Kosmologia

Elementy fizyki cząstek elementarnych
Wykład IX

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

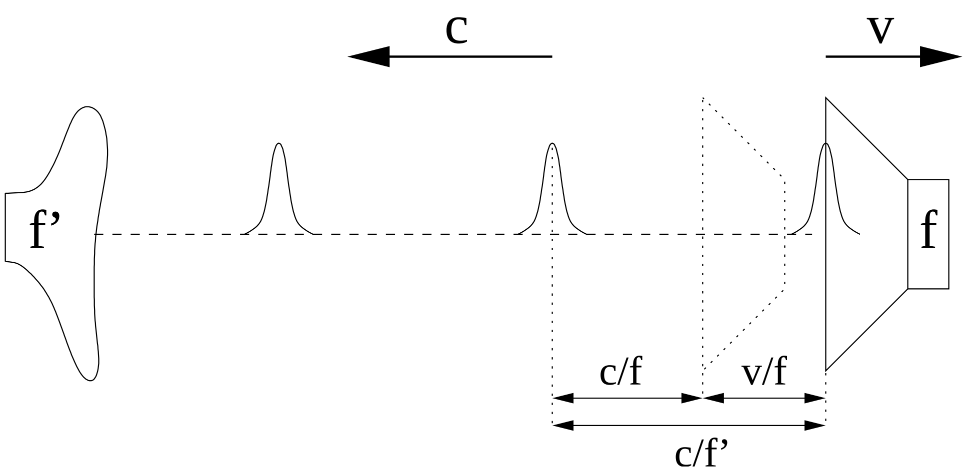
Prawo Hubbla

Efekt Dopplera

Przypadek (klasyczny) A:

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

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



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

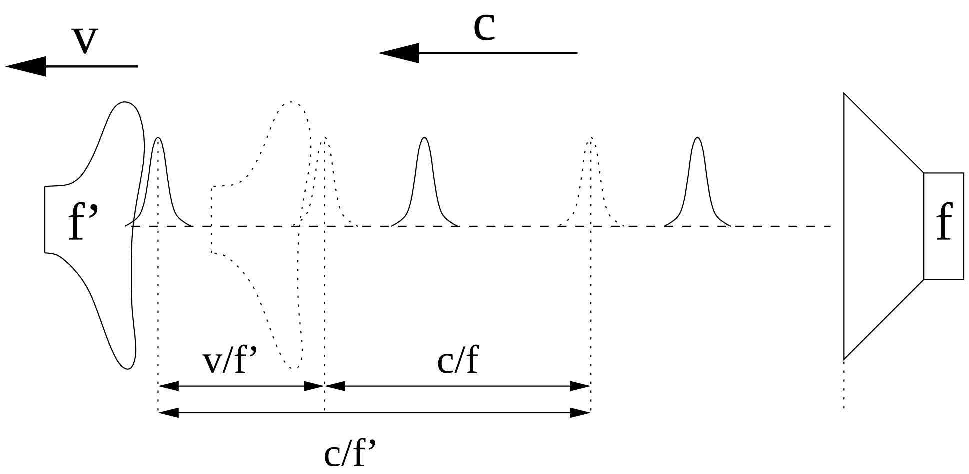
$$f' = \frac{f}{1+\frac{v}{c}}$$

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

Prawo Hubbla

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 podejściu klasycznym są różne dla przypadków A i B. Istotny jest ruch względem ośrodka.

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 o czynnik $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

Przypadek A:

Poruszające się źródło drga z częstością γ razy mniejszą:

$$f' \;=\; \frac{f/\gamma}{1+\frac{v}{c}} = f\,\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

Przypadek B:

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

$$f' \;=\; \gamma\, f\,\left(1-\frac{v}{c}\right) = f\,\sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

Efekt 'relatywistyczny' nie wyróżnia żadnego układu odniesienia !

