Kosmologia

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład X

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

Prawo Hubbla

Efekt Dopplera

Przypadek (klasyczny) A:

źródło dźwięku o częstości 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.

$\boxed{\text{A jak to będzie dla światła ?}}$

Prawo Hubbla

Efekt Dopplera - przypadek relatywistyczny

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

$\Rightarrow$ 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:

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

Ruchomy obserwator

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

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

$\Rightarrow$ Pełna symetria !

Efekt 'relatywistyczny' nie wyróżnia żadnego układu odniesienia !

Prawo Hubbla

Przesunięcie ku czerwieni

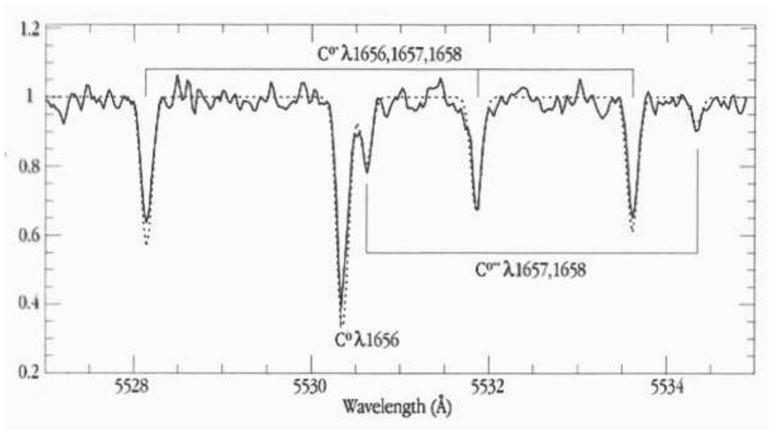
Jeśli źródło światła oddala się od obserwatora następuje wydłużenie fali:

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

$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$: 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 Hubbla

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 Hubbla)

$$v = H\,r$$

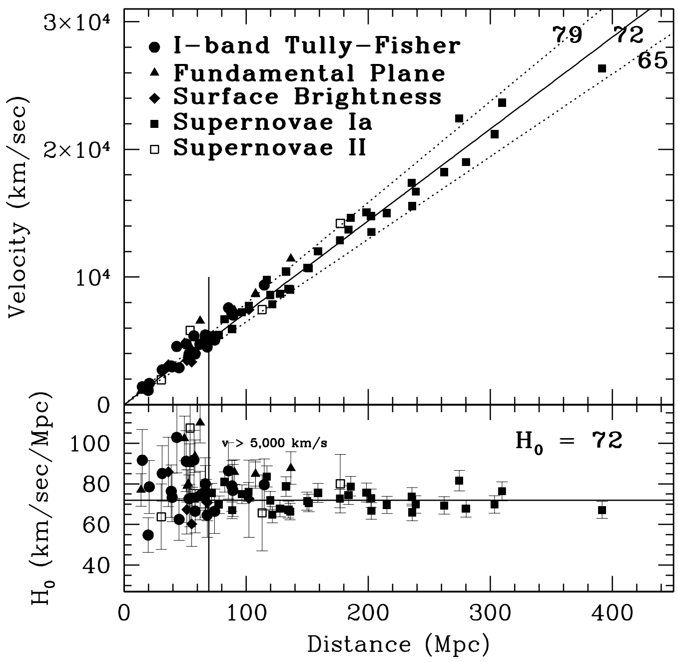
r - odległość od Ziemi, H - stała Hubbla

Wartość podana przez Hubbla:

$$H \approx 500\ km/s/Mpc$$

prawie rząd wielkości za dużo :-)

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

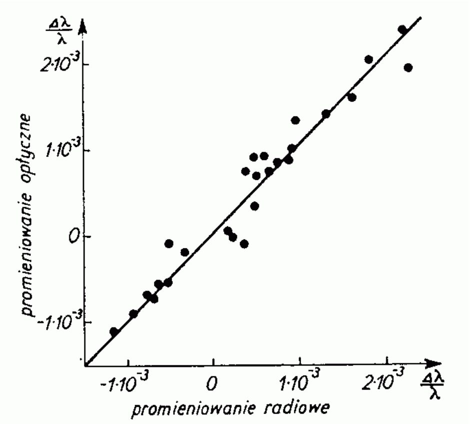


Prawo Hubbla

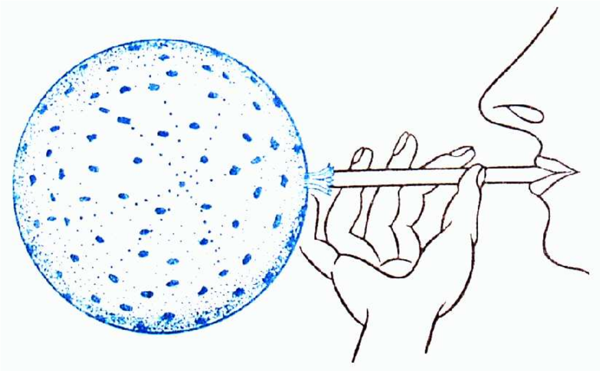
Przesunięcie ku czerwieni

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

Porównanie przesunięcia w zakresie optycznym i radiowym:



Obserwacja Hubbla, 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 ⇒ “skala kosmologiczna”

Zasada kosmologiczna: w skalach kosmologicznych Wszechświat jest jednorodny i izotropowy ⇒ 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 “odprzęgają się”, jeśli zanika ich oddziaływanie z innymi cząstkami...

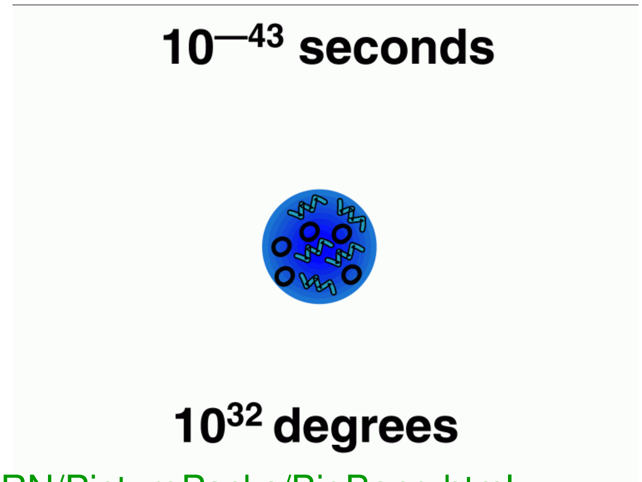
Wielki Wybuch

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: $W^+W^- \leftrightarrow q\bar{q}$

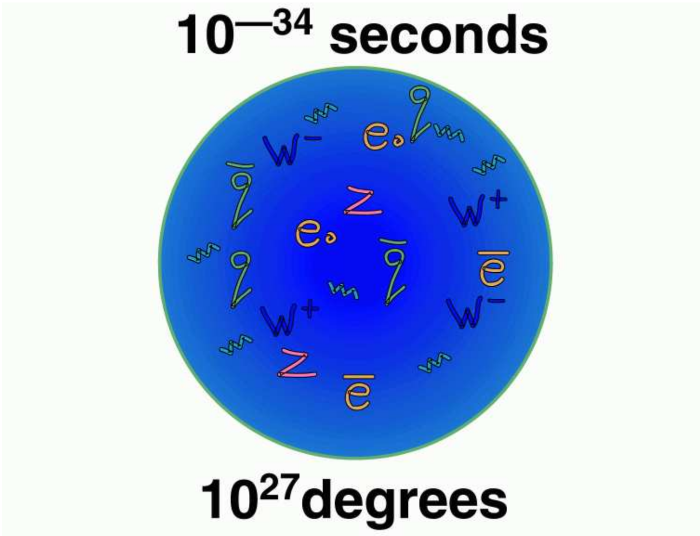


http://outreach.web.cern.ch/outreach/public/CERN/PicturePacks/BigBang.html

Wielki Wybuch

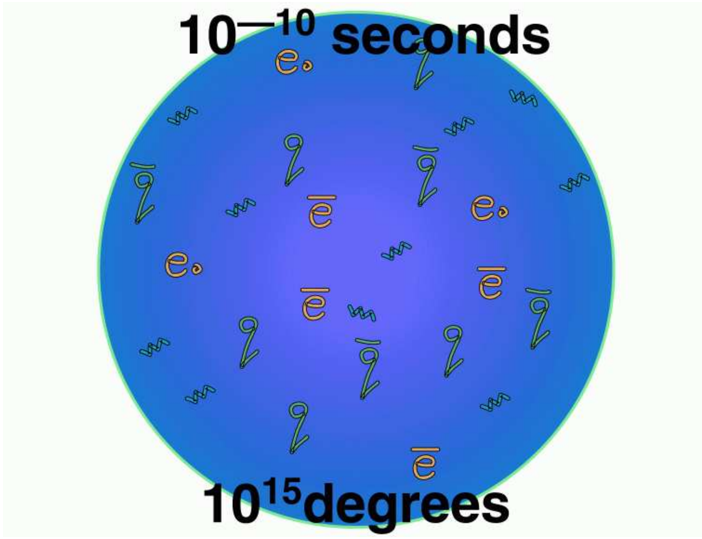
10^{-34} sekundy

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



10^{-10} sekundy

Oddzielenie oddziaływań elektromagnetycznych i słabych. Zanikają swobodne bozony $W^{\pm}$ i Z° (do tej pory w równowadze z fotonami).

