

# Podstawy astrofizyki i astronomii

Andrzej Odrzywołek

Zakład Teorii Względności i Astrofizyki, Instytut Fizyki UJ

19 marca 2019



# 5. Złamanie symetrii elektrosłabej. Mechanizm Higgsa.

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  $\rho$ , jest identyczna jak dla gazu fotonowego:

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

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

Rozwiązanie:

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

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

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

gdzie  $a = 4\sigma/c$ ,  $\sigma$  - stała Stefana-Boltzmann, 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?

# Lista „cząstek elementarnych”

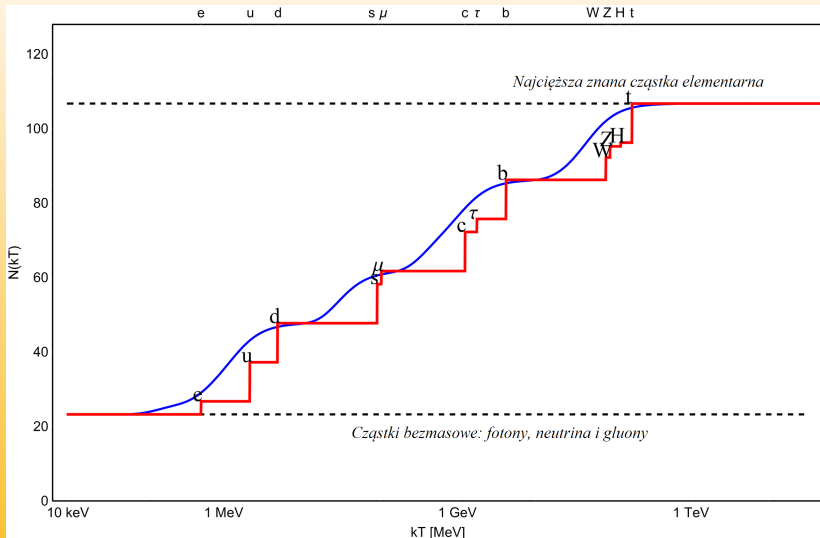
## Bozony (28)

- 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 Higgosa (spin=0)

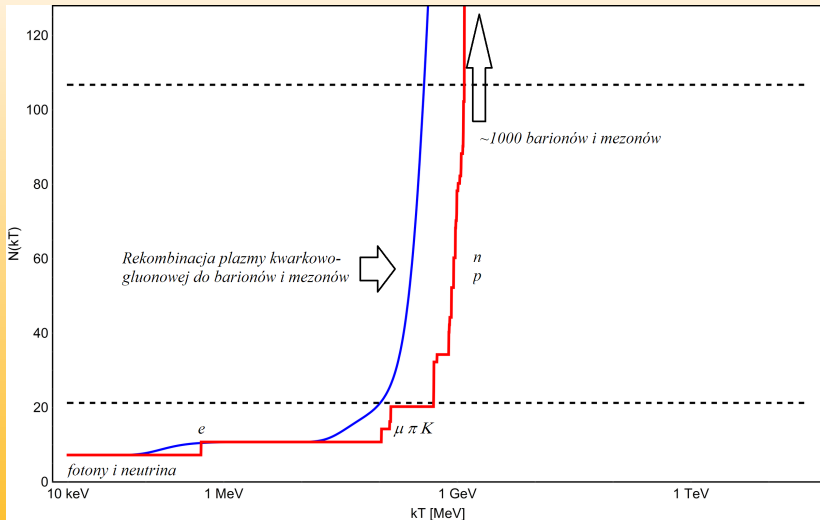
## Fermiony (90)

