

Kosmologia

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład X

- Prawo Hubble'a
- Wielki Wybuch i ewolucja Wszechświata
- Promieniowanie tła
- Eksperyment WMAP
- W jakim (Wszech)świecie żyjemy ?...

Prawo Hubble'a

Efekt Dopplera

Przypadek (klasyczny) A:

źródło dźwięku o częstotliwości f poruszające się z prędkością v względem ośrodka w którym prędkość dźwięku wynosi c .

Częstość dźwięku i długość fali mierzona przez obserwatora nieruchomego względem ośrodka:

$$f' = \frac{f}{1 + \frac{v}{c}}$$

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Przypadek (klasyczny) B:

obserwator porusza się z prędkością v względem ośrodka i źródła dźwięku

Mierzona częstość długość fali:

$$f' = f \left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

$$\lambda' = \frac{\lambda}{1 - \frac{v}{c}}$$

Wyrażenia uzyskane w podejściu klasycznym są **różne** dla przypadków A i B.

Istotny jest **ruch względem ośrodka**.

A jak to będzie dla światła ?

Prawo Hubble'a

Efekt Dopplera - przypadek relatywistyczny

Aby zaobserwować efekt Dopplera dla światła, źródło i/lub obserwator musi się poruszać z prędkością porównywalną z prędkością światła.

⇒ należy uwzględnić dylatację czasu

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta)(1 + \beta)}}$$

Ruchome źródło

Poruszające się źródło drga z częstością γ razy mniejszą:

$$f' = \frac{f/\gamma}{1 + \beta} = f \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

⇒ Pełna symetria !

Ruchomy obserwator

Dla poruszającego się obserwatora czas biegnie wolniej, mierzona częstość jest γ razy większa:

$$f' = \gamma f (1 - \beta) = f \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Efekt 'relatywistyczny' nie wyróżnia żadnego układu odniesienia !

Prawo Hubble'a

Przesunięcie ku czerwieni

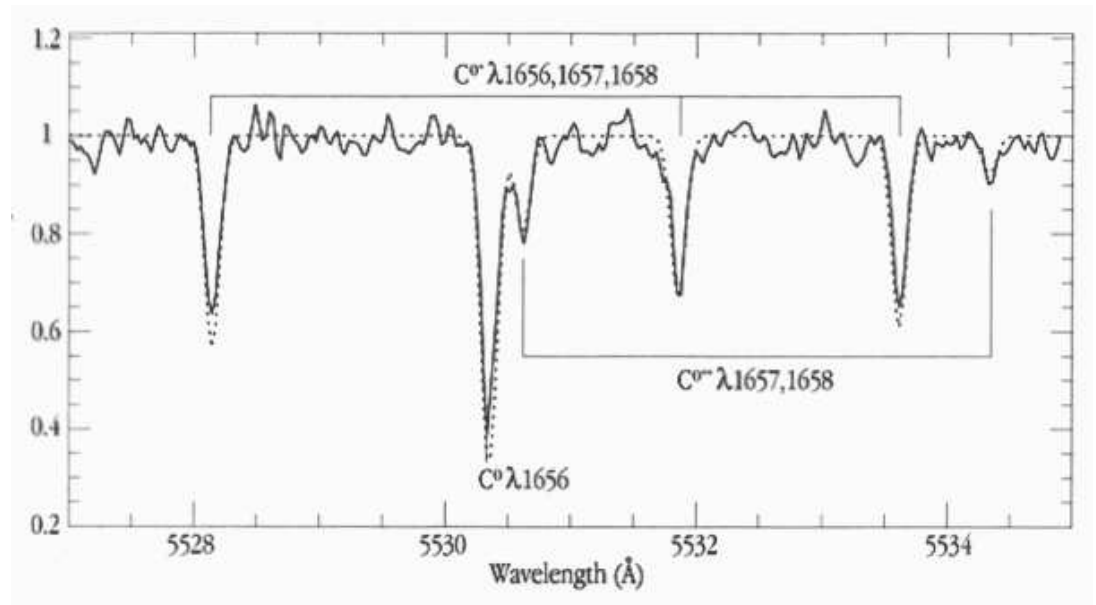
Jeśli **źródło** światła **oddala się** od obserwatora następuje **wydłużenie fali**:

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

$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$: przesunięcie ku czerwieni (ang. "redshift")

W widmach odległych gwiazd zaobserwowano **linie znanych nam pierwiastków** wyraźnie przesunięte ku czerwieni.

Linie węgla w widmie kwazara PKS 1232+0815:



Widoczne przesunięcie odpowiada $z=2.34$

$(\lambda' = 3.34 \lambda) !$

Prawo Hubble'a

Przesunięcie ku czerwieni

Przesunięcie ku czerwieni w widmach odległych galaktyk zaobserwował po raz pierwszy Hubble w 1929 r.

Zauważył on też, że prędkość 'ucieczki' rośnie z odległością: (prawo Hubble'a)

$$v = H r$$

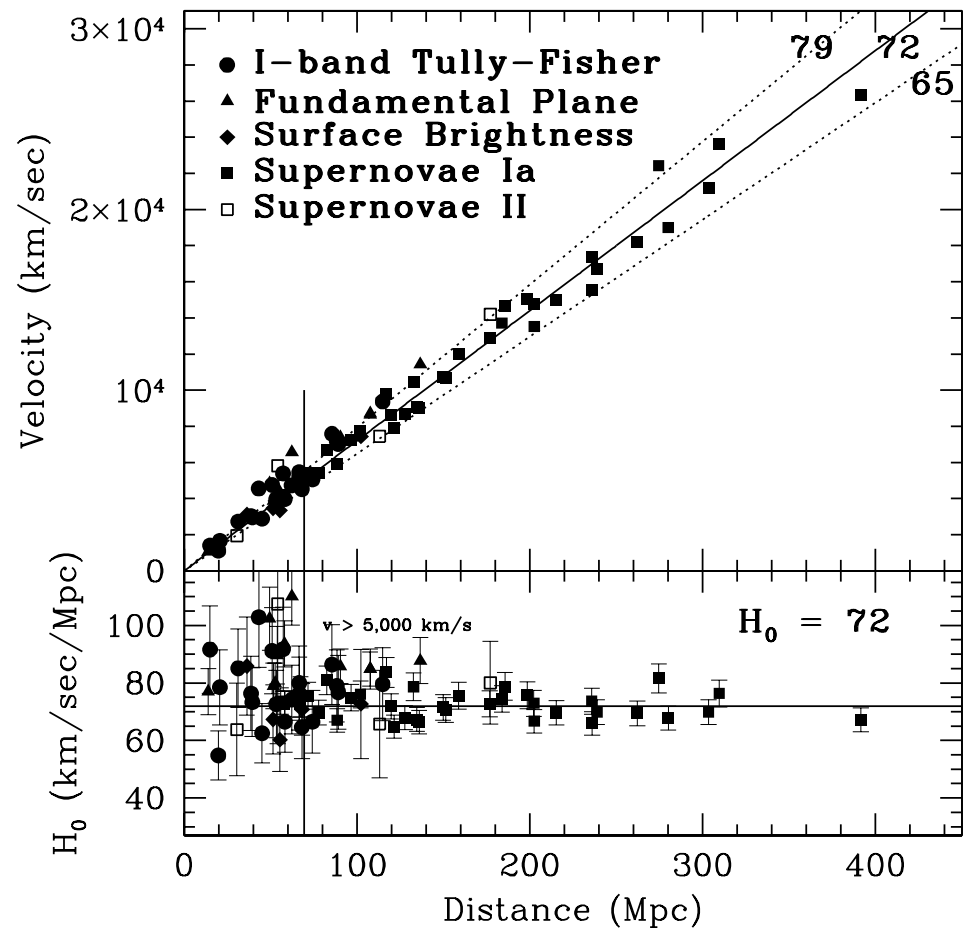
r - odległość od Ziemi, H - stała Hubble'a

Wartość podana przez Hubble'a:

$$H \approx 500 \text{ km/s/Mpc}$$

prawie rząd wielkości za dużo :-)

Obecne pomiary: $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

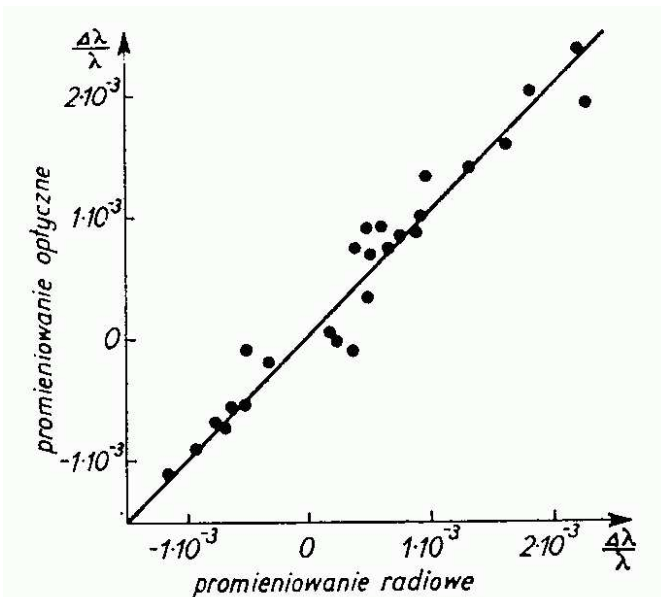


Prawo Hubble'a

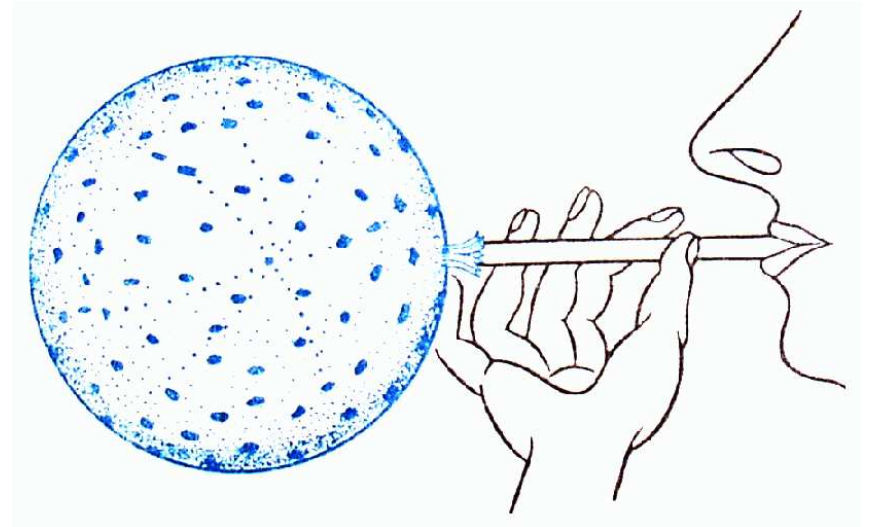
Przesunięcie ku czerwieni

Obserwowane przesunięcie jest **takie samo** w **całym** zakresie **widma** promieniowania elektromagnetycznego.

Porównanie przesunięcia w zakresie optycznym i radiowym:



Obserwacja Hubble'a, że **wszystkie** obiekty **oddalają się**, **nie wyróżnia** w żaden sposób **naszego układu** odniesienia.



Dowolne dwa obiekty oddalać się będą w ten sam sposób.

Ewolucja Wszechświata

Zasada kosmologiczna

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur \Rightarrow “skala kosmologiczna”

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat jest **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Przyjmuje się, że w trakcie ewolucji **Wszechświat** cały czas znajdował się (w **dobrym przybliżeniu**) w stanie **równowagi termodynamicznej**.
Poszczególne rodzaje cząstek anihilują w tym samym tempie co są produkowane...

W miarę **rozszerzania Wszechświata** maleje średnia energia cząstek (temperatura).
Cząstki zbyt **masywne** przestają być “reprodukowane” i **zanikają...**

Albo też “**odprzegają się**”, jeśli zanika ich oddziaływanie z innymi cząstkami...

Wielki Wybuch

Początki Wszechświata

Przyjmujemy, że Wszechświat rozpoczął swoją ewolucję od **pojedynczego punktu**, osobliwości, o nieskończonej gęstości energii...

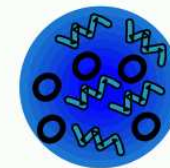
10^{-43} sekundy

Wszechświat **rozszerza się bardzo szybko** (tzw. **inflacja**), nierozróżnialne oddziaływania (nośniki) są w równowadze z materią i antymaterią, np: $W^+W^- \leftrightarrow q\bar{q}$

The big



10^{-43} seconds



10^{32} degrees

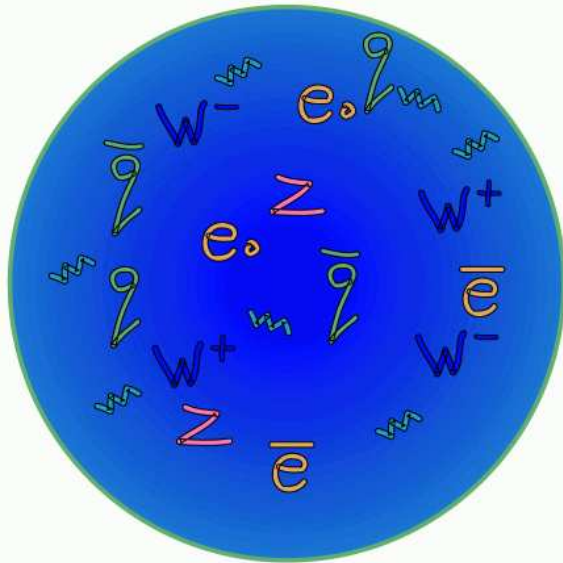
<http://outreach.web.cern.ch/outreach/public/CERN/PicturePacks/BigBang.html>

Wielki Wybuch

10^{-34} sekundy

Rozszerzanie \Rightarrow spadek energii cząstek. Materia znajduje się w stanie **Plazmy Kwarkowo-Gluonowej** (QGP). Oddziaływania silne oddzielają się od elektroślabych.

