

Kosmologia

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład X

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

Prawo Hubble'a

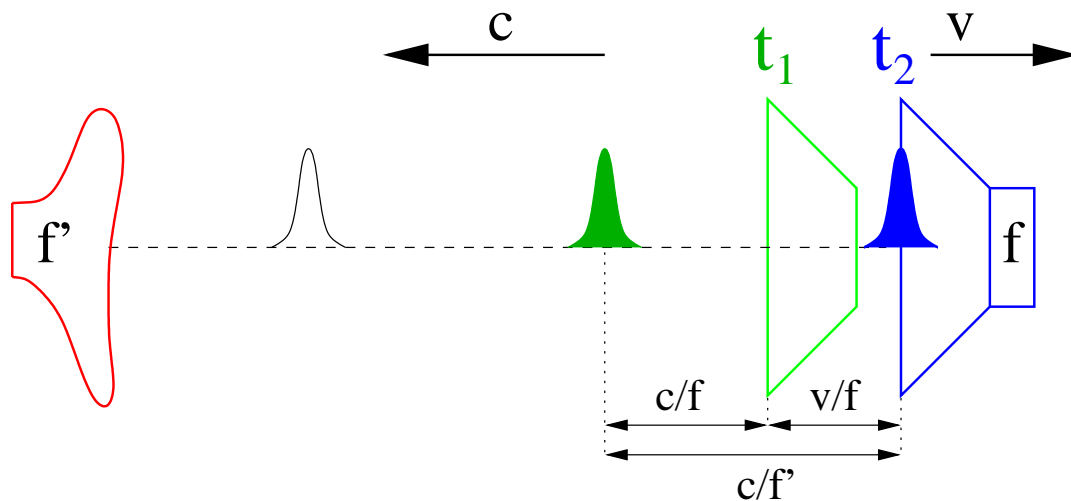
Efekt Dopplera

Przypadek (klasyczny) A:

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

Dla uproszczenia:

krótkie impulsy wysyłane co $\Delta t = 1/f$:



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

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

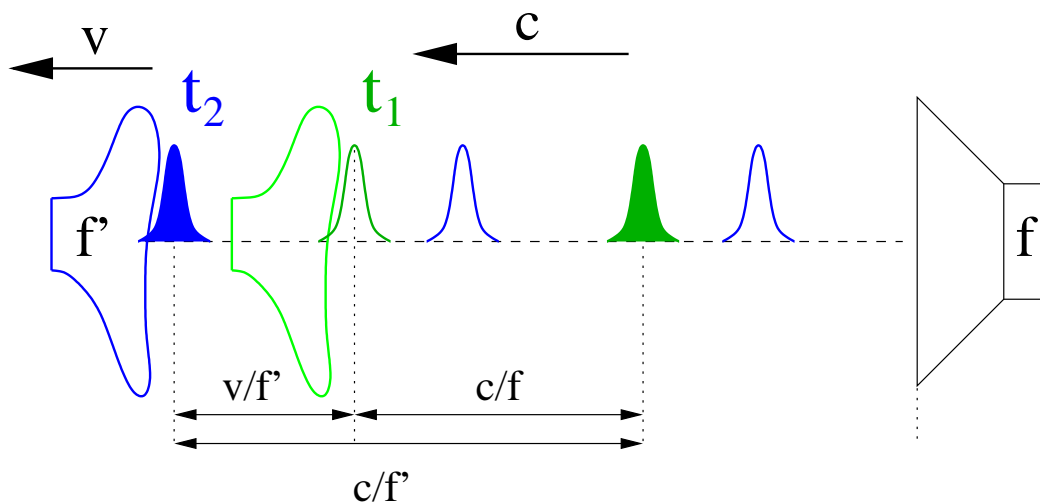
$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

Prawo Hubble'a

Efekt Dopplera

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 **podjęciu 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

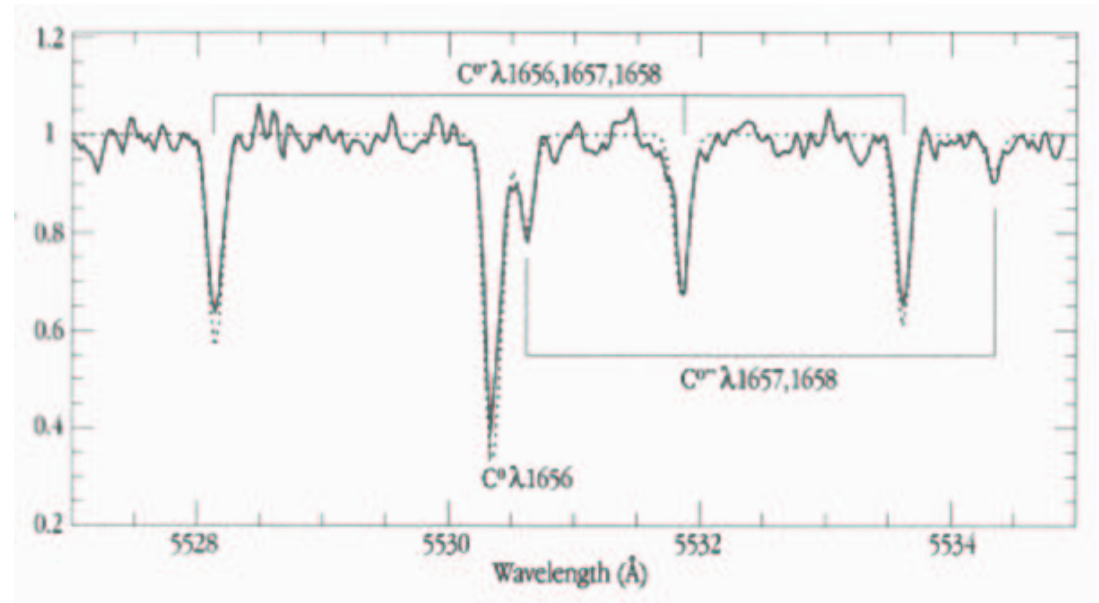
Jeśli **źródło** światła **oddala się** od obserwatora następuje **wydłużenie fali**:

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

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

$$v = H r$$

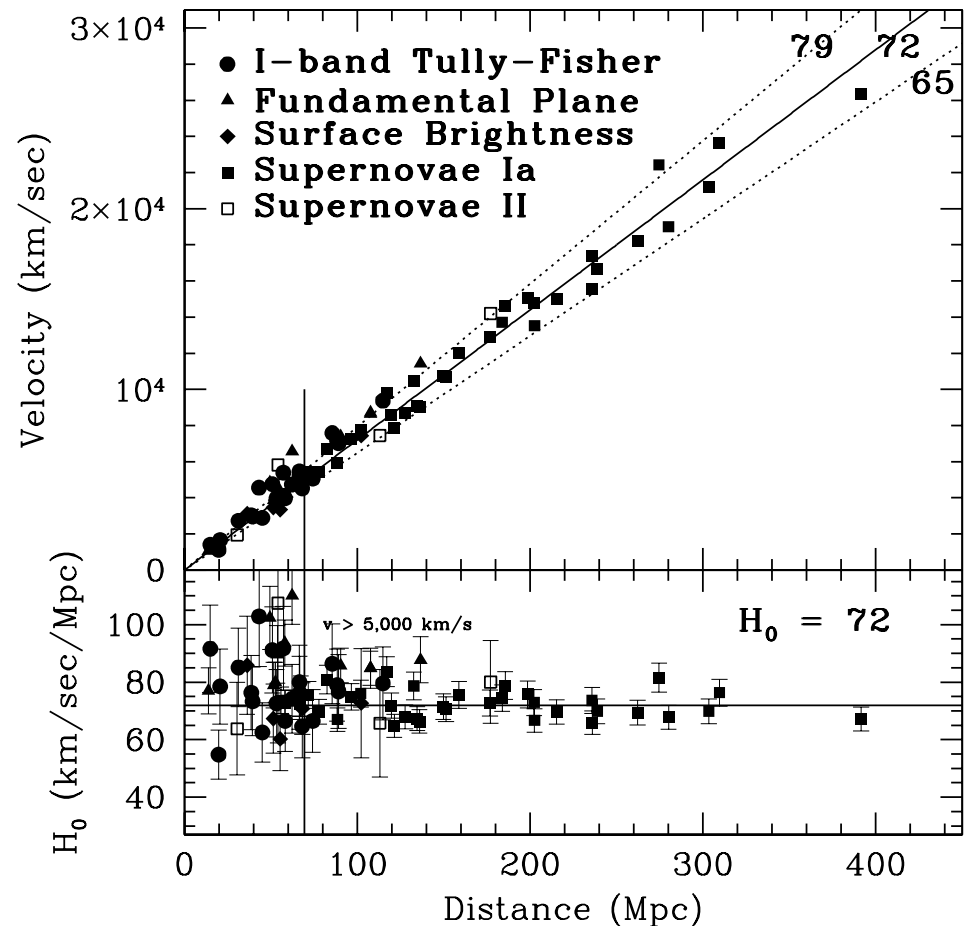
r - odległość od Ziemi, H - stała Hubble'a

Wartość podana przez Hubble'a:

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

prawie rząd wielkości za dużo :-)