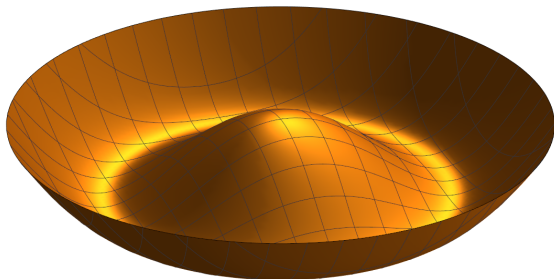
- leptony
  - 1  $12 \times e^\pm, \mu^\pm, \tau^\pm$  – (spin=1/2, masa>0)
  - 2  $6 \times \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$  – neutrina (spin=1/2, masa=0 ?)
- bariony
  - 1  $72 \times u, d, s, c, b, t$  – kwarki (spin=1/2, masa>0, 3 kolory)

# Zamrażanie stopni swobody w erze radiacyjnej



# Zamrażanie stopni swobody w erze radiacyjnej



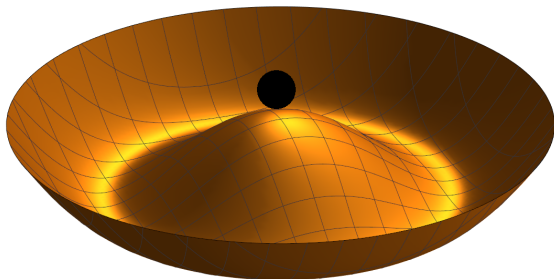


## „Meksykański kapelusz”

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

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

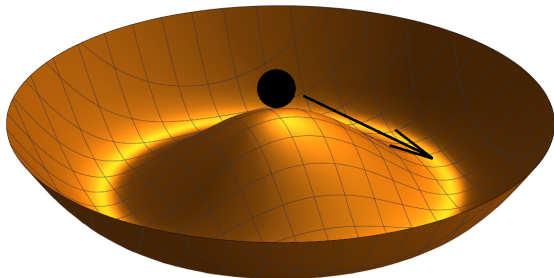




## „Meksykański kapelusz”

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**:

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

# Łamanie symetrii elektrosłabej

## PRZED

- 1  $B, W_1, W_2, W_3$  (4 bezmasowe bozony) –  $4 \times 2 = 8$
- 2 Pole Higgosa (dublet zespolony) – 4
- 3 razem 12 stopni swobody

$$\begin{pmatrix} \gamma \\ Z^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & \sin \theta_W \\ -\sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B \\ W_3 \end{pmatrix}, W^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (W_1 \pm iW_2)$$

$\theta_W \simeq 28^\circ$  – kąt Weinberga (elektrosłaby kąt mieszania)

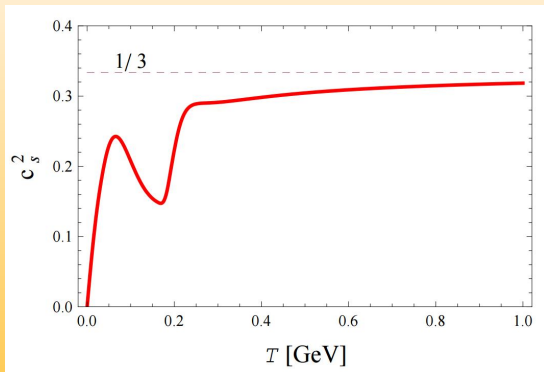
## PO

- 1  $\gamma$  (foton bezmasowy) – 2
- 2  $Z^0, W^\pm$  (3 masywne bozony o spinie 1) –  $3 \times 3 = 9$
- 3  $H^0$  (bozon Higgosa, cząstka o spinie zero) – 1
- 4 razem 12 stopni swobody

- 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”

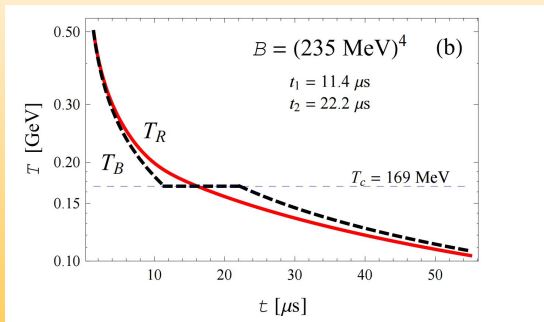
# 6. Uwięzienie kwarków. Powstanie barionów (protony, neutrony, ...)

