

Elementy kosmologii

- ❖ Rozszerzający się Wszechświat
- ❖ Wielki Wybuch (Big Bang)
- ❖ Nukleosynteza
- ❖ Promieniowanie mikrofalowe tła
- ❖ Pomiary parametrów kosmologicznych:
 - WMAP
 - SNIa
- ❖ Asymetria materii i antymaterii

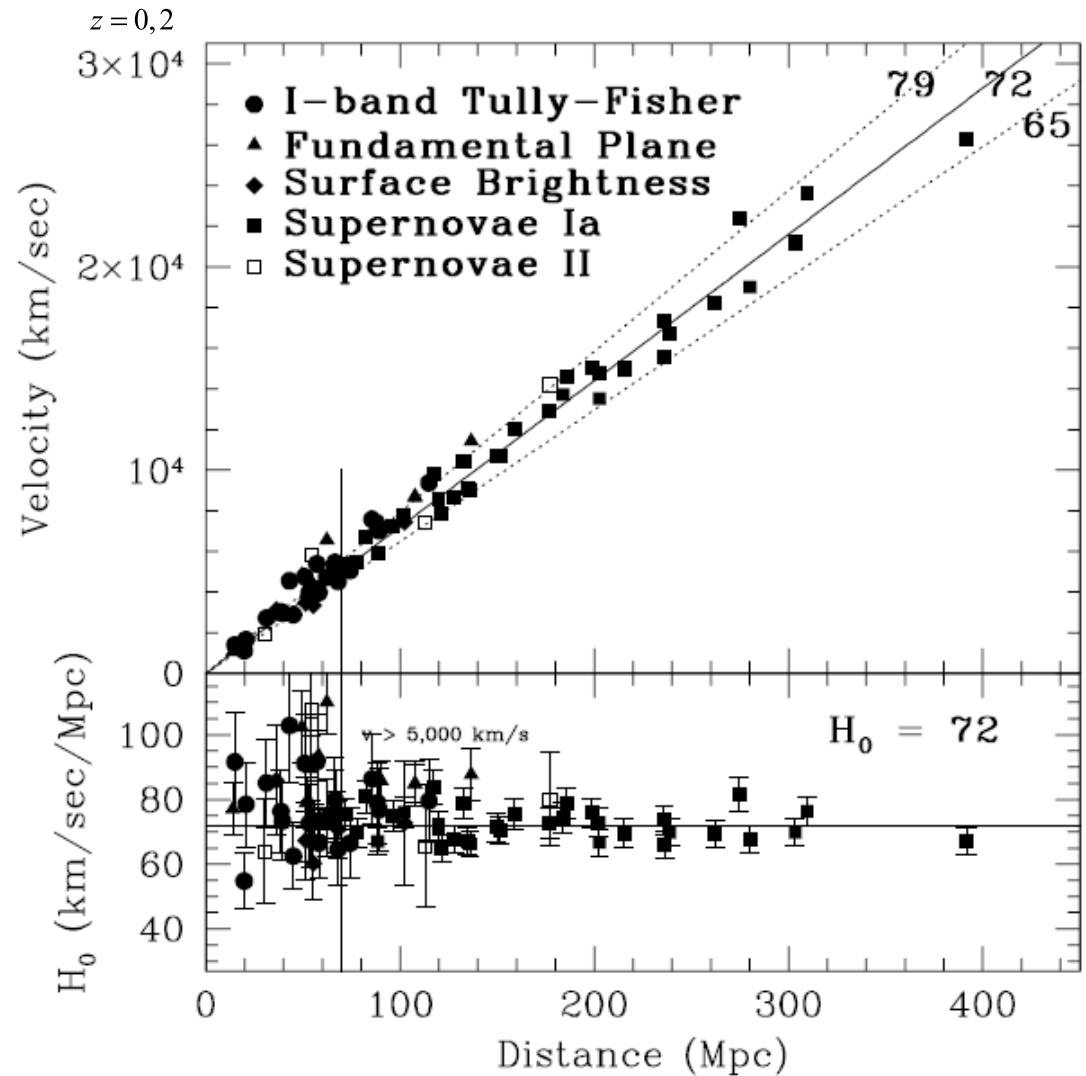
Rozszerzający się Wszechświat

W 1929 Hubble zaobserwował przesunięcia ku czerwieni (redshift) linii widmowych z odległych galaktyk i przypisał je ucieczce galaktyk z prędkością:

$$v = Hr \quad \text{gdzie } r \text{ to odległość} \\ \text{a } H \text{ stała Hubble}$$

$$\lambda' = \lambda \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} = \lambda(1+z) \quad z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Dla $z \ll 1$ to efekt Dopplera ale ogólnie to przejaw izotropowej ekspansji Wszechświata: zwiększają się zarówno odległości, jak i długości fali.



Rozszerzający się Wszechświat

Ekspansja Wszechświata zależy od czasu. Jeśli oznaczymy jakąś **uniwersalną skalę odl. $R(t)$** to:

$$r(t) = R(t) \cdot r_0$$

$$v(t) = \dot{R}(t) \cdot r_0$$

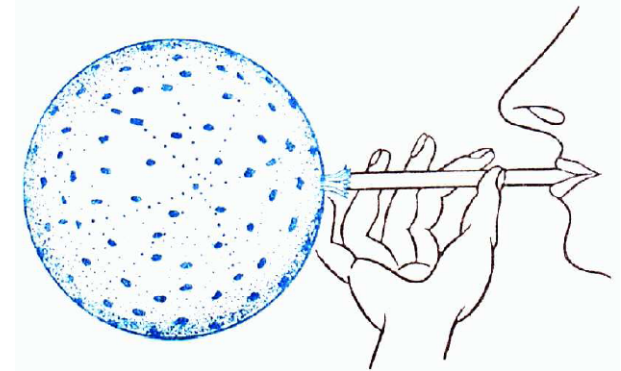
$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

H zależy od czasu
ale dziś:

$$H_0 = 100 \cdot h_0 \frac{\text{km}}{\text{s} \times \text{Mpc}}$$

$$h_0 = 0,73^{+0,04}_{-0,03}$$

$$1 \text{ Mpc} = 3,09 \cdot 10^{19} \text{ km}$$



Dowolne 2 obiekty
oddalają się tak samo.

Ewolucję W opisuje rozwiązanie r-nań Einsteina:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

tzw. r-nie Friedmanna

G_N stała grawit.

ρ gęstość energii

Λ stała kosmologiczna

Rozszerzający się Wszechświat

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G_N \rho}{3} - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

G_N stała grawit.
 ρ gęstość energii
 Λ stała kosmologiczna

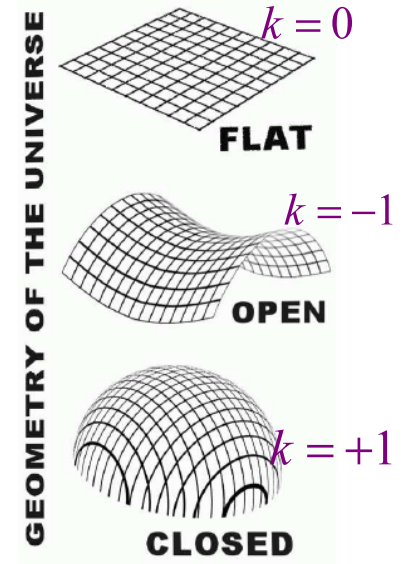
Dla $k=\Lambda=0$ oraz stałej nierelatywistycznej masy M
 z całkowania dostaje się:

$$R = \left(\frac{9}{2} G_N M\right)^{1/3} t^{2/3}$$

$$\frac{R}{\dot{R}} = \frac{3t}{2}$$

czyli wiek
 Wszechświata:

$$t_0 = \frac{2}{3H_0} \approx 10^{10} \text{ lat}$$



definiuje tzw. gęstość krytyczną

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N} = 5,6 \frac{\text{GeV}}{\text{c}^2 \text{m}^3}$$

$k = \Lambda = 0$

Bardziej precyzyjnie:

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = 13,7_{-0,2}^{+0,1} \cdot 10^9 \text{ lat}$$

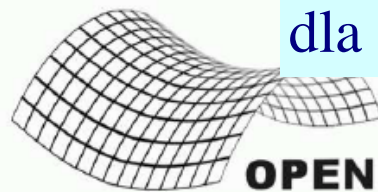
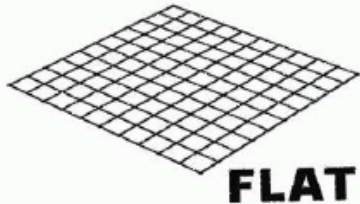
Parametry kosmologiczne

Dla różnych k i $\Lambda=0$ można wprowadzić:

$$\Omega_{tot} = \frac{\rho}{\rho_c} \quad \text{wtedy:} \quad \frac{k}{R^2} = H^2 (\Omega_{tot} - 1)$$

czyli dla $k=0$
 $\Omega_{tot}=1$ niezależnie od t

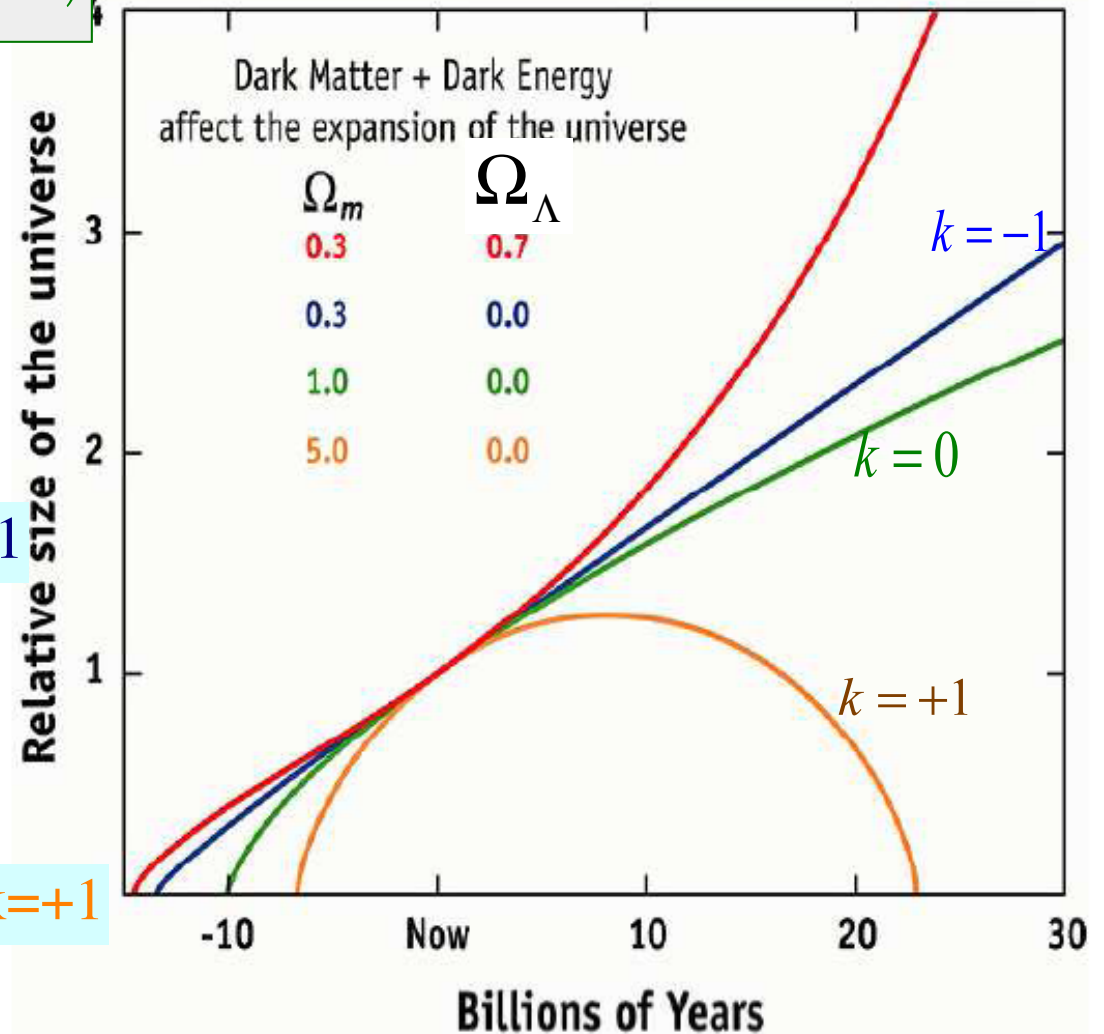
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



dla $\Omega_{tot} < 1$ $k=-1$

dla $\Omega_{tot} > 1$ $k=+1$

EXPANSION OF THE UNIVERSE



Parametry kosmologiczne

Dla różnych k i $\Lambda=0$ można wprowadzić:

$$\Omega_{tot} = \frac{\rho}{\rho_c}$$

wtedy: $\frac{k}{R^2} = H^2 (\Omega_{tot} - 1)$

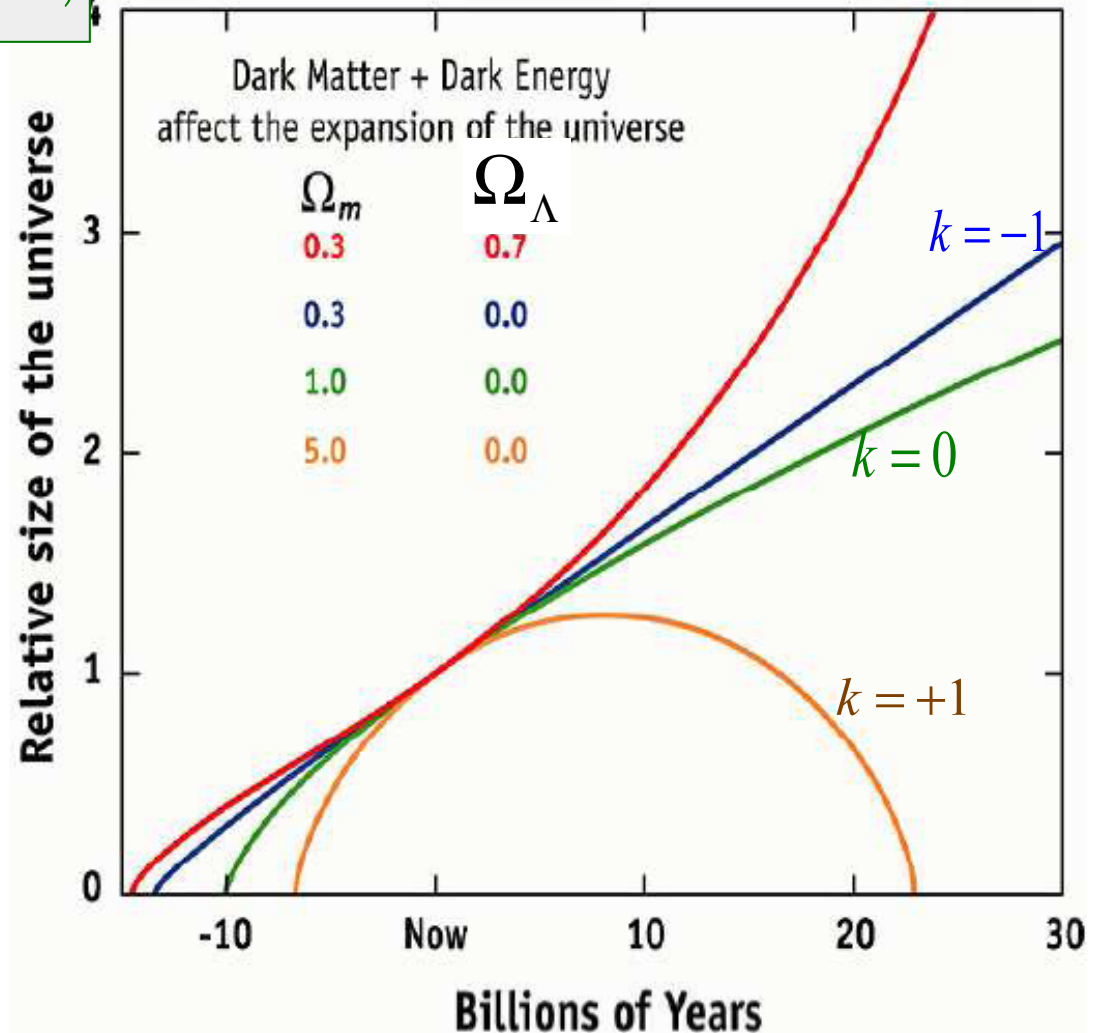
Często wygodnie jest rozdzielić wkład od cząstek relat. Ω_v i od materii bez ciśnienia Ω_m oraz wprowadzić:

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2}$$

Wtedy:

$$\frac{k}{R^2} = H^2 (\Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda - 1)$$

EXPANSION OF THE UNIVERSE



Era dominacji promienistej

Jak różne gęstości zmieniały się w czasie?

Gęstość materii: $\rho_m \propto R^{-3}$

Gęstość energii promieniowania: $\rho_r \propto R^{-4}$ bo:

= gęstość fotonów \times średnia energia fotonu

$$\propto R^{-3}$$

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} \propto R^{-1}$$

bo długość fali
zwiększa się ze skalą R

Stąd teraz dominuje materia ale kiedyś dominowała
energia promieniowania.

Z r-nia Friedmanna oraz prawa Stefana-Boltz.
dostaje się dla promieniowania :

temperatura:

$$kT \approx \frac{1 \text{ MeV}}{\sqrt{t(\text{sek})}}$$

Czyli na początku był gorący
Wielki Wybuch

Wielki Wybuch (Big Bang)

Początek Wszechświata

Weźmy: 10^{-43} s 10^{32} K 10^{19} GeV



Dla wcześniejszych czasów potrzebna kwantowa grawitacja, której nie znamy

W najwcześniejszych momentach zdarzyła się też pewnie **inflacja**:

W jednym z modeli stała kosmologiczna przez krótki moment dominuje

r-nie Friedmanna: $\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 \sim \frac{\Lambda}{3}$ dając: $R_2 = R_1 e^{\sqrt{\Lambda/3}(t_2-t_1)}$ $\frac{R_1(10^{-34}\text{ s})}{R_2(10^{-32}\text{ s})} \sim 10^{30}$

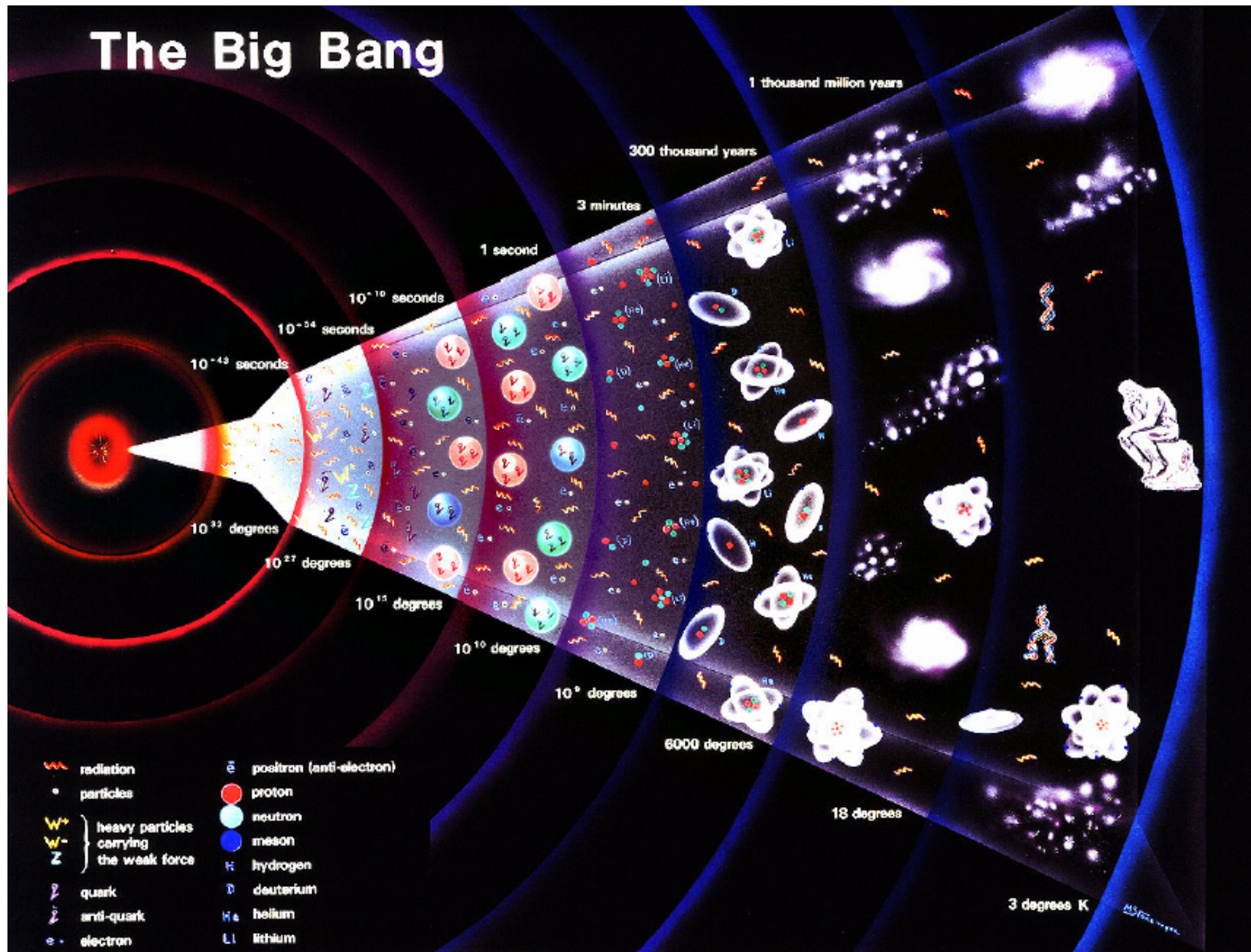
Po okresie inflacji Λ mała.

Dalej omówimy kolejne stadia oziębiania Wszechświata. Zakładamy, że cząstki które spełniają: $kT \gg Mc^2$ są w równowadze termicznej w porównywalnych ilościach a reakcje mogą przebiegać w obydwu kierunkach

np: $p + \bar{p} \leftrightarrow \gamma + \gamma$

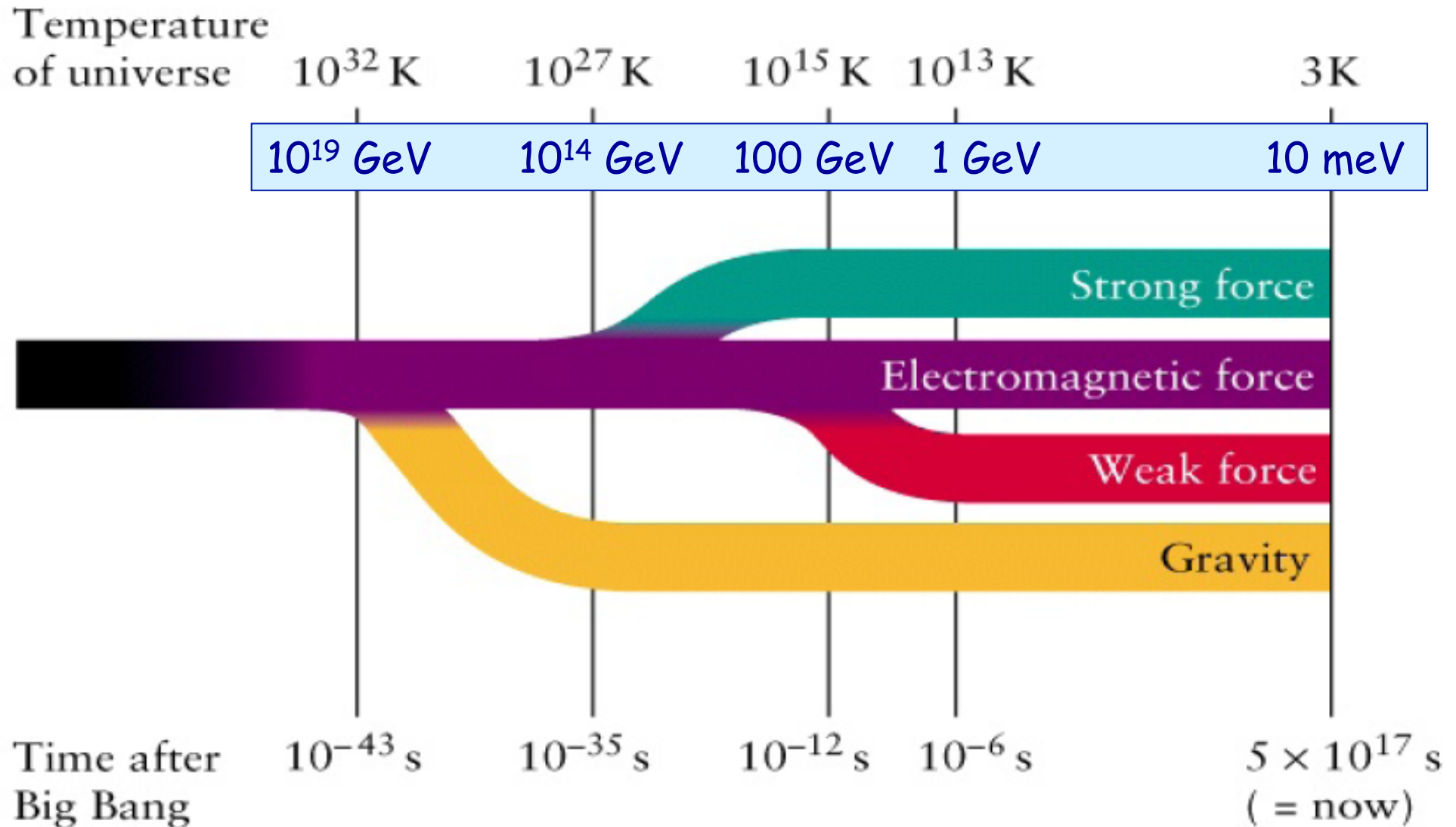
D. Kięczewska, wykład 14

The Big Bang



<http://outreach.web.cern.ch/outreach/public/CERN/PicturePacks/BigBang.html>

Łamanie symetrii oddziaływań



10^{-43} seconds



10^{32} degrees 10^{19} GeV

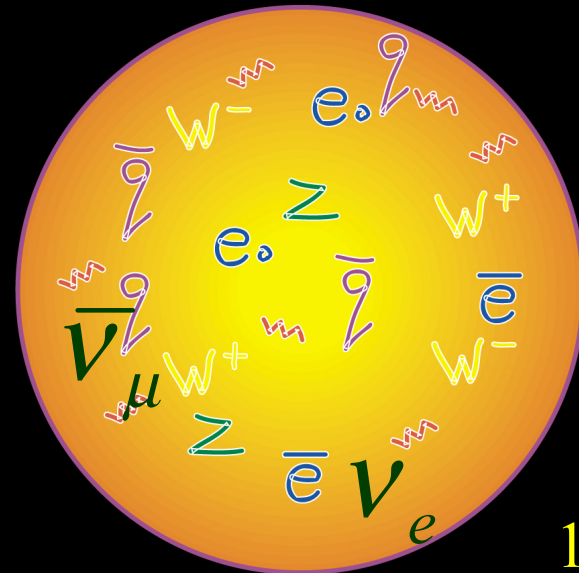
- Plazma kwarkowo-gluonowa
- Bozony X, Y znikają
- Prawd. pojawia się nadmiar materii nad antymaterią wskutek rozpadów ciężkich neutrin N ??