Prawo Hubbla

Przesunięcie ku czerwieni

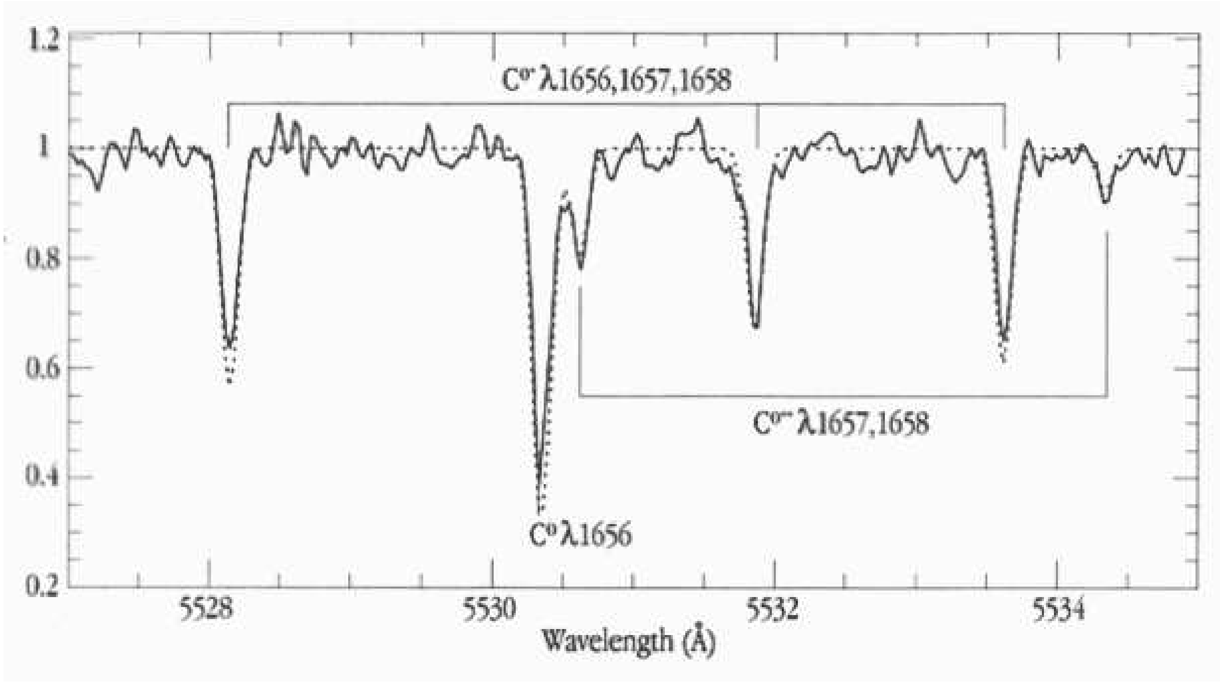
Jeśli źródło światła oddala się od obserwatora następuje wydłużenie fali:

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

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

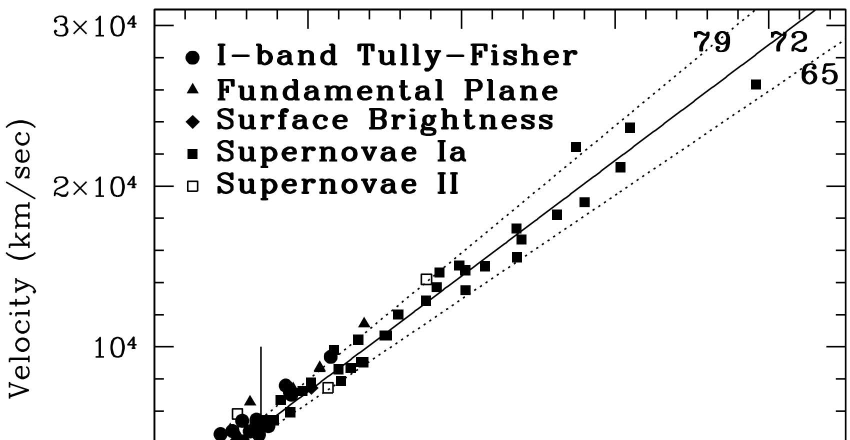
Zauważył on też, że prędkość 'ucieczki' rośnie z odległością:

$$v = H\,r$$

r - odległość od Ziemi, H - stała Hubbla

Wartość podana przez Hubbla: $H \approx 500 km/s/Mpc$.