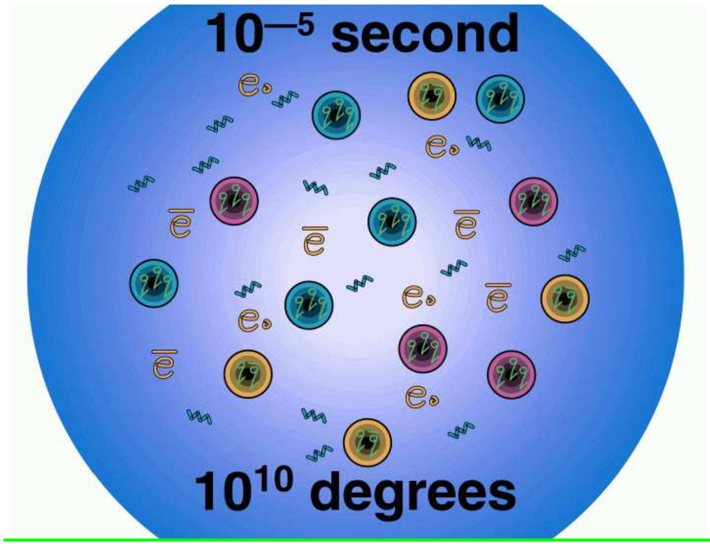


Wielki Wybuch

10^{-5} sekundy

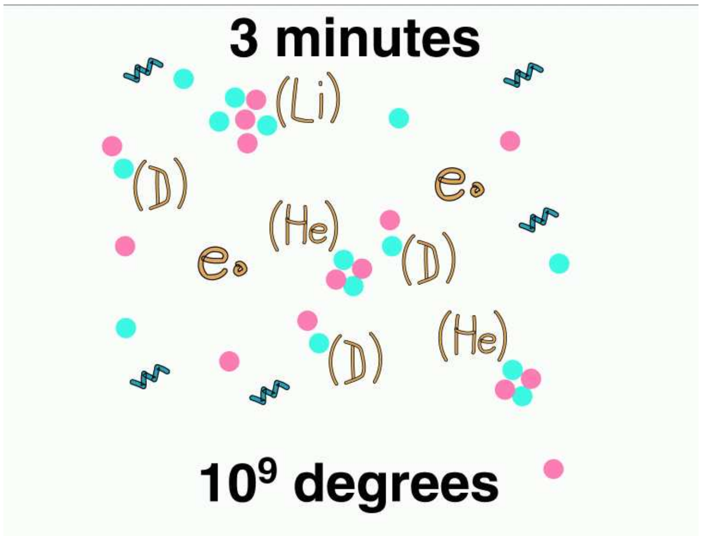
Kwarki formują neutrony i protony. Antymateria zaczyna zanikać bo promieniowanie jest już zbyt słabe aby ją wciąż wytwarzać.

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



3 minuty

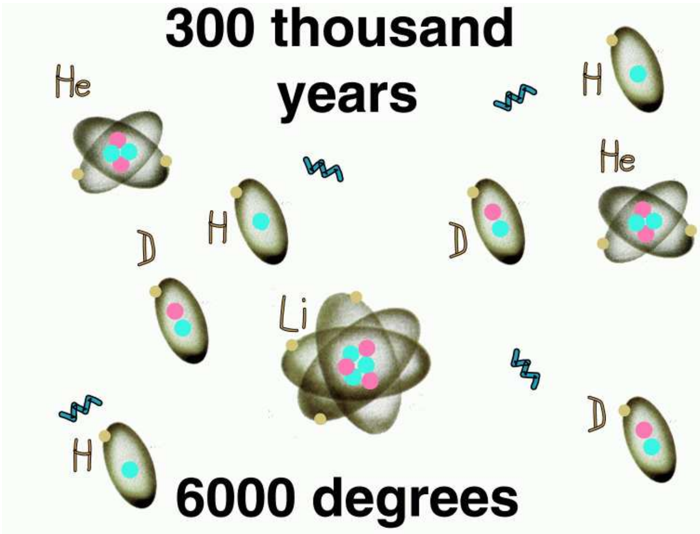
Protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków. Wraz z zanikiem reakcji termojądrowych ustala się zawartości różnych izotopów we Wszechświecie.



Wielki Wybuch

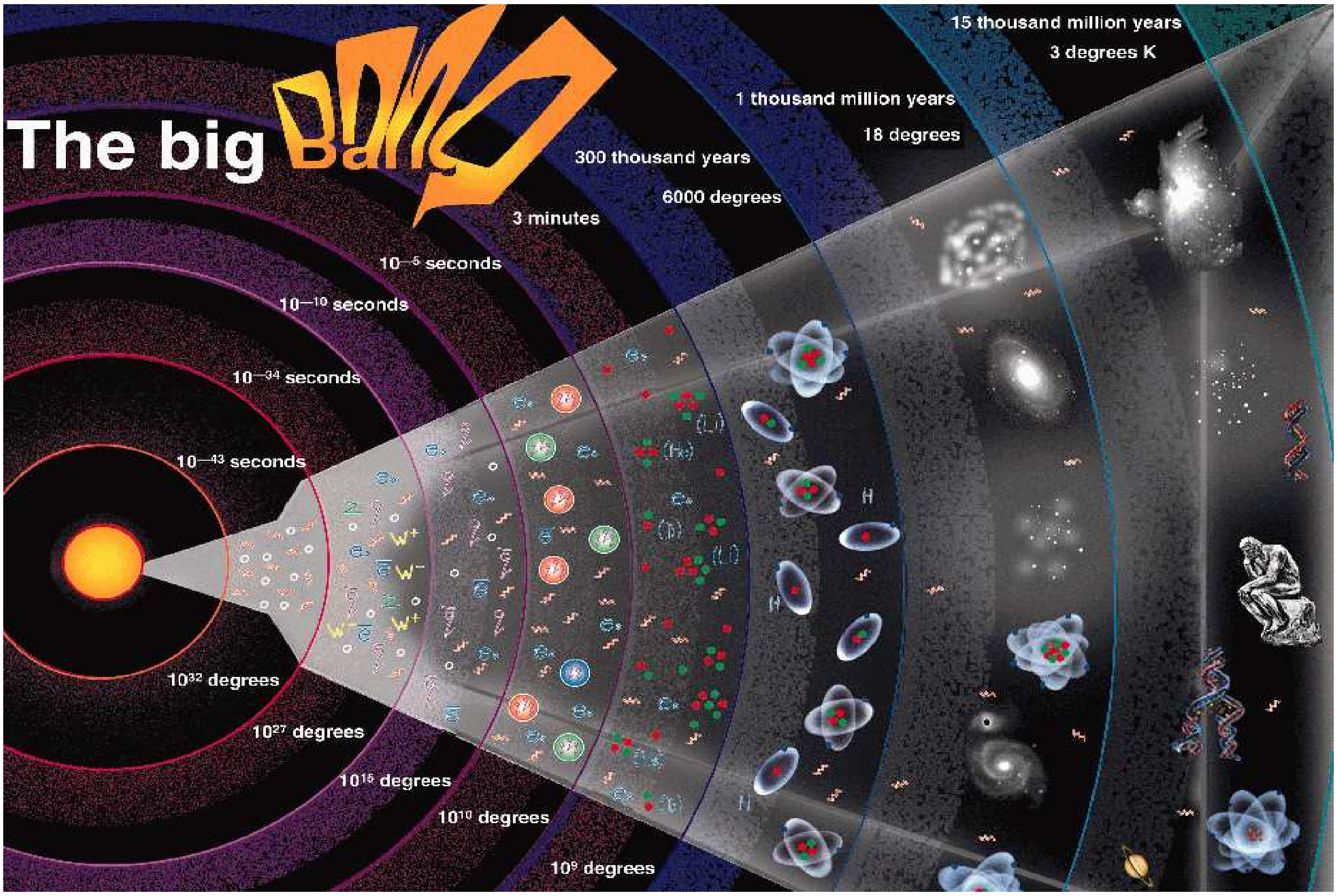
300 000 lat

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



1 000 000 000 lat

Formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach.