D. Kiełczewski

Big Bang (1)

- Wielka Unifikacja - wszystkie oddz. nierozróżnialne
- materii tyle samo co antymaterii
- bozonów X, Y tyle co np. kwarków
- leptony \leftrightarrow kwarki $\{\Delta(B-L)=0\}$

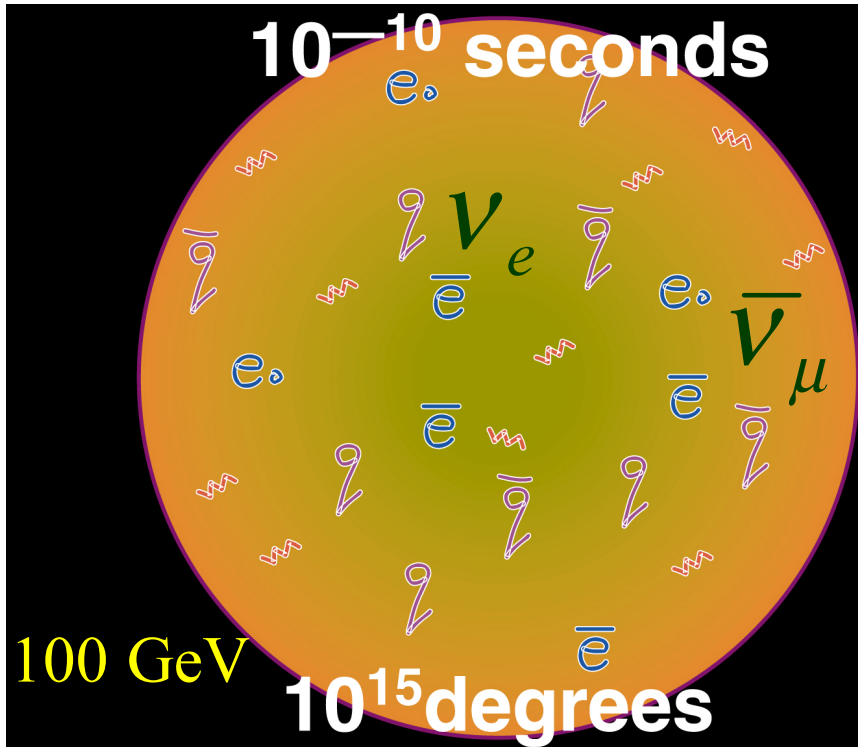
10^{-34} seconds



10^{27} degrees

10^{14} GeV

Big Bang (2)

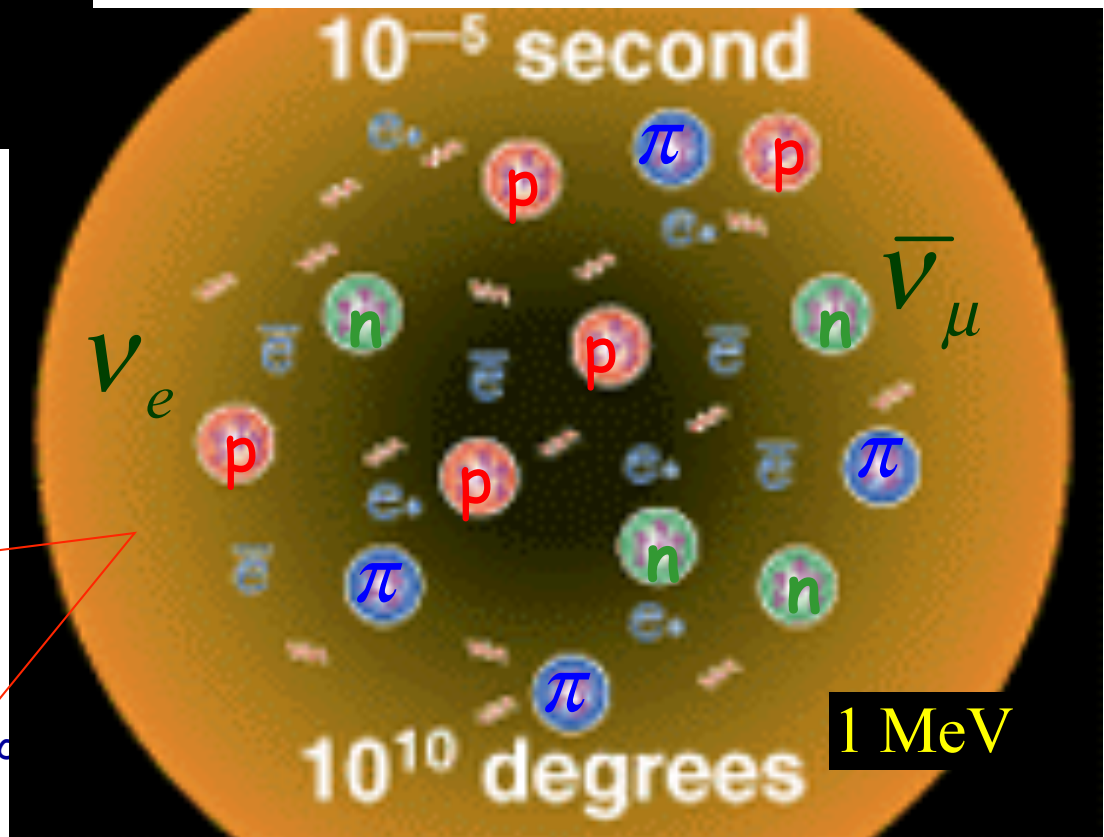


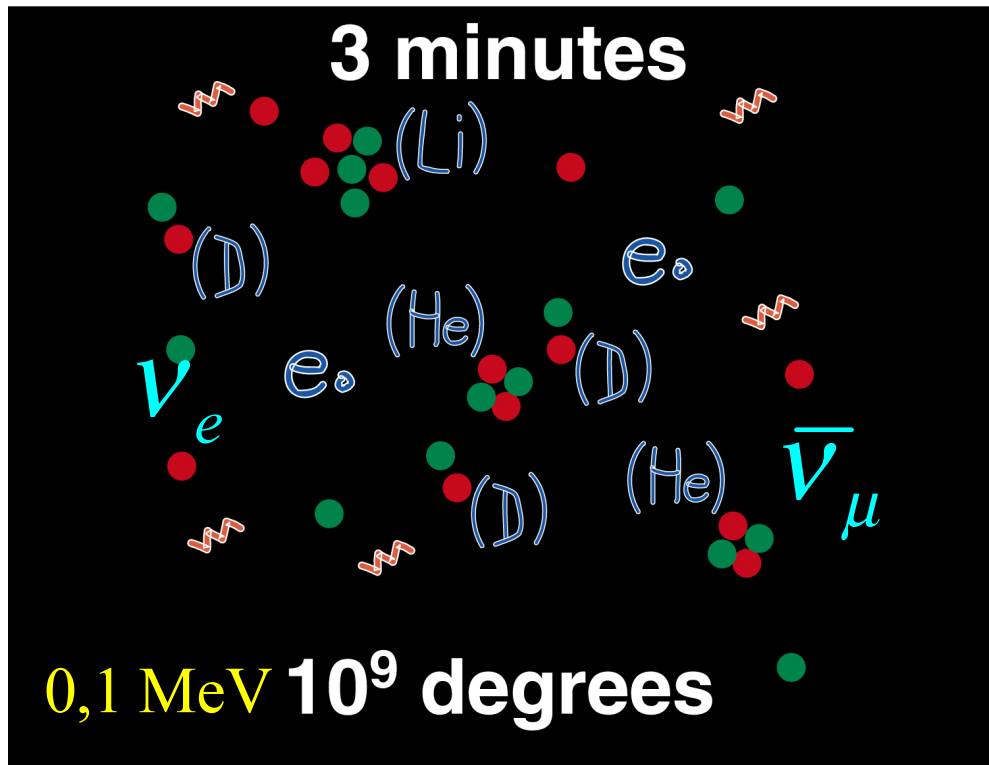
- rozdzieliły się oddz. słabe od emgt
- znikły kwarki top, znikają W i Z

- kwarki i gluony „ukryły” swoje kolory w hadrony
- antycząstki znikają $\gamma + \gamma \rightarrow q + \bar{q}$
- neutrony częściej rozpadają się niż są produkowane
- neutrina mają zbyt małą energię na procesy:

$$\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + e^-$$
- powstają **reliktowe neutrina**

D. Kiełto

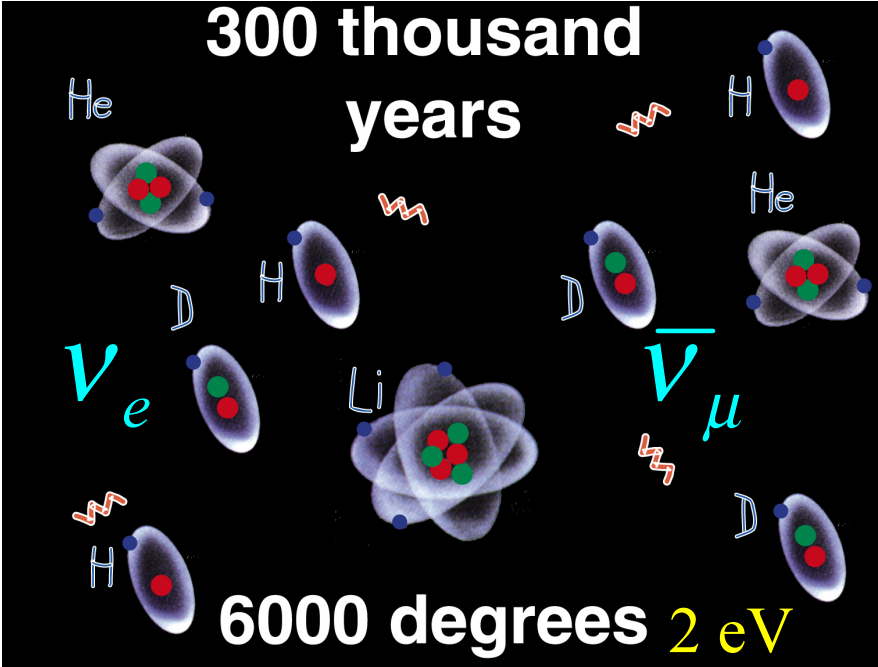




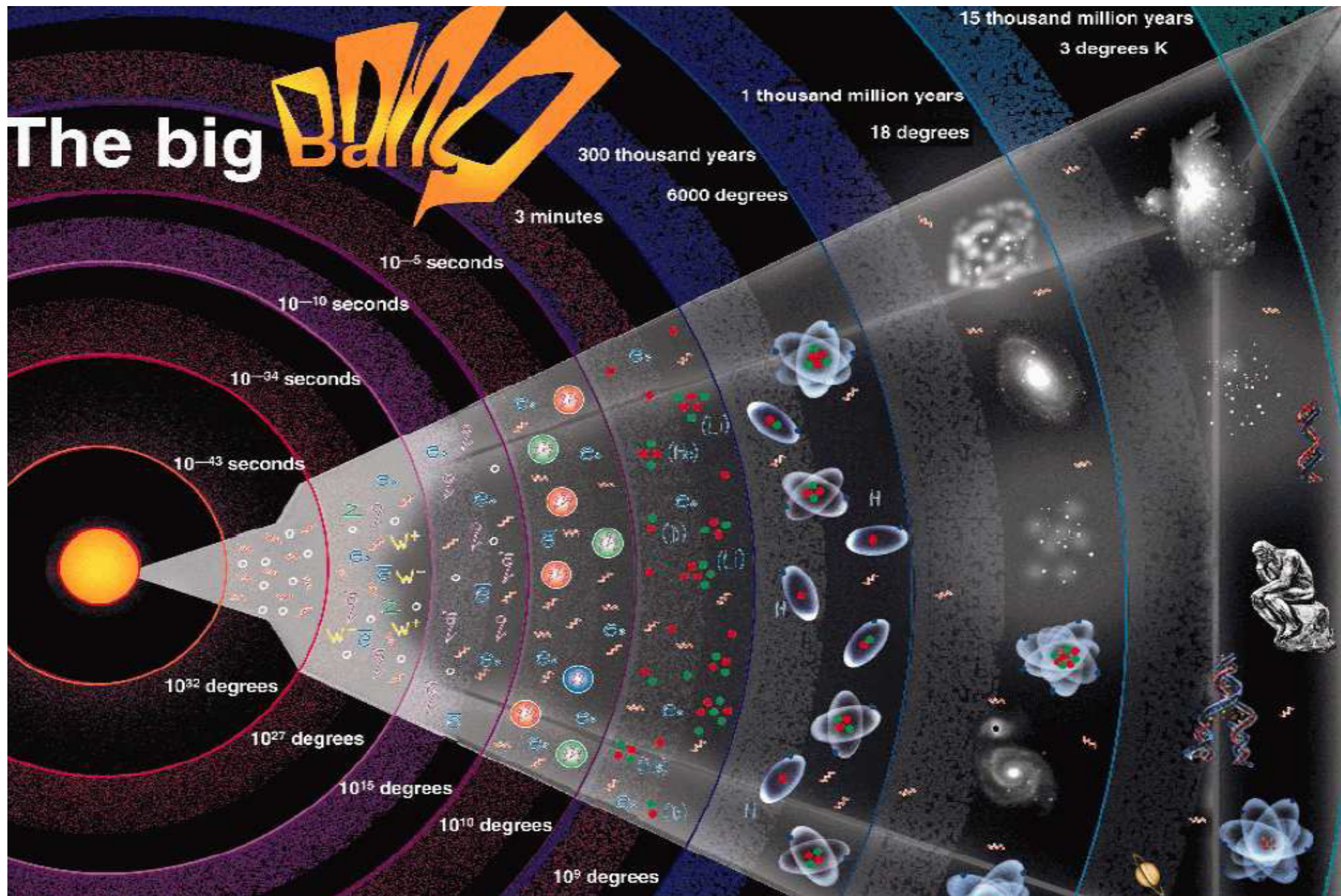
Big Bang (3)

- zbyt mało energii na $\gamma\gamma \leftrightarrow e^+e^-$
- pozytrony znikają
- powstają lekkie jądra - **Nukleosynteza**

