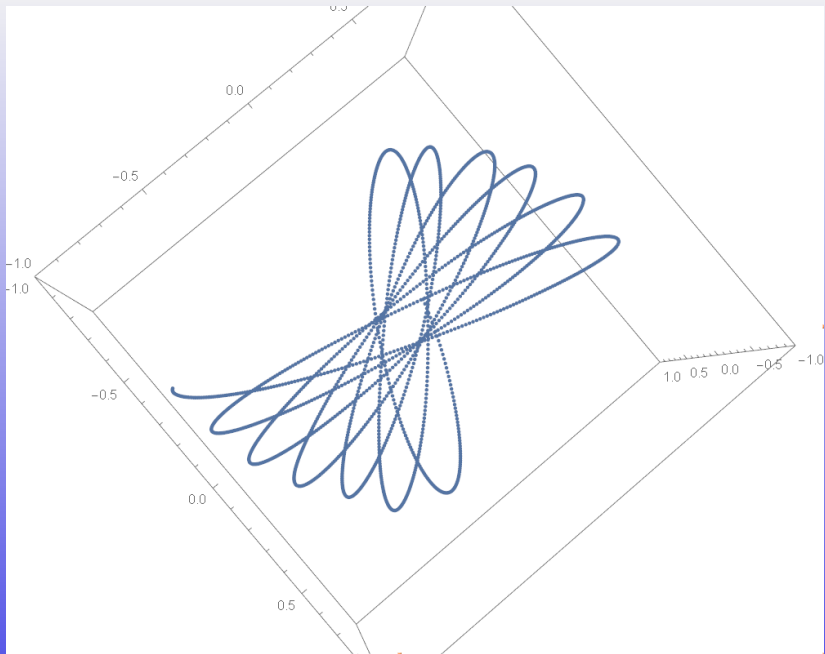
Najważniejsze zaobserwowane zjawiska to:

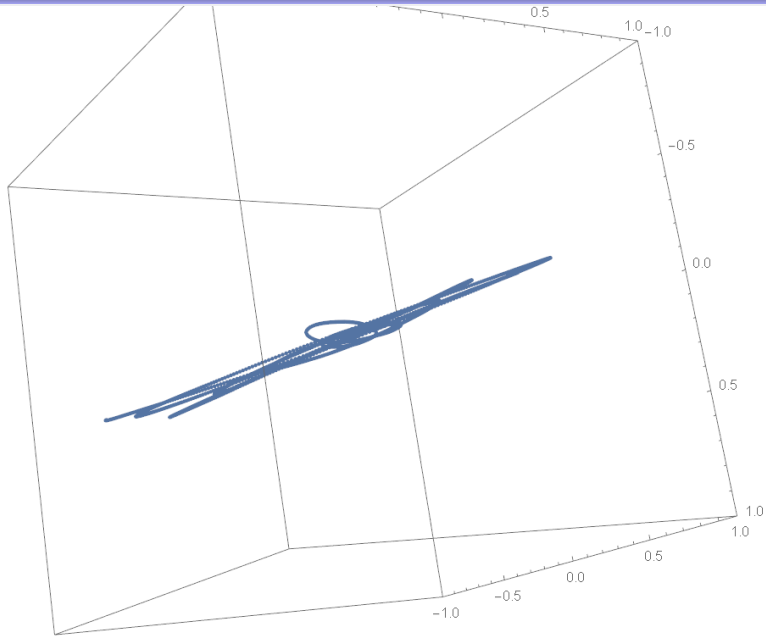
- dla $N \rightarrow \infty$ prawdopodobieństwo oddziaływania spada do zera, pojedyncza cząstka porusza się w uśrednionym polu pozostałych
- **parowanie**: oddziaływania trójciałowe wytwarzają cząstki o prędkościach przekraczających prędkość ucieczki v_{II}
- **segregacja masy**: gwiazdy cięższe/gęstsze dyfundują do centrum
- **kolaps jądra** (ang. core-collapse): w centrum $\rho \rightarrow \infty$ (nie wiadomo czy w tym procesie powstaje czarna dziura, tzw. IMBH)
- zacieśniające się układy podwójne są źródłem energii „termicznej” dla całej gromady, co powoduje zatrzymanie kolapsu i tzw. oscylacje grawitotermiczne
- opór dynamiczny („falowy”)