Obecne pomiary:

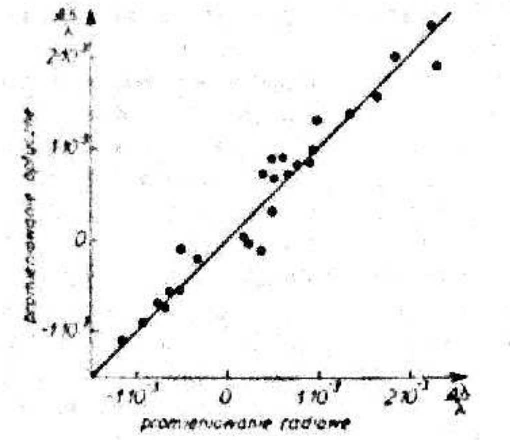


Prawo Hubbla

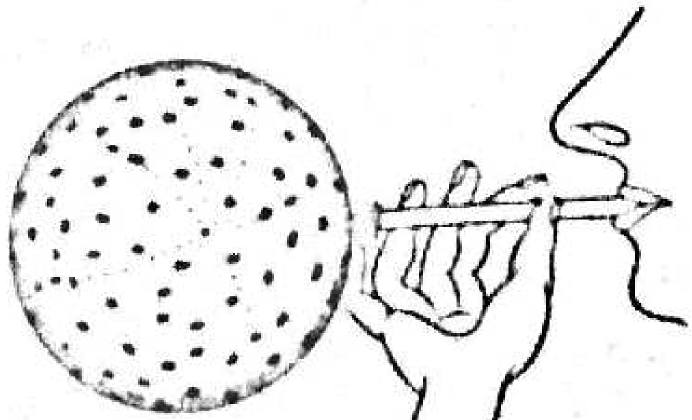
Przesunięcie ku czerwieni

Obserwowane przsunięcie 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 bedą 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

Zamiast opisywać ’przepływ’ materii we Wszechświecie (pozycja zależna od czasu: $r = r(t)$), możemy wprowadzić **układ współporuszający się**.

W układzie tym materia (uśredniona na skalach kosmologicznych) jest zawsze w spoczynku ($r = r_0$).

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

Równania Friedmann'a

Równanie Einsteina możemy sprowadzić do równań na skalę $R(t)$. Równania Friedmann'a:

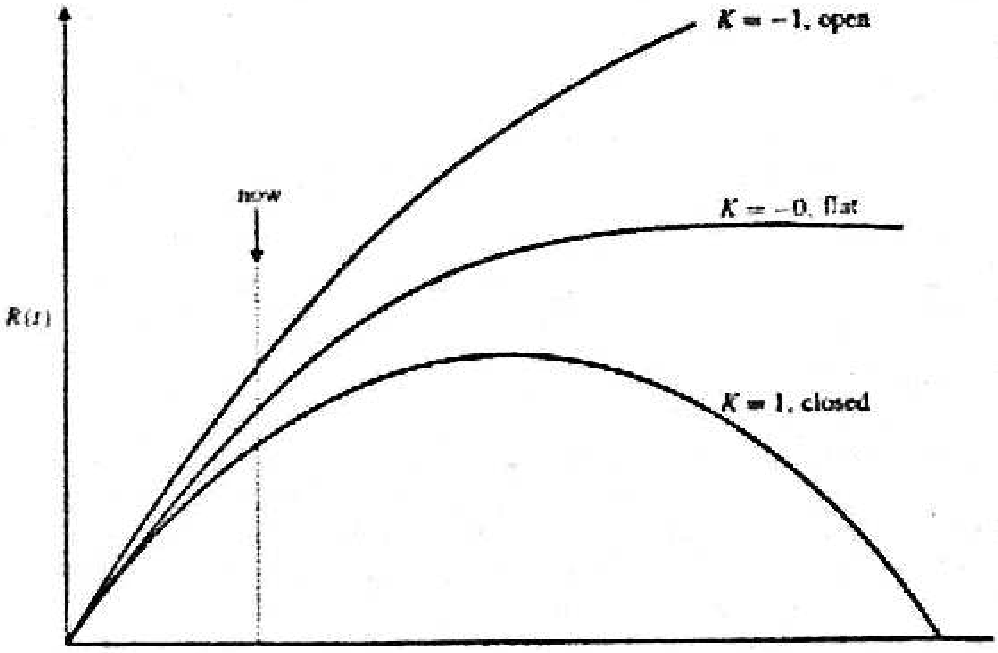
$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{R^2} + \frac{1}{3}\Lambda$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda}{3} - \frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

gdzie: ρ - gęstość materii, p - ciśnienie

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

W ogólnym przypadku Wszechświat ewoluuje:



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 $\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1 \Rightarrow$ Wszechświat jest płaski.
Dla $\Omega_{tot} > 1 \Rightarrow$ 'otwarty' (rozszerza się w nieskończoność)
Dla $\Omega_{tot} < 1 \Rightarrow$ 'zamknięty' (kiedyś zacznie się zapadać)

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

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

Wielki Wybuch

Początki Wszechświata

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

Na samym początku wszystkie składniki materii (fermiony) i promieniowanie (bozony) były ze sobą w stanie quasi-równowagi termodynamicznej i występowały w porównywalnych ilościach (zakładając, że $kT \gg Mc^2$).

Dla przykładu, równowaga między elektronami i neutrinami:

$$e^{+} + e^{-} \quad \longleftrightarrow \quad \nu + \bar{\nu}$$

Ekspansja Wszechświata $\Rightarrow$ malejąca gęstość energii (czyli także energie pojedyńczych cząstek).

Dla $t > 0.01s$ przekrój czynny zbyt mały
$\Rightarrow$ neutrina zostają 'uwolnione'

Dla $t \sim 1s$ we Wszechświecie dominowały fotony, leptony oraz protony i neutrony.

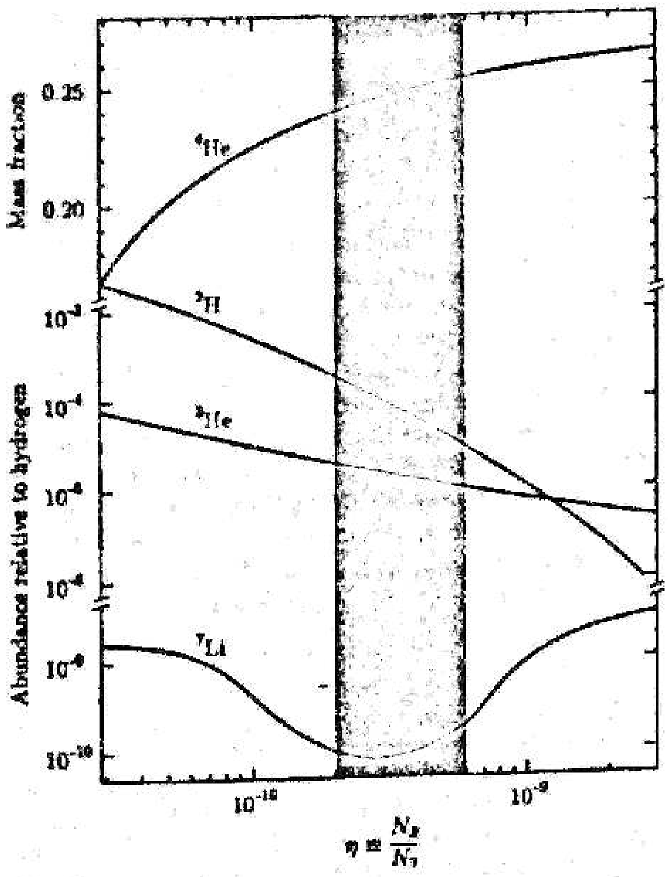
Wielki Wybuch

Nukleosynteza

W miarę dalszego 'ochładzania' zaczynają się tworzyć jądra atomowe:

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

Przyjmując, że 'ochładzanie' następuje powoli i układ jest cały czas w quasi-równowadze termodynamicznej, model Wielkiego Wybuch poprawnie opisuje zawartość różnych lekkich izotopów we Wszechświecie.