10^{-34} seconds

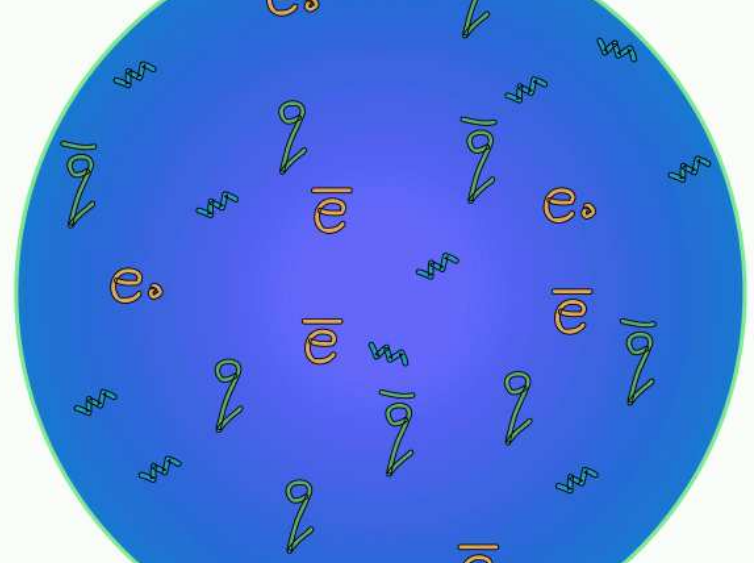


10^{27} degrees

10^{-10} sekundy

Oddzielenie oddziaływań elektromagnetycznych i słabych. **Zanikają swobodne bozony W^\pm i Z^0** (do tej pory w równowadze z fotonami).

10^{-10} seconds



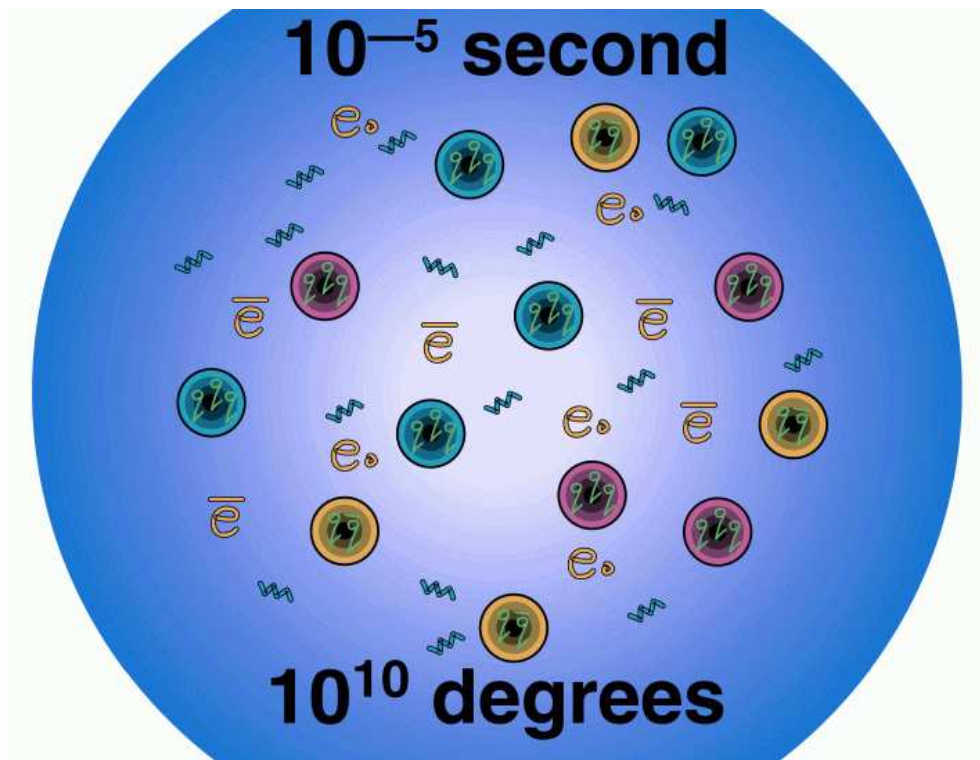
10^{15} degrees

Wielki Wybuch

10^{-5} sekundy

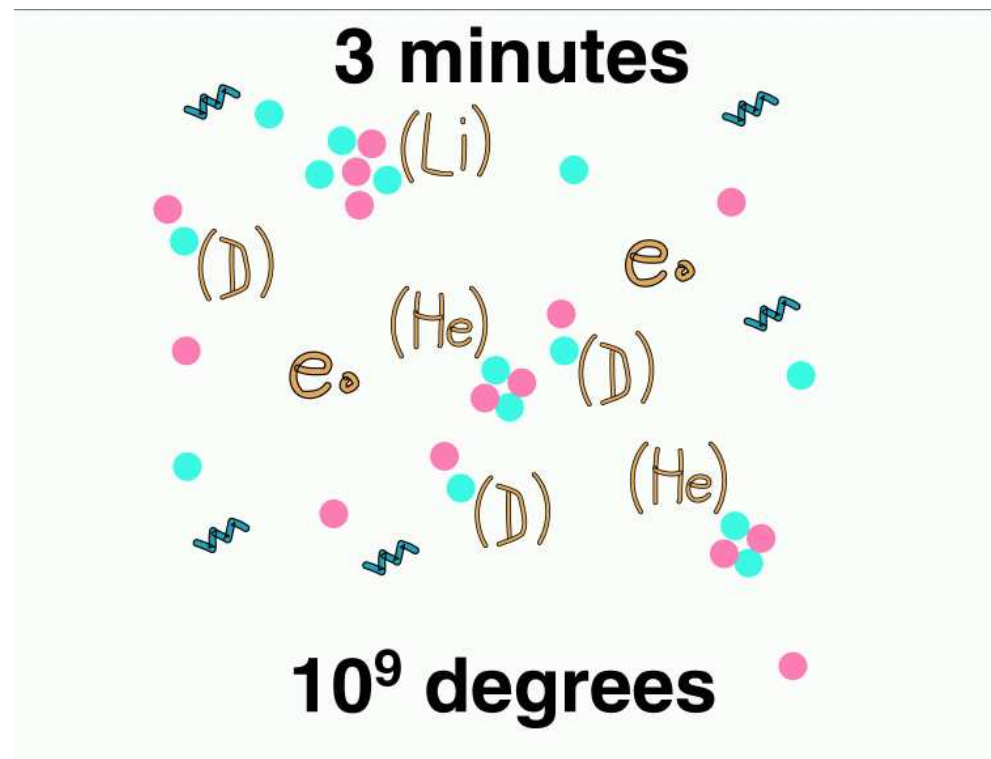
Kwarki formują **neutrony i protony**. **Antymateria zaczyna zanikać** bo promieniowanie jest już zbyt słabe aby ją wciąż wytwarzać.

W międzyczasie naruszenie $B - \bar{B} \dots$



3 minuty

Protony i neutrony tworzą **jądra lekkich pierwiastków**. Wraz z zanikiem reakcji termojądrowych ustala się zawartości różnych izotopów we Wszechświecie.



Wielki Wybuch

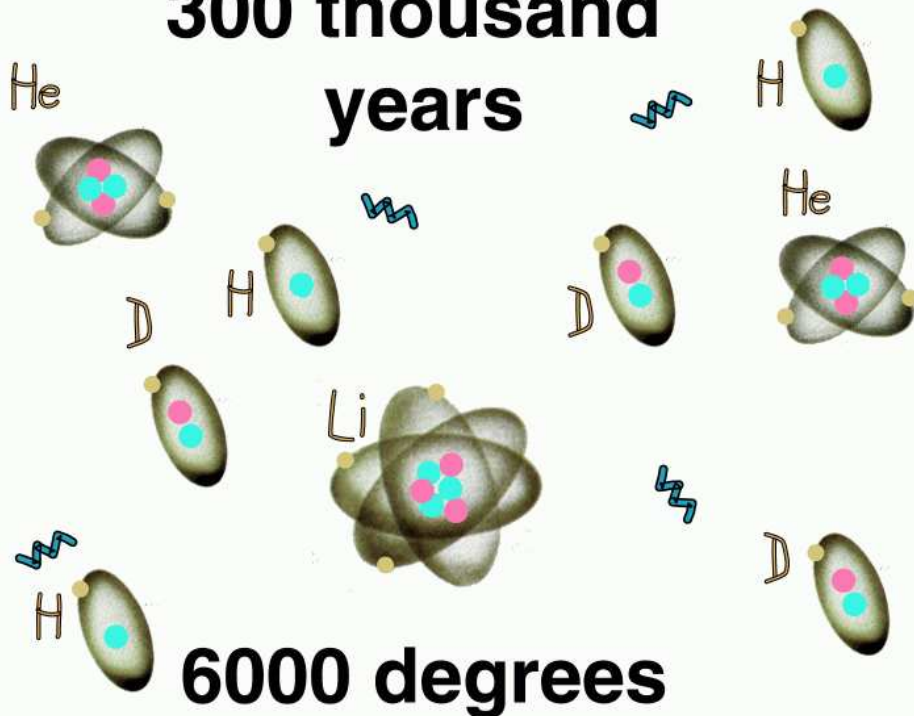
300 000 lat

Elektrony wychwytywane przez jądra tworzą atomy. Wszechświat staje się **przezroczysty dla fotonów**.

1 000 000 000 lat

Formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach.

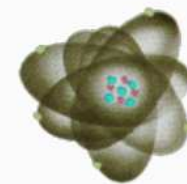
300 thousand years

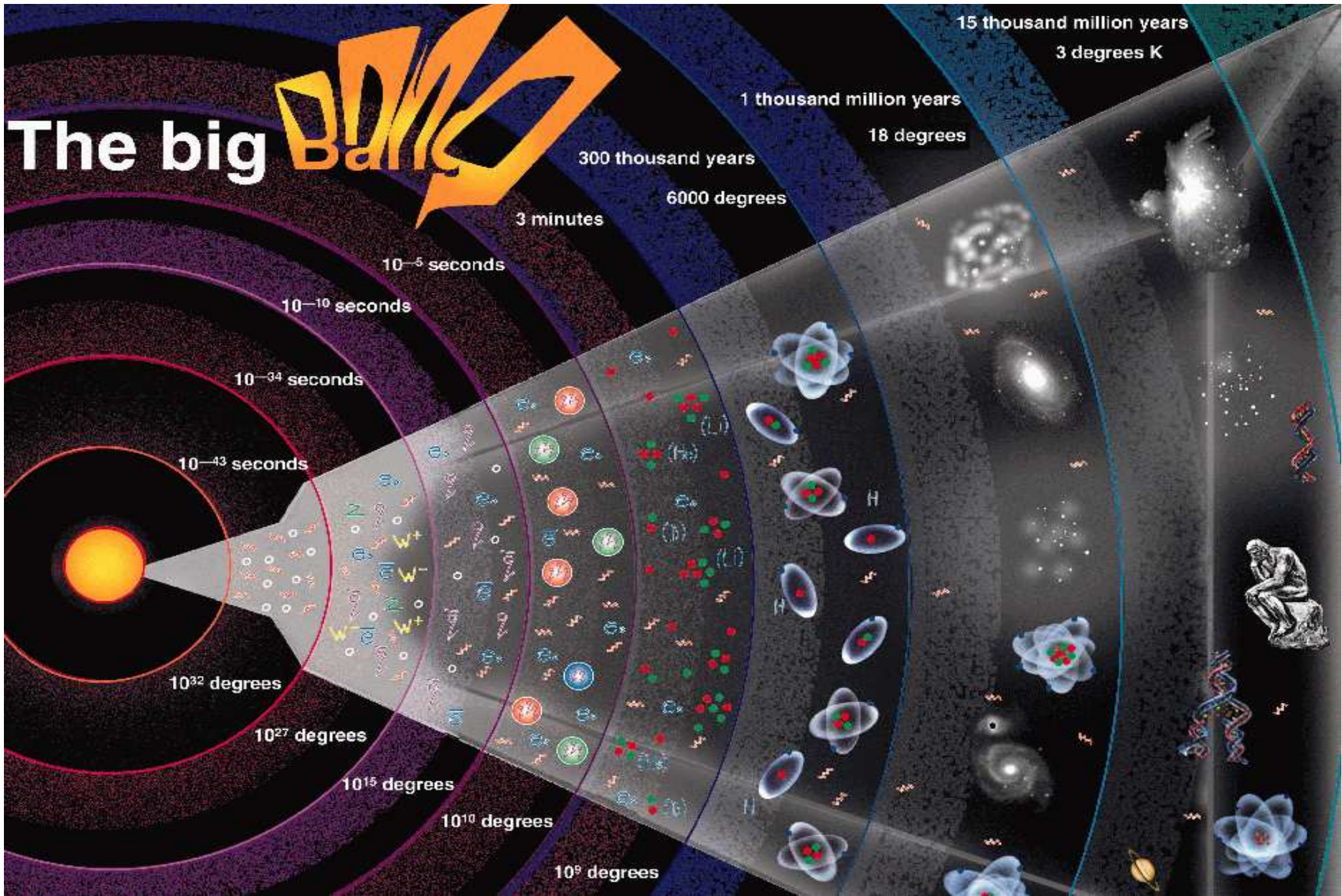


1 thousand million years



18 degrees





Ewolucja Wszechświata

Zasada kosmologiczna

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat jest **jednorodny** i **izotropowy** \Rightarrow materia jest rozłożona **równomiernie**

Zamiast 'przepływu' materii we Wszechświecie (**pozycja zależna od czasu: $r = r(t)$**), możemy opisać **ewolucję Wszechświata** wprowadzając **układ współporuszający się**.