Z powodów praktycznych (dzielenie przez zero) jak i fizycznych (skończone rozmiary gwiazd) w symulacjach N-ciałowych stosuje się powszechnie „zmiękczenie” siły newtonowskiej:

$$\vec{F} = -\frac{Gm_1m_2}{\sqrt{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2}^3}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \rightarrow \vec{F} = -\frac{Gm_1m_2}{\sqrt{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2 + \epsilon^2}^3}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$$

Parametr ϵ ma sens najmniejszej dopuszczalnej odległości pomiędzy gwiazdami. W realistycznych symulacjach musimy wziąć pod uwagę nie tylko rozmiary, ale także ewolucję gwiazd oraz ich nieuniknione zderzenia.

Budowa i cechy galaktyk

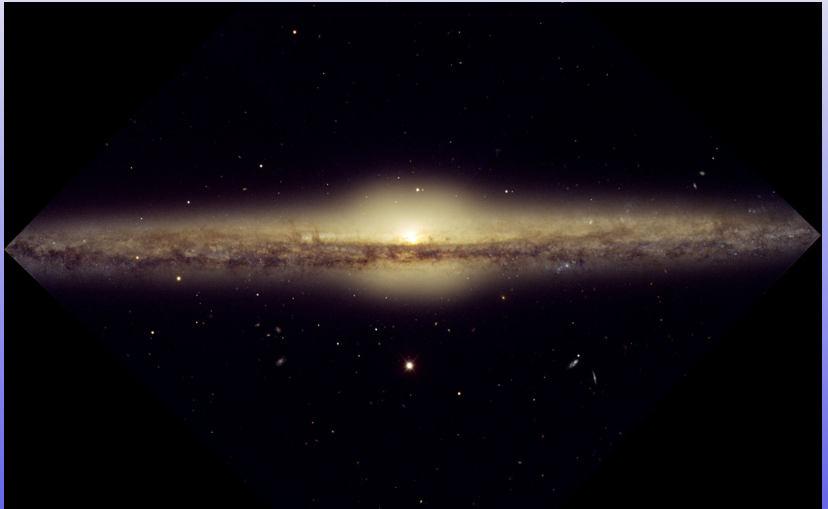
Galaktyka

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

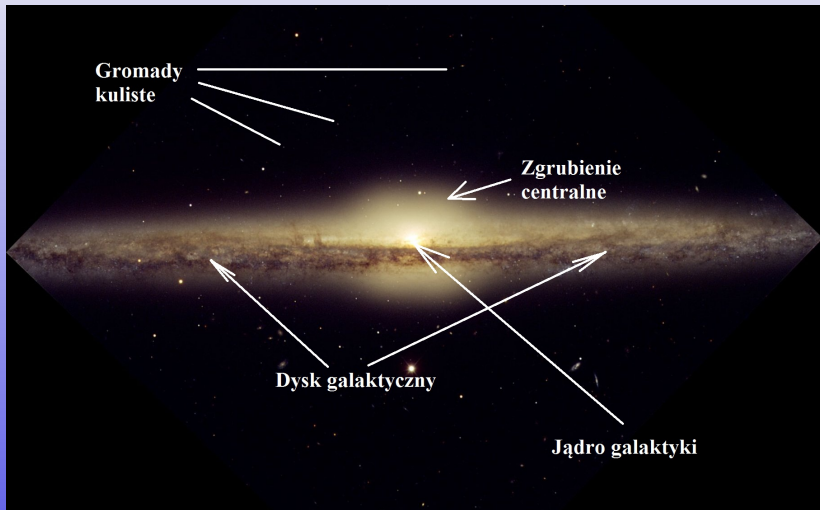
- płaskiego jak płyta CD dysku
- ramion spiralnych z poprzeczką
- jądra zawierającego czarną dziurę o masie 4 milionów mas Słońca
- sferycznego halo bardzo starych gwiazd
- około 150 gromad kulistych

Galaktyka obraca się raz na 250 milionów lat.