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**.

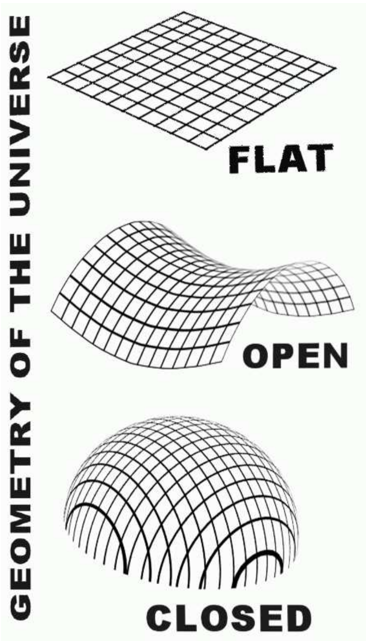
W układzie tym materia (uśredniona na skalach kosmologicznych) spoczywa ($r = r_0$).
Zmianę odległości między obiektami opisujemy poprzez wprowadzenie zależnej od czasy metryki:

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

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

Ewolucja Wszechświata

Krzywizna przestrzeni



$k = 0$

$k = -1$

$k = +1$

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:

$\Omega_m < 1$ $(k = -1)$
⇒ Wszechświat będzie zawsze rozszerzał się

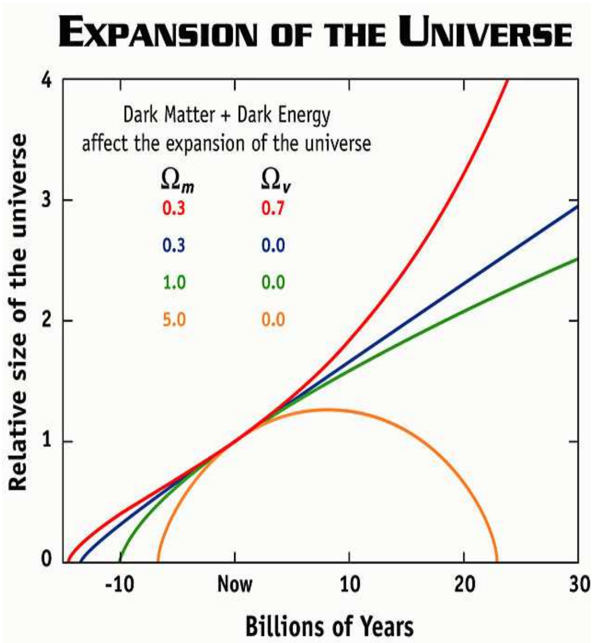
$\Omega_m = 1$ $(k = 0)$
⇒ asymptotycznie Wszechświat “zatrzyma” się

$\Omega_m > 1$ $(k = +1)$
⇒ Wszechświat kiedyś zacznie się zapadać

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

$$\boxed{H, \Omega_m, \Omega_\Lambda}$$

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 międzygwiezdnej
  $\Rightarrow$ materia "świetlista"

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

- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)
  $\Rightarrow$ materia "barionowa"

$$\Omega_b \sim 0.04$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych (np. rotacja galaktyk)
  $\Rightarrow$ materia "grawitacyjna" (całkowita ?)

$$\Omega_m$$

$\Omega_m > \Omega_b \Rightarrow$ ciemna materia !?

Nukleosynteza

Pierwotna nukleosynteza

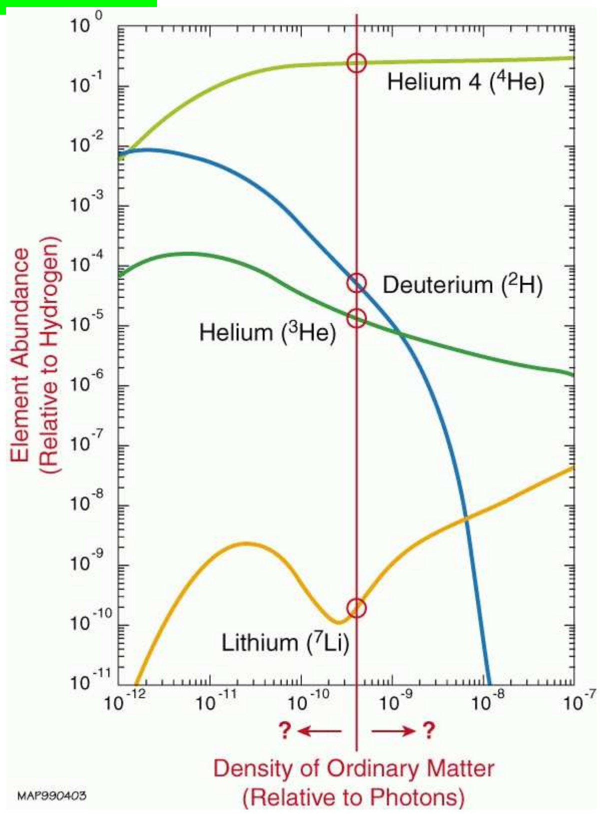
W zależności od stosunku gęstości materii (pozostałej po anihilacji materii i antymaterii) do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

Produkcja deuteru:

$$p + n \longleftrightarrow {}^2H + \gamma$$

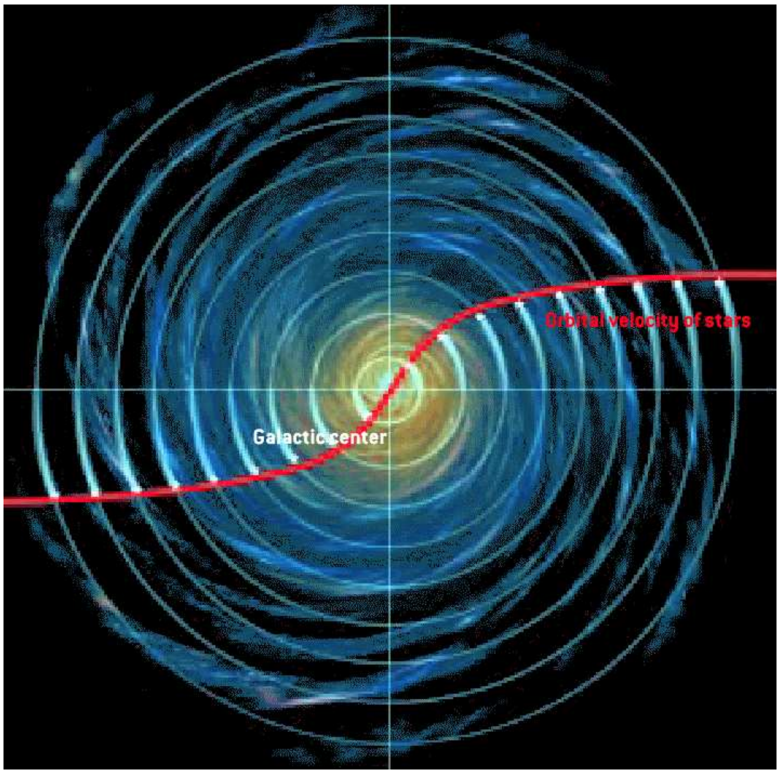
Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

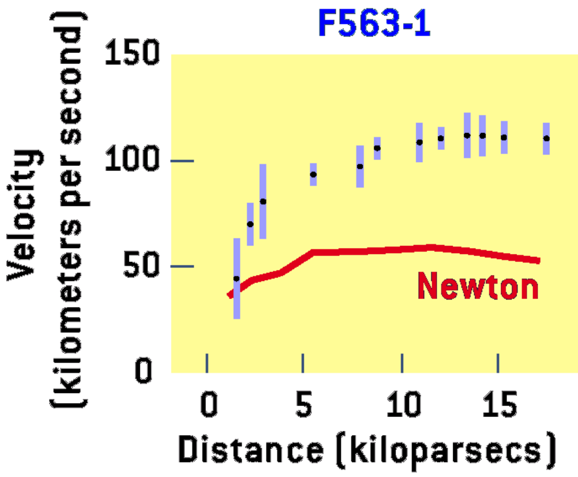


Rotacja galaktyk

Ciemna materia ?