W układzie tym **materia (uśredniona na skalach kosmologicznych) spoczywa** ($r = r_0$).

Zmianę odległości między obiektami opisujemy poprzez wprowadzenie **zależnej od czasu metryki**:

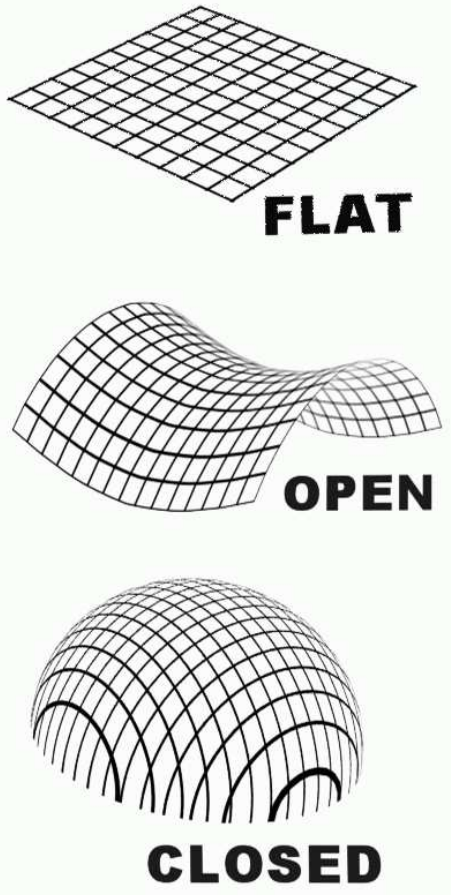
$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - k r^2} + r^2 (d\theta^2 + d\phi^2 \sin^2 \theta) \right]$$

metryka Friedmanna-Robertsona-Walkera, $k = -1, 0, 1$: krzywizna przestrzeni

Ewolucja Wszechświata

Krzywizna przestrzeni

GEOMETRY OF THE UNIVERSE



$$k = 0$$

$$k = -1$$

$$k = +1$$

Równania Friedmann'a

Równanie Einsteina możemy sprowadzić do równań na skalę $R(t)$.

Równania Friedmann'a:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{R^2} + \frac{1}{3}\Lambda$$
$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

gdzie: ρ - gęstość materii, p - ciśnienie

Stałą kosmologiczną Λ wprowadził do swojego równania Einstein, aby 'uratować' statyczny i płaski Wszechświat.

Ewolucja Wszechświata

Gęstość krytyczna

Z równań Friedmanna wynika **zależność** między **krzywizną** przestrzeni a **gęstością** materii we Wszechświecie.

Gęstość krytyczna:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

Parametry gęstości

(gęstość w jednostkach ρ_c):

$$\Omega_m = \frac{\rho}{\rho_c}$$

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

Jeśli $\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$

⇒ Wszechświat jest 'płaski' (euklidesowy)
krzywizna $k = 0$

Jeśli $\Omega_{tot} < 1$

⇒ Wszechświat 'otwarty'
krzywizna $k = -1$

Jeśli $\Omega_{tot} > 1$

⇒ Wszechświat 'zamknięty'
krzywizna $k = +1$

Ewolucja Wszechświata

Szczególny przypadek: $\Lambda = 0$

⇒ gęstość materii (krzywizna przestrzeni) określa jednoznacznie charakter ewolucji:

$$\Omega_m < 1 \quad (k = -1)$$

⇒ Wszechświat będzie zawsze rozszerzał się

$$\Omega_m = 1 \quad (k = 0)$$

⇒ asymptotycznie Wszechświat “zatrzyma” się

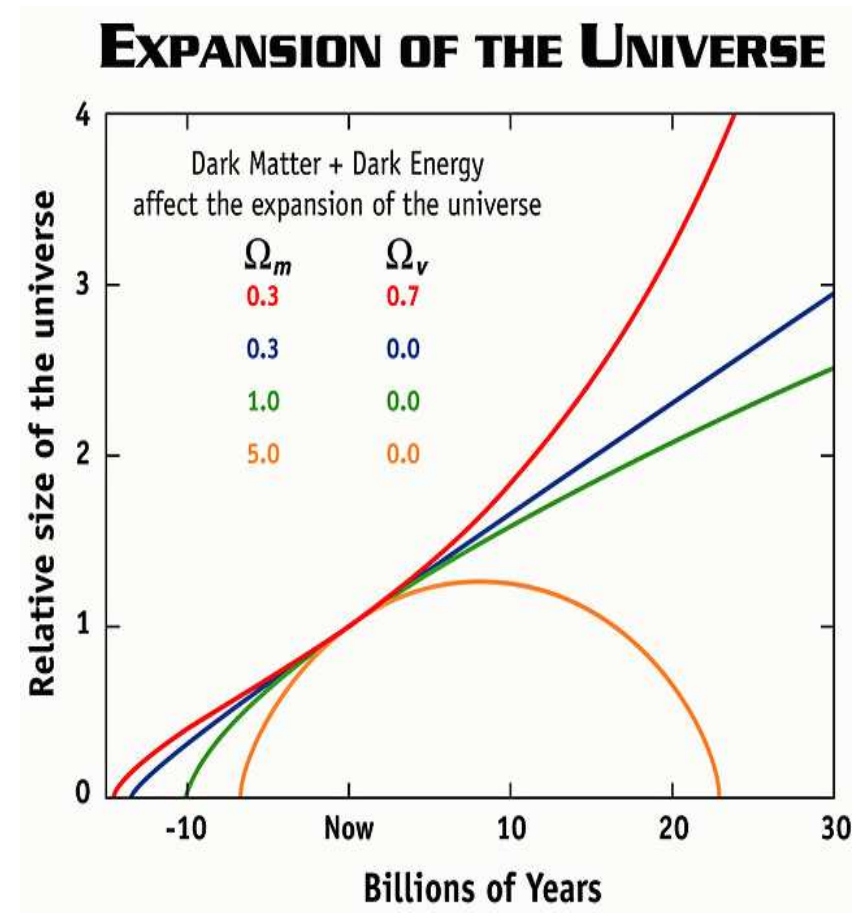
$$\Omega_m > 1 \quad (k = +1)$$

⇒ Wszechświat kiedyś zacznie się zapadać

Do opisu ewolucji Wszechświata wystarczą (w najprostszym modelu) trzy parametry:

$$H, \Omega_m, \Omega_\Lambda$$

Scenariusze ewolucji Wszechświata



Ewolucja Wszechświata

Gęstość materii we Wszechświecie

Krzywizna przestrzeni i charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej
⇒ materia “światlista”

$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)
⇒ materia “barionowa”

$$\Omega_b \sim 0.04$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych (np. rotacja galaktyk)
⇒ materia “grawitacyjna” (całkowita ?)

$$\Omega_m$$

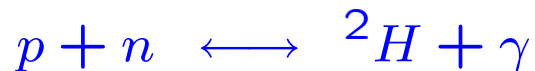
$$\Omega_m > \Omega_b \Rightarrow \text{ciemna materia !?}$$

Nukleosynteza

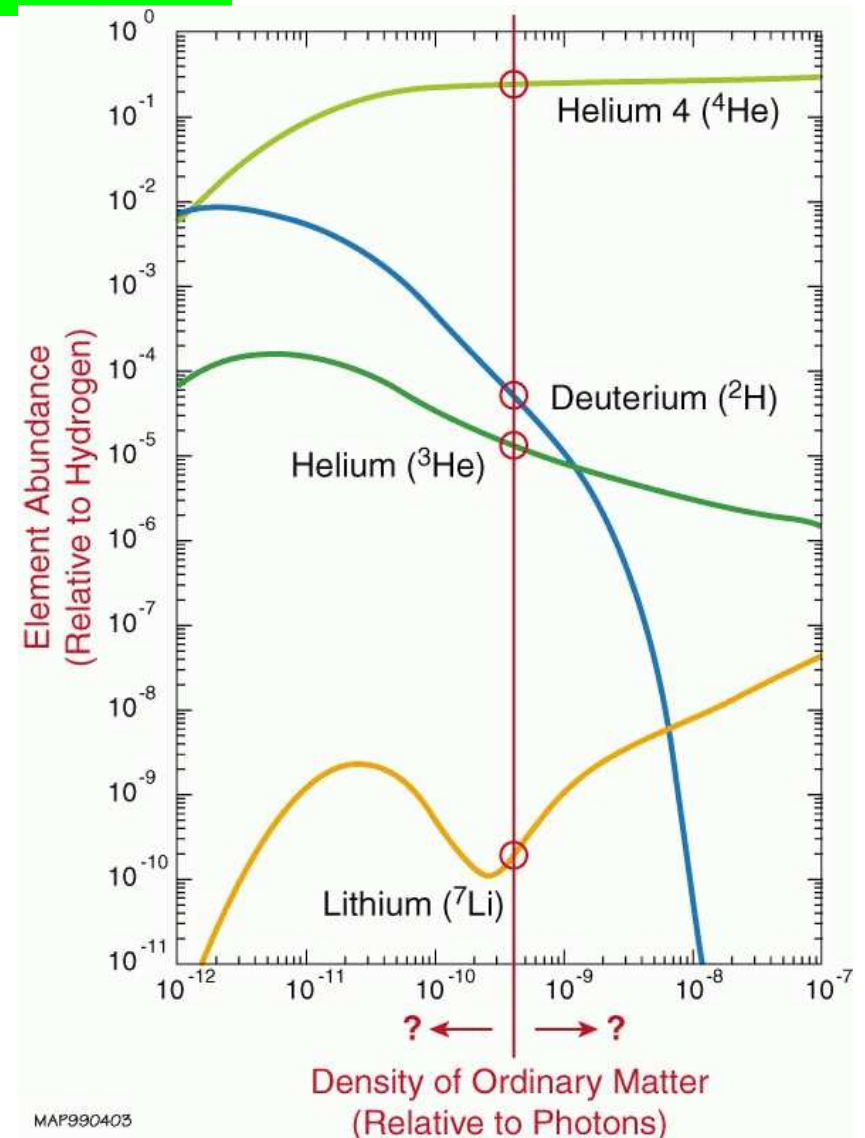
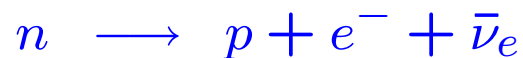
Pierwotna nukleosynteza

W zależności od stosunku gęstości materii (pozostałej po anihilacji materii i antymaterii) do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

Produkcja deuteru:

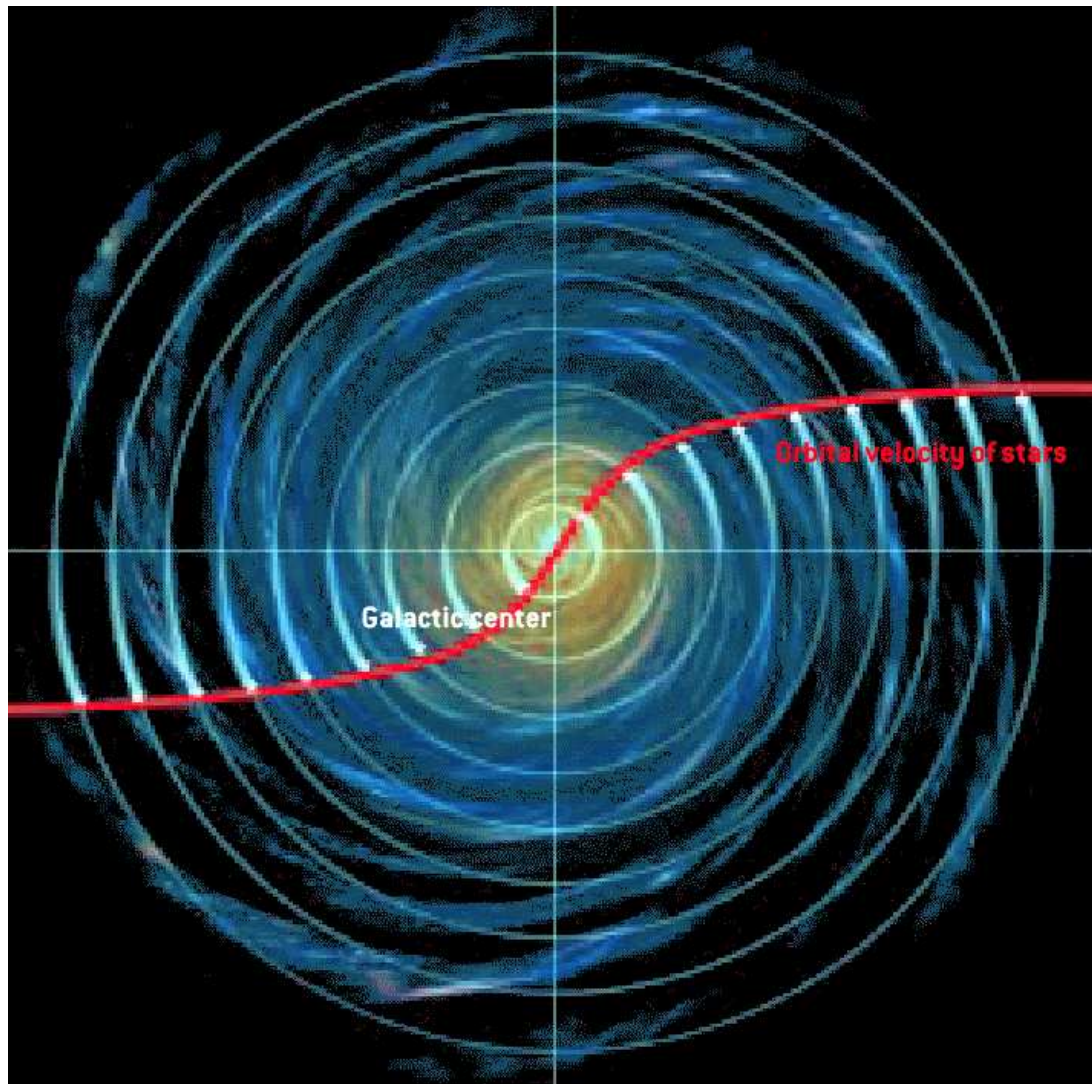


Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):

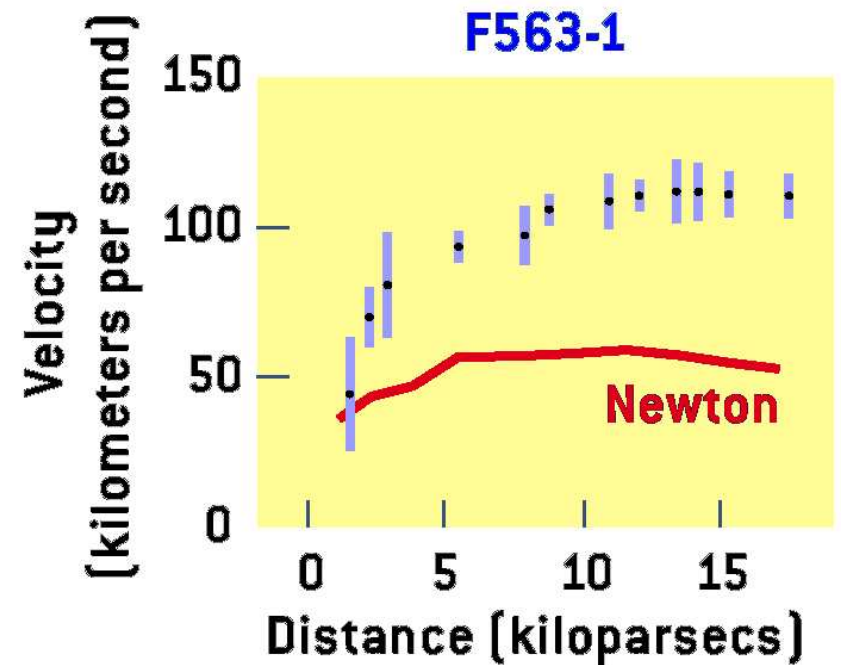


Rotacja galaktyk

Ciemna materia ?



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.



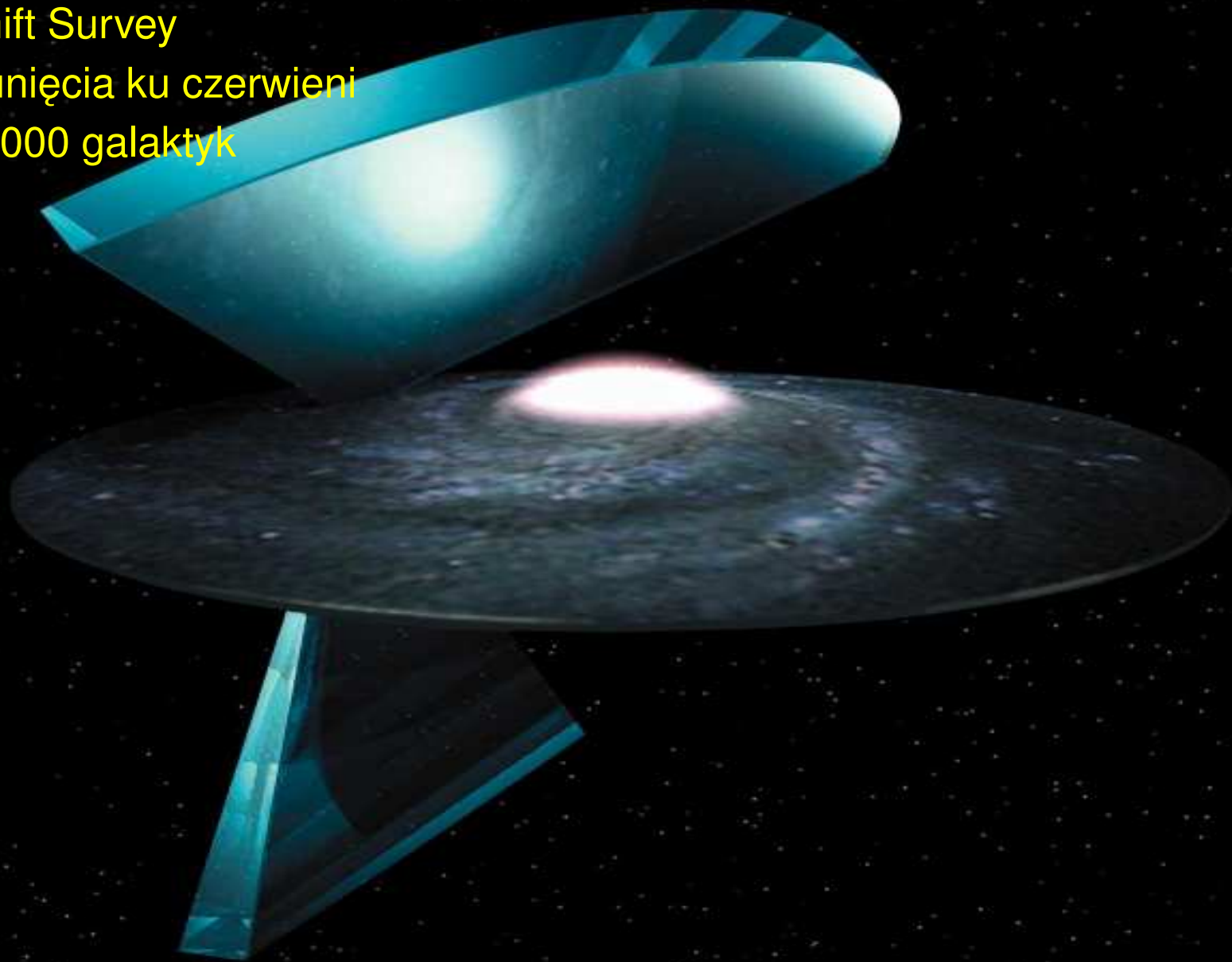
Ramiona wirują szybciej niż oczekiwaliśmy z praw grawitacji i dynamiki

⇒ ciemna materia ?

Projekt 2dF

Galaxy Redshift Survey

pomiar przesunięcia ku czerwieni
dla około 250 000 galaktyk



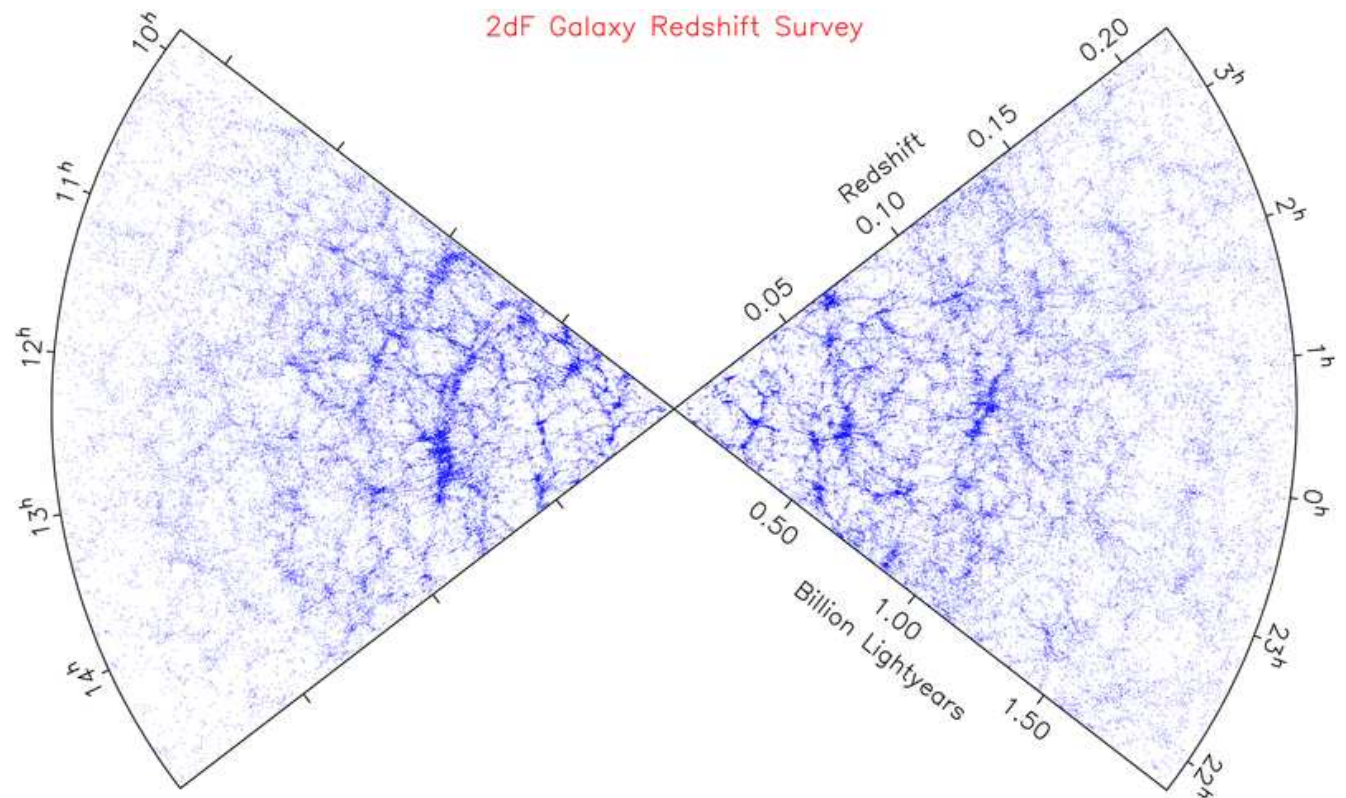
Przesunięcie ku czerwieni

Ciemna materia ?

