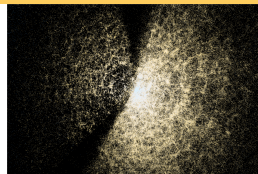
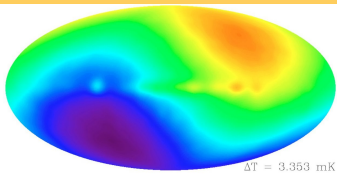


Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

13 marca 2018



Początkowo można założyć, że:

- **stała kosmologiczna** jest zaniedbywalna (w 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** (ang. Equation Of State, EOS), czyli funkcja wyliczająca ciśnienie P jako funkcję gęstości ρ , jest identyczna jak dla gazu fotonowego:

$$P = \varepsilon/3 \equiv \frac{\rho c^2}{3}$$

- początkowo geometria jest nieodróżnialna od płaskiej ($k = 0$)

Równania Friedmanna (wersja OTW):

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

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

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + P/c^2) = 0$$

po podstawieniu $\Lambda = 0, k = 0, P = \rho c^2/3$ redukują się do:

$$\dot{H} + H^2 + \frac{8}{3}\pi G\rho = 0$$

$$H^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = 0$$

$$\dot{\rho} + 4H\rho = 0$$

Rowiązanie:

$$\rho(t) = \frac{3}{32\pi Gt^2}, \quad H(t) = \frac{1}{2t}, \quad a(t) \propto \sqrt{t}$$

Czas t lub/i gęstość ρ można przeliczyć na temperaturę (lub energię termiczną kT) ze wzoru:

$$\rho c^2 = \frac{1}{2} N(T) a T^4$$

gdzie $a = 4\sigma/c$, σ - stała Stefana-Boltzmana, a liczba wszystkich „cząstek elementarnych”

$$N(T) = \sum_i \frac{7}{8} N_{Fermion} + N_{Boson}$$

Tuż po Wielkim Wybuchu $N_{Fermion} = 90$, $N_{Boson} = 28$ czyli $N = 106.75$.

Skąd oni biorą te liczby?

$$\rho c^2 = \frac{4\pi}{h^3 c^3} \int_0^{\infty} \frac{E^3 dE}{e^{E/kT} \pm 1}$$

Lista „cząstek elementarnych”

Bozony (28)

- 1 $2 \times \gamma$ – foton (spin=1, masa=0, cząstka=antycząstka)
- 2 $6 \times W^\pm$ – (spin=1, masa>0)
- 3 $3 \times Z^0$ – (spin=1, masa>0, cząstka=antycząstka)
- 4 $16 \times g$ – gluony (spin=1, masa=0, 8 kolorów)
- 5 $1 \times H$ – bozon Higgsa (spin=0)

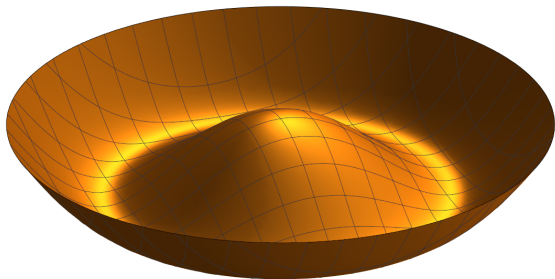
Fermiony (90)

• leptony

- 1 $12 \times e^\pm, \mu^\pm, \tau^\pm$ – (spin=1/2, masa>0)
- 2 $6 \times \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ – neutrina (spin=1/2, masa=0 ?)

• bariony

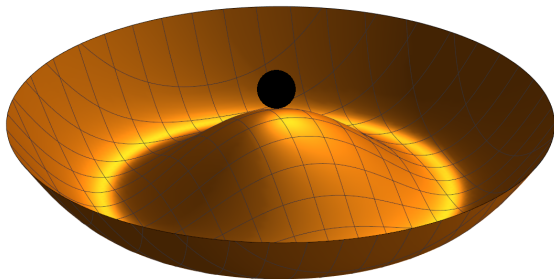
- 1 $72 \times u, d, s, c, b, t$ – kwarki (spin=1/2, masa>0, 3 kolory)



„Meksykański kapelusz”

Typowy potencjał pola skalarnego h w którym może dojść do **spontanicznego łamania symetrii**:

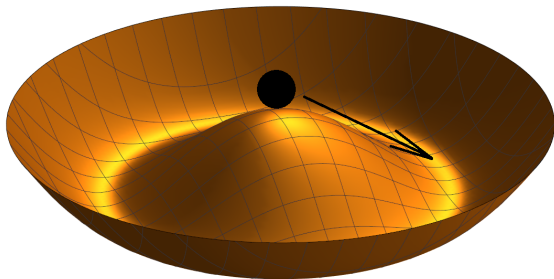
$$V \propto (h^2 - h_0^2)^2.$$



„Meksykański kapelusz”

Typowy potencjał pola skalarnego h w którym może dojść do **spontanicznego łamania symetrii**:

$$V \propto (h^2 - h_0^2)^2.$$



„Meksykański kapelusz”

Typowy potencjał pola skalarnego h w którym może dojść do **spontanicznego łamania symetrii**:

$$V \propto (h^2 - h_0^2)^2.$$

- 1 dla $kT > 100$ GeV wszystkie bozony elektroslabe były bezmasowe
- 2 potencjał pola Higgsa $V \propto (h^2 - h_0^2)^2$ jest symetryczny...
- 3 ...ale przejście do minimum kończy się w losowym punkcie
- 4 pochodzenie niektórych parametrów Modelu Standardowego jest czysto losowe
- 5 niezadowoleni z powyższej odpowiedzi szukają ratunku w:
 - teoriach wielkiej unifikacji i innych (supersymetria, struny)
 - **zasadzie antropicznej**
 - hipotezie „multiświata”

7. Odsprężenie neutrin

Proces URCA z udziałem nukleonów

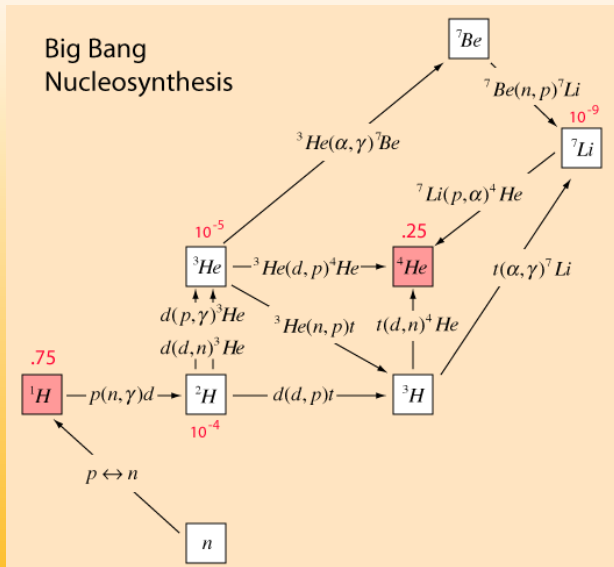


Różnica masy $\Delta Q = 1.3 \text{ MeV}$ (neutron jest cięższy!) W momencie gdy tempo ekspansji Wszechświata staje się większe niż tempo reakcji z udziałem neutrin, stosunek ilości protonów zostaje „zamrożony” na wartości:

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

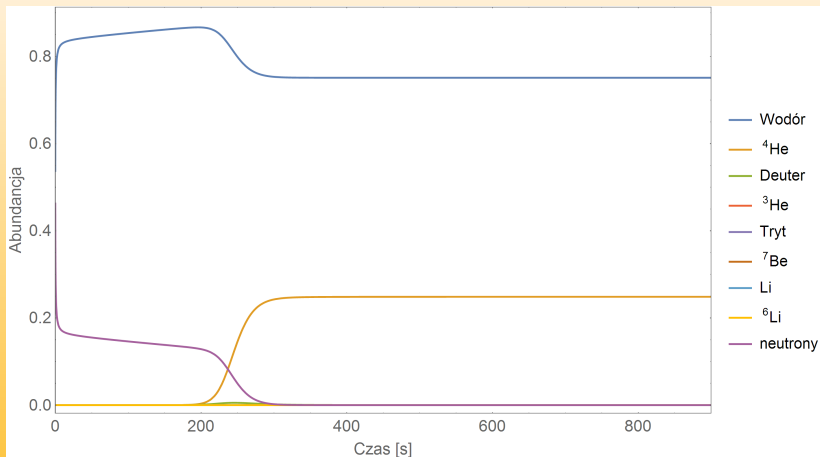
Od momentu gdy neutrina przestają być w równowadze z nukleonami, poruszają się swobodnie tworząc hipotetyczne *neutrinowe promieniowanie tła*. Stosunek neutronów do protonów stanowi warunki początkowe dla kolejnego etapu: *kosmologicznej nukleosyntezy*.