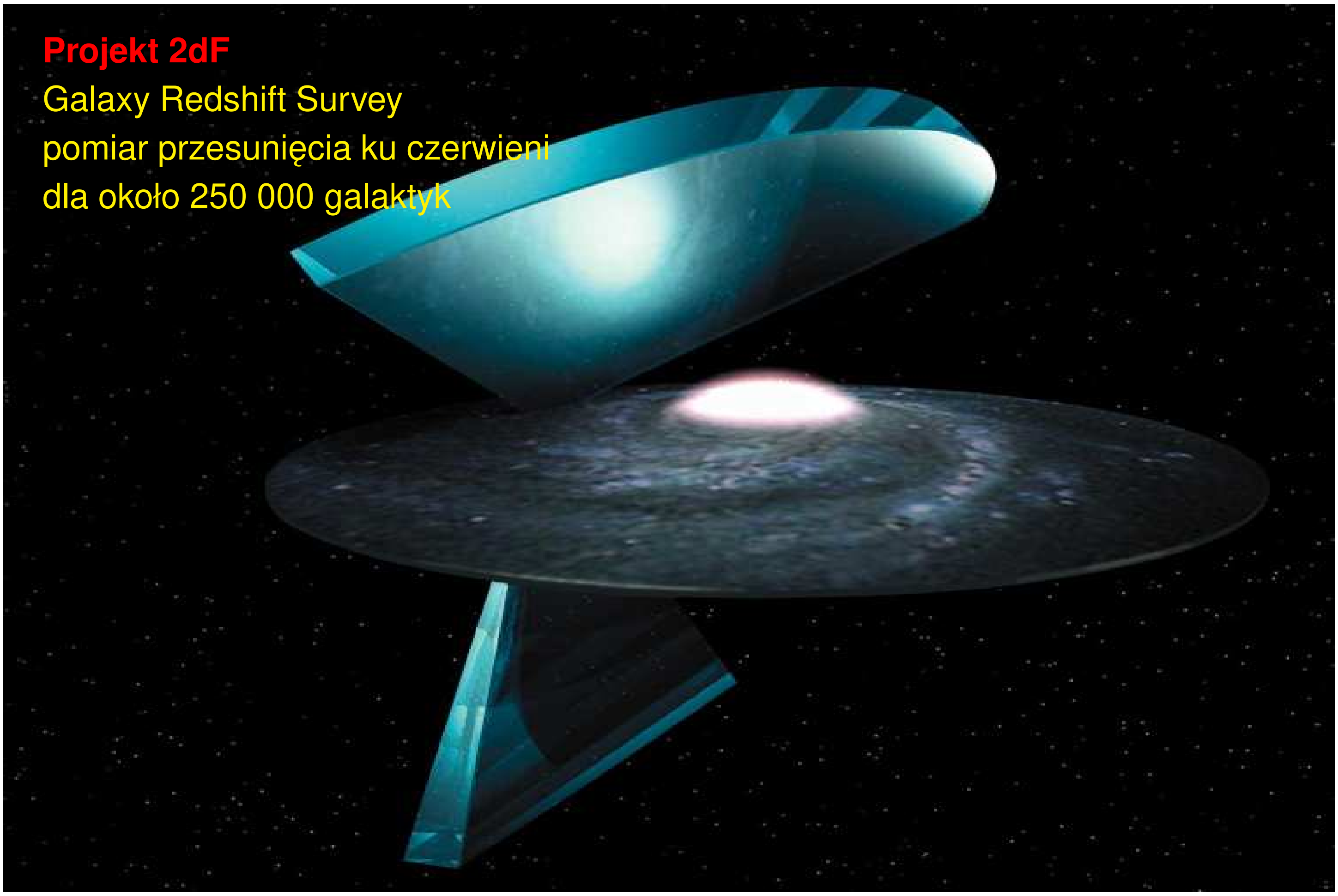


Znane nam prawa dynamiki
nie tłumaczą rotacji galaktyk.



Ramiona wirują szybciej niż oczekiwa-
libyśmy z praw grawitacji i dynamiki

$\Rightarrow$ ciemna materia ?



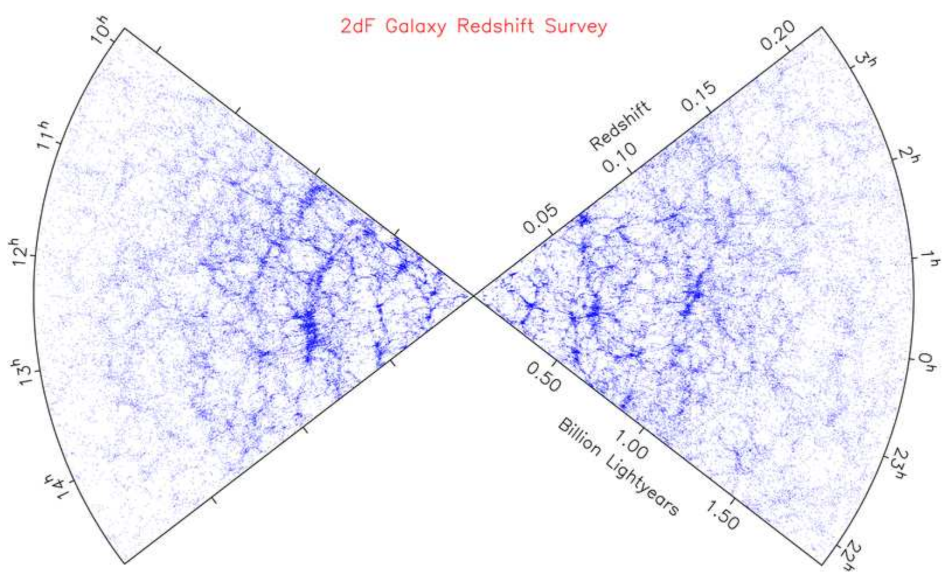
Przesunięcie ku czerwieni

Ciemna materia ?

