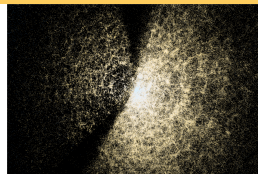
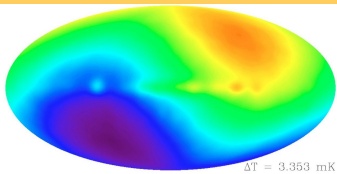


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

6 marca 2018



Historia Wszechświata

Na początku był Wielki Wybuch (ang. Big Bang) ...

Skąd wiemy, że nastąpił Wielki Wybuch?

Podstawą są następujące fakty obserwacyjne:

- 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 własności obserwowanego Wszechświata nie zależą od kierunku obserwacji
- 5 paradoks Olbersa

Do tego należy dodać założenia:

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

oraz brak matematycznie stabilnych, statycznych rozwiązań.

	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 elektroslabej	10^{-12} s	1 TeV	10^{32}
6.	uwięzienie kwarków	10^{-4} s	100 MeV	10^{16}
7.	neutrino reliktowe	1 s	1 MeV	10^9
8.	nukleosynteza	„3 minuty”	0.2 MeV	10^4
9.	koniec ery promieniowania	50000 lat		10^{-16}
10.	fotonowe promieniowanie tła (rekombinacja)	300000 lat	0.45 eV	10^{-17}
	wieki ciemne			

0. Wielki wybuch

- Klasyczne (w odróżnieniu od kwantowych!) modele kosmologiczne przewidują **osobliwość** dla $t = 0$, czyli stan w którym:
 - gęstość,
 - temperatura,
 - krzywizna przestrzeni,
 - stała Hubble'a ...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).

1. Era Plancka

Era „kwantowej grawitacji”

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

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

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

Długość Plancka a stała kosmologiczna

- 1 Stała kosmologiczna $\Lambda \simeq 2 \times 10^{-52} \frac{1}{\text{m}^2}$.
- 2 Λ wyznacza pewną skalę odległości $d_\Lambda = \frac{1}{\sqrt{\Lambda}} \simeq 10^{26}$ m (około 10 mld lat świetlnych, rzędu „rozmiaru” Wszechświata)

3

$$\frac{d_\Lambda}{d_{\text{Planck}}} \simeq 2 \times 10^{60}$$

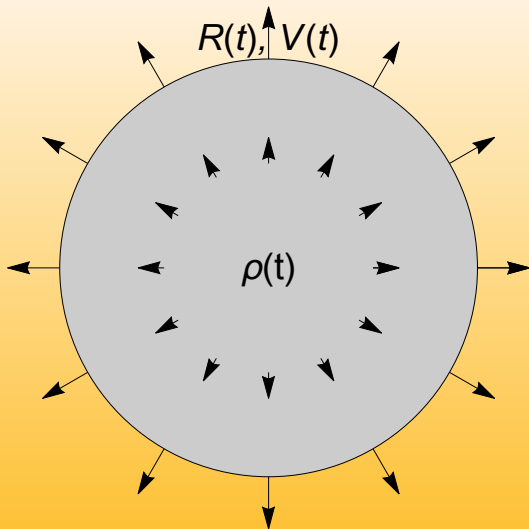
2. Era „wielkiej unifikacji”

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

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

Na dzień dzisiejszy nie ma przekonujących dowodów podważających Model Standardowy oddziaływań elementarnych.

„Kosmologia” newtonowska



Założenia modelu newtonowskiego

- 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

Czy stała Hubble'a nie jest stała?

- Stała Hubble'a jako stała fizyczna H_0 określa **obecne** tempo rozszerzania się Wszechświata
- stała Hubble'a jako współczynnik proporcjonalności $H(t)$ zmienia się podczas ewolucji Wszechświata
- jej zmiana jest niemierzalnie mała w skali czasowej cywilizacji ludzkiej przy obecnej dokładności pomiarów

Wyznaczenie wartości liczbowej stałej Hubble'a jest odwiecznym i nadal nierozwiązanym problemem kosmologii. Na dzień dzisiejszy opublikowano dwa precyzyjne i wzajemnie sprzeczne wyniki:

$$H_0 = 67.6 \pm 0.6(\text{km/s})/\text{Mpc}, \quad H_0 = 73.5 \pm 1.7(\text{km/s})/\text{Mpc}.$$