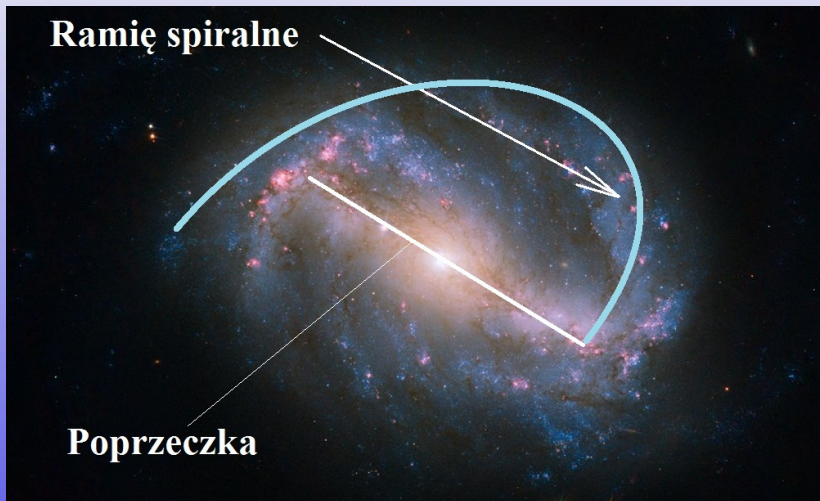
Z oczywistych powodów nie można pokazać zdjęcia naszej Galaktyki (Drogi Mlecznej)! Ale są miliardy innych ...



Typowe galaktyki spiralne







Pierścień Saturna vs dysk Galaktyki

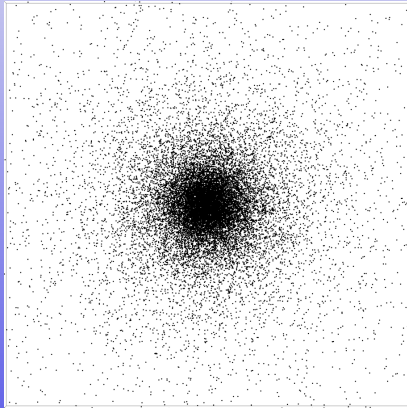


- pierścień: punkty materialne poruszają się w dominującym potencjale Saturna
- dysk galaktyczny: punkty materialne poruszają się w średnim potencjale dysku

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:

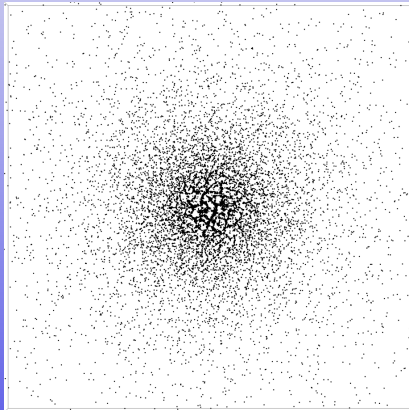
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



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:

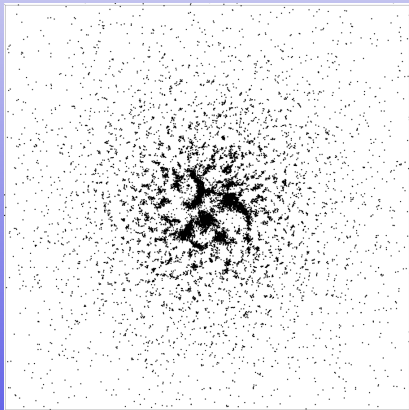
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



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:

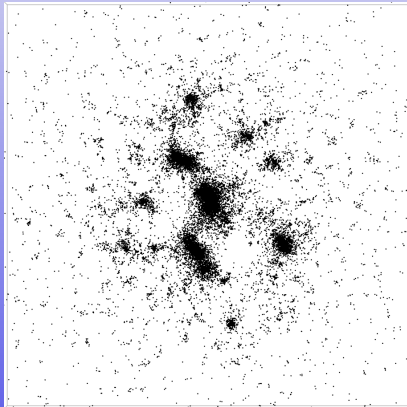
- duża dyspersja prędkości („ciśnienie”) w dysku
- ruch w potencjale sferycznego halo *ciemnej materii*