Znana nam materia barionowa nie wystarcza też do opisu oddziaływań grawitacyjnych na skalach międzygalaktycznych

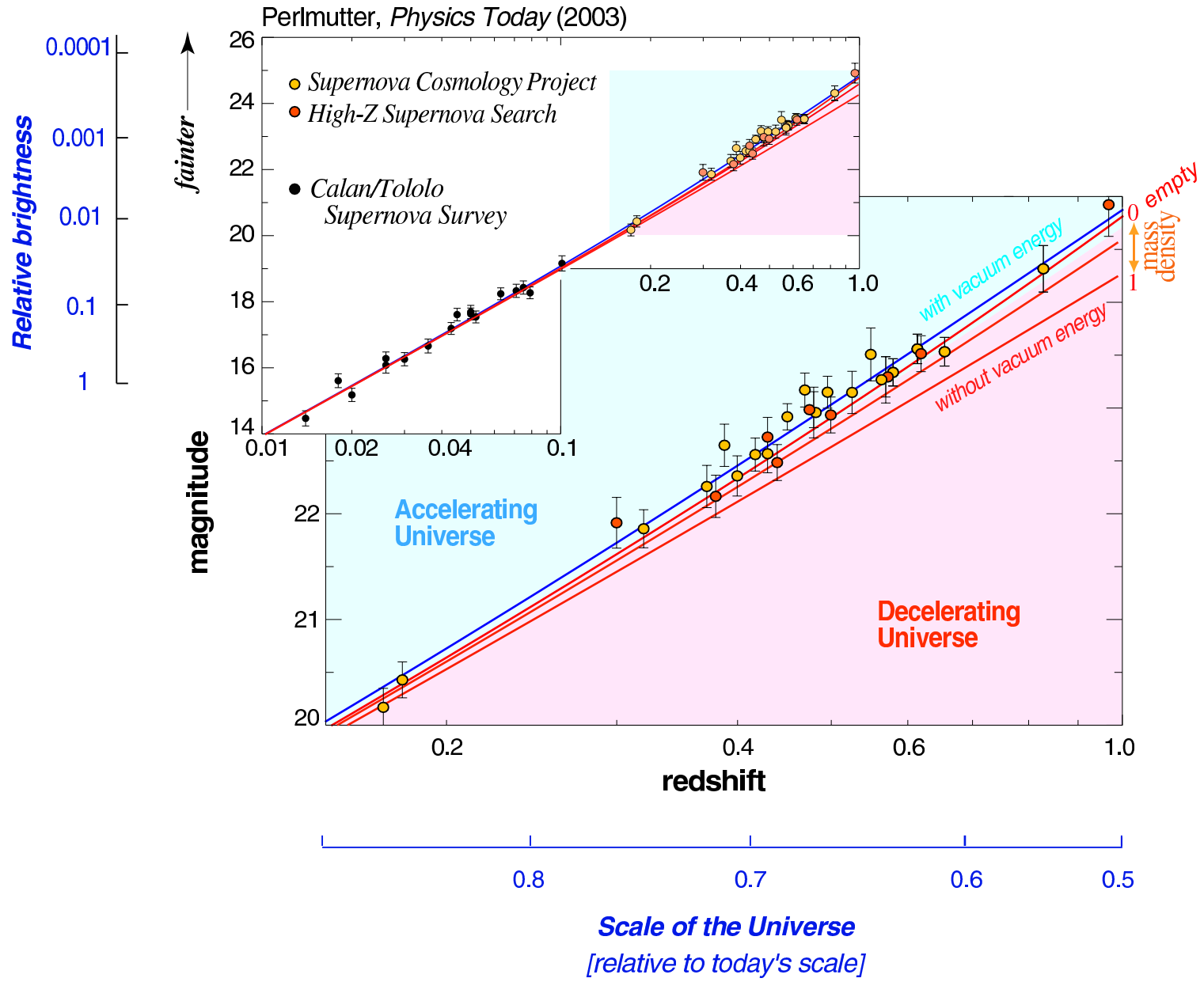
Wyniki 2dFGRS \Rightarrow

$$\Omega_m \sim 0.3$$



Supernova Cosmology Project

Type Ia Supernovae



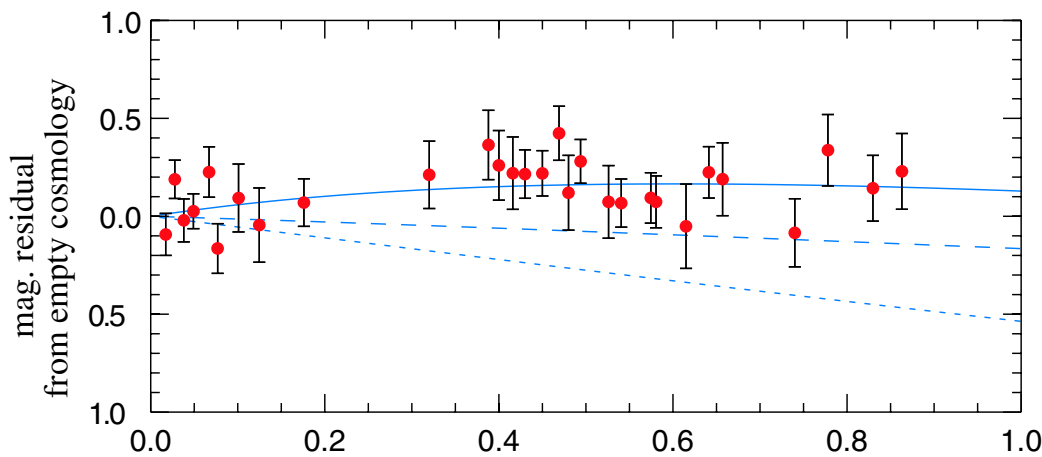
Ewolucja Wszechświata

Pomiar stałej Hubblea

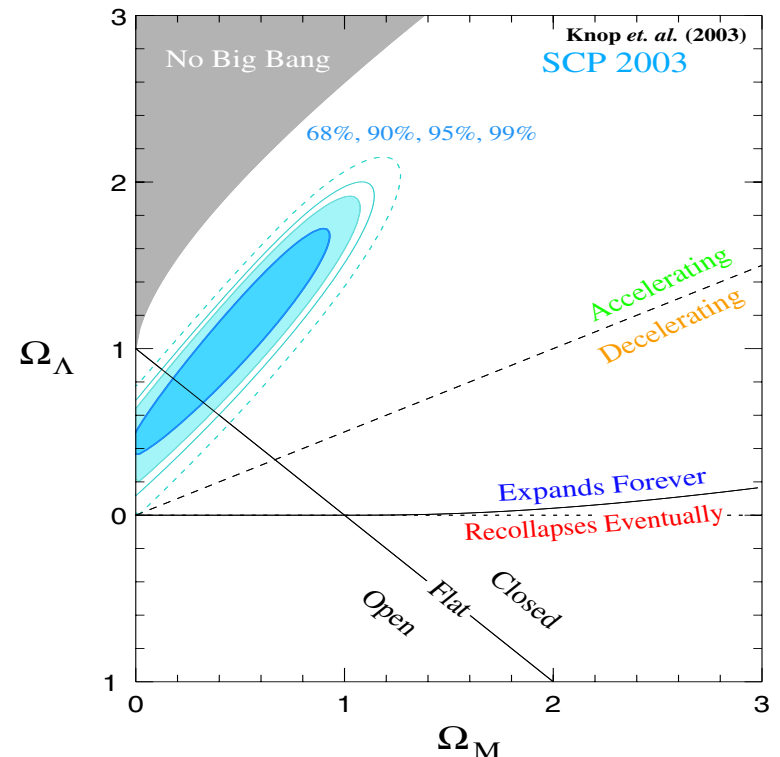
Supernowe typu 1A są najlepszym obiektem do pomiaru ekspansji Wszechświata.

Są to tzw. “świece standardowe”. Wiemy dokładnie jaka jest ich absolutna jasność
⇒ jasność obserwowana definiuje odległość.

Jasność obserwowana, w stosunku do oczekiwanej dla modelu z $\Omega_{tot} = 0$:



“Redshift” bardzo odległych obiektów niesie informację o “historii”, ewolucji Wszechświata (światło wyemitowane bardzo dawno temu) ⇒ możemy dopasować parametry Ω_M i Ω_Λ :



Promieniowanie tła

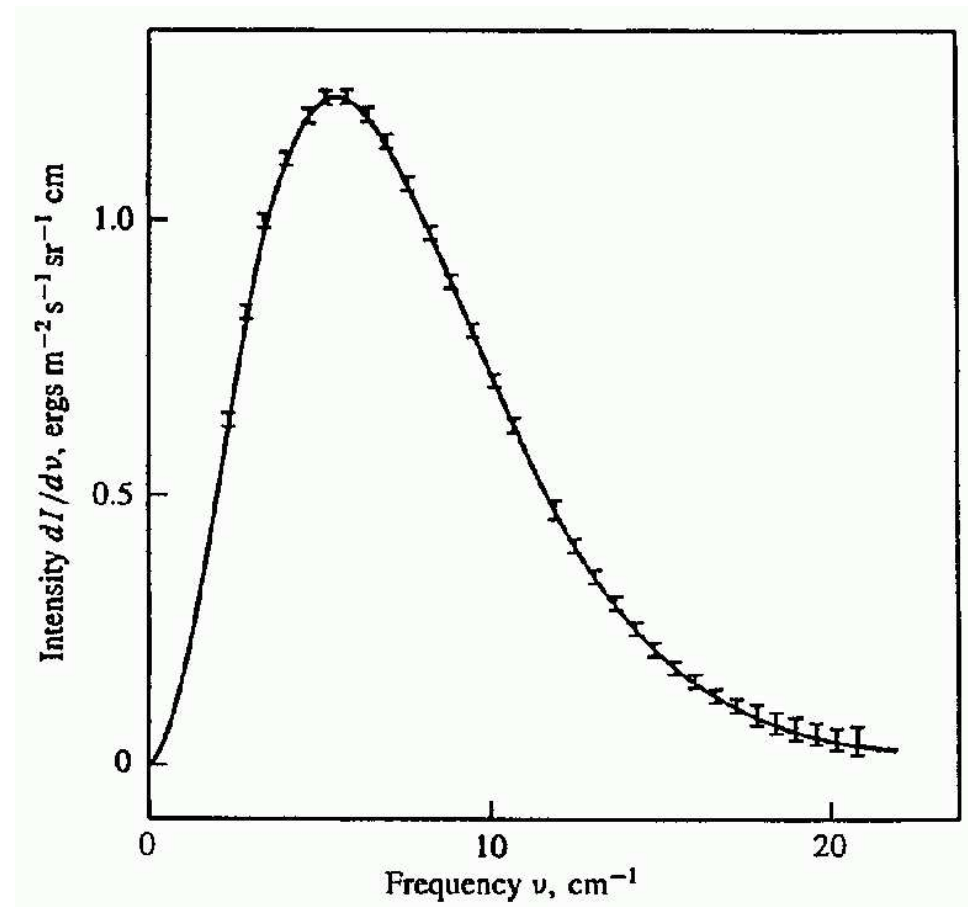
Odkrycie

Mikrofalowe promieniowanie tła (CMB) zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzisa i R.W.Wilsona.

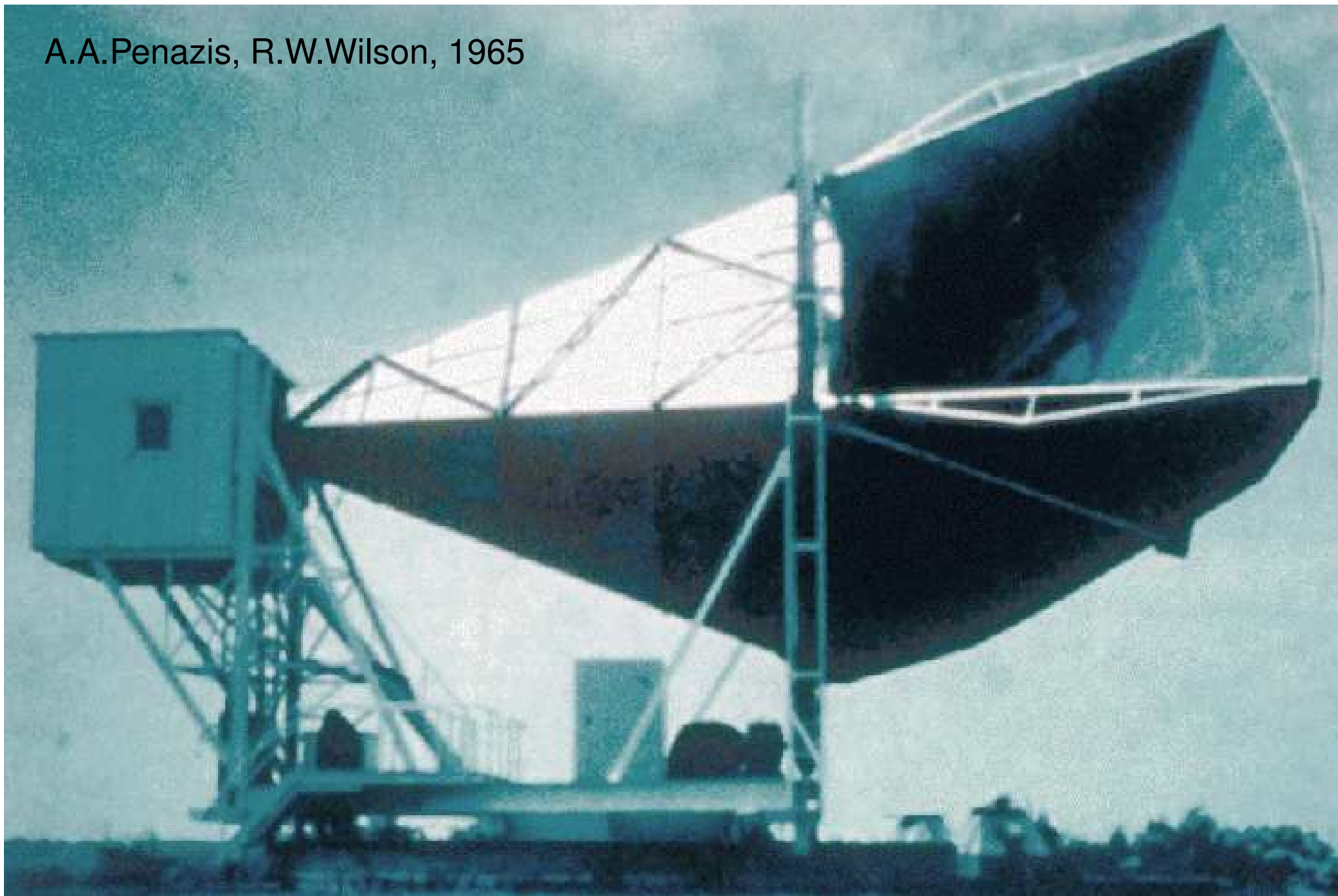
Rozkład widmowy promieniowania zgadza się z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego.