Wielki Wybuch

Ewolucja Wszechświata

Na pierwszym etapie gęstość energii promieniowania była znacznie większa od gęstości materii.

Gęstość energii promieniowania zmienia się jak

$$\rho_\gamma \sim R^{-4}$$

co po wstawieniu do równań ewolucji daje nam:

$$\begin{aligned} R(t) &\sim t^{1/2} \\ kT &\sim t^{-1/2} \end{aligned}$$

Gęstość materii spada wolniej niż promieniowania:

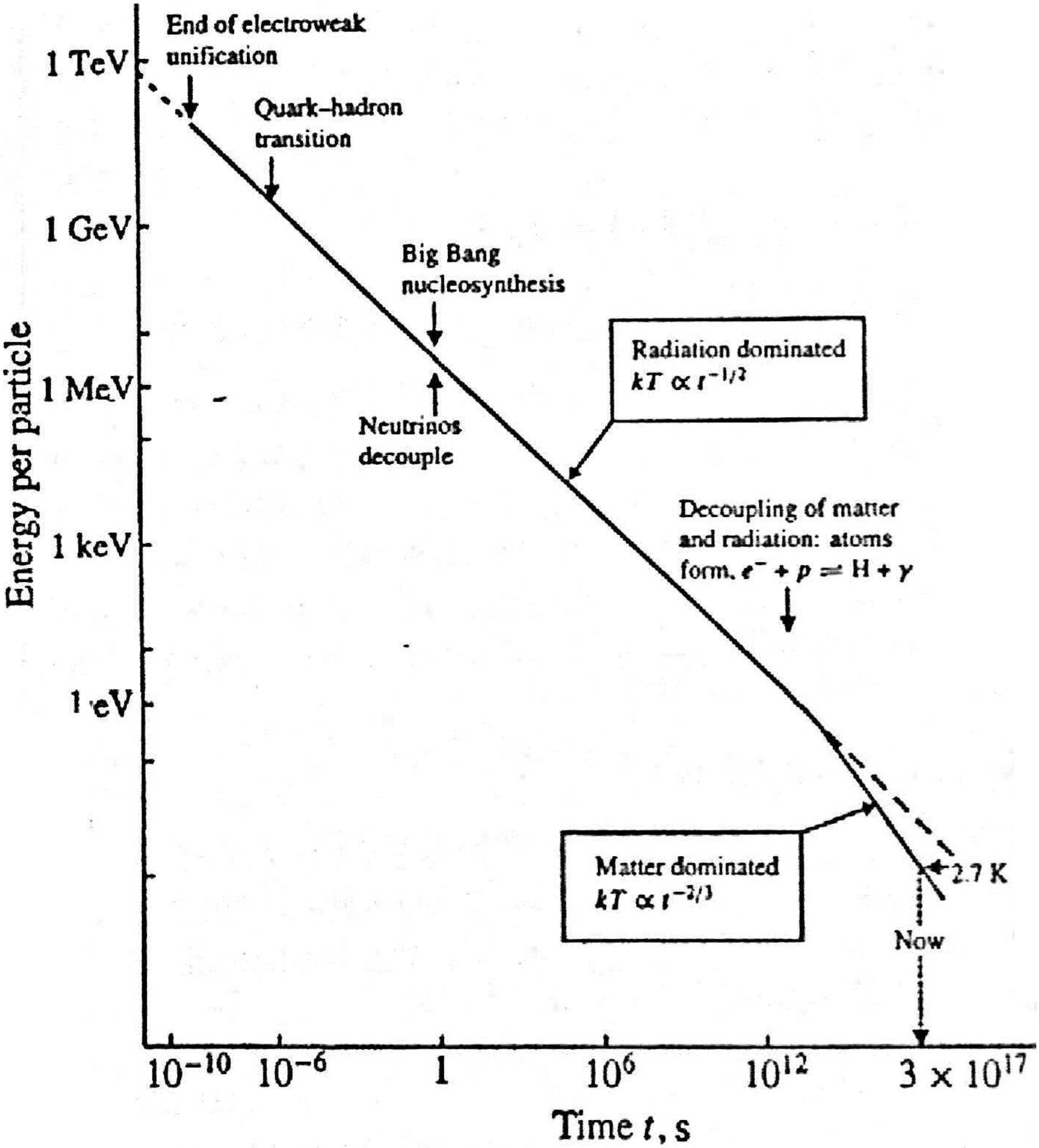
$$\rho_m \sim R^{-3}$$

Dla czasów rzędu $\sim 10^5$ lat zaczyna dominować materia

$$\begin{aligned} R(t) &\sim t^{2/3} \\ kT &\sim t^{-2/3} \end{aligned}$$

Wielki Wybuch

Ewolucja Wszechświata



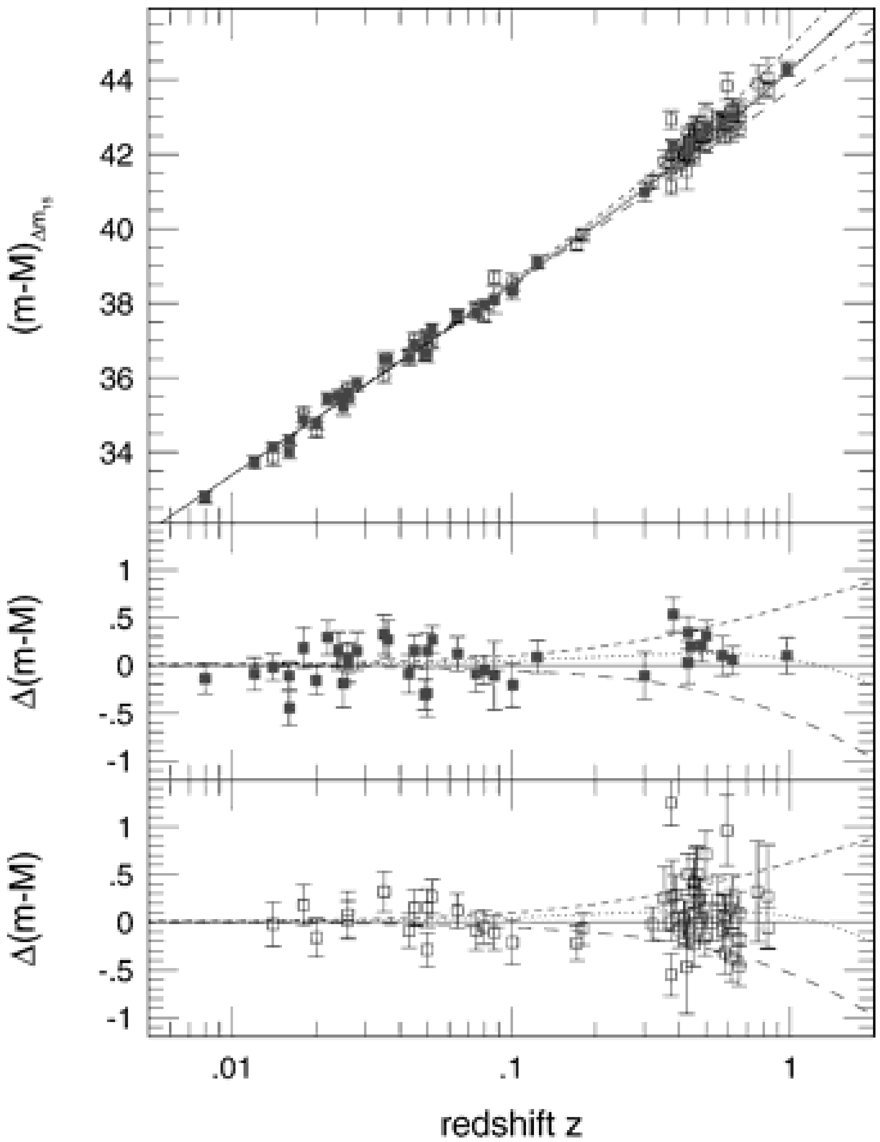
Supernowe 1A

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
$\Rightarrow$ jasność obserwowana definiuje odległość.