- elektrony związane w atomach
 - fotony oddz. zbyt rzadko - odprzegają się od materii i lecą swobodnie: powstają **reliktowe fotony**
- ➡ **mikrofalowe promieniowanie tła** D. Kiełczewska,

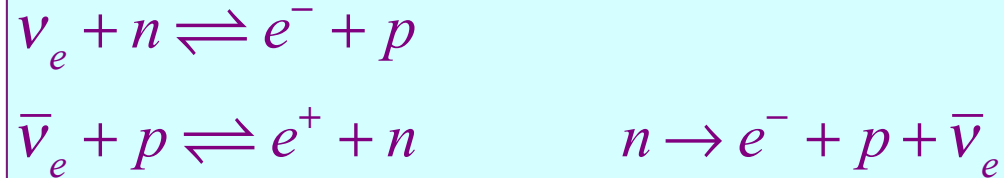


The big




Nukleosynteza

- Wiek Wszechświata ~ 1 sek (~ 1 MeV)
- Od początku BB większość cięższych cząstek zanihilowała ze swoimi antycząstkami
- Zostało 10^9 razy więcej ν i γ niż barionów
- Zachodzą reakcje:



Ale: $Q = (M_n - M_p)c^2 = 1,3 \text{ MeV}$


$$\frac{N_n}{N_p} = \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right) = 0,23$$

Ponadto czas życia neutronu $\tau = 896 \text{ s}$

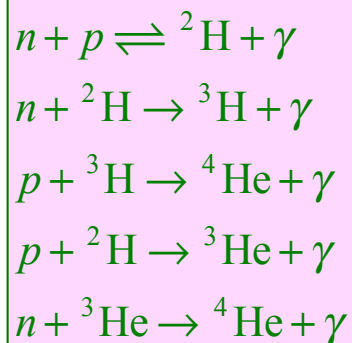
W efekcie po czasie 400 sek pozostaje:

$$\frac{N_n}{N_p} = 0,14$$

Ale część neutronów jest wiązana w jądrach i dalej się nie rozpada

Nukleosynteza

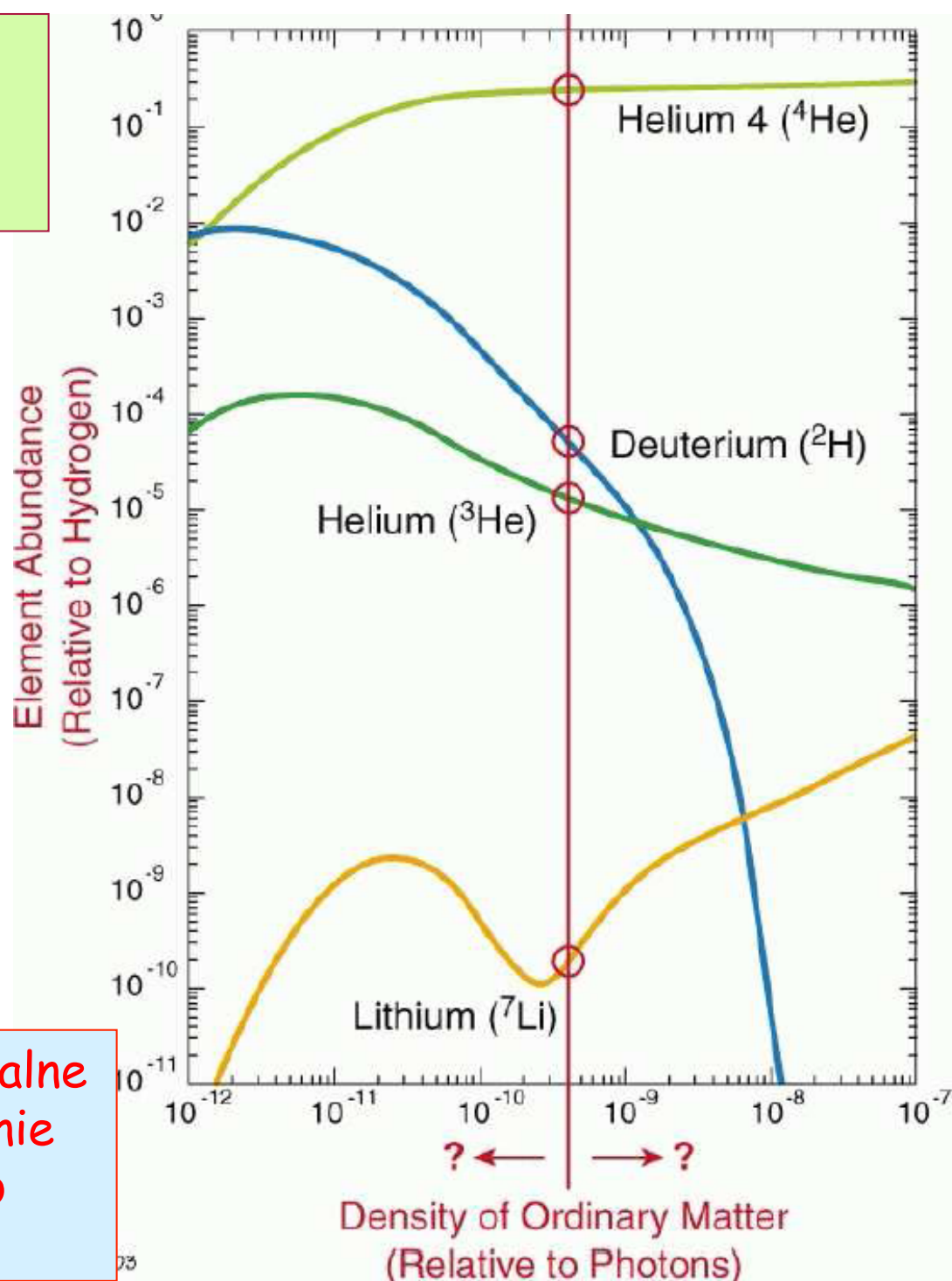
Jądra powstają w
 elmgnt procesach:
 Atomy powstają
 300 000 lat
 później.



Produkcja różnych jąder silnie
 zależy od stosunku gęstości
 materii do kwantów γ . Okazuje
 się, że obserwowane gęstości
 różnych pierwiastków zgadzają
 się z przewidywaniami dla:

$$\frac{N_B}{N_\gamma} \approx 5,5 \cdot 10^{-10}$$

**Eksperymentalne
 potwierdzenie
 Wielkiego
 Wybuchu**

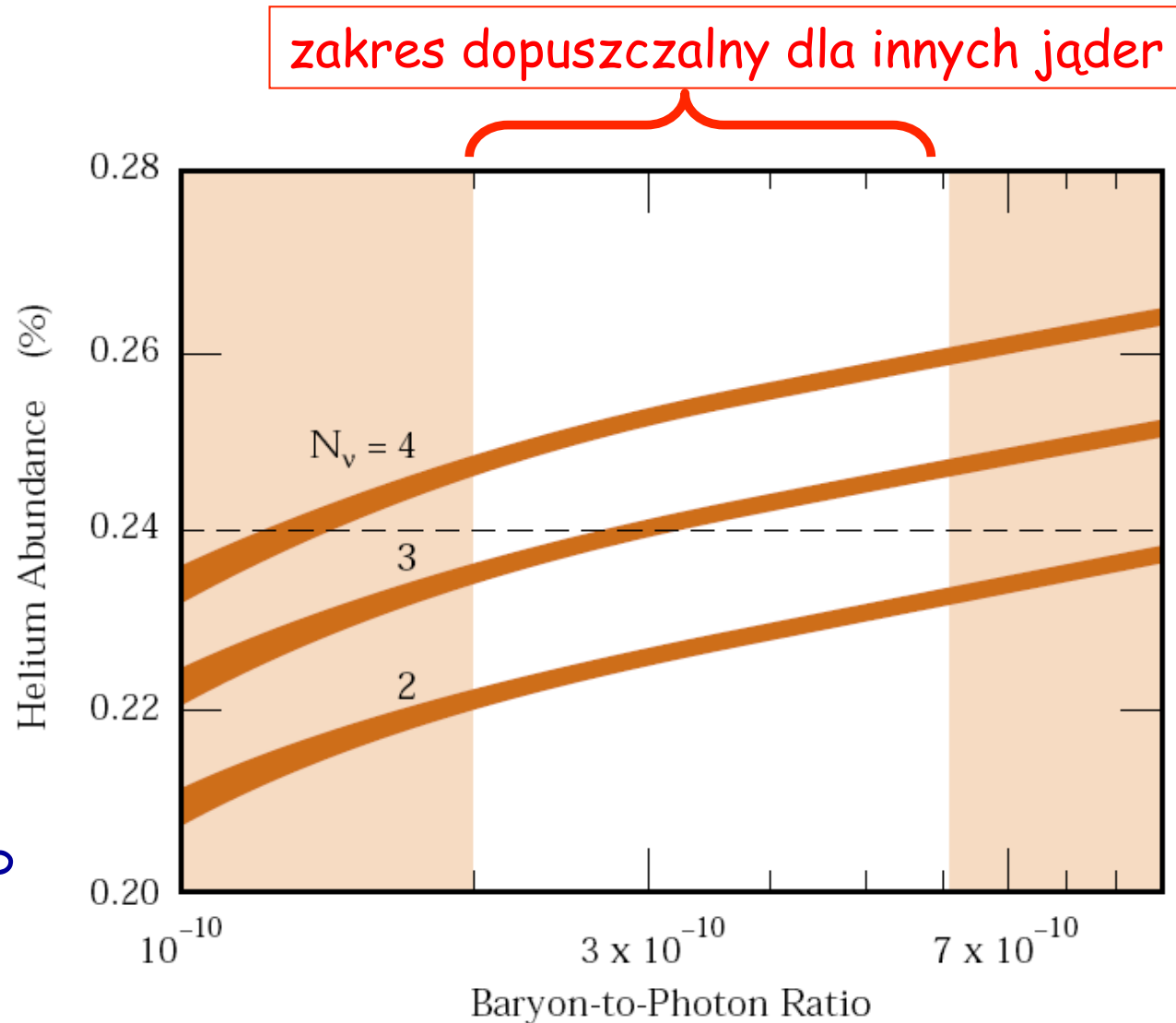


Liczba zapachów neutrin w modelu BB

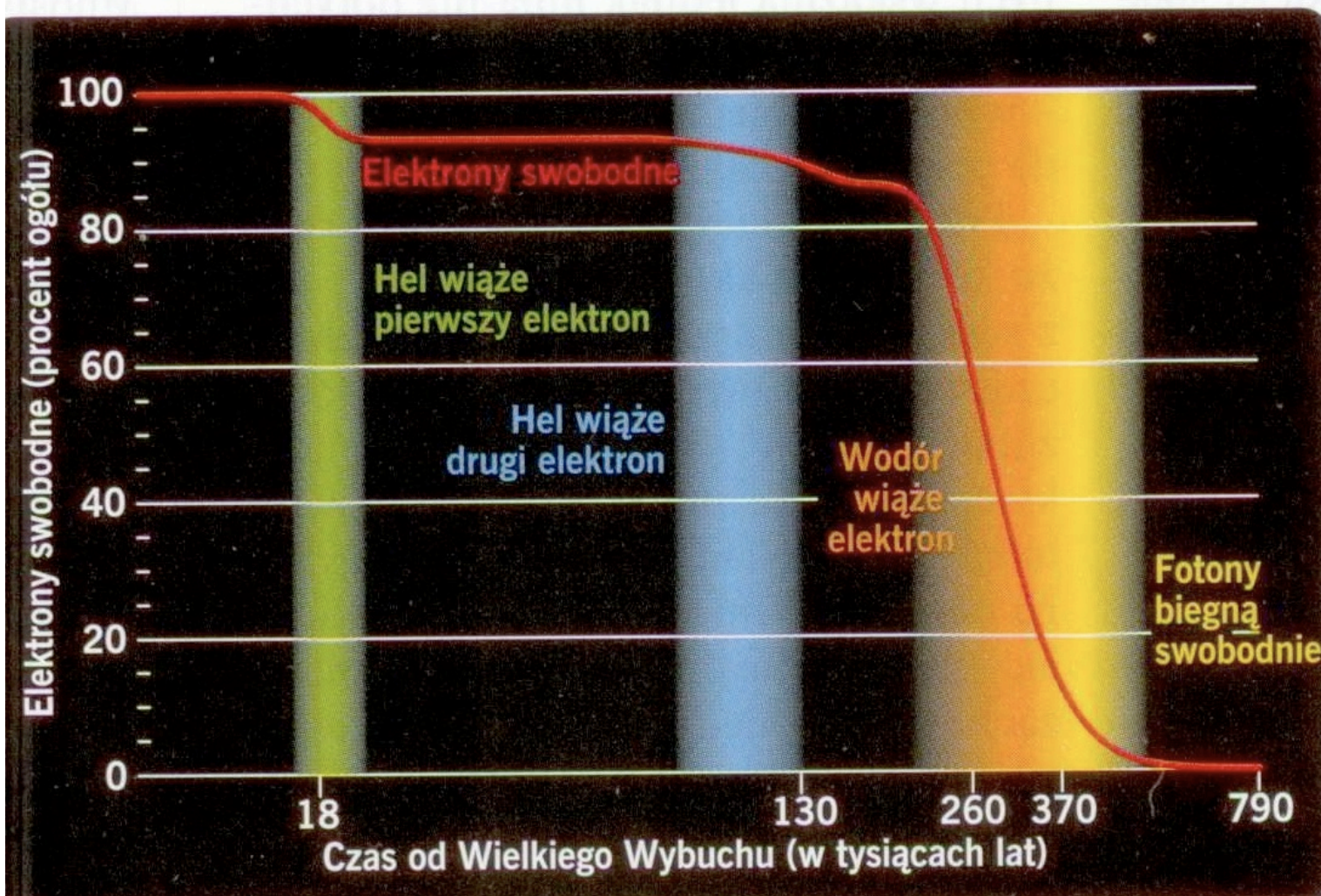
Szybkość ekspansji zależy od gęstości energii, a ta z kolei zależy od liczby zapachów neutrin: N_ν . Im szybsza ekspansja tym mniej neutronów zdąży się rozpaść i tym więcej jąder helu powstaje.

$$N_\nu = 3$$

zgodnie z pomiarami w LEP



Od nukleosyntezy do powstawania atomów



Atomy powstawały stopniowo, kiedy Wszechświat ochłodził się na tyle, by jądra mogły wychwytywać elektrony. Emitowały przy tym fotony, które badamy dziś.