$$T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

Wyniki z satelity COBE: (1999)



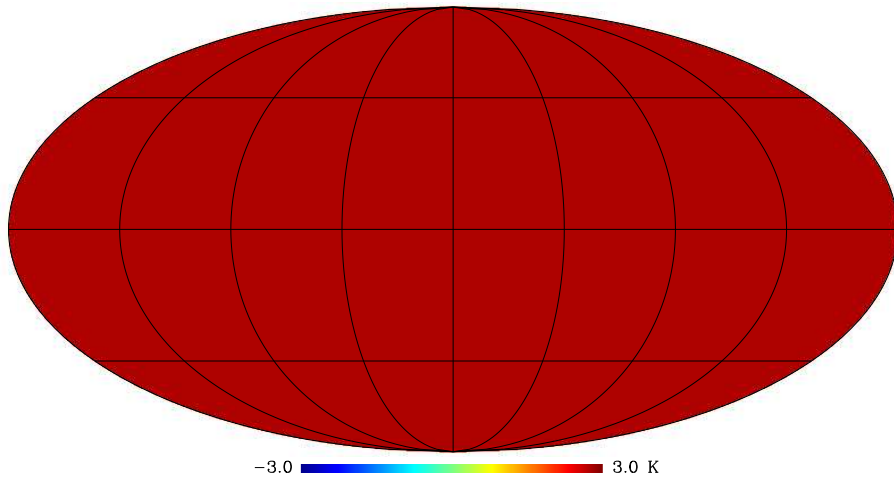
A.A.Penazis, R.W.Wilson, 1965



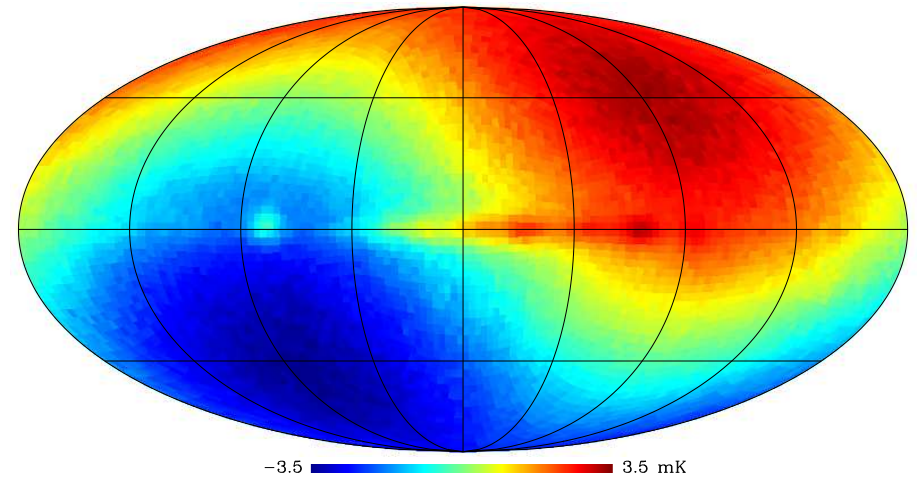
Promieniowanie tła

Rozkład kątowy

W pierwszym przybliżeniu ($\Delta T \sim 1K$)
promieniowanie tła jest **izotropowe**:



Jednak gdy przyjrzymy się bliżej
($\Delta T \sim 1mK$):

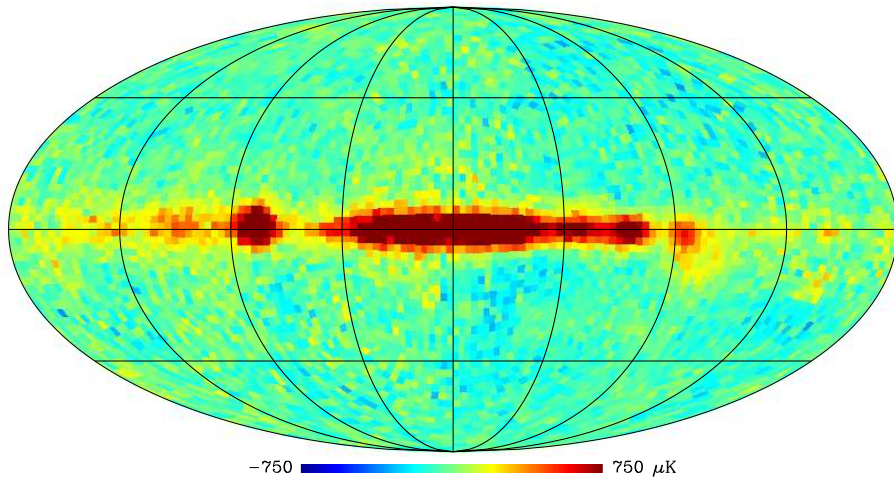


widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem
'globalnego' układu.

Promieniowanie tła

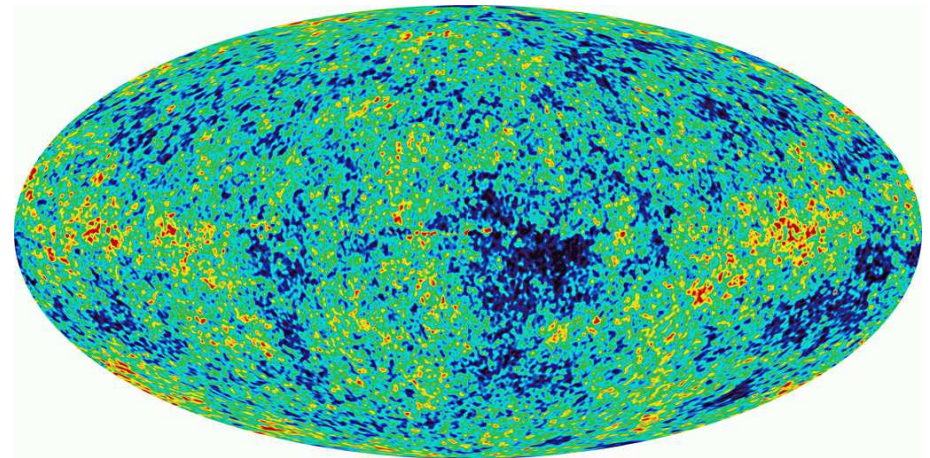
Rozkład kątowy

Odejmując wpływ efektu Dopplera
($\Delta T \sim 200 \mu K$):

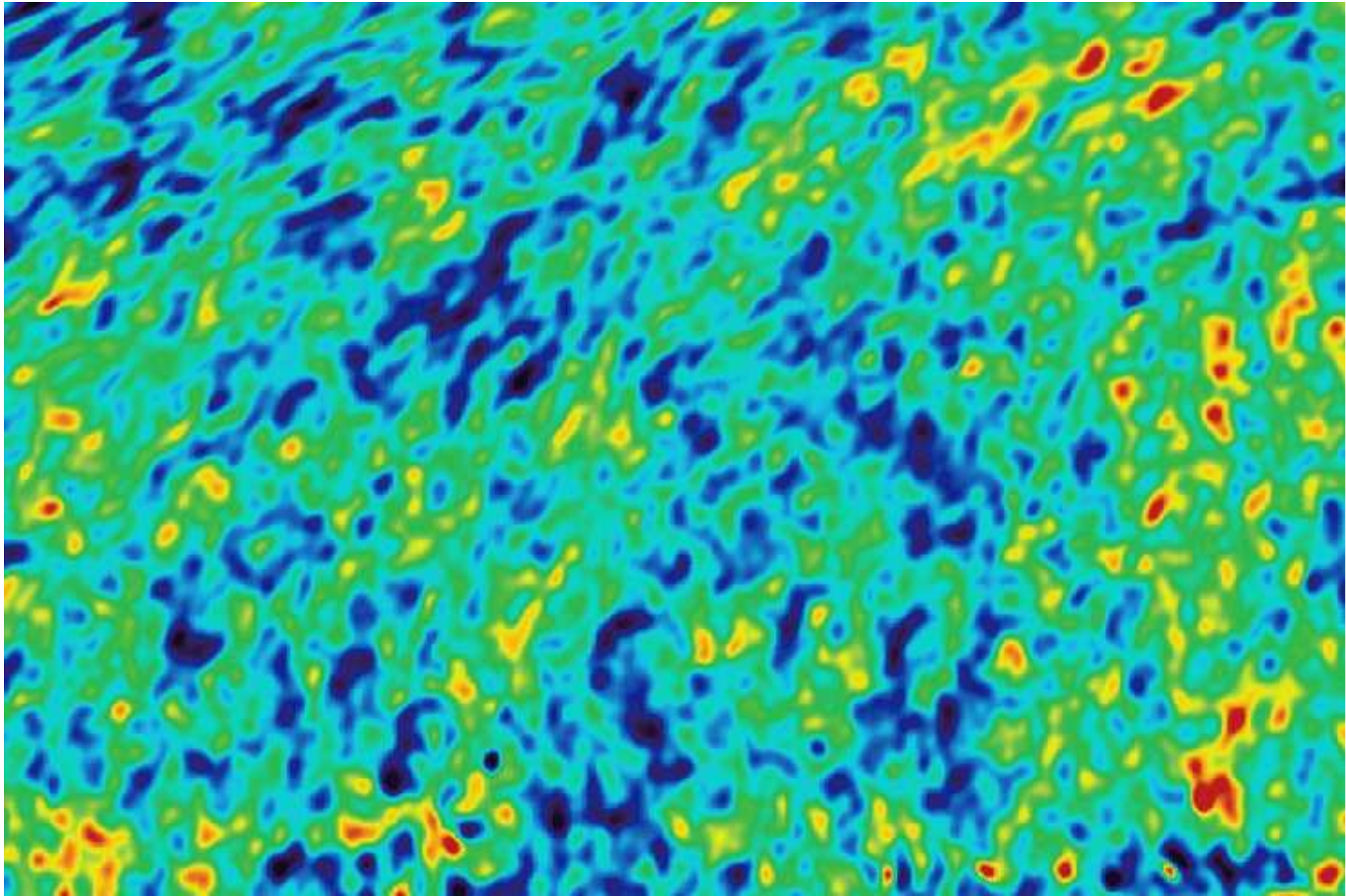


⇒ widzimy promieniowanie naszej
galaktyki (**Drogi Mlecznej**)...

Odejmując promieniowanie **Galaktyki** i
innych znanych **źródeł** ($\Delta T \sim 100 \mu K$):



⇒ zaczyna być ciekawie !!!



Promieniowanie tła

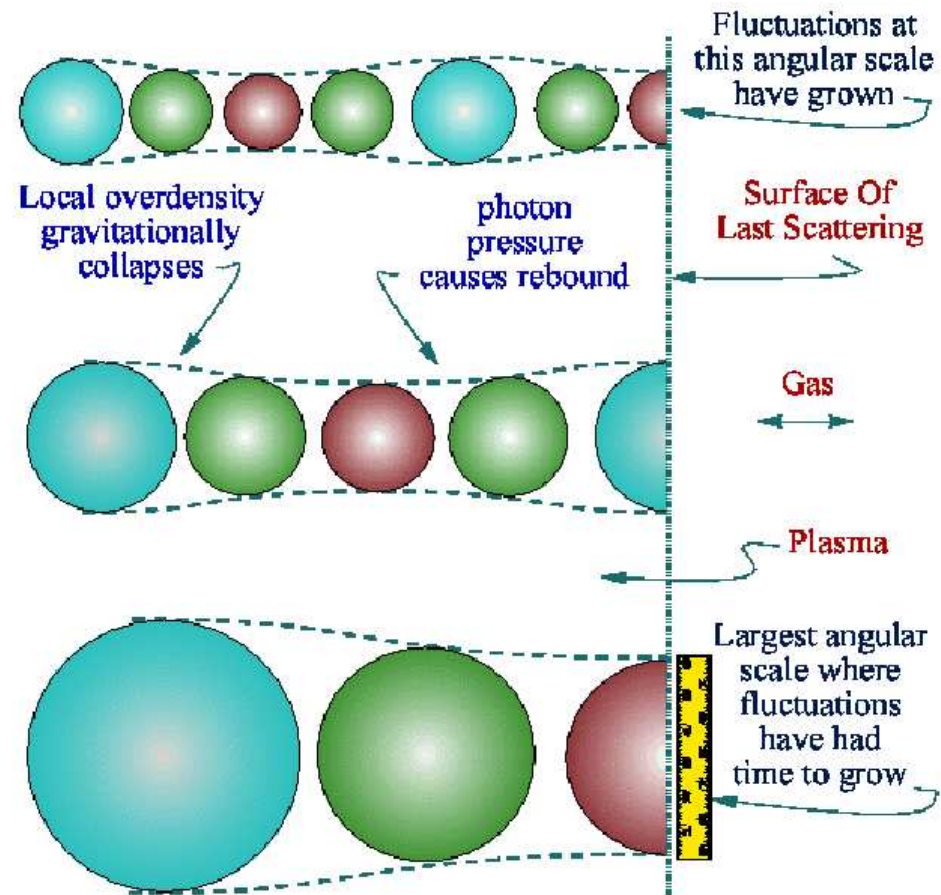
Fluktuacje

Fluktuacje promieniowania wynikają z faktu, że Wszechświat w momencie 'oddzielenia' promieniowania nie był 'statyczny'.