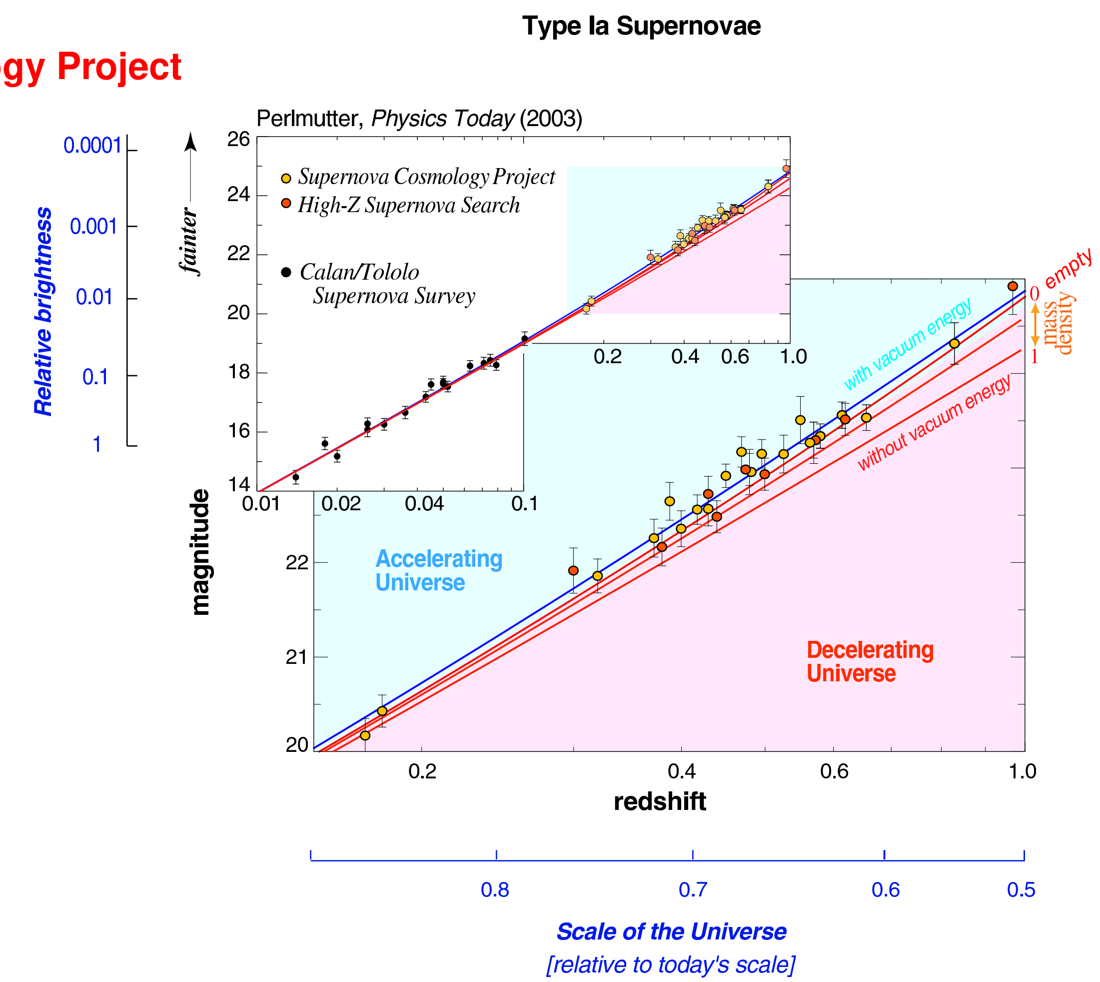
Znana nam materia barionowa nie wystarcza też do opisu oddziaływań grawitacyjnych na skalach międzygalaktycznych

Wyniki 2dFGRS $\Rightarrow$

$\Omega_m \sim 0.3$



Supernova Cosmology Project



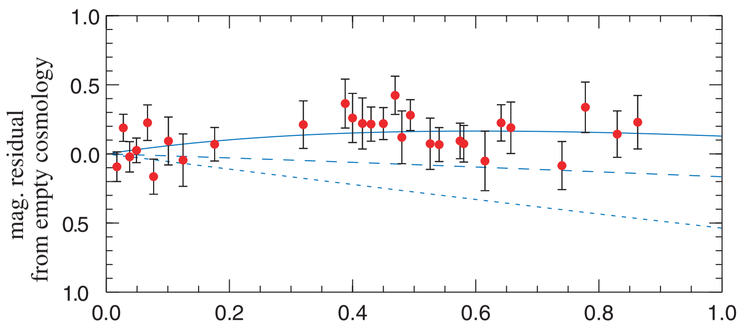
Ewolucja Wszechświata

Pomiar stałej Hubbla

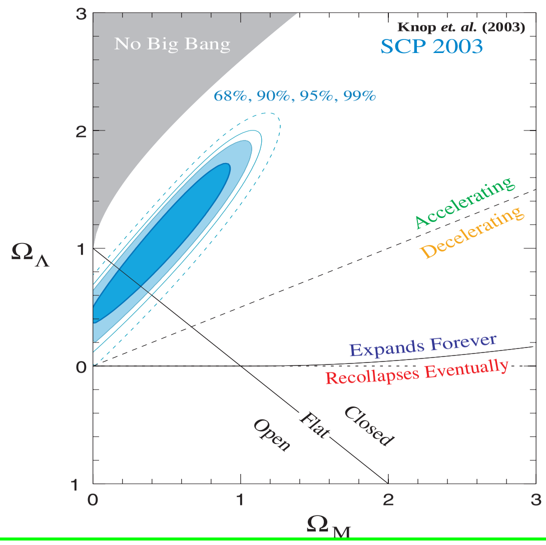
Supernowe typu 1A są najlepszym obiektem do pomiaru ekspansji Wszechświata.

Są to tzw. “świece standardowe”. Wiemy dokładnie jaka jest ich absolutną 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

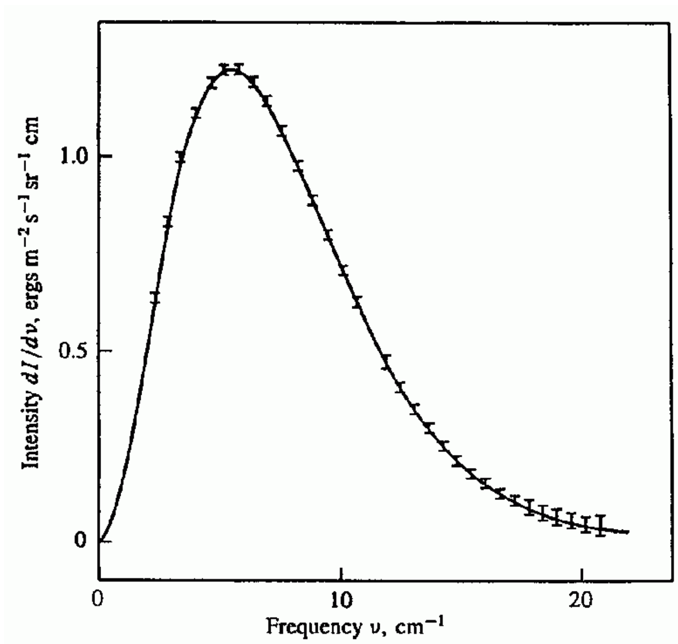
Odkrycie

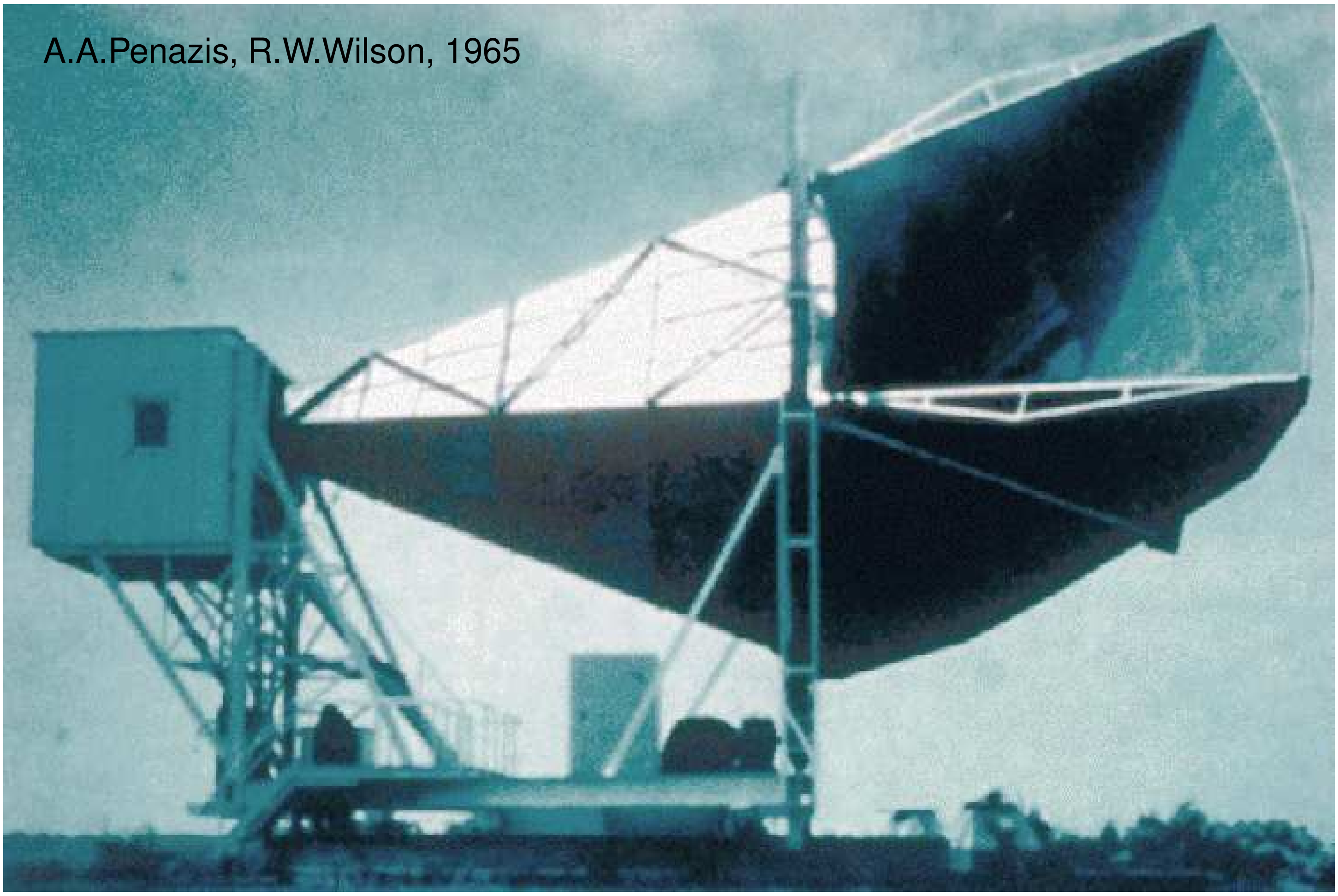
Mikrofalowe promieniowanie tła (CMB) zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penazisa i R.W.Wilsona.