Promieniowanie mikrofalowe tła

Wg zależności:

$$kT \approx \frac{1 \text{ MeV}}{\sqrt{t(\text{sek})}}$$

można się spodziewać, że dziś temperatura prom. we Wszechświecie wynosi kilka K.

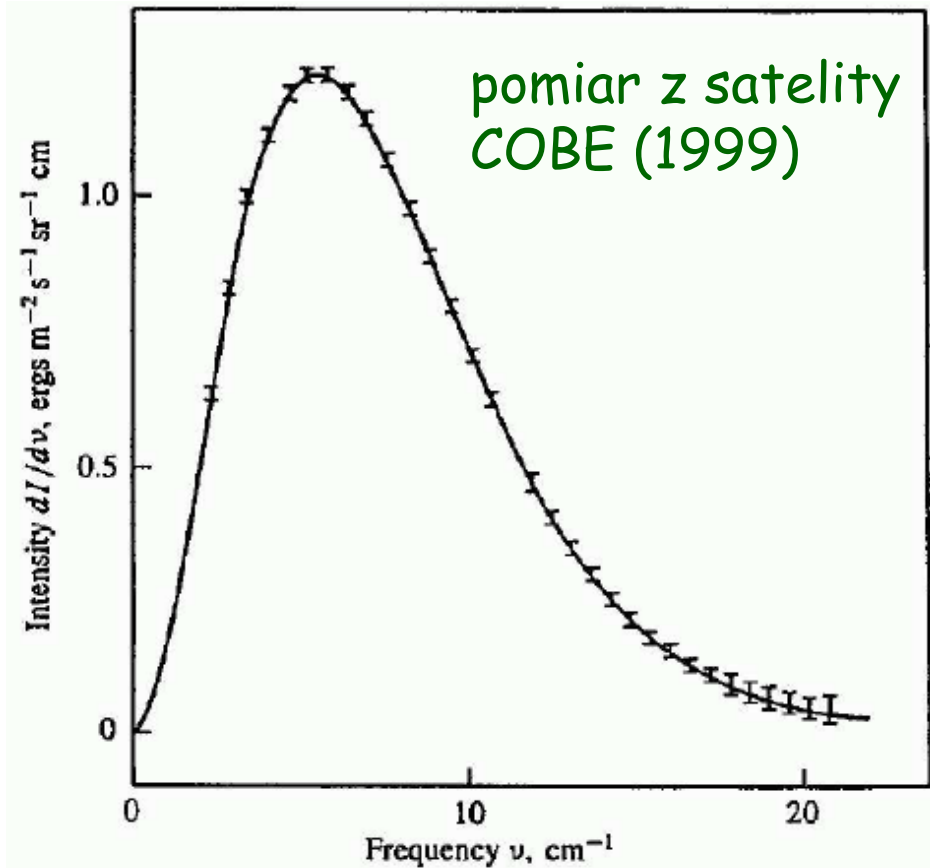
W 1965 r Penzias i Wilson wykryli mikrofalowe promieniowanie tła (CMB). Jego temp.:

$$T = 2,725 \pm 0,001 \text{ K}$$

Kolejna obserwacja potwierdzająca Wielki Wybuch. Pozostałość gorącej kosmicznej plazmy.

D. Kietczewska, wykład 14

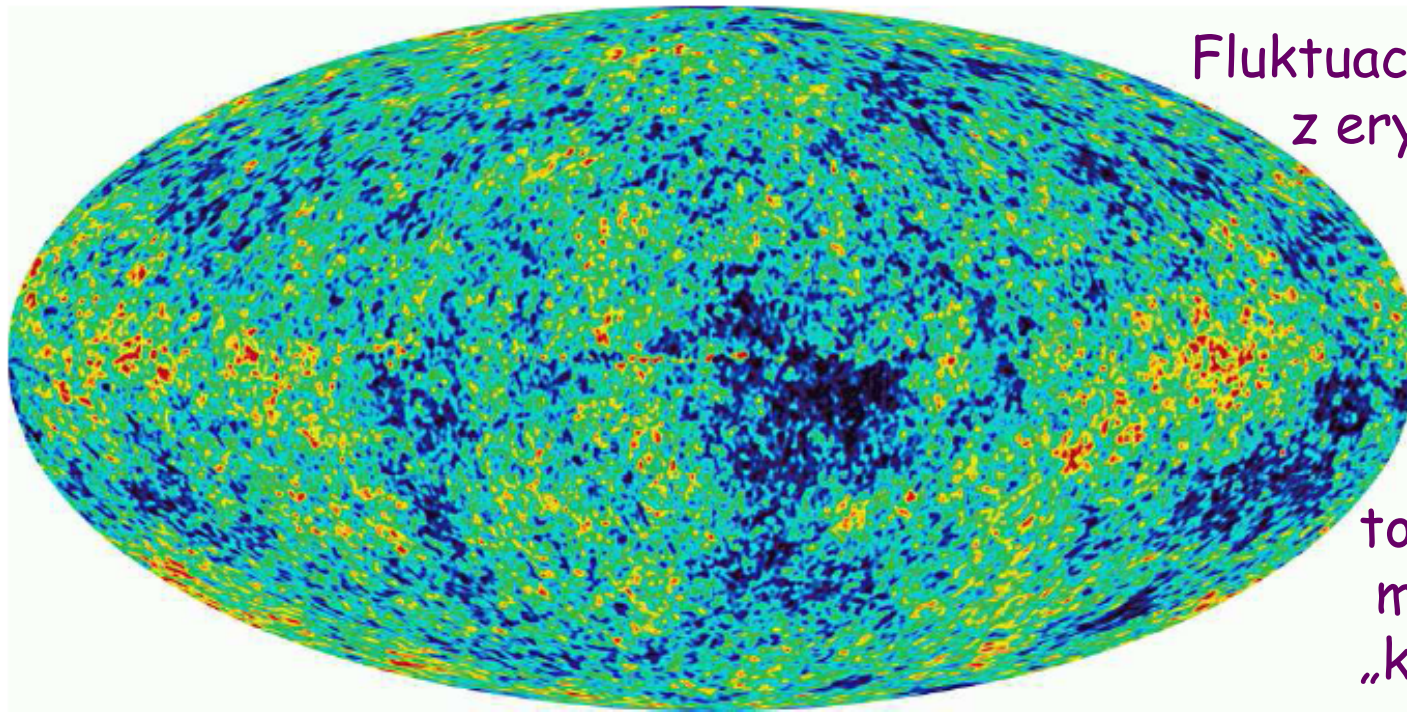
Widmo energii fotonów zgadza się z krzywą dla ciała czarnego o takiej temp.



Przez wiele lat mierzono taką samą temp. w różnych kierunkach.

Pomiar anizotropii przez WMAP

Satelitarny eksperyment „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe.” zbiera dane od 2001 r. Zbadał fluktuacje temperatury z precyzją 10^{-5} .
Obraz Wsz. w wieku 300 000 lat. (nagroda Nobla w 2006)



Fluktuacje mogą pochodzić z ery inflacji. Jeśli np. inflacja nastąpiła gdy:

$$t = 10^{-34} \text{ s}$$

$$ct = 10^{-26} \text{ m}$$

$$kT \sim 10^{14} \text{ GeV}$$

to z zasady Heisenberga można się spodziewać „kwantowych fluktuacji”

Fluktuacje dawały ośrodki zgęszczania materii, z których powstały galaktyki

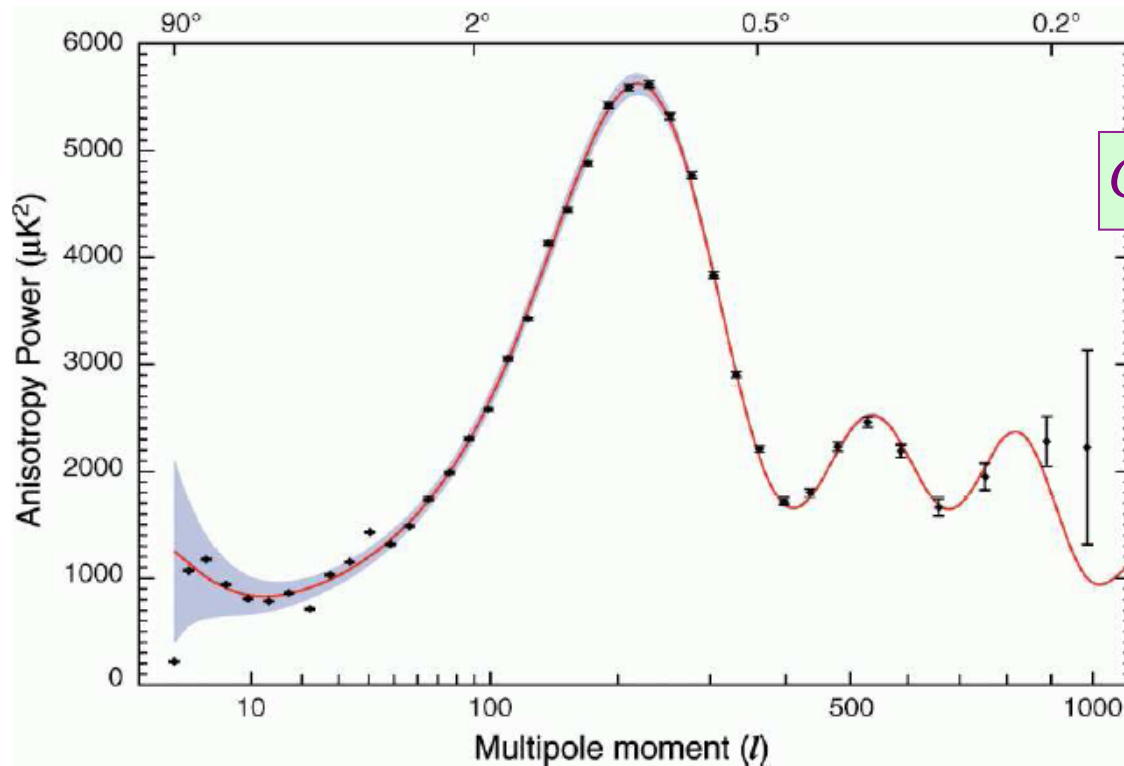
D. Kięczewska, wykład 14

$$\Delta(kT) \sim \frac{\hbar c}{ct} \sim 10^{10} \text{ GeV}$$

$$\frac{\Delta(kT)}{kT} \sim 10^{-4}$$

Pomiar anizotropii CMB przez WMAP

skala kąтова



Funkcja korelacji:

$$C(\vartheta) = \langle \delta T(\vec{m}) \delta T(\vec{n}) \rangle, \quad \vec{m} \cdot \vec{n} = \cos \vartheta$$

mierzy fluktuacje temp. wokół średniej temp. T_0 w kierunkach m and n . Dla małych kątów:

$$C(\vartheta) = \frac{1}{4\pi} \sum_{l=2}^{\infty} a_l^2 (2l+1) P_l(\cos \vartheta)$$

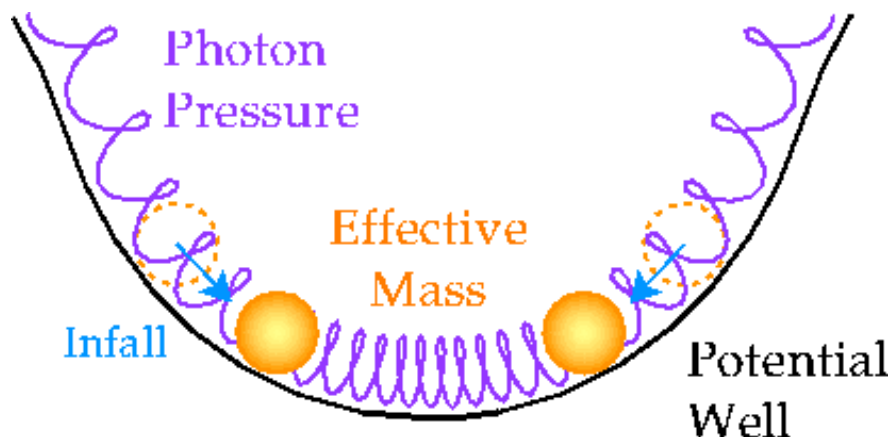
$$C_l = a_l^2$$

krzywa: model Λ CDM model

WMAP & 2dfGRS, astro-ph/0302209

Fitując modele do danych można dofitować zadziwiająco liczbę parametrów.

Modele dopasowywane do danych CMB



- Sprężynki reprezentują ciśnienie fotonów a kulki efektywną masę cieczy.
- Regiony kompresji (maksima) reprezentują obszary gorące a rozrzedzenia (minima) obszary zimne.

➤ W studni potencjału grawit. (wyznaczonego przez ciemną materię) znajduje się ciecz barionowo-fotonowa.

➤ Ciśnienie promieniste fotonów przeciwdziała grawit. kompresji cieczy.