Cały czas 'oscylował' wokół stanu równowagi, w którym ciśnienie promieniowania równoważy przyciąganie grawitacyjne ⇒

Charakter fluktuacji w promieniowaniu tła zależy od rozmiarów Wszechświata w chwili oddzielenia promieniowania...

⇒ zależy od parametrów kosmologicznych

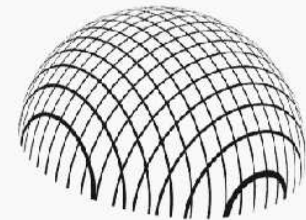
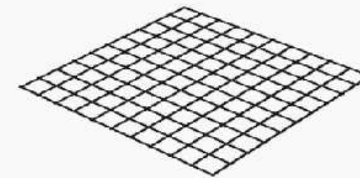
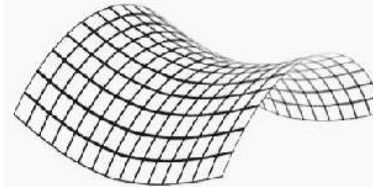
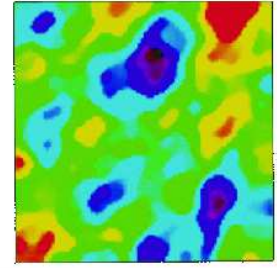
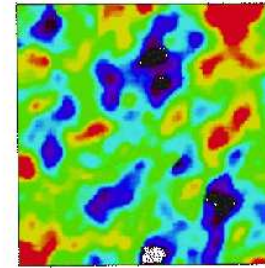
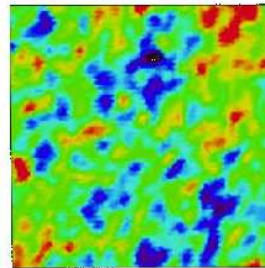
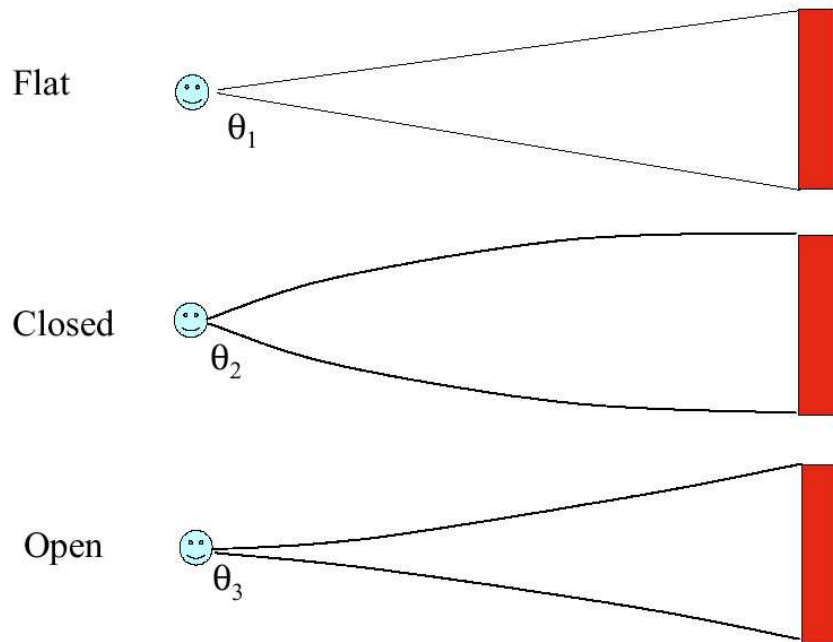


Promieniowanie tła

Fluktuacje

Rozmiary fluktuacji jakie obecnie obserwujemy zależy też silnie od **krzywizny** Wszechświata !

Wyniki symulacji:



OPEN

FLAT

CLOSED

Promieniowanie tła

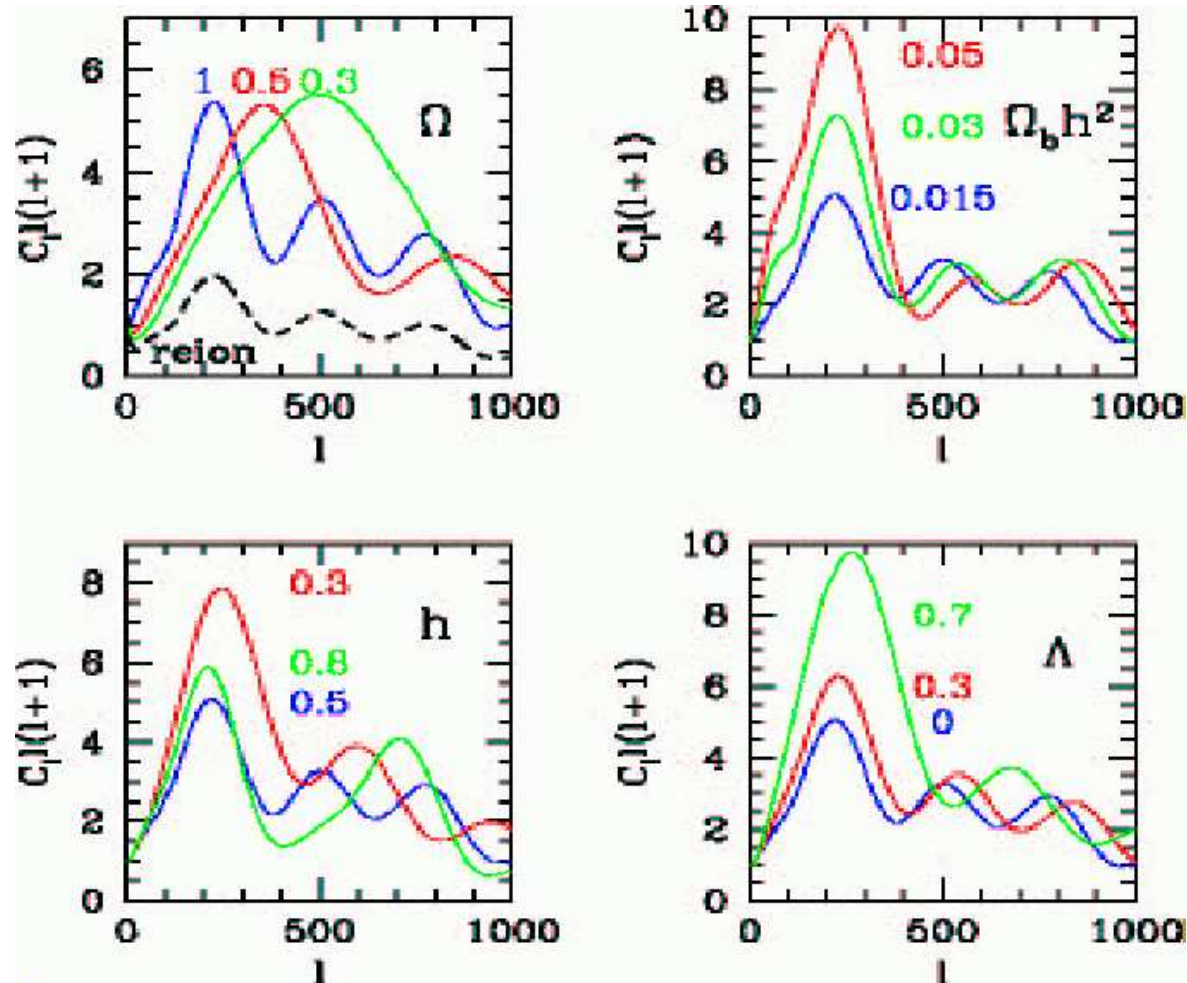
Fluktuacje

Aby opisać rozkład fluktuacji dzieli się obraz na małe kawałki (pixle), a następnie rozkłada uzyskaną macierz korelacji na wielomiany Legendre'a w $\cos \theta_{ij}$ (odległości kątowej).

Oczekiwany rozkład natężenia dla poszczególnych 'multipoli' (wielomianów danego rzędu) zależy od parametrów modelu

np. dla płaskiego Wszechświata ($\Omega = 1$) oczekujemy dominującego wkładu od $l \sim 200$

Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów:



WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Detektor

Sonda kosmiczna wystrzelona 30.06.2001.

Pomiar promieniowania mikrofalowego

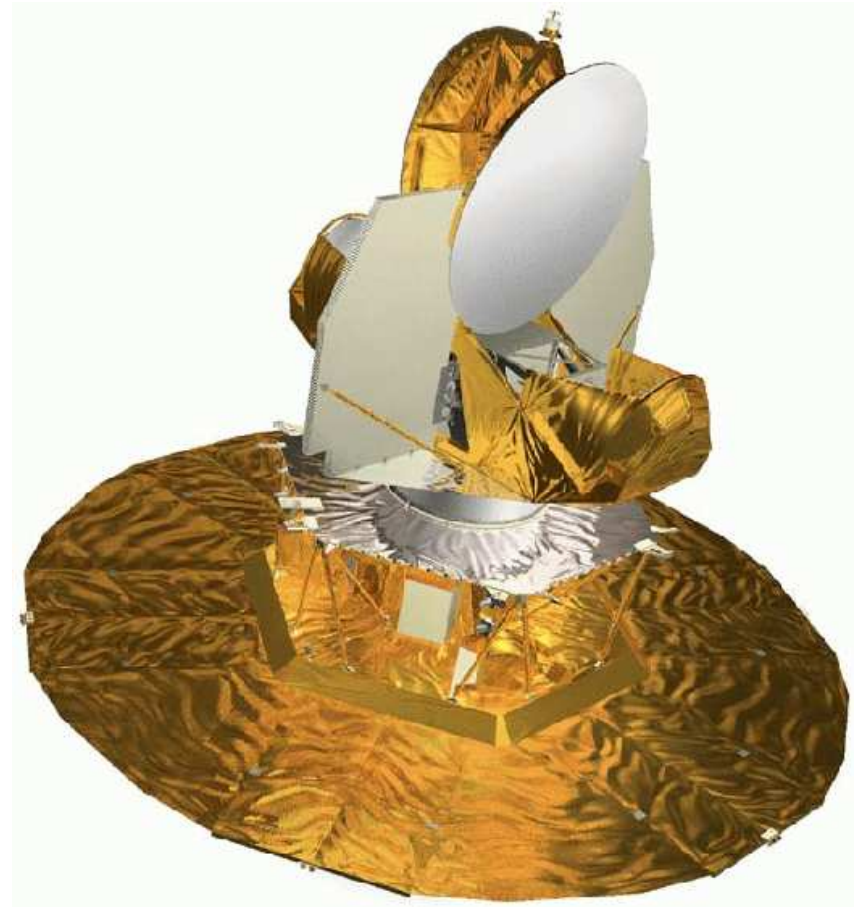
w 5 przedziałach częstości:

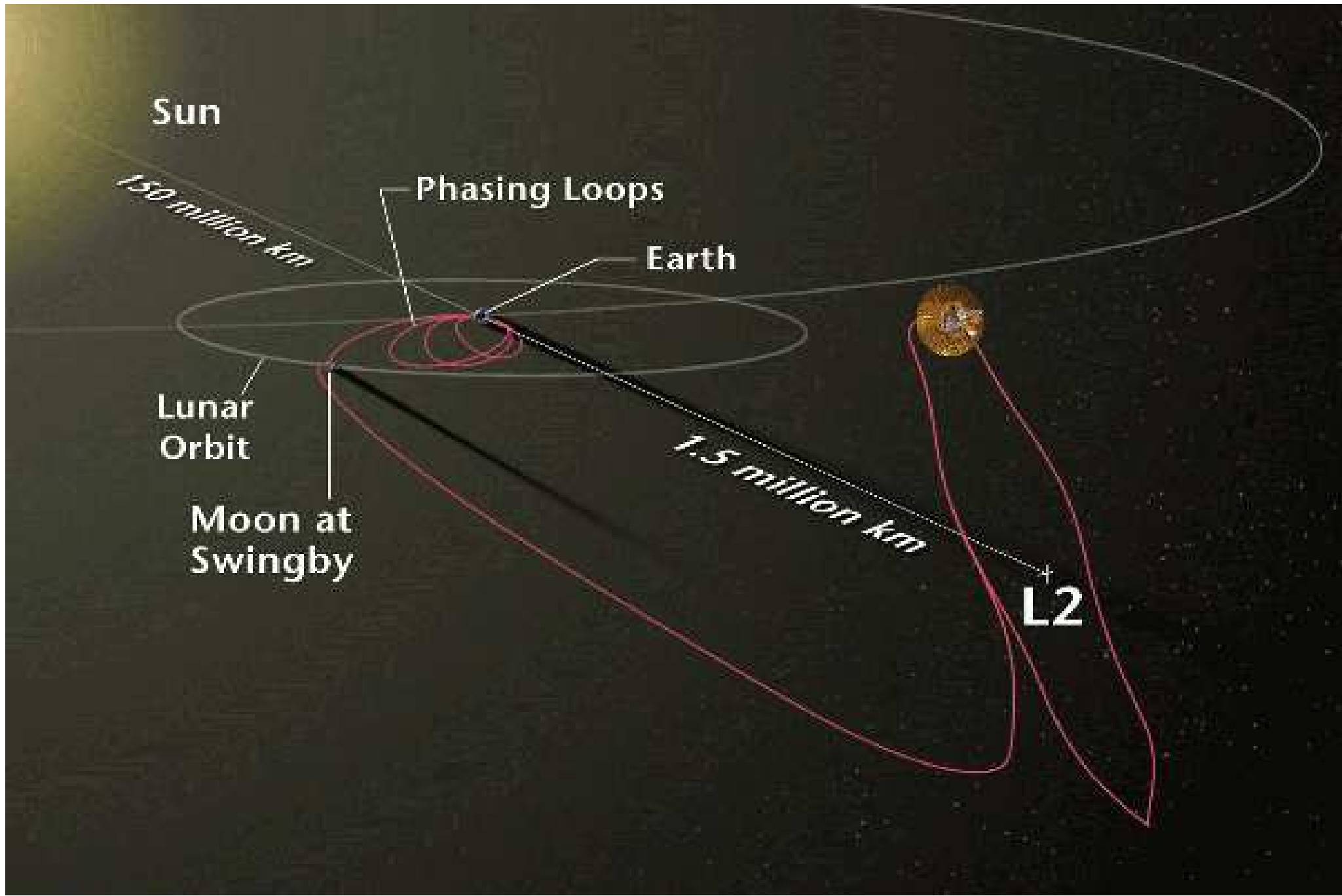
od 23 GHz (13 mm) do 94 GHz (3.2 mm).