Obecne pomiary: $H \approx 72 \text{ km/s/Mpc}$



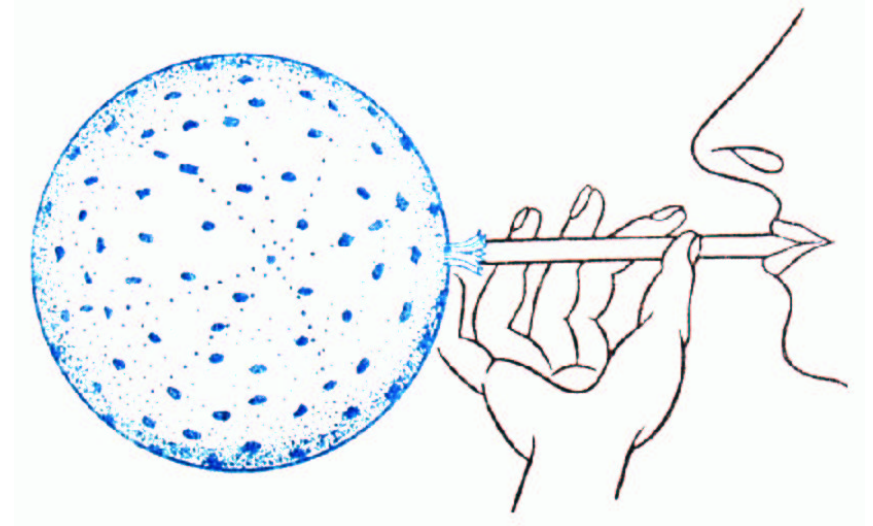
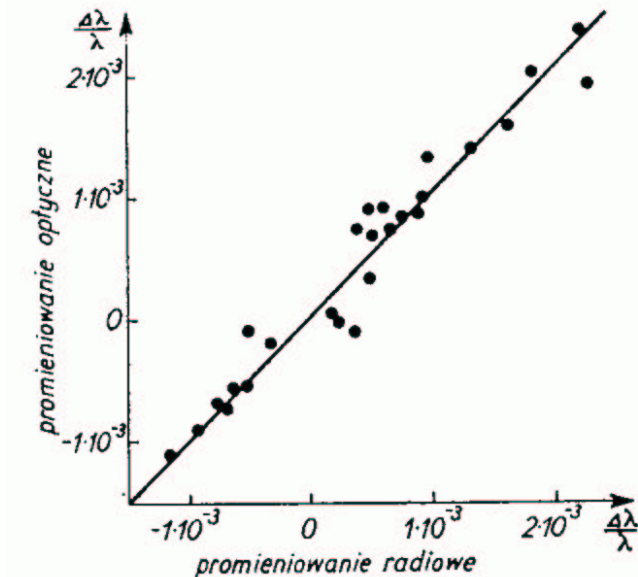
Prawo Hubble'a

Przesunięcie ku czerwieni

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

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

Porównanie przesunięcia w zakresie optycznym i radiowym:



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**

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** ($r = r_0$).

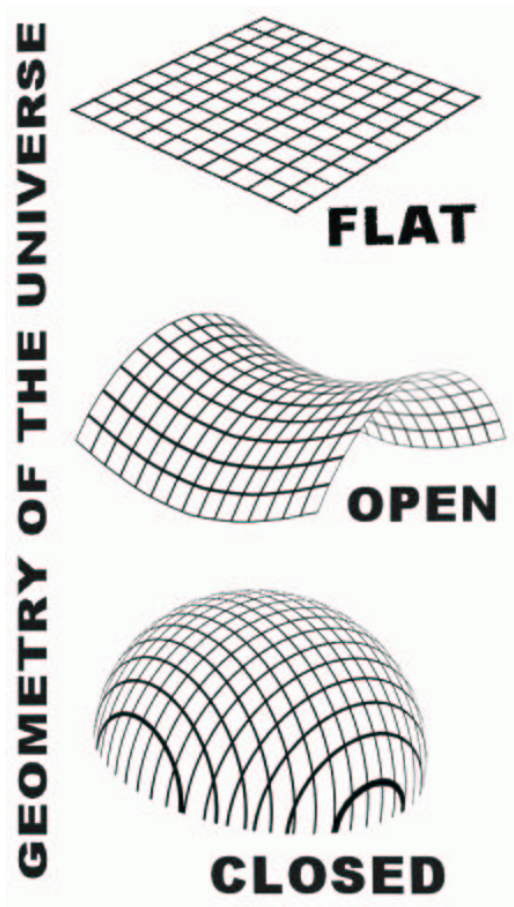
Zmianę odległości między obiektami opisujemy poprzez wprowadzenie zależnej od czasu metryki:

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

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

Ewolucja Wszechświata

Krzywizna przestrzeni



$$k = 0$$

$$k = -1$$

$$k = +1$$

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

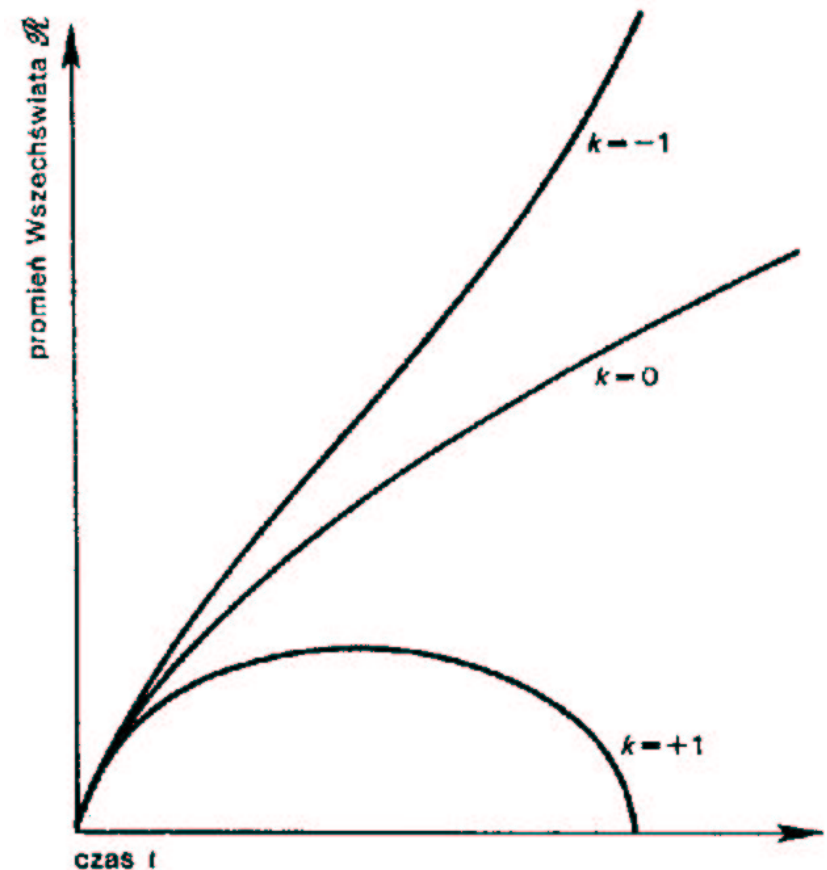
$$\Omega_m > 1 \quad (k = +1)$$

⇒ Wszechświat kiedyś zacznie się zapadać

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

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

Ewolucja Wszechświata ($\Lambda = 0$):



Wielki Wybuch

Początki Wszechświata

Z równań wynika, że Wszechświat musiał rozpocząć swoją ewolucję od pojedynczego punktu, osobliwości, o nieskończonej gęstości energii.

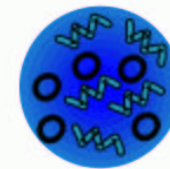
10^{-43} sekundy

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

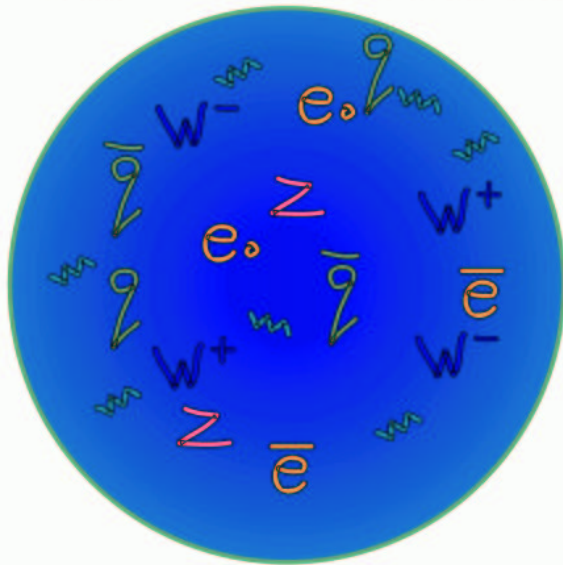
<http://outreach.cern.ch/public/CERN/PicturePacks/BigBang.html>