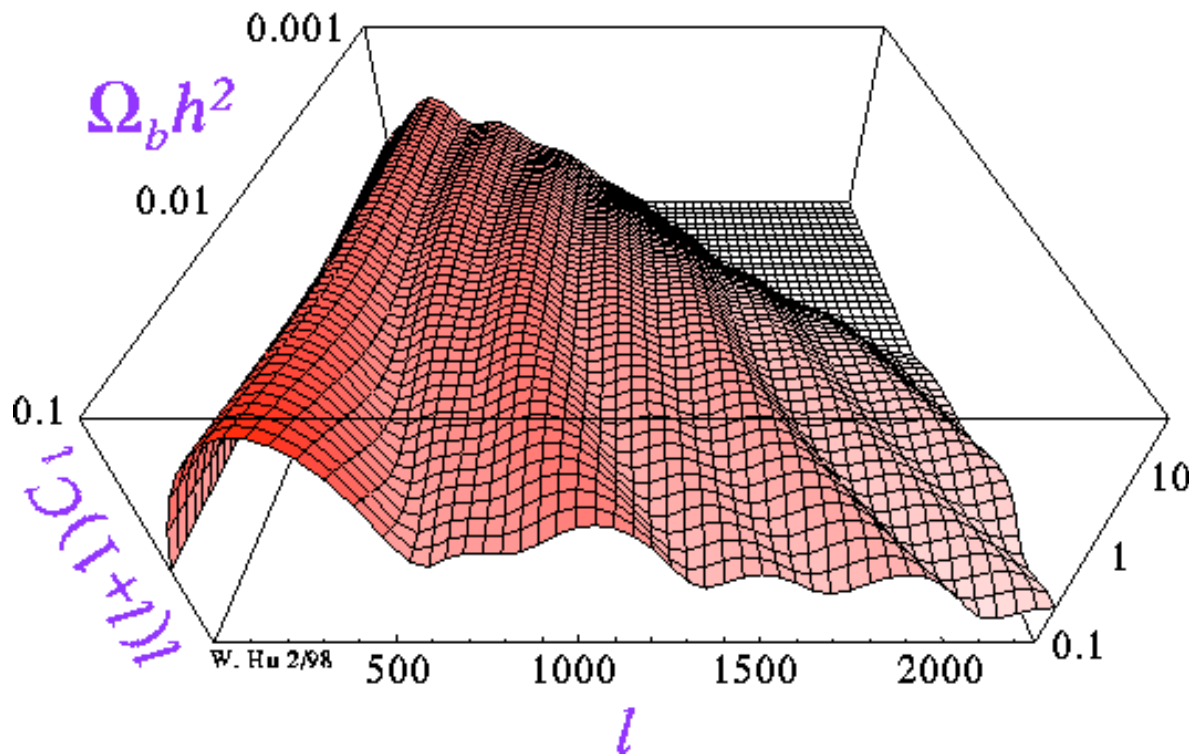
➤ W rezultacie powstają oscylacje akustyczne w cieczy.

➤ WMAP mierzy maksima i minima tych oscylacji, a w konsekwencji właściwości tej cieczy oraz potencjału grawit.

Wpływ barionów na anizotropię

Baryon-Photon Ratio in the CMB

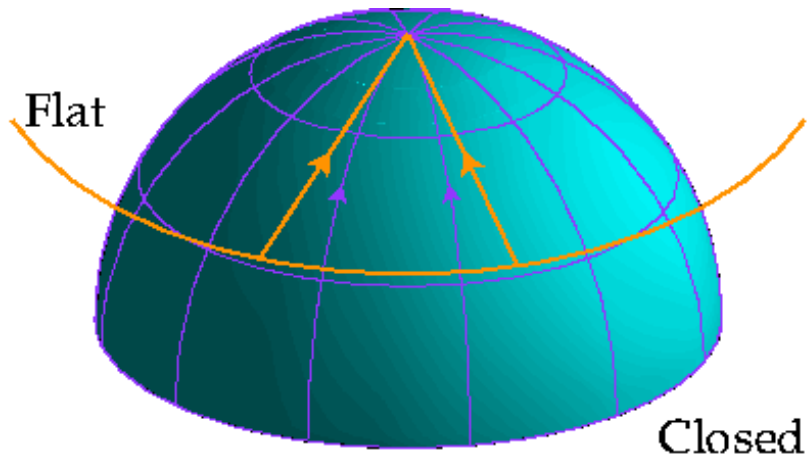
$$\Omega_b$$



Większa gęstość barionów zwiększa efektywną masę cieczy. Większa grawitacja zwiększa kompresję cieczy, a w konsekwencji amplitudę oscylacji

Wpływ geometrii Wszechświata na anizotropię.

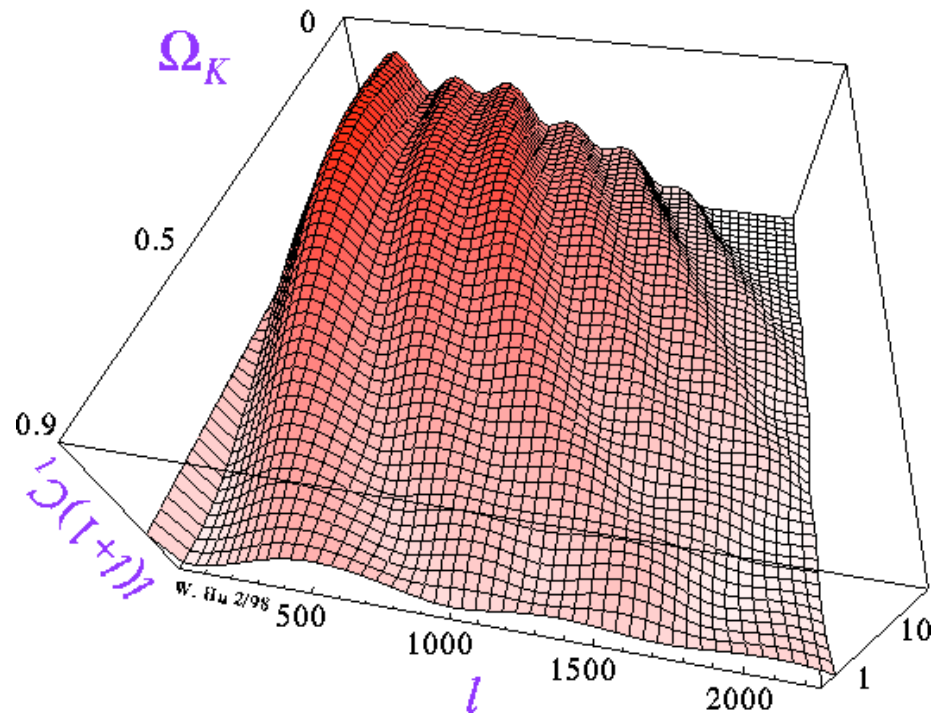
Np. w przypadku dodatniej krzywizny:



Przejście od wielkości fluktuacji do kąta obserwacji zależy od krzywizny.

Curvature
in the CMB

$$\Omega_k \equiv \frac{k}{R^2}$$



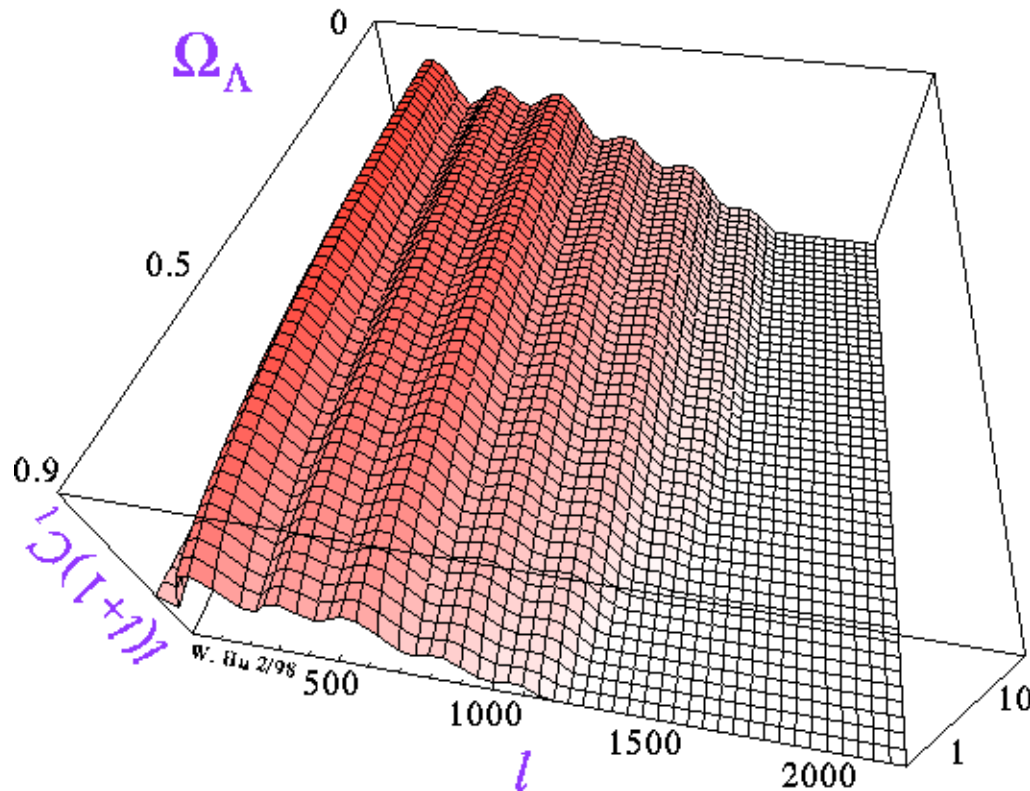
Odległości między maksimami stanowią najlepszy test krzywizny.



$$k = 0$$

Wpływ Λ na anizotropię.

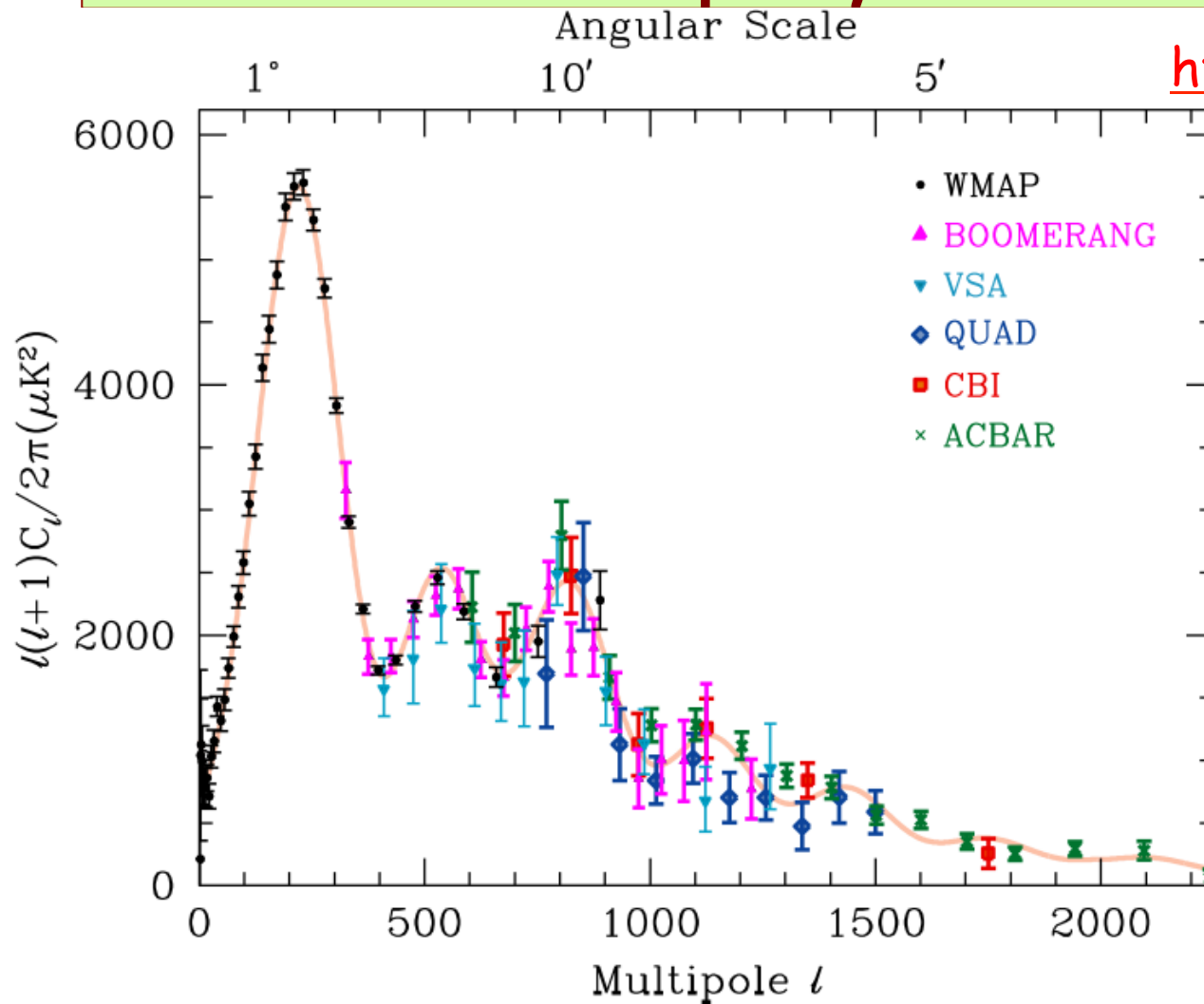
Cosmological Constant
in the CMB



Z pomiarów WMAP:

$$\Omega_\Lambda \cong 0.7$$

Podsumowanie różnych eksperymentów



<http://pdg.lbl.gov/2008/>
Particle Data Group

Summary of recent results (PDG2008)