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

$$T = 2.725 \pm 0.002\ K$$

Wyniki z satelity COBE: (1999)

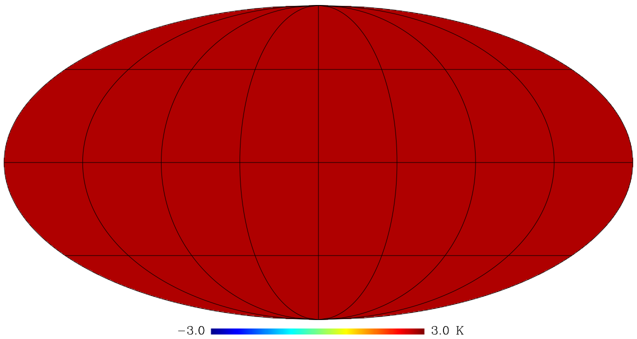




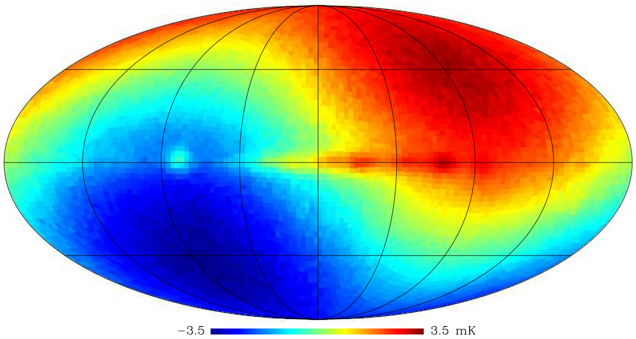
Promieniowanie tła

Rozkład kątowy

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



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

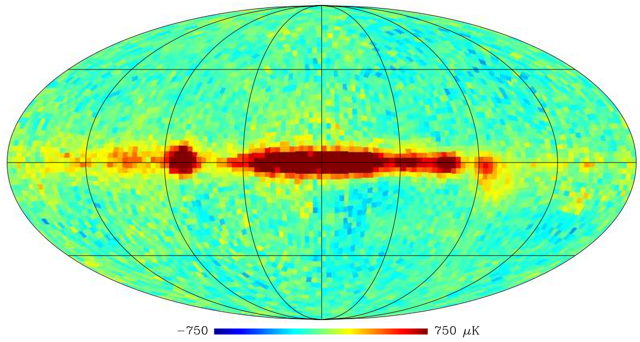


widzimy wpływ ruchu Ziemi względem 'globalnego' układu.

Promieniowanie tła

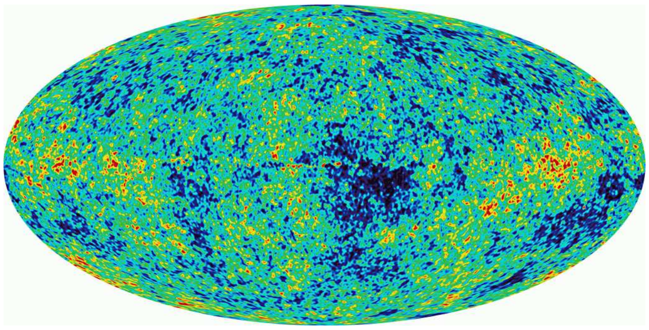
Rozkład kątowy

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

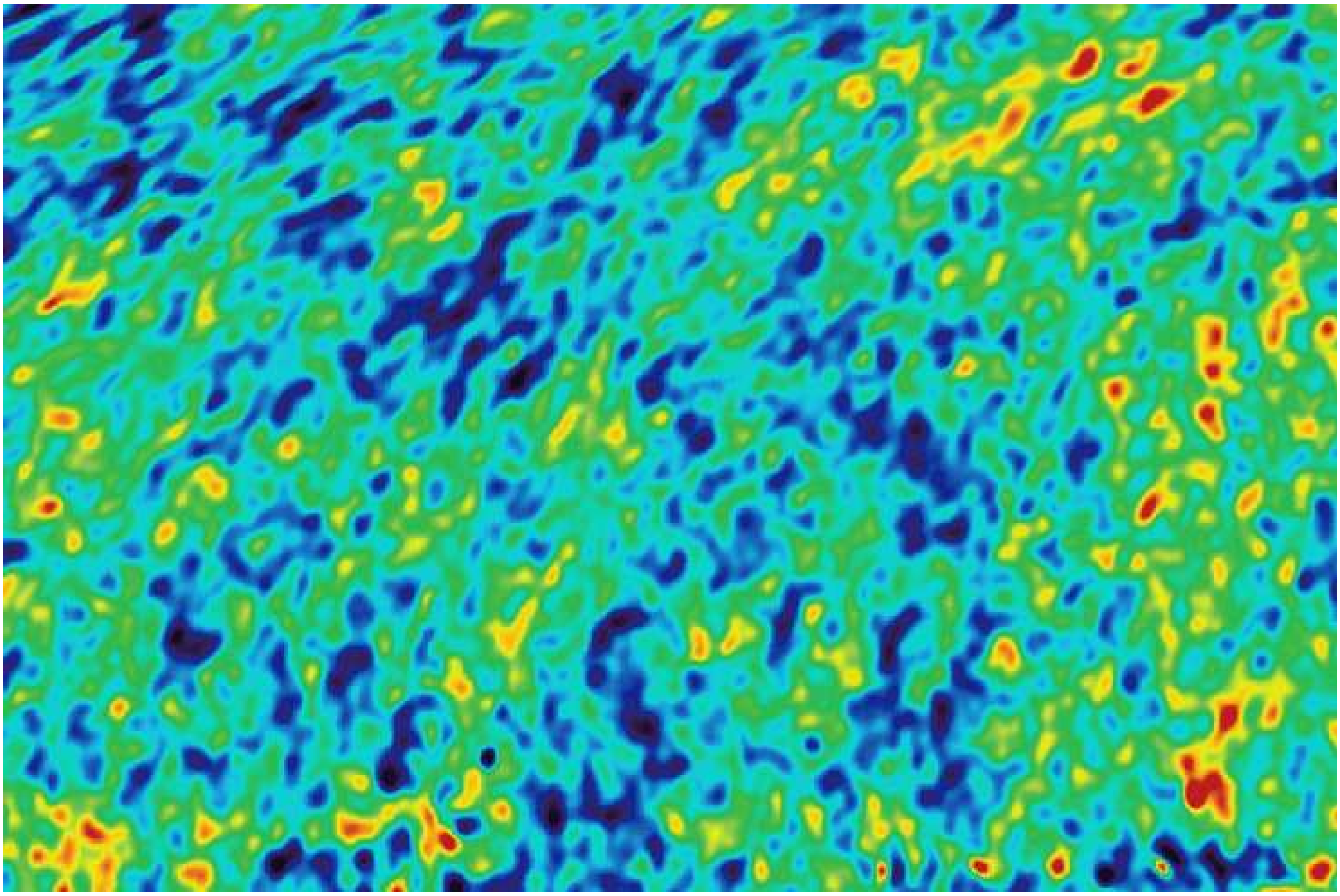


⇒ widzimy promieniowanie naszej galaktyki (Drogi Mlecznej)...