## 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

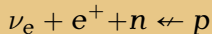
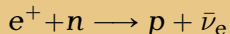
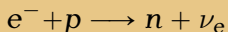


Źródło: Wojciech Florkowski, The realistic QCD equation of state in relativistic heavy-ion collisions and the early Universe, Nuclear Physics A Volume 853, Issue 1, 1 March 2011, Pages 173-188

# 7. Uwolnienie neutrin. Powstanie neutrinowego promieniowania tła.



## Proces URCA z udziałem nukleonów

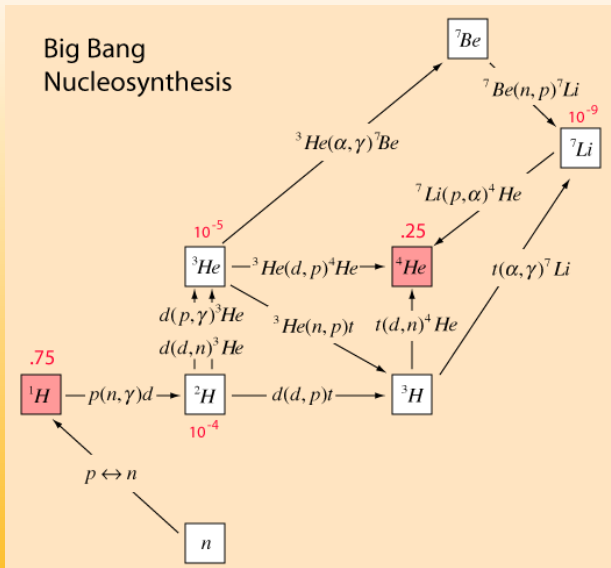


Różnica masy  $\Delta Q = 1.3 \text{ MeV}$  (neutron jest cięższy!) W momencie gdy tempo ekspansji Wszechświata staje się większe niż tempo reakcji z udziałem neutrino, stosunek ilości protonów zostaje „zamrożony” na wartości:

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

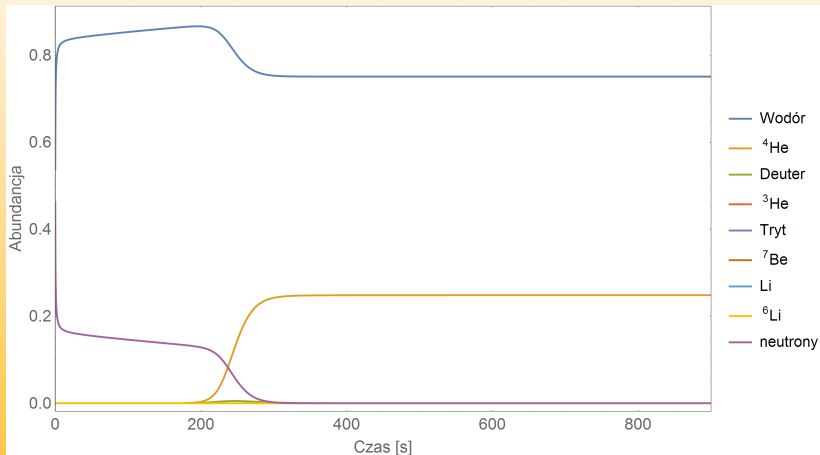
Od momentu gdy neutrino przestają być w równowadze z nukleonami, poruszają się swobodnie tworząc hipotetyczne *neutrinowe promieniowanie tła*. Stosunek neutronów do protonów stanowi warunki początkowe dla kolejnego etapu: kosmologicznej nukleosyntezy.