Parameter	Symbol	Value
Hubble parameter	h	0.73 ± 0.03
Total matter density	Ω_m	$\Omega_m h^2 = 0.128 \pm 0.008$
Baryon density	Ω_b	$\Omega_b h^2 = 0.0223 \pm 0.0007$
Cosmological constant	Ω_Λ	See Ref. 2
Radiation density	Ω_r	$\Omega_r h^2 = 2.47 \times 10^{-5}$
Neutrino density	Ω_ν	See Sec. 21.1.2
Density perturbation amplitude	σ_8	0.76 ± 0.05
Density perturbation spectral index	n	$n = 0.958 \pm 0.016$
Tensor to scalar ratio	r	$r < 0.65$ (95% conf)
Ionization optical depth	τ	$\tau = 0.089 \pm 0.030$
Bias parameter	b	See Sec. 21.3.4

$$\Omega_\nu < 0.04$$

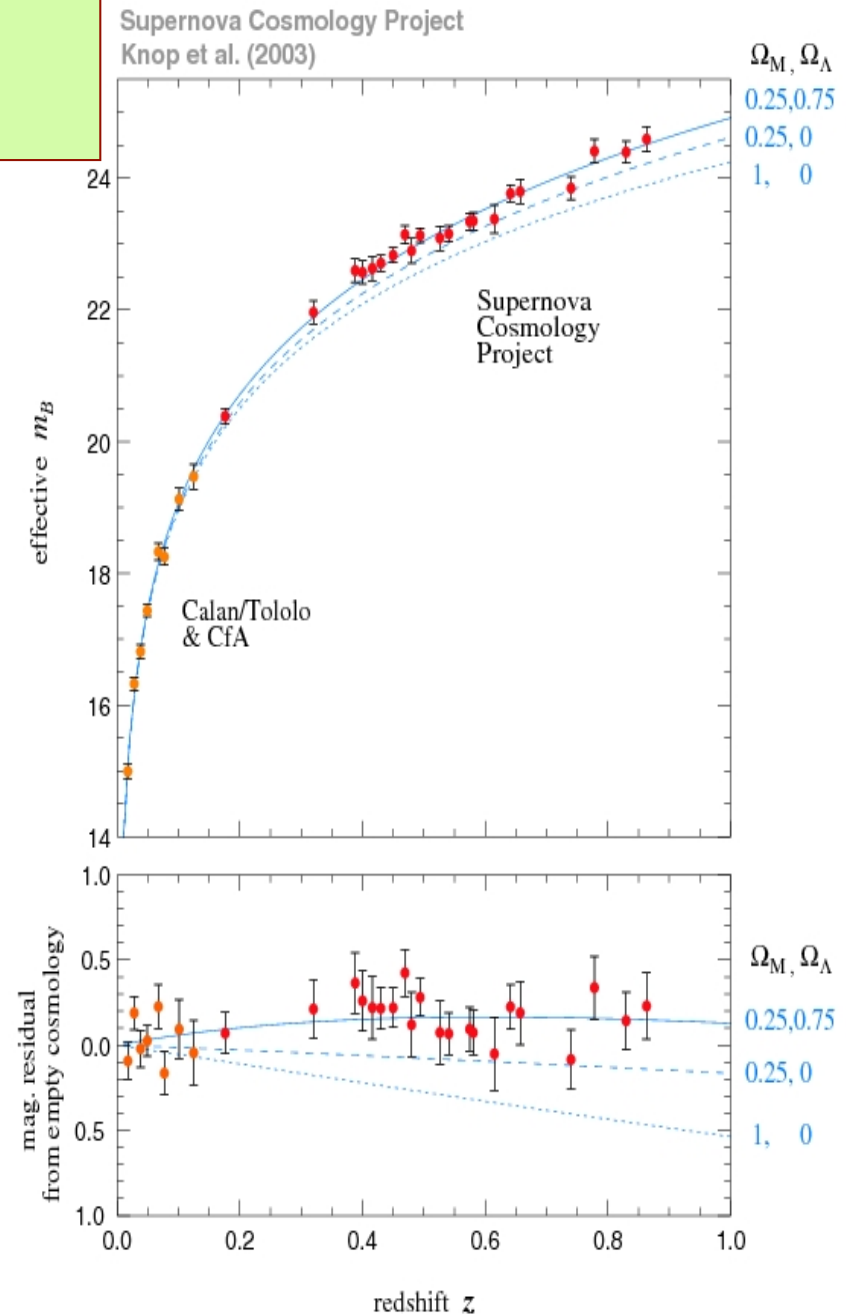
Pomiary odległych supernowych

Supernowe Ia mają na tyle ustaloną jasność w funkcji czasu, że mogą stanowić tzw. „standardowe świeceki”.

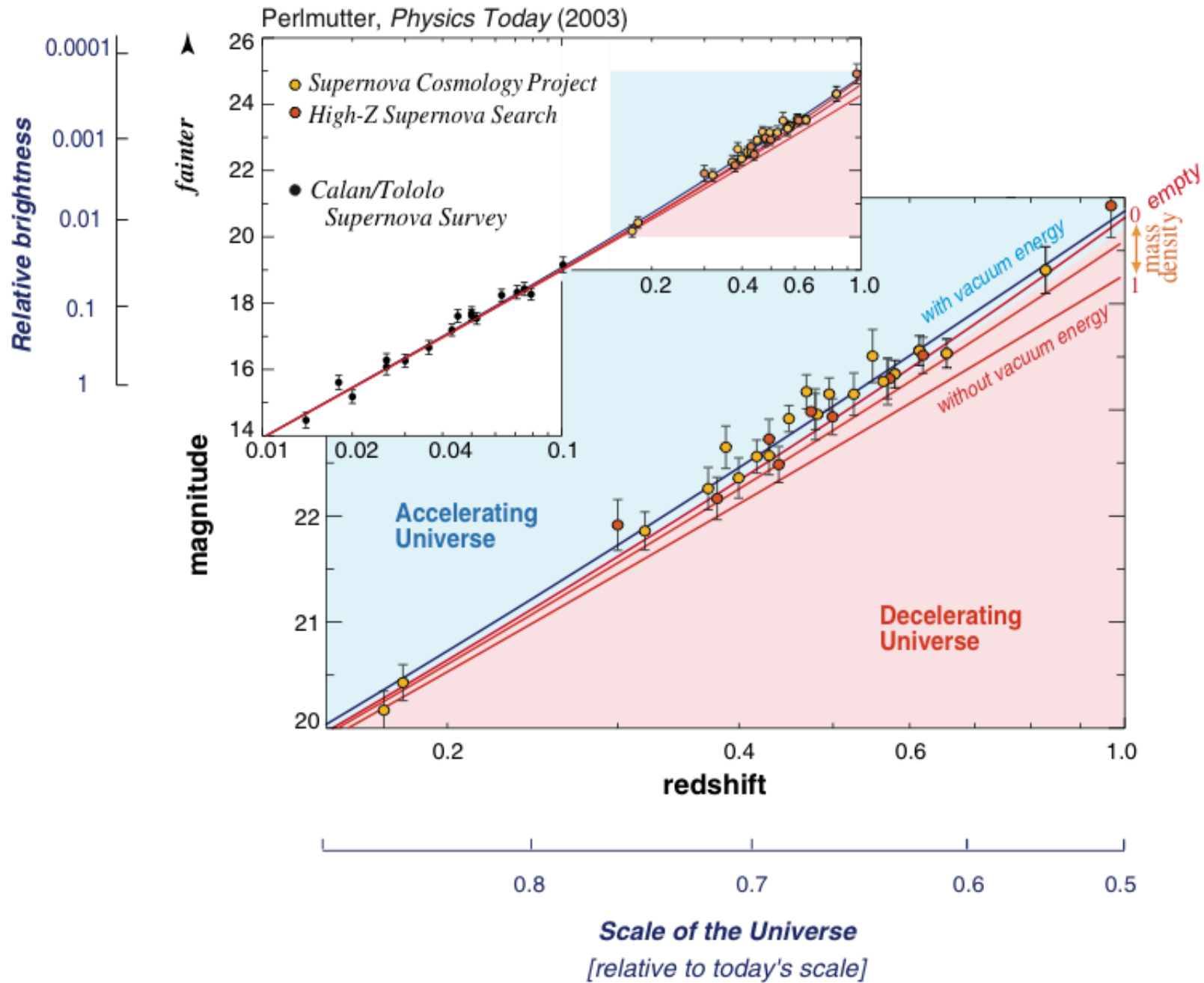
Porównując oczekiwaną jasność z obserwowaną można ocenić odległość

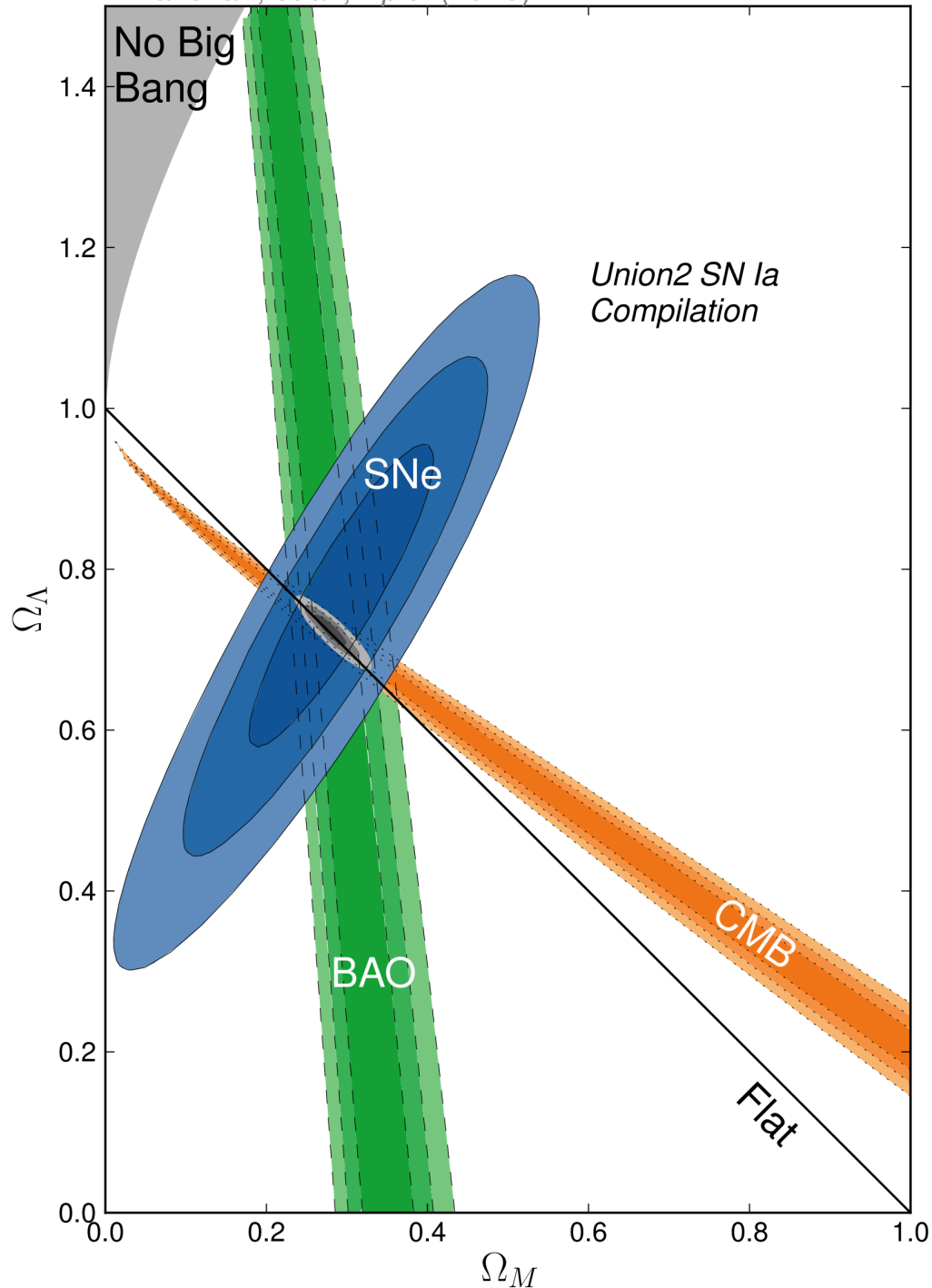
Mierząc „redshift” z można ocenić prędkość oddalania się

Korelacja prędkości z odległością (czyli diagram Hubble’a) umożliwia testowanie modeli kosmologicznych



Type Ia Supernovae





Parametry kosmologiczne

$$\Omega_\Lambda \cong 0.7$$

$$\Omega_{matter} \cong 0.3$$

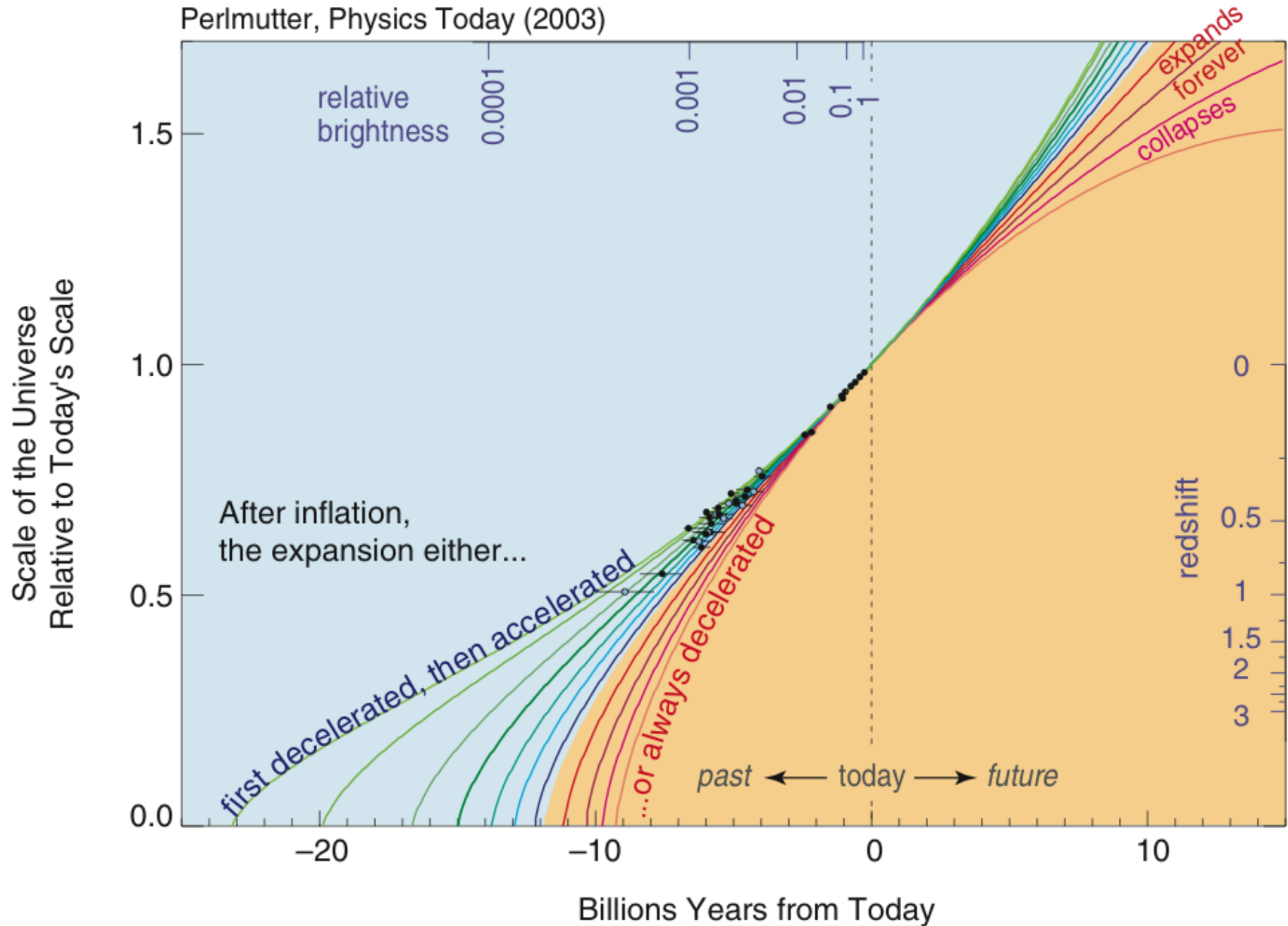
$$k = 0$$

Nie rozumiemy jaka jest natura energii reprezentowanej przez Λ .