8. Nukleosynteza kosmologiczna



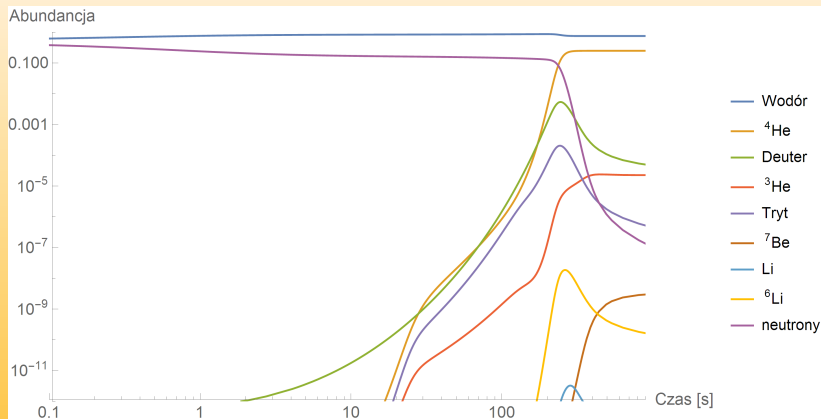
Źródło: http://cococubed.asu.edu/code_pages/net_bigbang.shtml

8. Nukleosynteza kosmologiczna



Źródło: http://cococubed.asu.edu/code_pages/net_bigbang.shtml

8. Nukleosynteza kosmologiczna



Źródło: http://cococubed.asu.edu/code_pages/net_bigbang.shtml

9. Koniec Wszechświata radiacyjnego

Wszechświat radiacyjny

$$P = \frac{\rho c^2}{3}$$

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} = -4H \equiv -4\frac{\dot{a}}{a}$$

$$\rho \propto \frac{1}{a^4}$$

Wszechświat pyłowy

$$P = 0$$

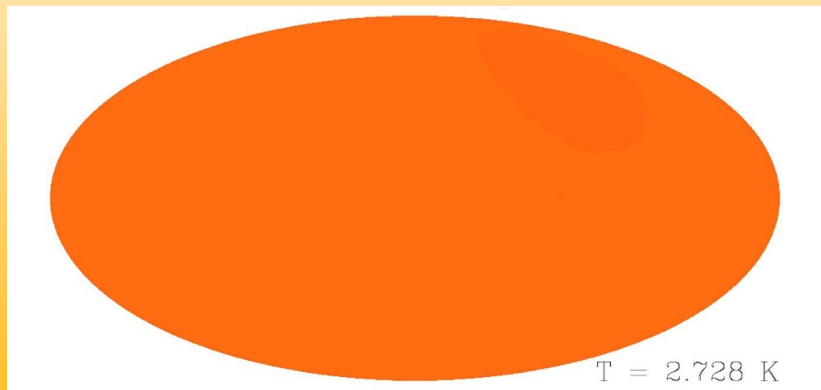
$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} = -3H \equiv -3\frac{\dot{a}}{a}$$

$$\rho \propto \frac{1}{a^3}$$

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”.