Porównanie pomiarów w różnych zakresach częstości umożliwia efektywne odjęcie tła pochodzącego od Galaktyki.

Aby zminimalizować tło pochodzące od Ziemi i Słońca sondę umieszczono na orbicie wokół tzw. punktu Lagrange'a

⇒ quasi-stabilna konfiguracja WMAP-Ziemia-Słońce



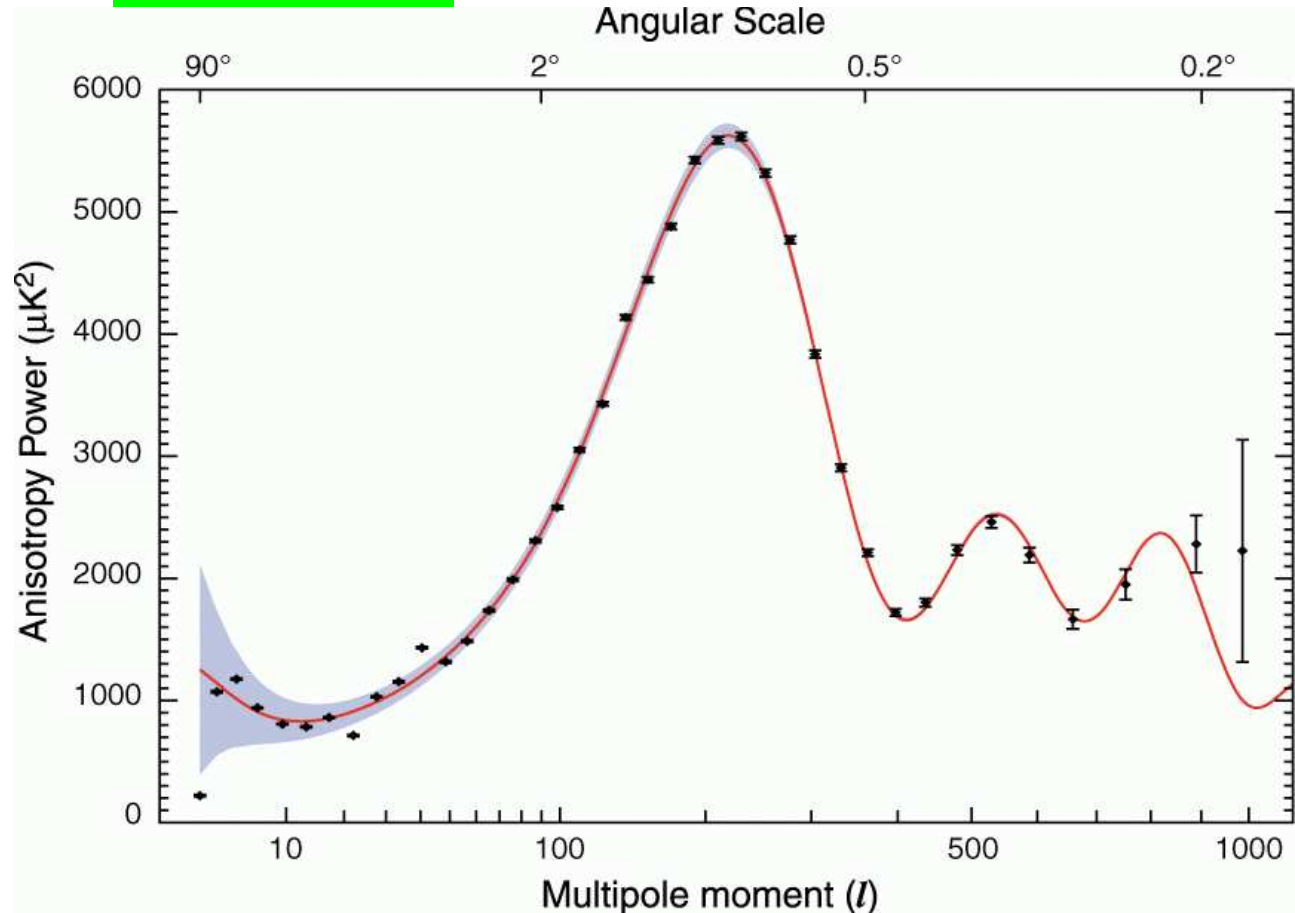


WMAP

Wyniki (2006)

Bardzo precyzyjny pomiar korelacji kątowych w promieniowaniu tła.

Możliwe jednoczesne dopasowanie wielu parametrów kosmologicznych



Dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu 0.8° ($l \approx 220$)

\Rightarrow gęstość całkowita: $\Omega_{tot} = 1.00 \pm 0.03$

\Rightarrow Wszechświat jest płaski !... ($k = 0$)

WMAP

Zestawienie wyników

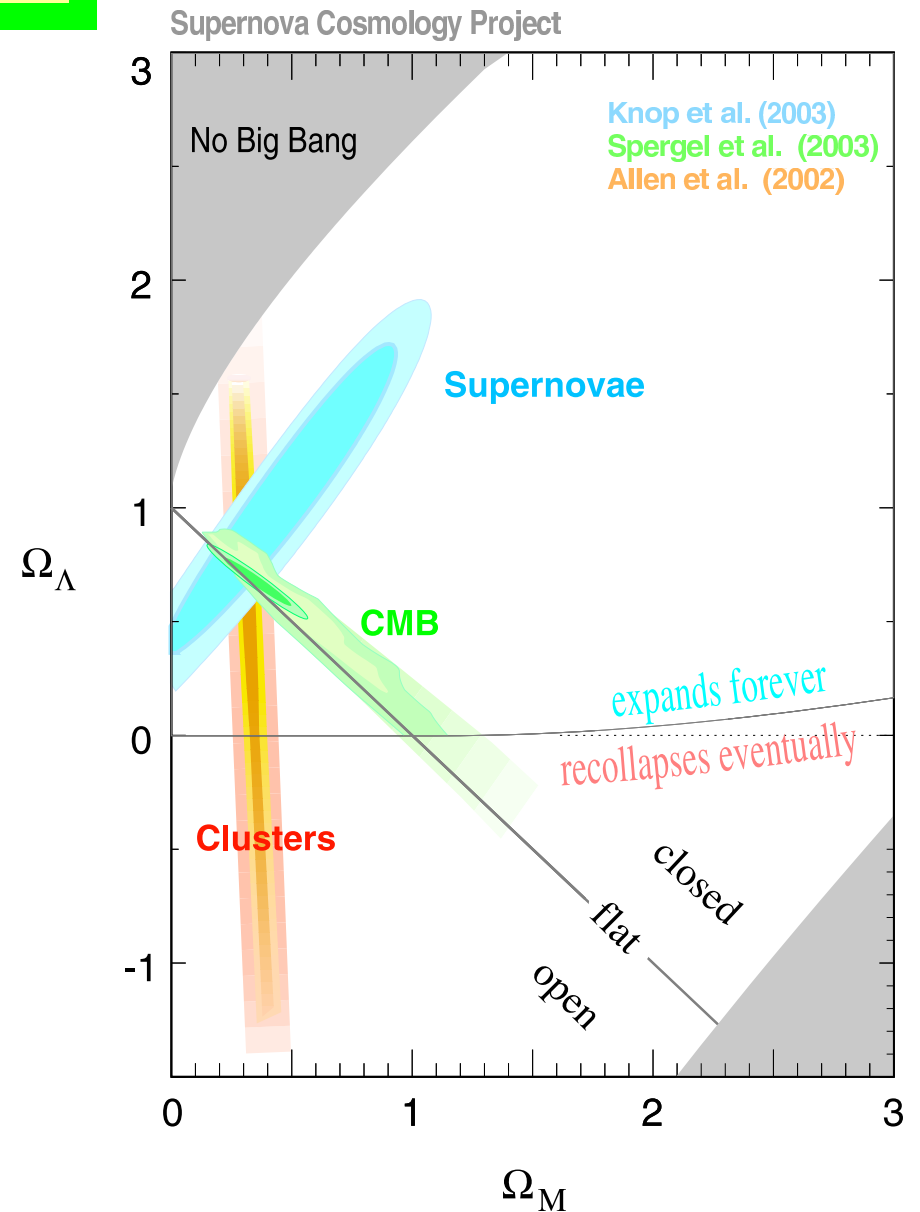
Łączna analiza pomiarów (2006)

- supernowych 1A
- promieniowania tła
- oddz. grawitacyjnych gromad galaktyk

$$\Omega_b = 0.044^{+0.002}_{-0.003}$$

$$\Omega_{cdm} = 0.22^{+0.01}_{-0.02}$$

$$\Omega_\Lambda = 0.74 \pm 0.02$$



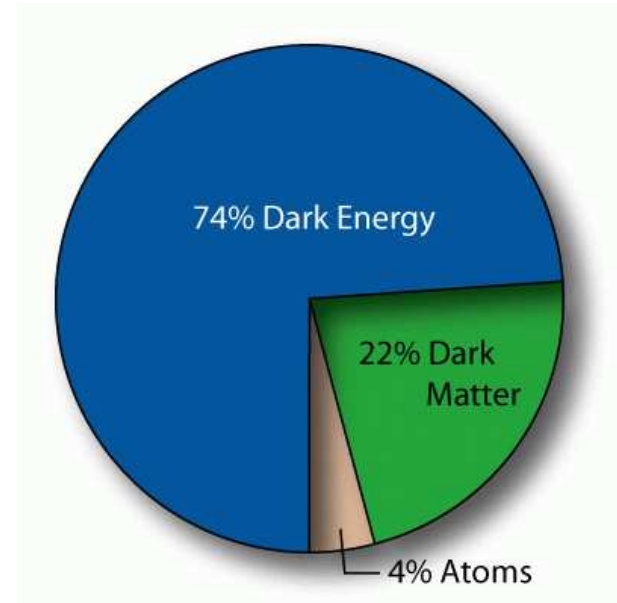
WMAP

Wyniki

Okazuje się, że **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **4%** Wszechświata.

22% stanowi tzw. **ciemna materia**, której natury na razie nie znamy (?)...

74% to “**ciemna energia**”, którą opisujemy poprzez **stałą kosmologiczną** (?)



Wszechświat zdominowany przez stałą kosmologiczną **rozszerza się coraz szybciej !!!**

Wiek Wszechświata:

$$T = 13.8_{-0.2}^{+0.1} \text{ Gyr} \quad (\text{przed WMAP błąd } 1.7 \text{ Gyr})$$

Obecna wartość stałej Hubble'a:

$$H = 71_{-2}^{+1} \text{ km}/(s \cdot \text{Mpc})$$

Kosmo-cząstki

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**. Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia**

Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)

- **ciemna energia**

Całkowita zagadka...

- **asymetria barionowa** we Wszechświecie

Wszechświat zbudowany jest z **materii**

⇒ jak w trakcie ewolucji złamana została symetria **materia-antymateria** ?

Wiemy już, że wymagało to złamania **symetrii CP**,
znacznie silniejszego niż w Modelu Standardowym...

- cząstki o bardzo wysokich energiach w **promieniowaniu kosmicznym**, błyski γ , ...

Ogromny postęp
w ostatnich latach

od COBE (1999) ⇒

do WMAP (2003/2006) ⇒

czekamy na wyniki kolejnych
misji (Planck 2007 ?)