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

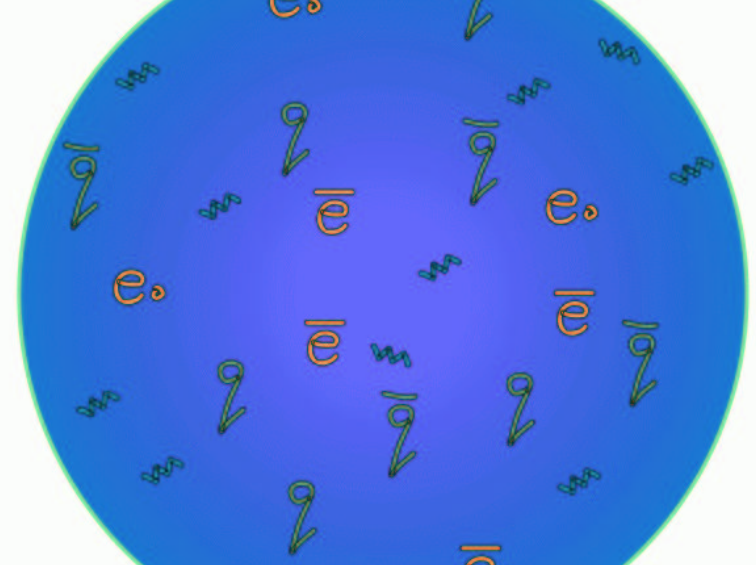


10^{27} degrees

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

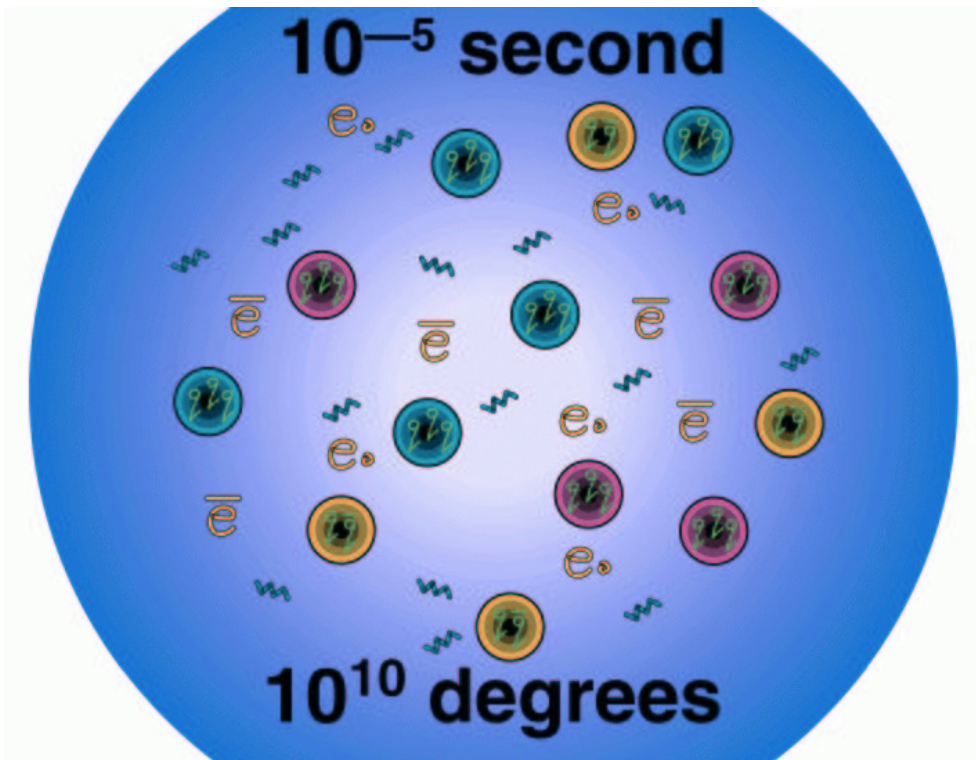


10^{15} degrees

Wielki Wybuch

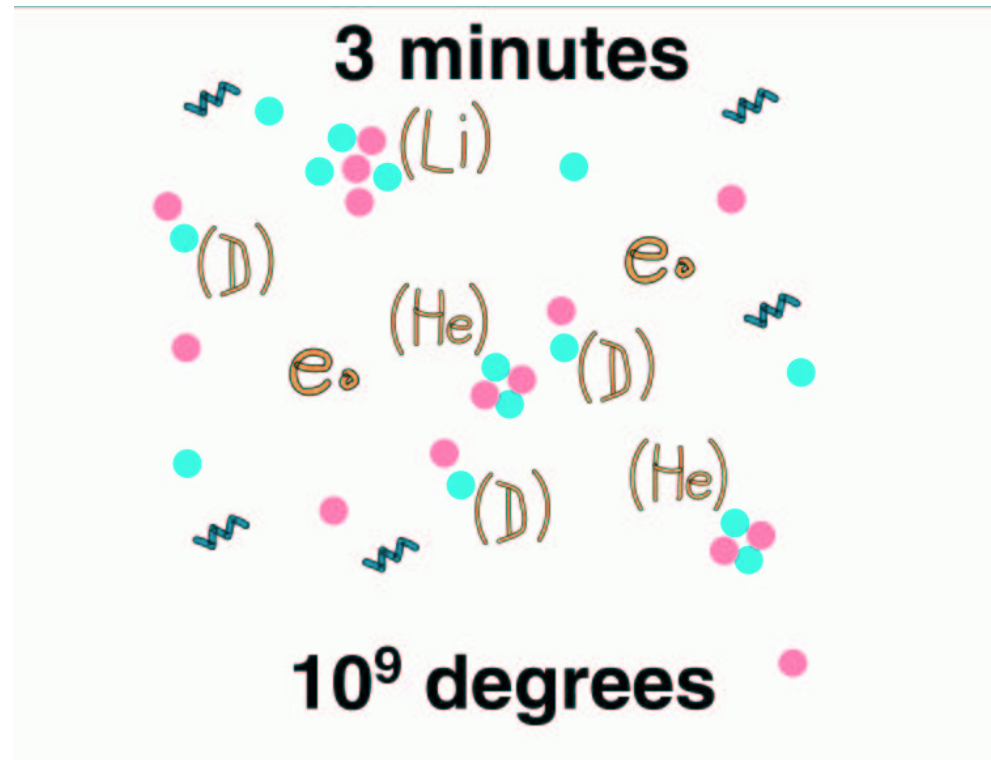
10^{-5} sekundy

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



3 minuty

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



Wielki Wybuch

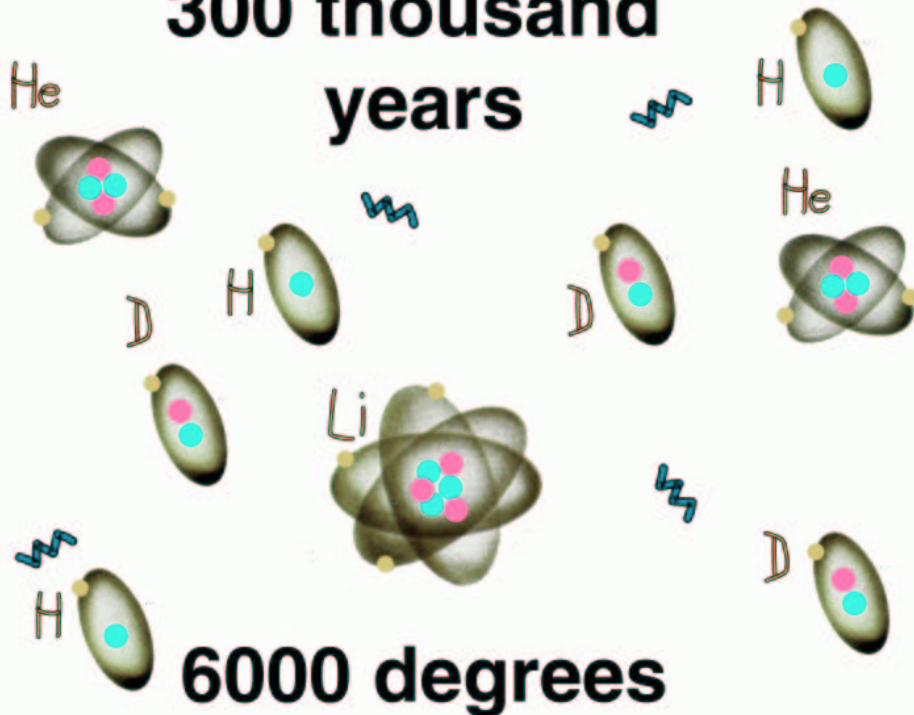
300 000 lat

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

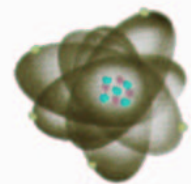
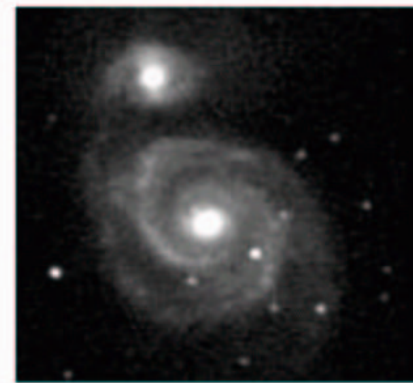
1 000 000 000 lat

Formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach.

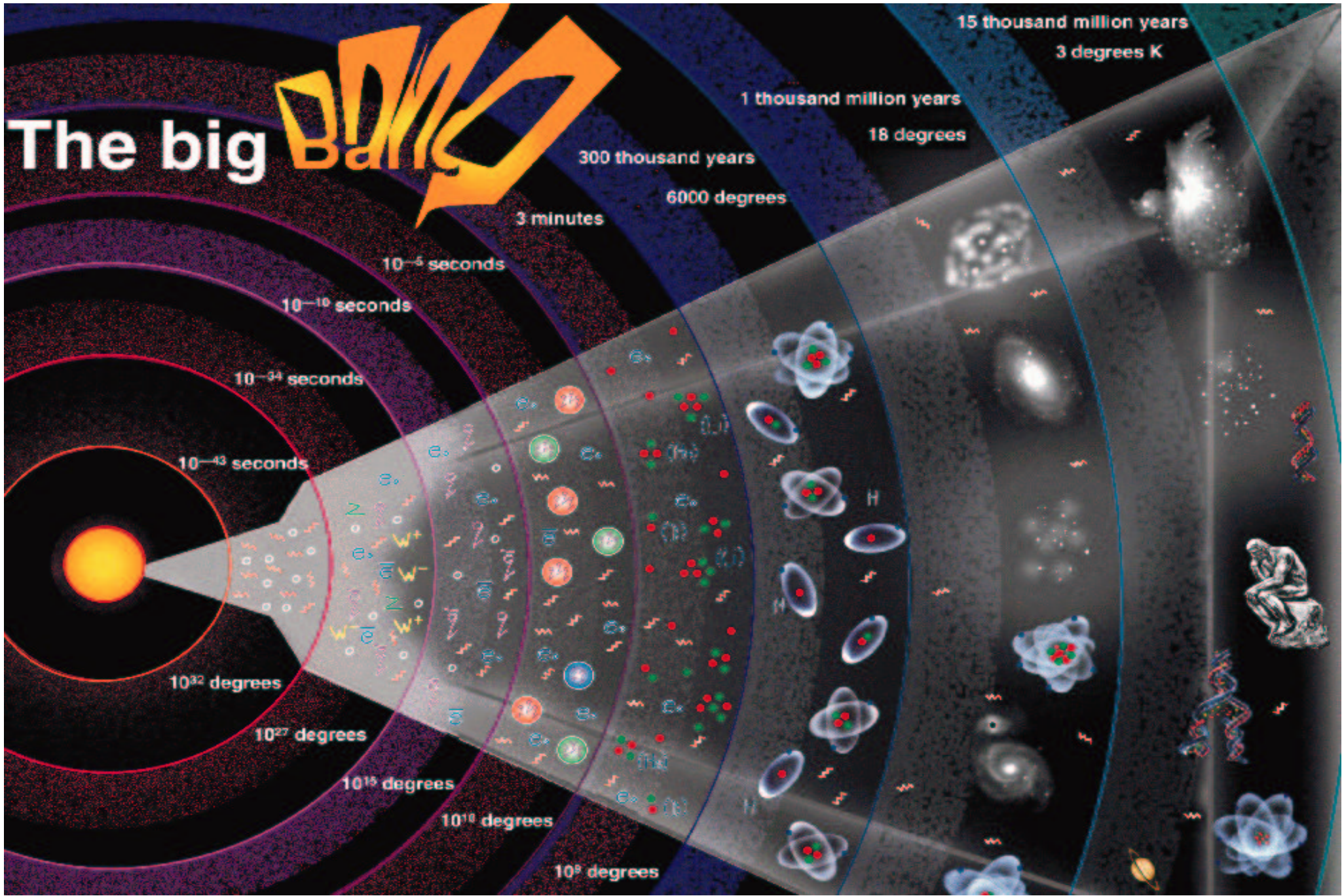
300 thousand years



1 thousand million years



18 degrees



Wielki Wybuch

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 ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

Wydaje się, że $\Omega_m \ll 1$...