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



⇒ zaczyna być ciekawie !!!



Promieniowanie tła

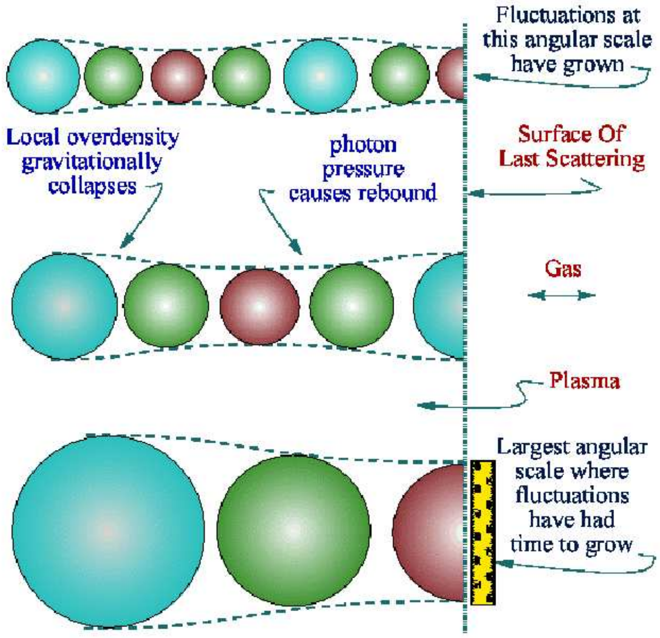
Fluktuacje

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...

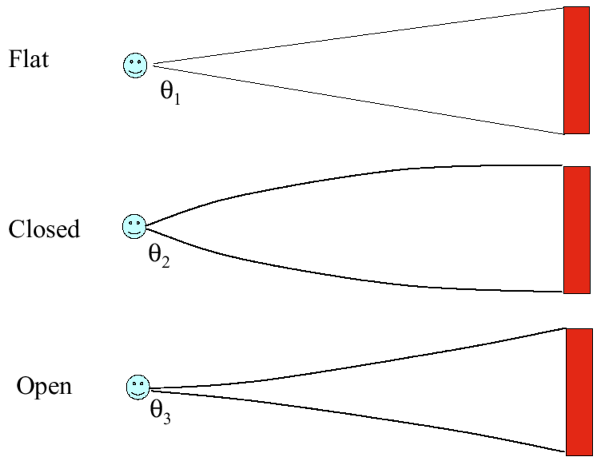
⇒ zależy od parametrów kosmologicznych



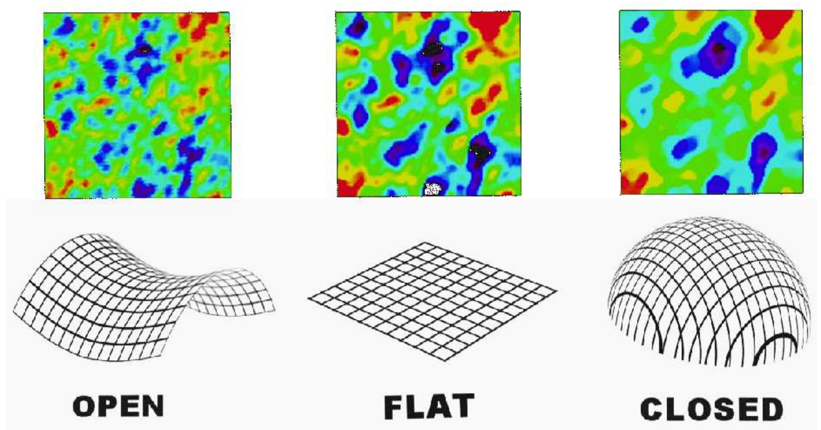
Promieniowanie tła

Fluktuacje

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



Wyniki symulacji:



Promieniowanie tła

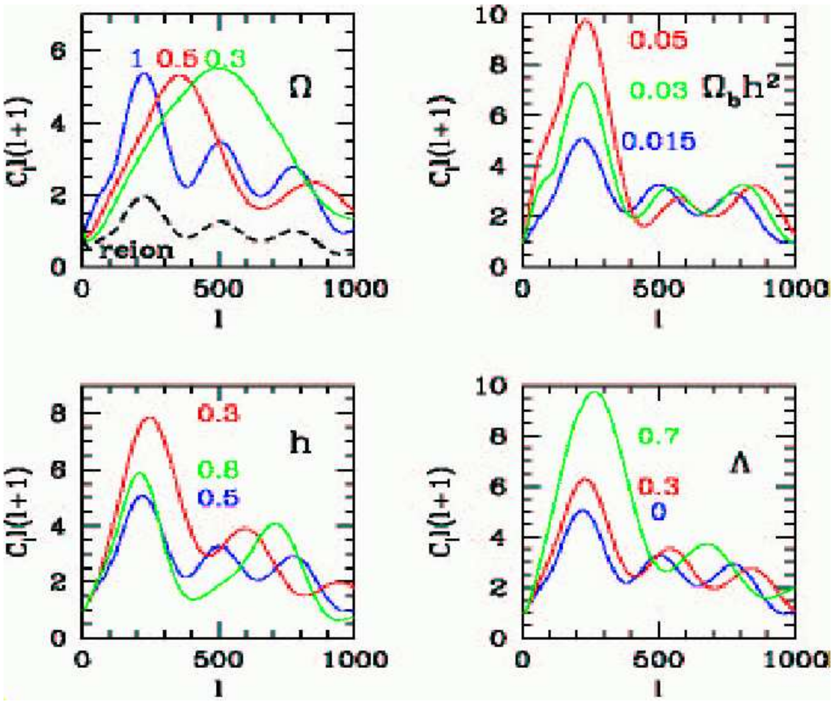
Fluktuacje

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

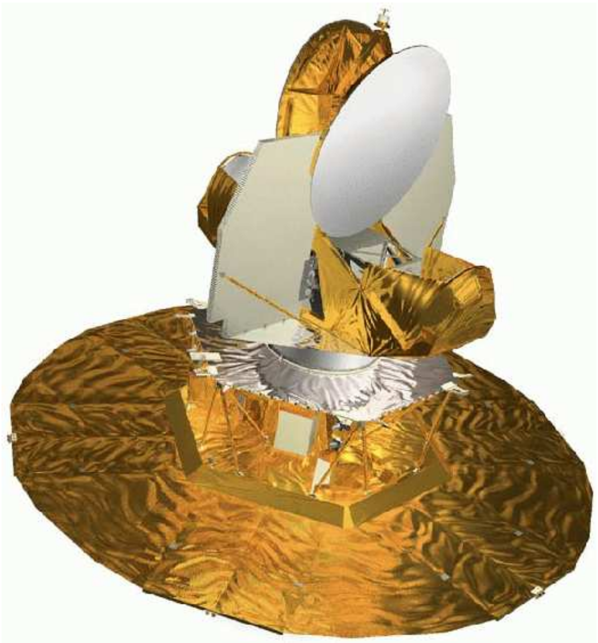
Detektor

Sonda kosmiczna wystrzelona 30.06.2001.