# 8. Nukleosynteza kosmologiczna



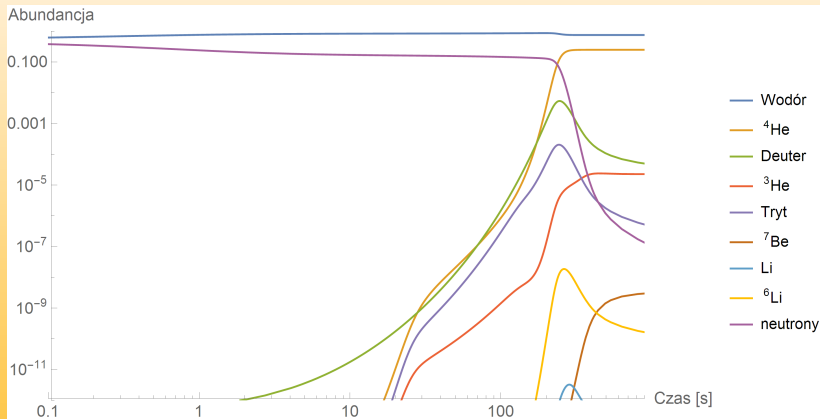
Źródło: [http://cococubed.asu.edu/code\\_pages/net\\_bigbang.shtml](http://cococubed.asu.edu/code_pages/net_bigbang.shtml)

# 8. Nukleosynteza kosmologiczna



Źródło: [http://cococubed.asu.edu/code\\_pages/net\\_bigbang.shtml](http://cococubed.asu.edu/code_pages/net_bigbang.shtml)

# 8. Nukleosynteza kosmologiczna



Źródło: [http://cococubed.asu.edu/code\\_pages/net\\_bigbang.shtml](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

$$P = 0$$

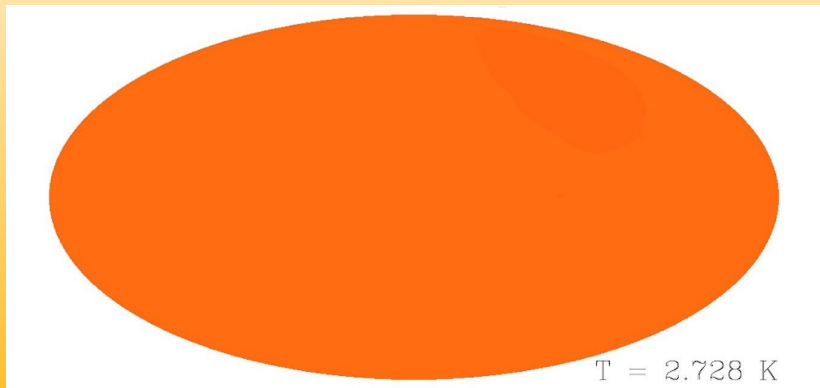
$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} = -3H \equiv -3\frac{\dot{a}}{a}$$

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

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”.