Dla rozszerzającej się kuli możemy zapisać równania

- 1 równanie Newtona:

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

- 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

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

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

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

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:

$$\begin{cases} H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 & = \frac{\Lambda c^2}{3} \\ \frac{\ddot{a}}{a} & = \frac{\Lambda c^2}{3} \end{cases}$$

$$H(t) = H_\infty = c\sqrt{\frac{\Lambda}{3}},$$

$$\ddot{a} - H_\infty^2 a = 0 \quad \rightarrow \quad a(t) \propto e^{H_\infty t} = e^{\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} ct}$$

3. Wszechświat inflacyjny

Wykładniczy wzrost powoduje:

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

Pole skalarne musi zniknąć zaraz po zakończeniu inflacji !

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

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

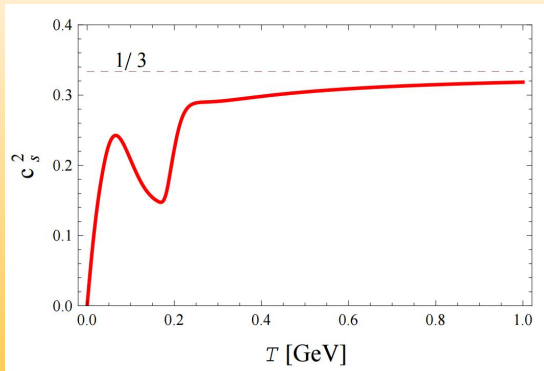
wskazuje na niemal 100% anihilację. Teoria bariogenezy musi wyjaśnić, dlaczego nie doszło do całkowitej anihilacji.

Kryteria Sacharowa

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

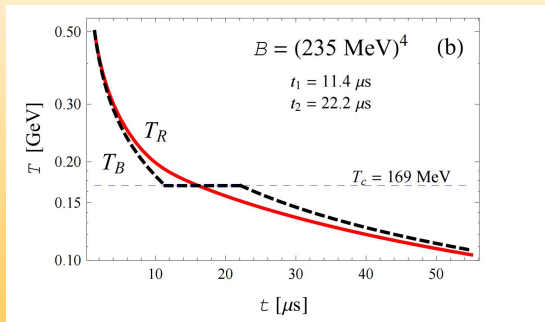
Nikt nie zauważy...

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

7. Odsprężenie neutrin

Proces URCA z udziałem nukleonów

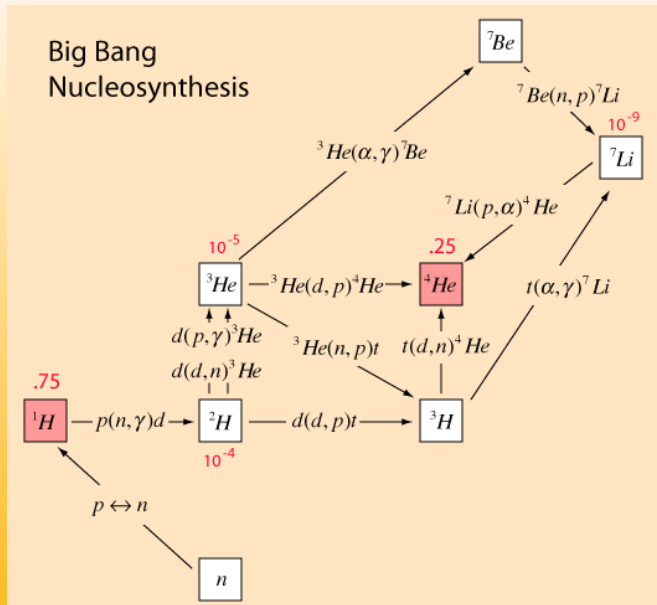


Różnica masy $\Delta Q = 1.3 \text{ MeV}$ (neutron jest cięższy!) W momencie gdy tempo ekspansji Wszechświata staje się większe niż tempo reakcji z udziałem neutrin, stosunek ilości protonów zostaje „zamrożony” na wartości:

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

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



Chcesz wiedzieć więcej?



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