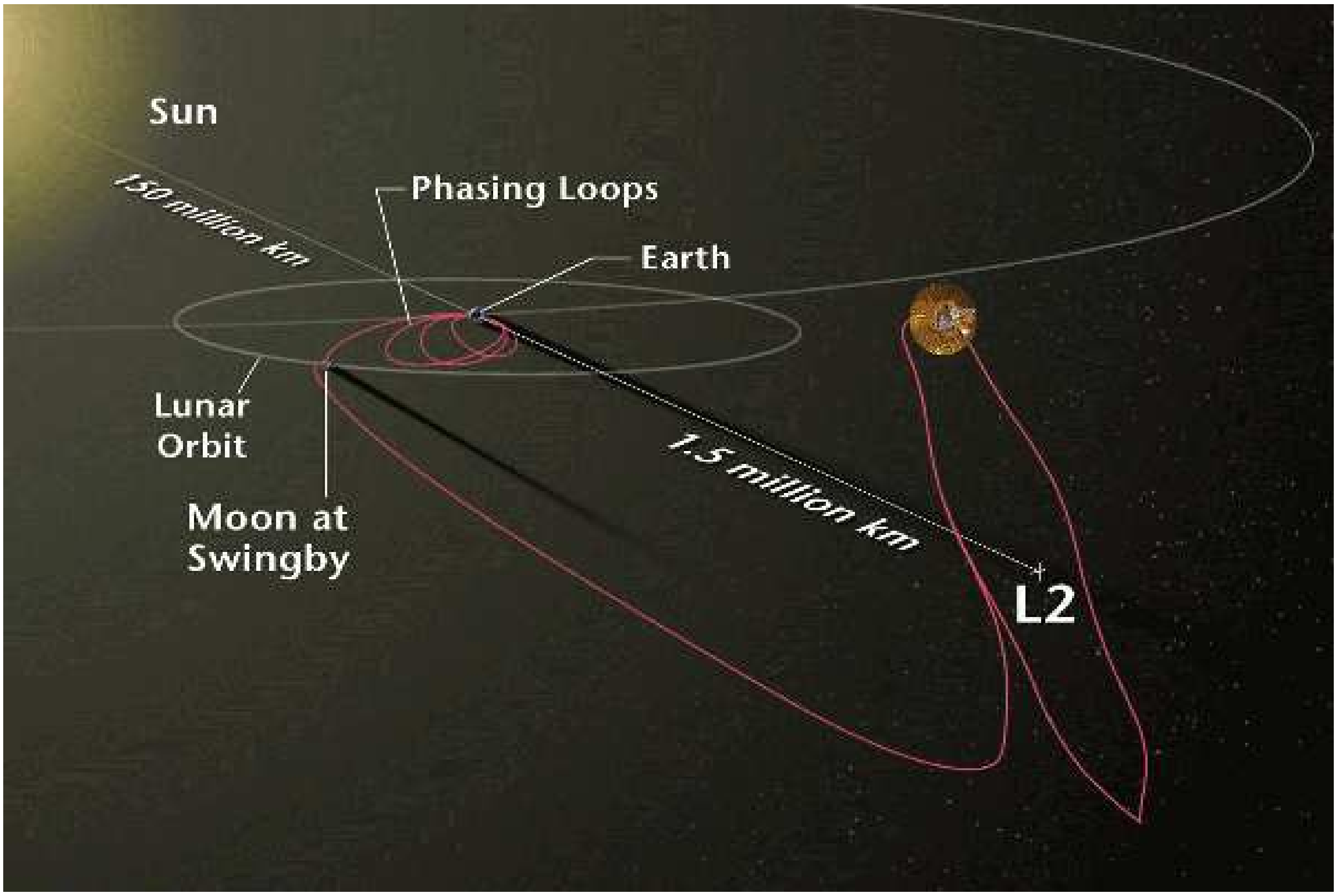
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach częstości:
od 23 GHz (13 mm) do 94 GHz (3.2 mm).

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



$\Rightarrow$ quasi-stabilna konfiguracja WMAP-Ziemia-Słońce

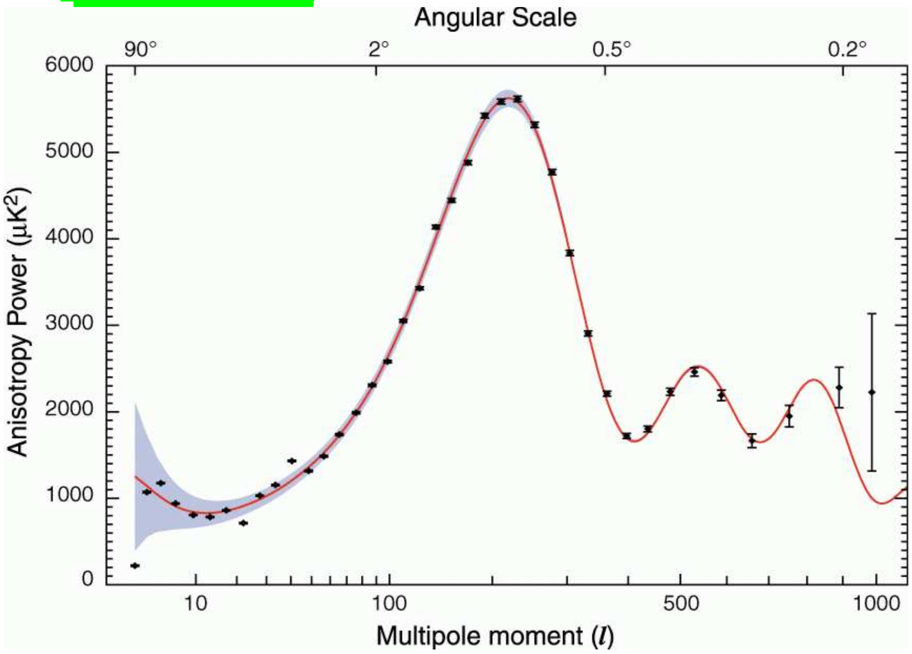


WMAP

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 !... ($k = 0$)

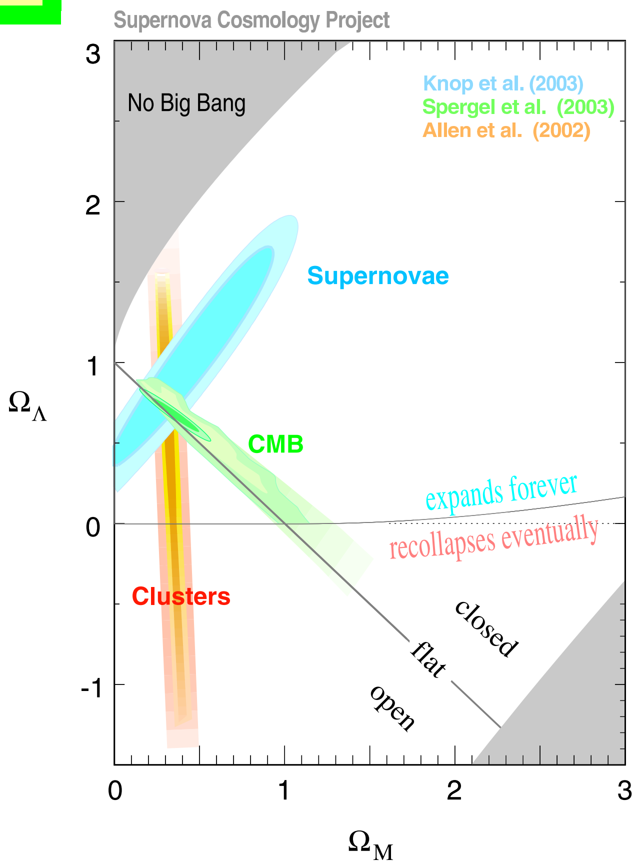
WMAP

Zestawienie wyników

Łączna analiza pomiarów (2006)

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

$$\Omega_b = 0.044^{+0.002}_{-0.003}$$
$$\Omega_{cdm} = 0.22^{+0.01}_{-0.02}$$
$$\Omega_\Lambda = 0.74 \pm 0.02$$



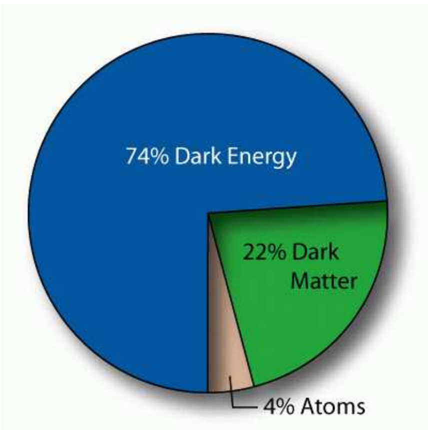
WMAP

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 stała kosmologiczną rozszerza się coraz szybciej !!!

Wiek Wszechświata:

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

Obecna wartość stałej Hubbla:

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

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

  $\Rightarrow$ 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) $\Rightarrow$

do WMAP (2003/2006) $\Rightarrow$

czekamy na wyniki kolejnych misji (Planck 2007 ?)