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*

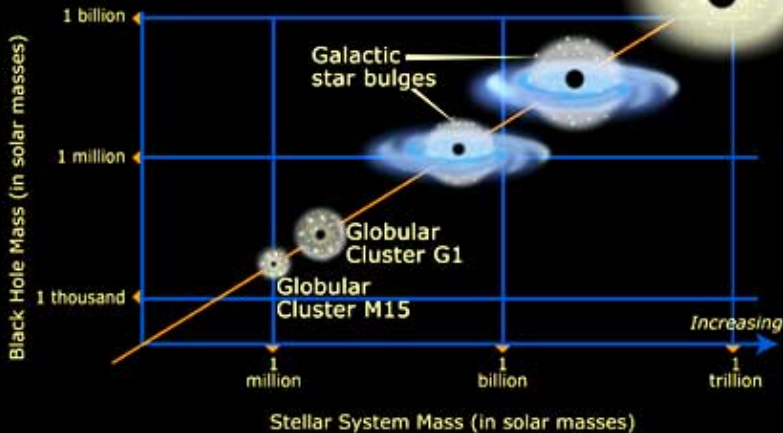


Co powstało ostatecznie w wyniku niestabilności dysku? Elipsoidalna struktura wypełniona chaotycznie poruszającymi się gwiazdami, podobnie jak w gromadzie kulistej.

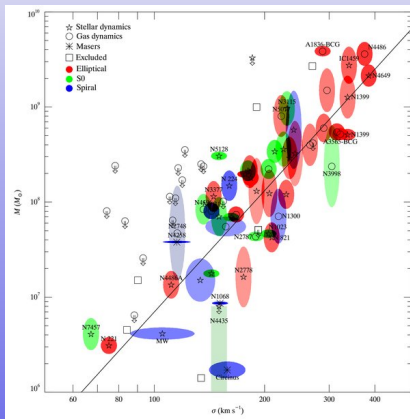
- chaotycznie poruszające się gwiazdy, głównie stare
- brak obłoków gazu i pyłu międzygwiazdowego
- supermasywna ($10^8 \dots 10^{10} M_{\odot}$) czarna dziura w centrum

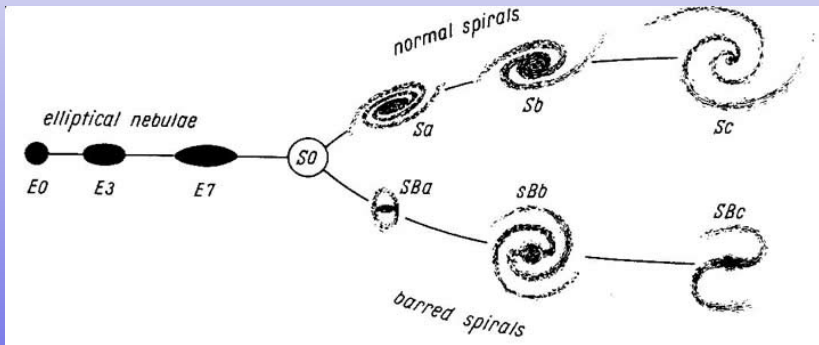


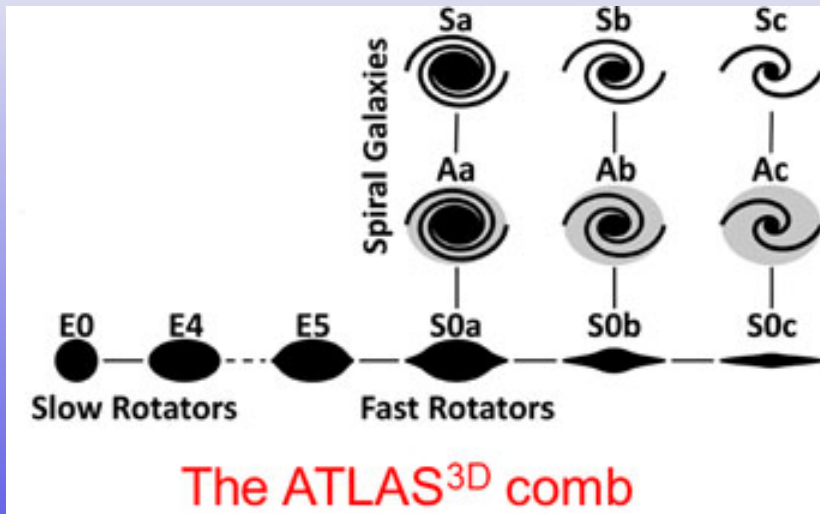
Correlating Black Hole Mass to Stellar System Mass



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







The ATLAS^{3D} comb

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



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