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

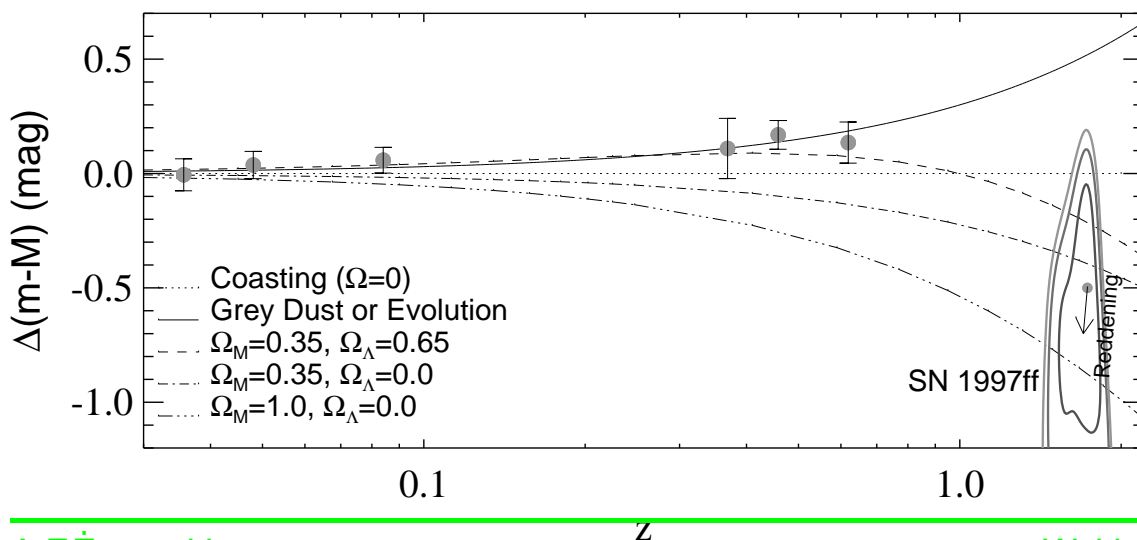
Supernowe 1A

Pomiar stałej Hubblea

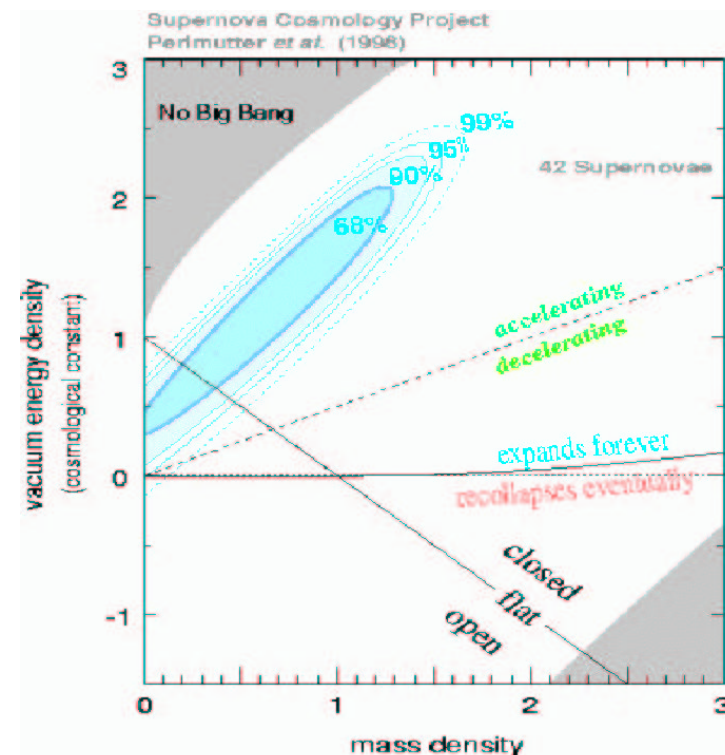
Supernowe typu 1A są najlepszym obiektem do pomiaru ekspansji Wszechświata.

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

Jasność obserwowana, w porównaniu z oczekiwaną 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

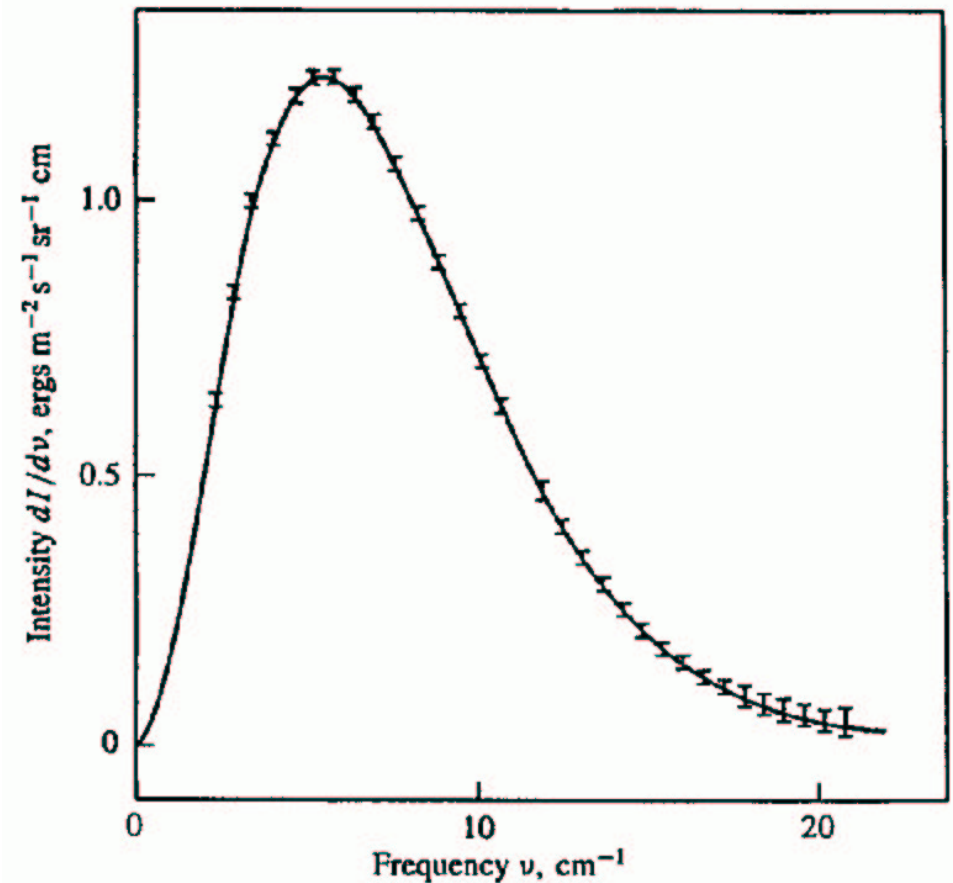
Odkrycie

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

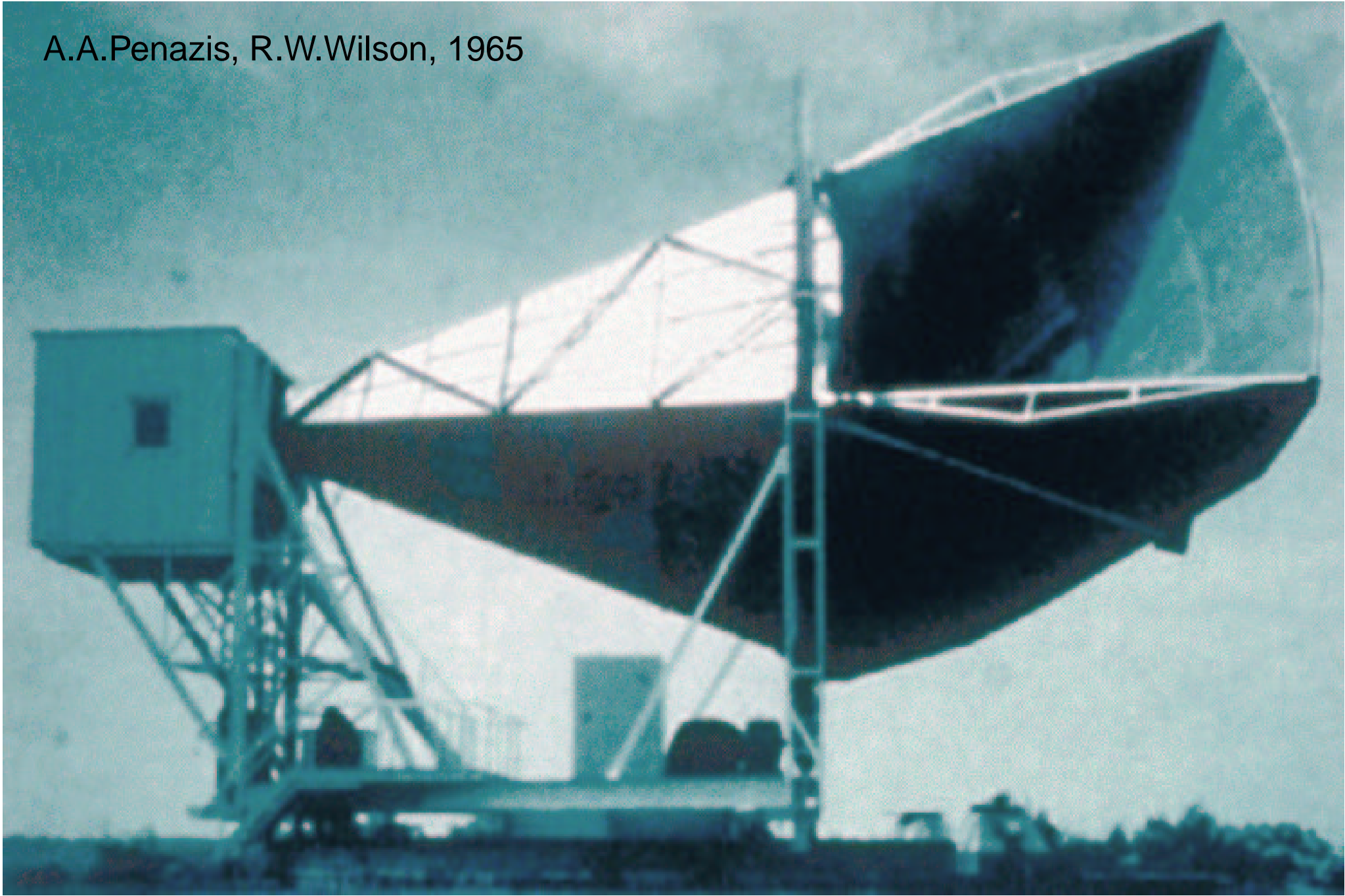
Rozkład widmowy promieniowania zgadza się z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego.