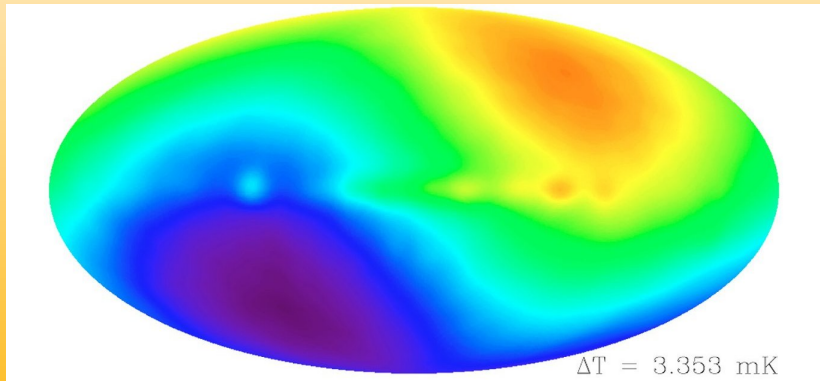
## 10. Mikrofalowe promieniowanie tła

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



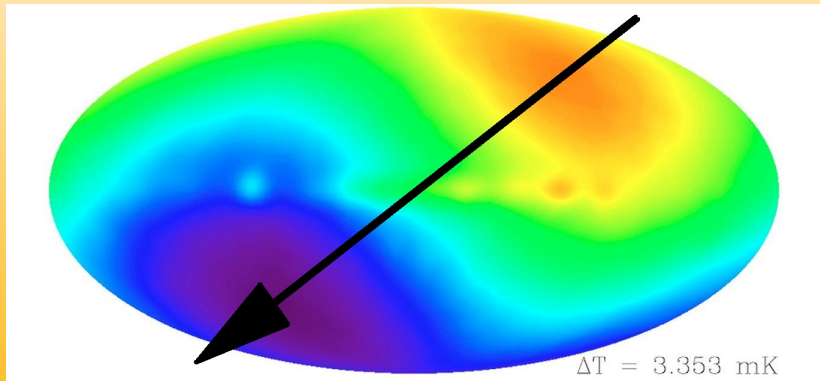
## 10. Mikrofalowe promieniowanie tła

- 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

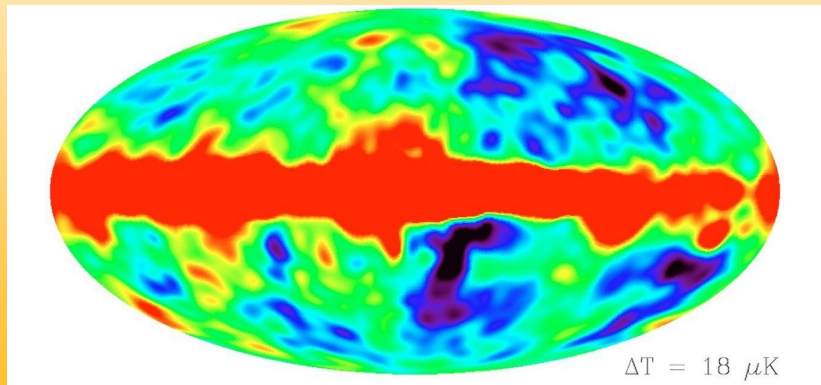
- z dokładnością 0.1% promieniowanie jest izotropowe
- nasza prędkość we Wszechświecie (tzw. dipol,  $v = 600$  km/s)
- fluktuacje po Wielkim Wybuchu





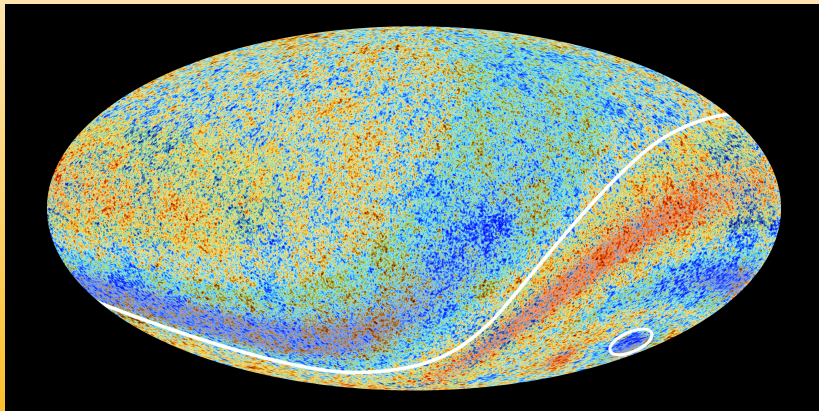
## 10. Mikrofalowe promieniowanie tła

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



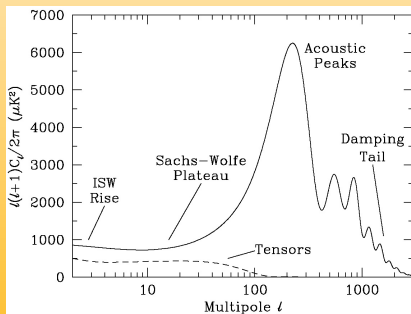
## 10. Mikrofalowe promieniowanie tła

- 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 12:30, A-1-08