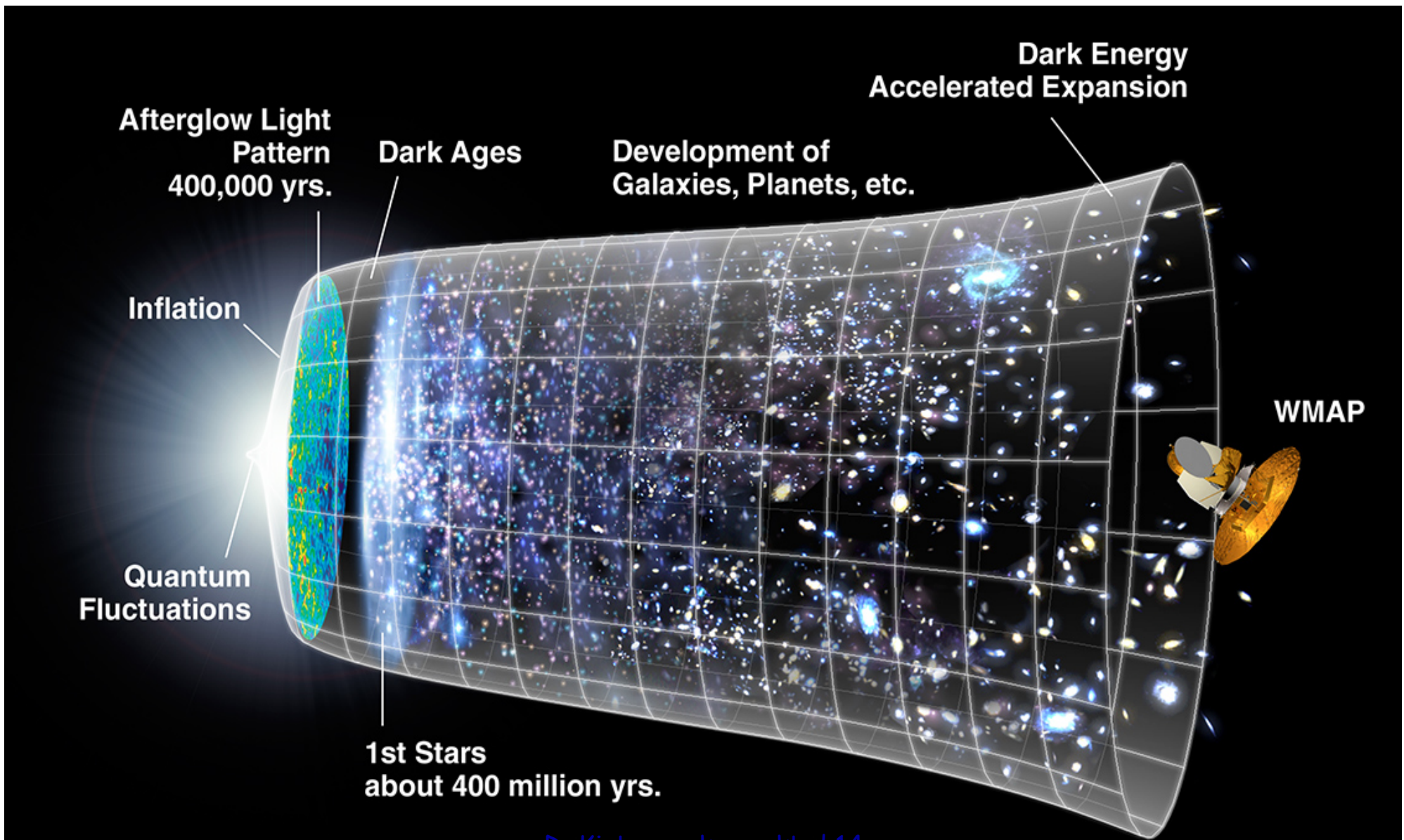
Nazywamy ją **Ciemną Energią**.

Expansion History of the Universe

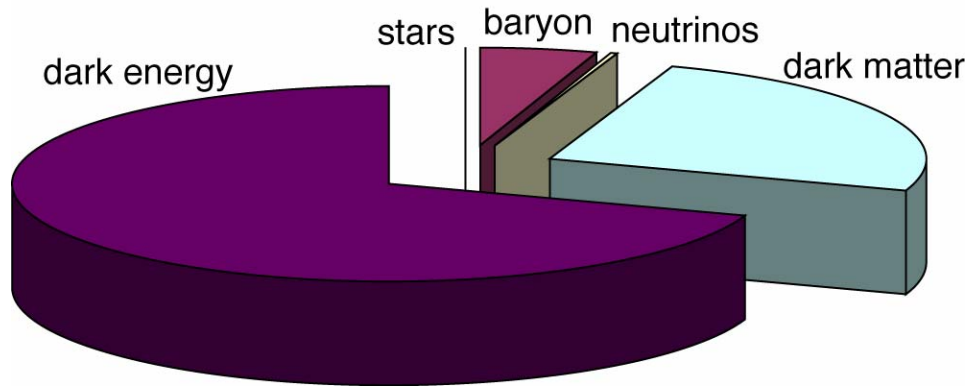
Perlmutter, Physics Today (2003)



Historia Wszechświata



Co wiemy o $\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$?



„Świecąca” materia a więc gwiazdy, gaz:

$$\Omega_\gamma = (4,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-5}$$

Bariony widoczne lub niewidoczne obliczone z nukleosyntezy

$$\Omega_b = 0,042^{+0,003}_{-0,005}$$

Całkowita materia wydedukowana z grawitacyjnej energii potencjalnej galaktyk itd.

$$\Omega_m = 0,24^{+0,03}_{-0,04}$$

Ciemna materia:

$$\Omega_{DM} = \Omega_m - \Omega_b = 0,20^{+0,02}_{-0,04}$$

Ciemna energia

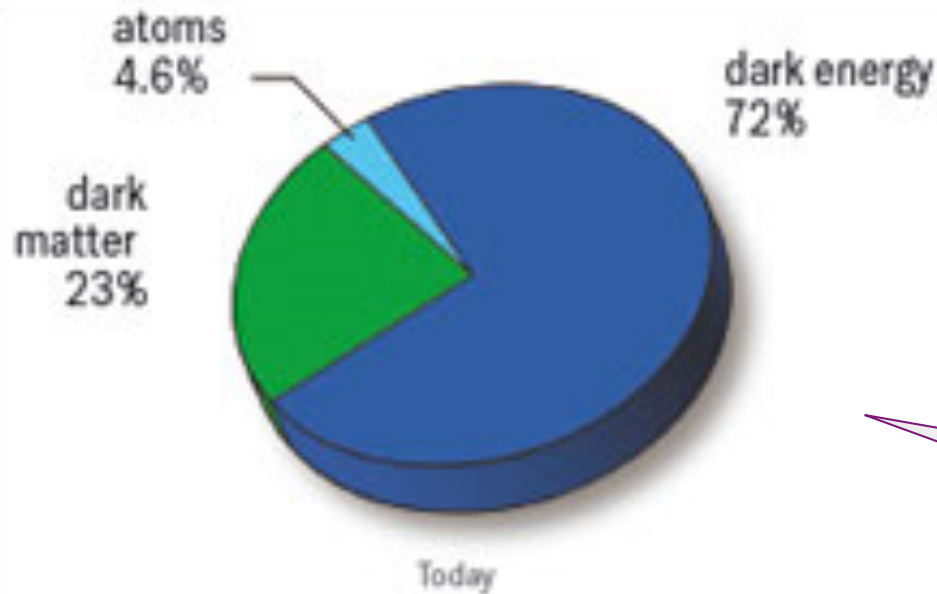
$$\Omega_\Lambda = 0,76^{+0,04}_{-0,06}$$

$$\Omega_{tot} = 1,02 \pm 0,02$$

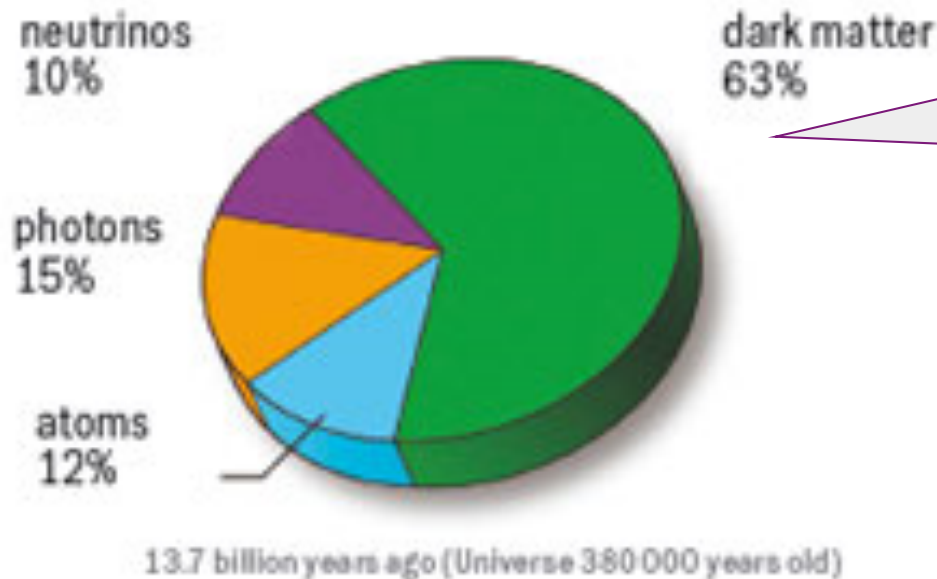
„geometria płaska” $k=0$

Nowe wyniki WMAP (04/2008)

Bilans energii Wszechświata



Dziś



380 tys lat po BB

$$\Omega_{\Lambda} = \frac{\Lambda}{3H^2}$$

Wkład ciemnej energii rośnie z czasem

Asymetria materia-antymateria

Symetria sugeruje, że Wielki Wybuch (BB) wyprodukował te same ilości **materii i antymaterii**. Stąd obecnie obserwowana nadwyżka materii musiała pojawić się na skutek procesów, które nie są symetryczne względem transformacji CP.

Eksperymenty nad mezonami K i B wykazały **łamanie symetrii CP** w sektorze kwarków. Obserwowane łamanie CP może być opisane w ramach Modelu Standardowego, ale nie wystarcza ono do opisu obserwowanej nadwyżki materii.

Pytanie: czy łamanie CP w sektorze leptonowym może wyjaśnić te nadwyżkę?

Leptogeneza

Najpopularniejsze wytłumaczenie asymetrii materii poprzez tzw. **Leptogenezę**

Jeśli neutrino są **cząstkami Majorany**, to elegancki sposób generacji masy wynika z oddziaływania z cząstką H zarówno znanych lekkich neutrin ν jak i **bardzo ciężkich neutrin N** o masach $10^{(9-15)} \text{ GeV}$.

N powinny być produkowane w bardzo wczesnych chwilach BB.

Ponieważ: $N \equiv \bar{N}$ więc możliwe rozpady:

$$N \rightarrow l^- + \dots$$

$$N \rightarrow l^+ + \dots$$

gdzie l^+ , l^- to naładowane leptony

Jeśli: \not{CP} to: $\Gamma(N \rightarrow l^- + \dots) \neq \Gamma(N \rightarrow l^+ + \dots)$

mamy nadwyżkę leptonów nad antyleptonami czyli **Leptogenezę**.
Stąd można dostać nadwyżkę barionów.

Jeśli hipoteza Leptogenezy jest prawdziwa to wszyscy bierzemy się z ciężkich neutrin.



Podsumowanie

- ❖ Kosmologia i fizyka cząstek są blisko związane
- ❖ Kosmologia stała się dziedziną eksperymentalną
- ❖ Teoria Wielkiego Wybuchu potwierdzona przez np:
 - pomiary mikrofalowego promieniowania tła
 - częstości występowania lekkich pierwiatków

ALE

- ❖ Nie wiemy co stanowi 90% energii Wszechświata
 - ciemna materia ?
 - ciemna energia ?
- ❖ Nie rozumiemy jak w trakcie ewolucji Wszechświata złamana została **symetria materia-antymateria**