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

Wyniki z satelity COBE: (1999)



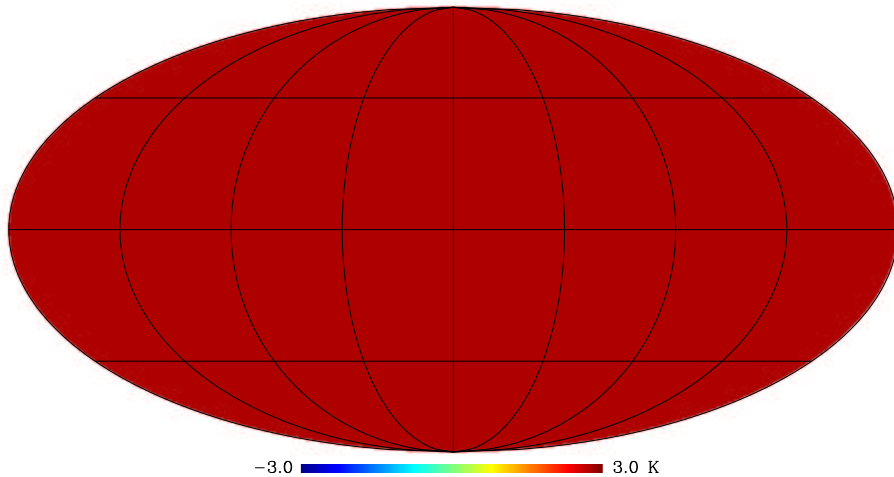
A.A.Penazis, R.W.Wilson, 1965



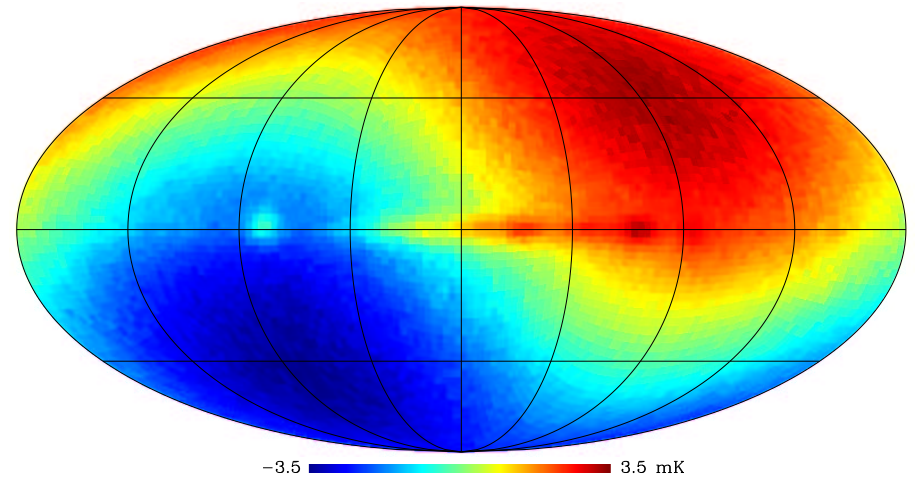
Promieniowanie tła

Rozkład kątowy

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



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

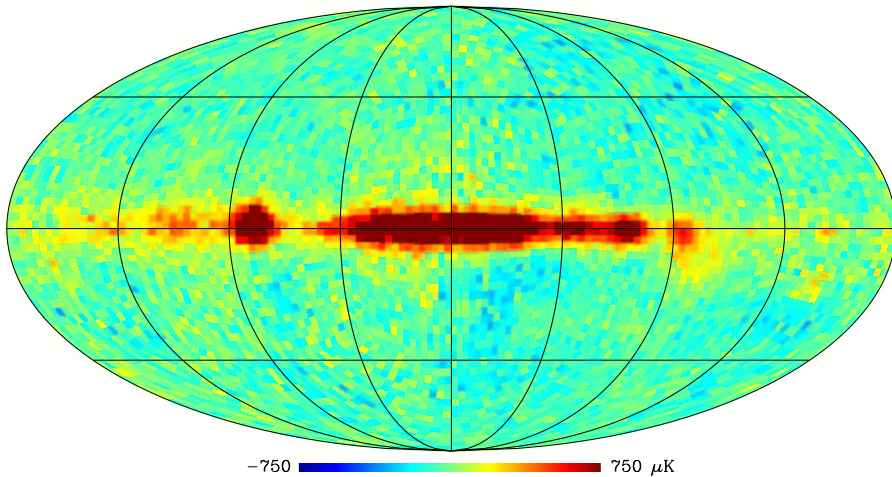


widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem
'globalnego' układu.

Promieniowanie tła

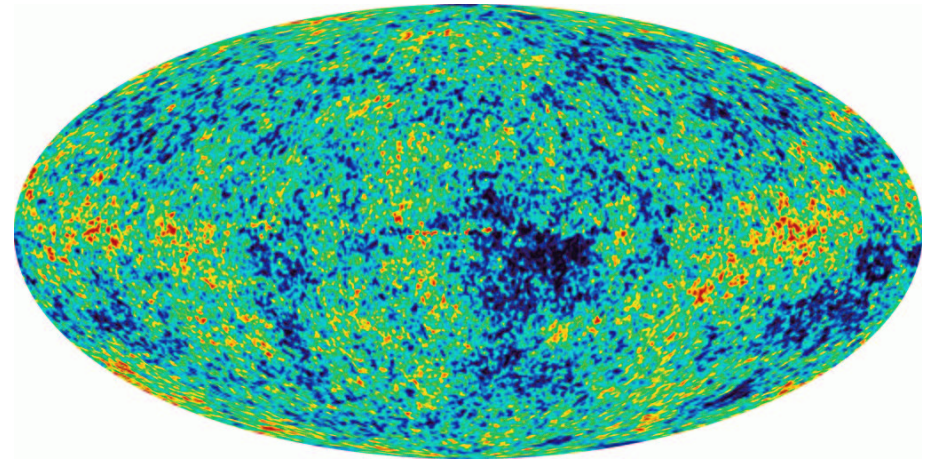
Rozkład kątowy

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

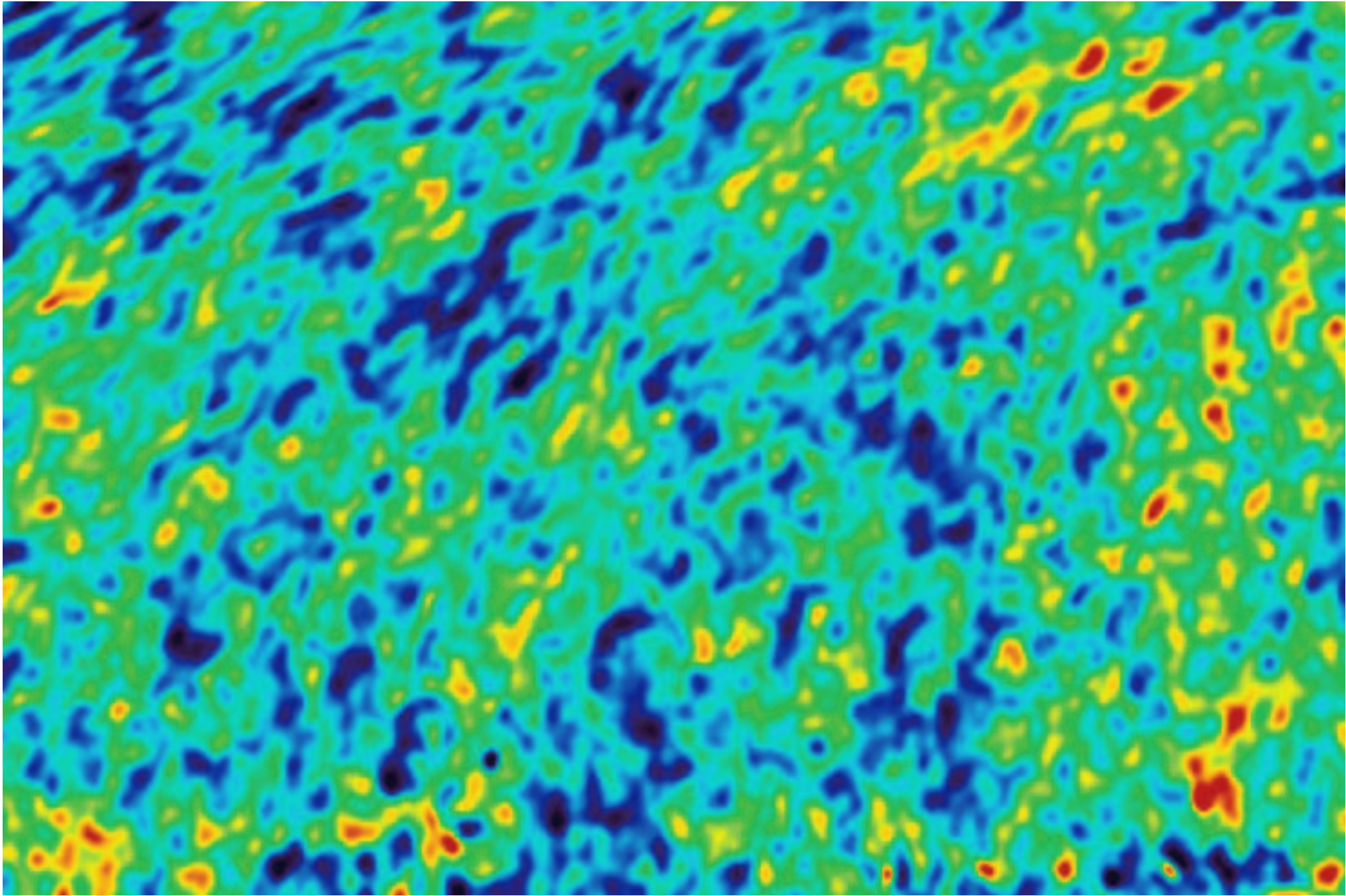


⇒ widzimy promieniowanie naszej
galaktyki (**Drogi Mlecznej**)...