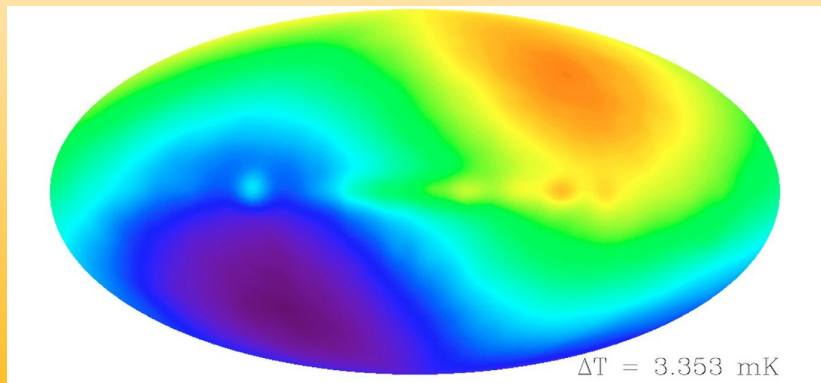
10. Mikrofalowe promieniowanie tła

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



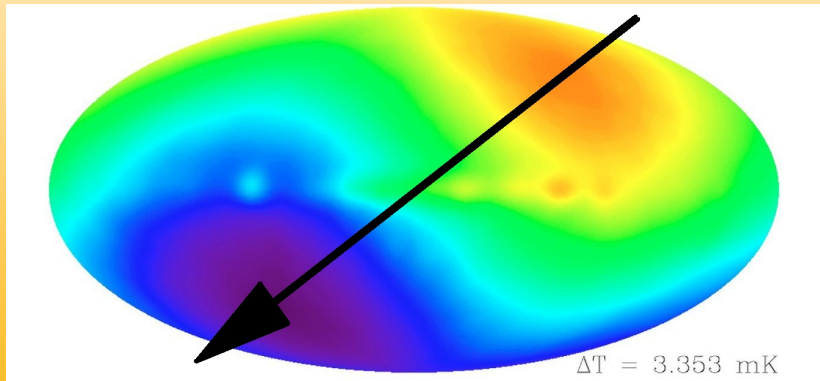
10. Mikrofalowe promieniowanie tła

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



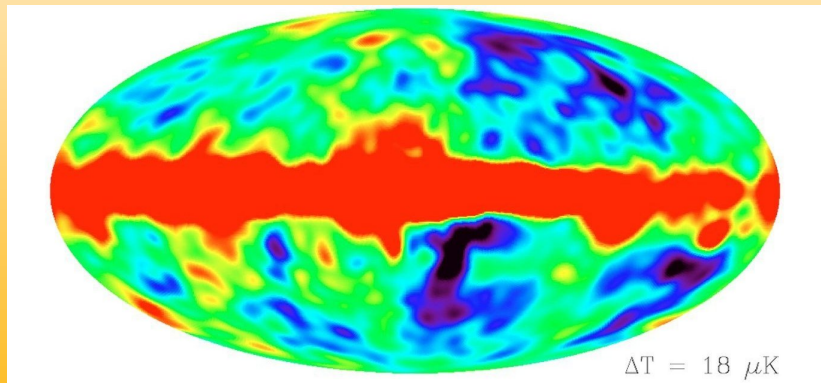
10. Mikrofalowe promieniowanie tła

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



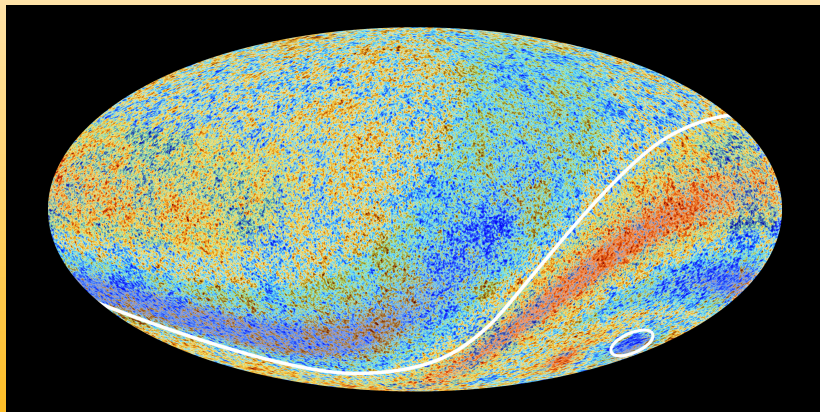
10. Mikrofalowe promieniowanie tła

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



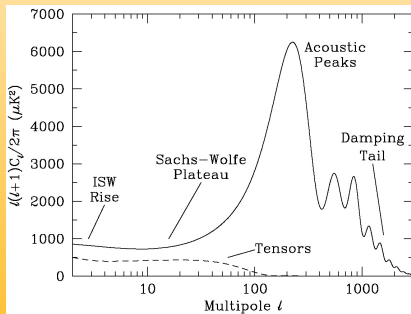
10. Mikrofalowe promieniowanie tła

- 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

- 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 . 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 $z = 6$, obecnie $z = 0$.

Chcesz wiedzieć więcej?



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