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



⇒ zaczyna być ciekawie !!!



Promieniowanie tła

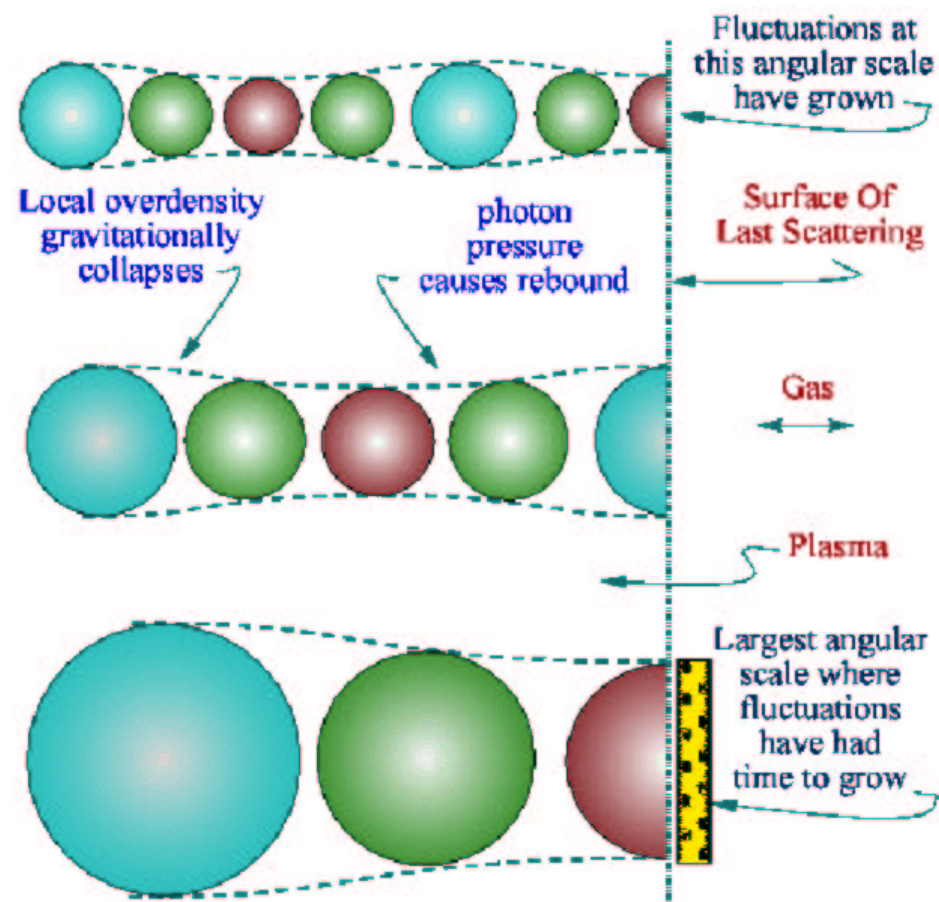
Fluktuacje

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

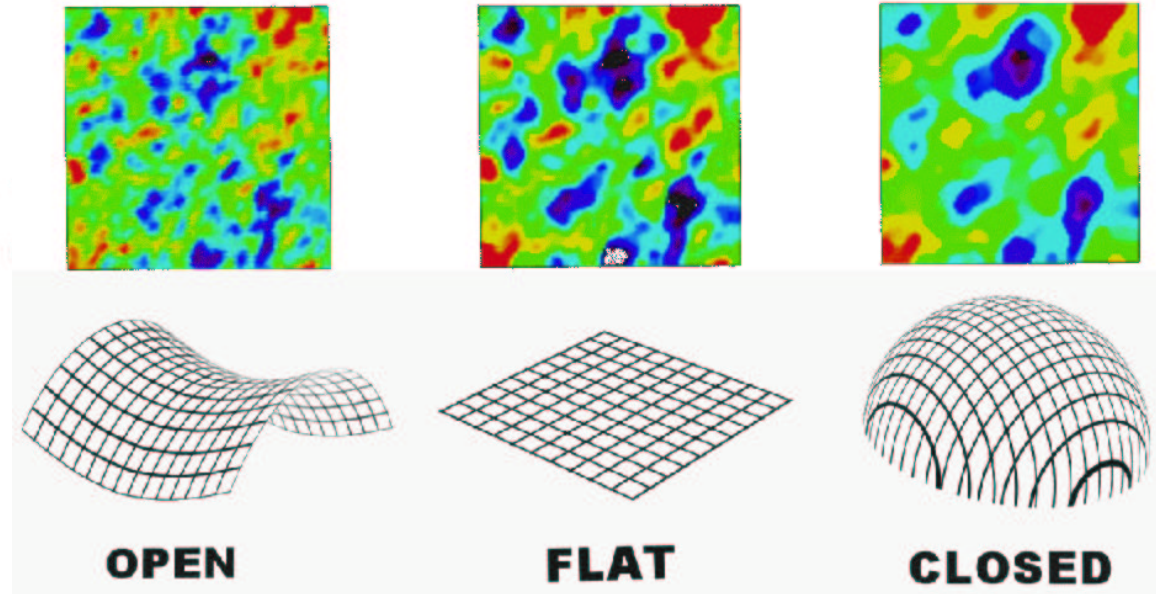
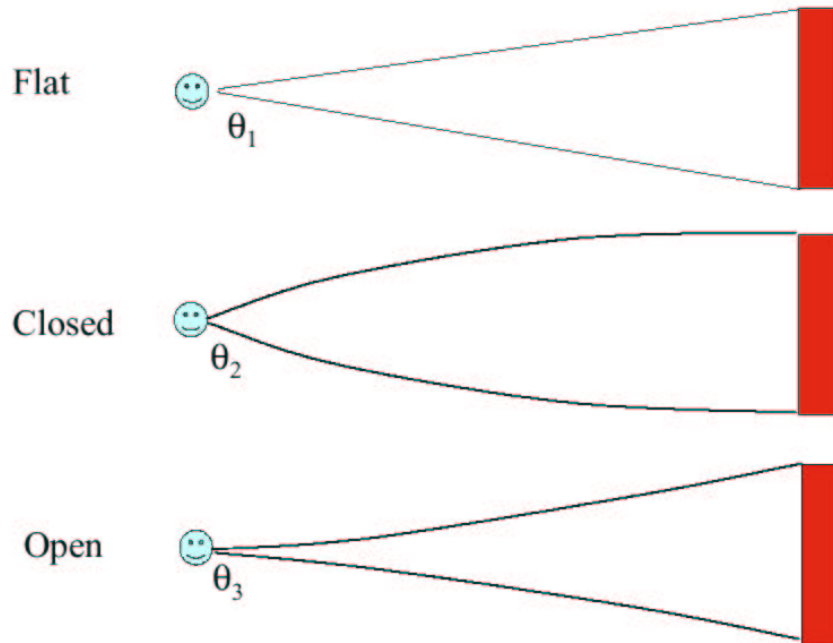


Promieniowanie tła

Fluktuacje

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

Wyniki symulacji:



Promieniowanie tła

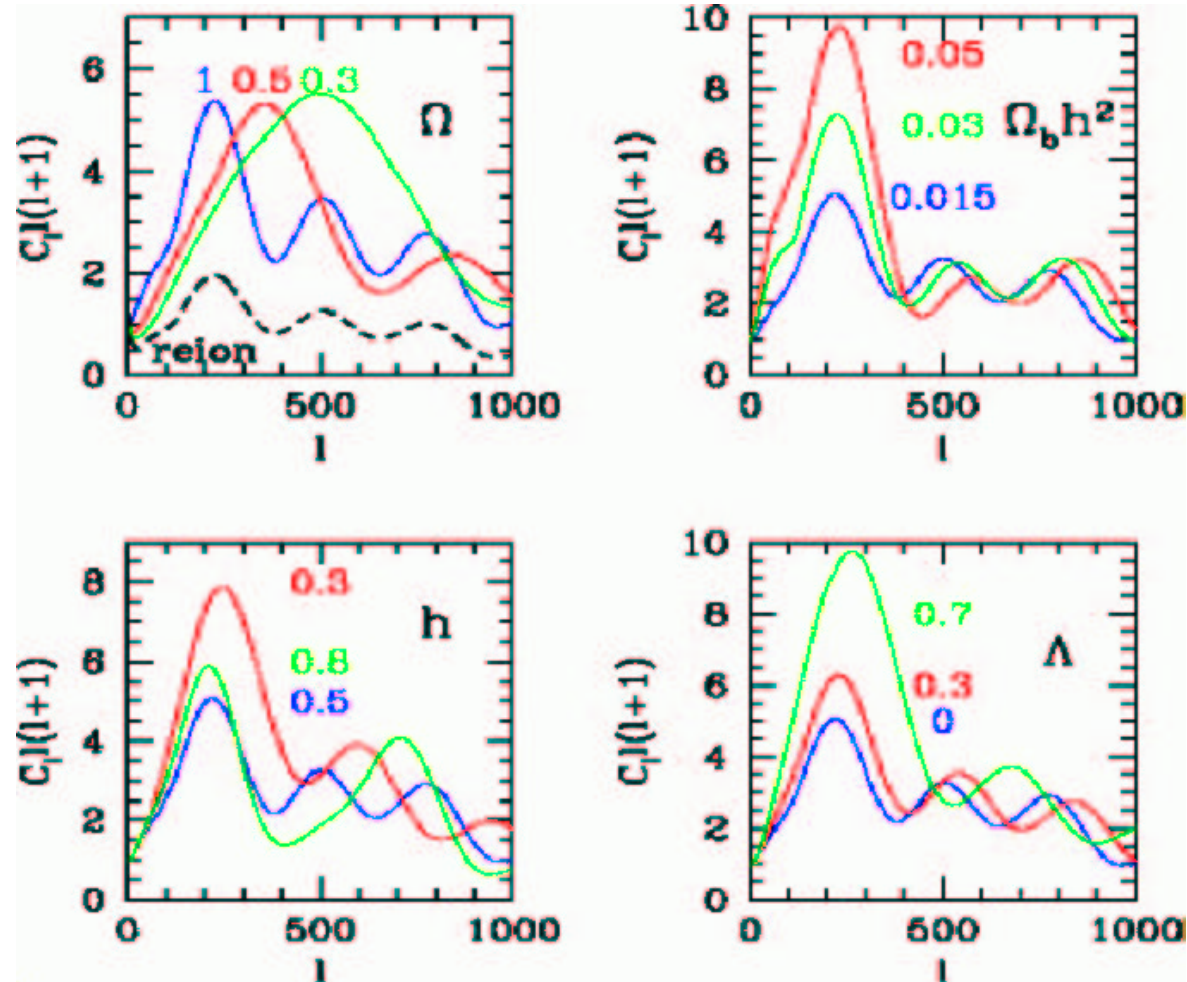
Fluktuacje

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 $l \sim 200$

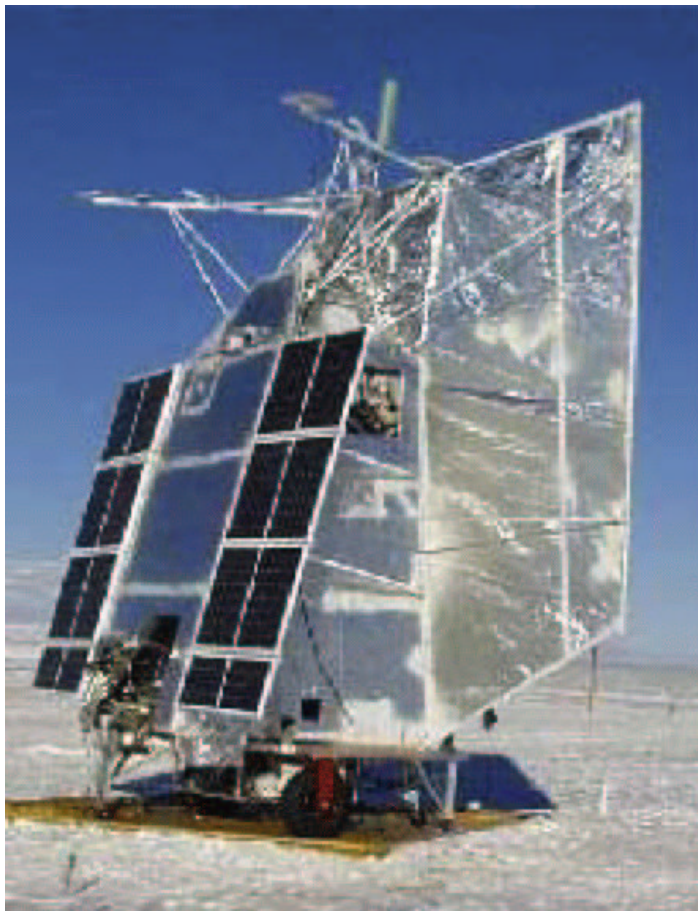
Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów:



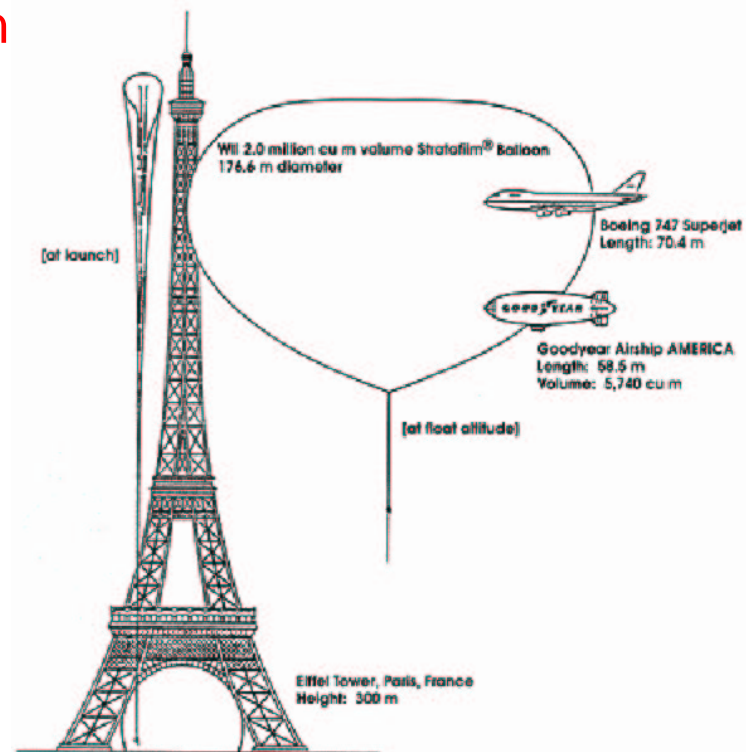
Boomerang

Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geomagnetics

Detektor



'Satelita' z teleskopami mierzącymi promieniowanie **mikrofalowe** w zakresie od 90 do 400 GHz został wyniesiony na **wysokość ok 40'000 km** przez specjalny **balon**



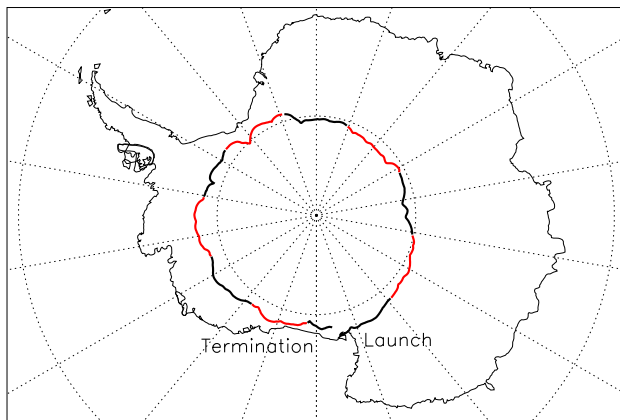
NASA balloon size

Boomerang

Lot

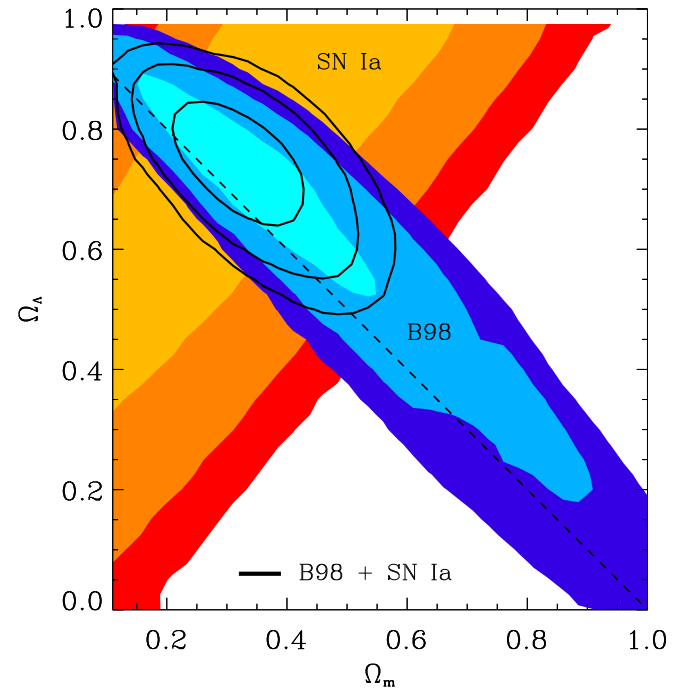
Aby zapewnić **optymalne warunki** pracy detektora (**niskie tło 'cywilizacyjne'**), możliwość pomiarów tego samego obszaru przez całą dobę) eksperyment wykonano na **biegunie południowym**.

Trasa 10 dniowego lotu (1998/99):



Wyniki (2000)

Połączenie informacji z pomiaru promieniowania tła przez **Boomerang** i odległych **supernowych**:



$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$\Omega_\Lambda \sim 0.7 \quad !?$$

WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Detektor

Sonda kosmiczna wystrzelona 30.06.2001.

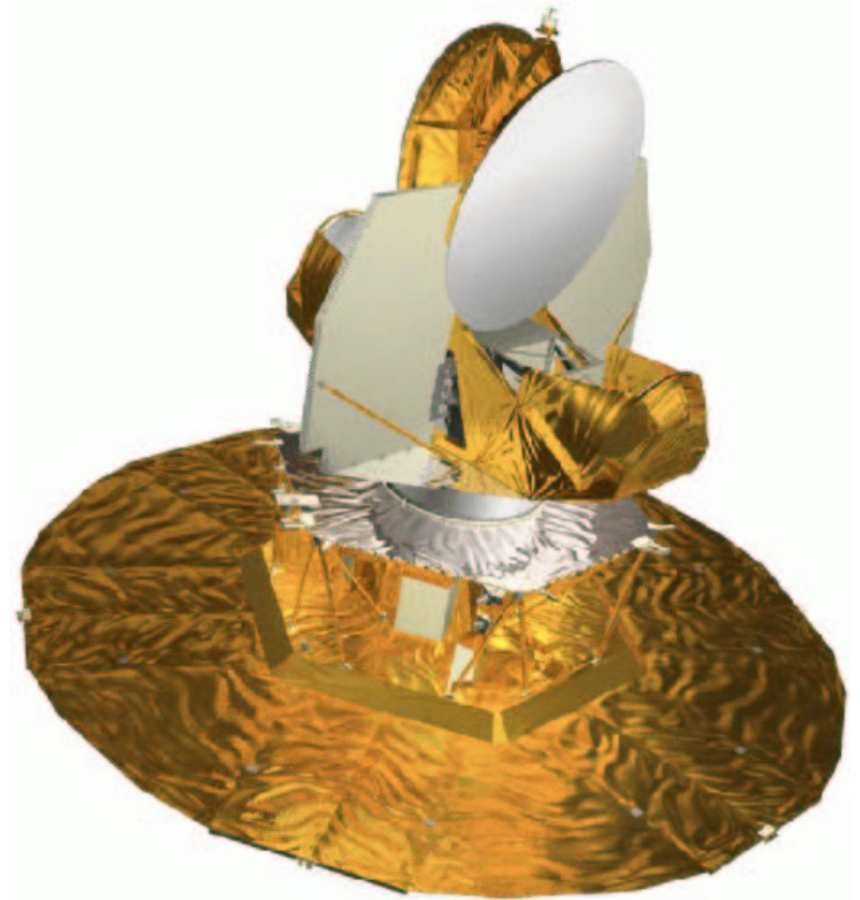
Pomiar promieniowania mikrofalowego
w 5 przedziałach częstości:

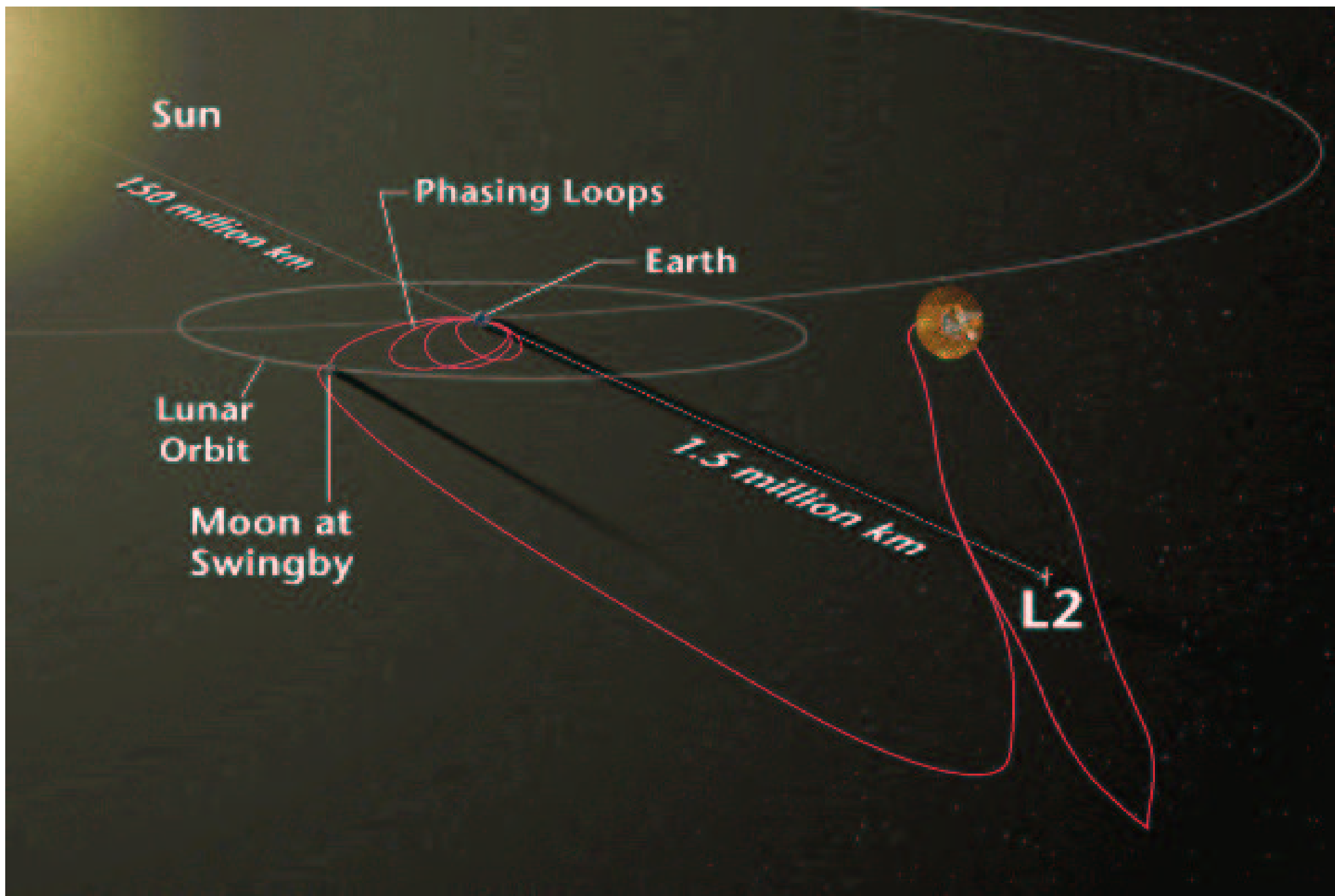
od 23 GHz (13 mm) do 94 GHz (3.2 mm).

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



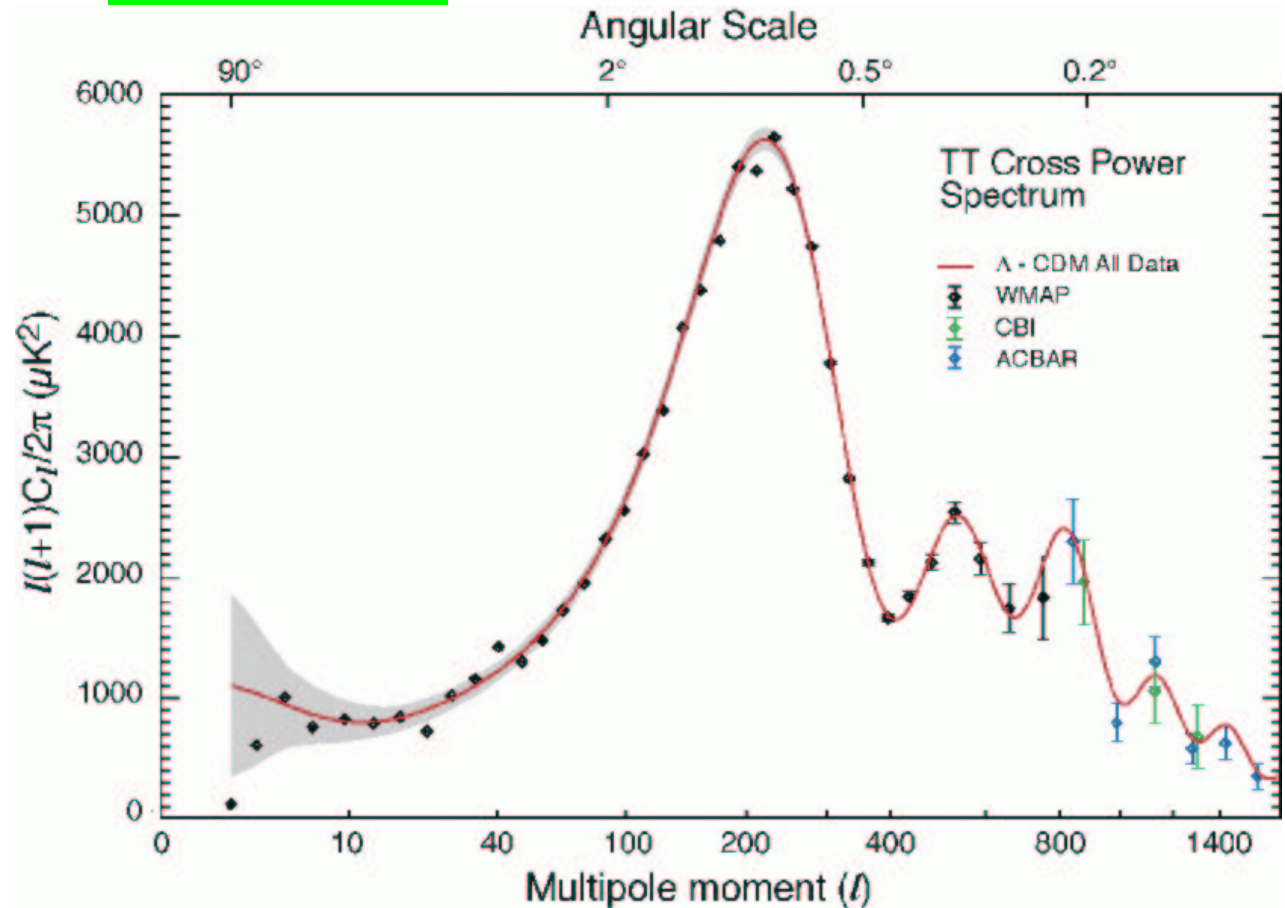


WMAP

Wyniki (2003 !!!)

Bardzo precyzyjny pomiar korelacji kątowych w promieniowaniu tła.

Możliwe jednoczesne dopasowanie wielu parametrów kosmologicznych



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

⇒ gęstość całkowita: $\Omega_{tot} = 1.02 \pm 0.02$

⇒ Wszechświat jest płaski !... ($k = 0$)

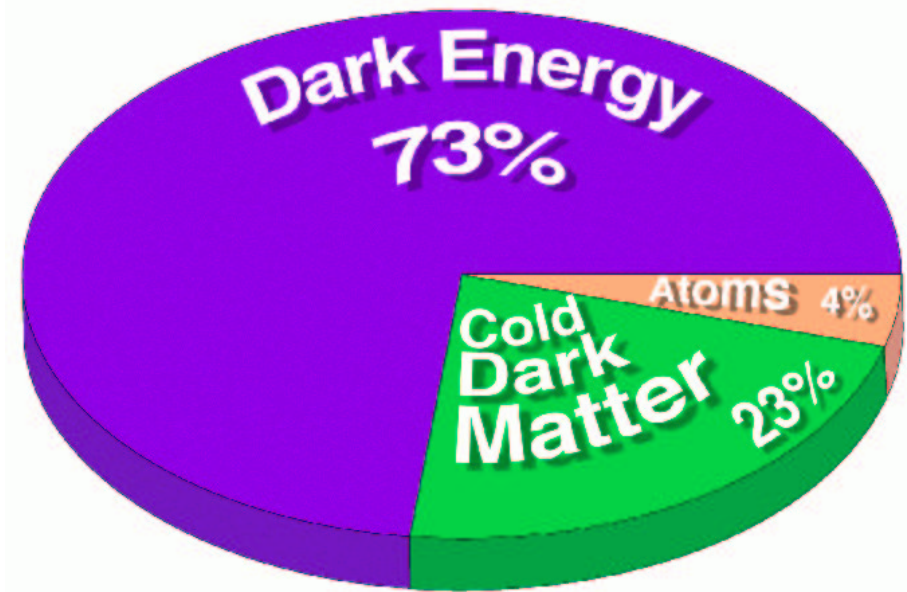
WMAP

Wyniki

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

23% stanowi tzw. **ciemna materia**, której natury na razie nie znamy (?)...

73% to “**ciemna energia**”, którą opisujemy poprzez **stałą kosmologiczną** (?)



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

Wiek Wszechświata:

$$T = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr} \quad (\text{poprzednio } \pm 1.7 \text{ Gyr})$$

Obecna wartość stałej Hubble'a:

$$H = 71_{-3}^{+4} \text{ km}/(s \cdot \text{Mpc})$$