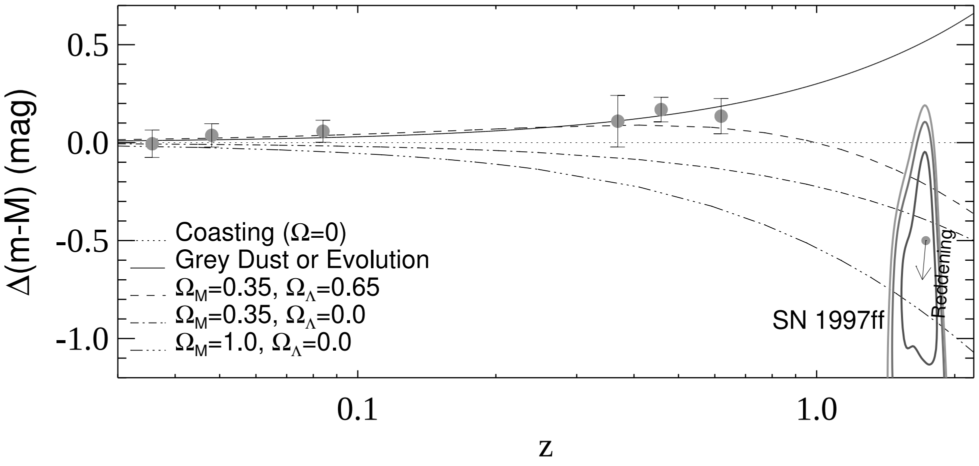
Zależność jasności od przesunięcia ku czerwieni z:



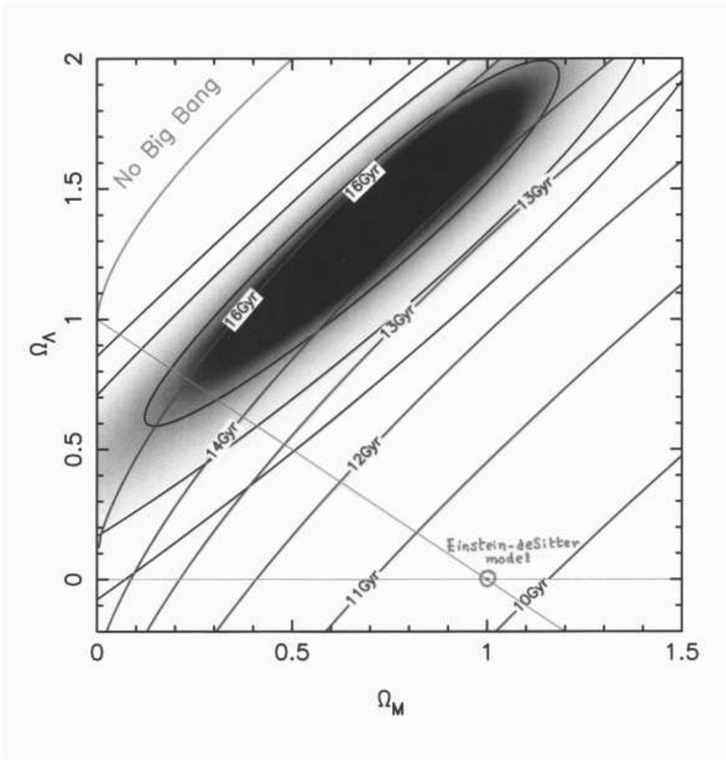
Supernowe 1A

Dopasowanie

Jasność obserwowana, w porównaniu z oczekiwaną dla modelu z $\Omega_{tot} = 0$ (pustego Wszechświata), uśredniona dla różnych przedziałów z:



Możemy dopasować parametry Ω_M i Ω_Λ:



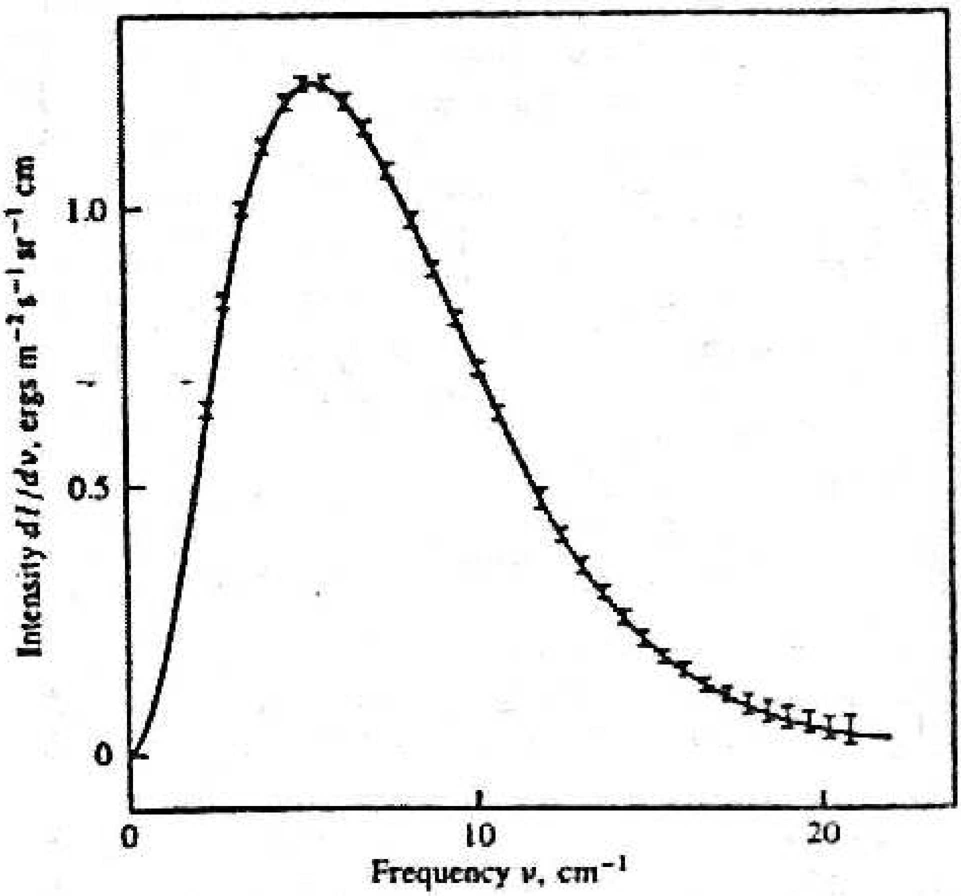
Promieniowanie tła

Odkrycie

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

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

Wyniki z satelity COBE:

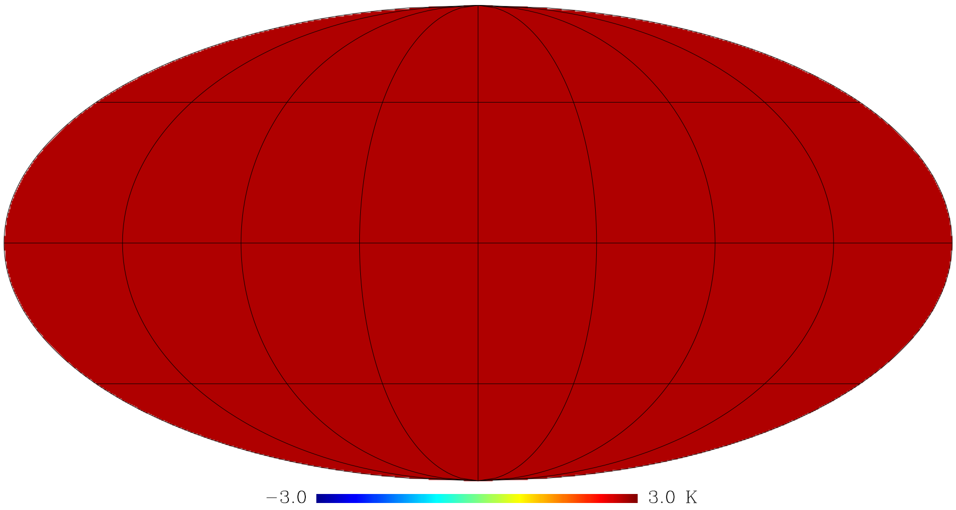


$$T = 2.73 \pm 0.01\ K$$

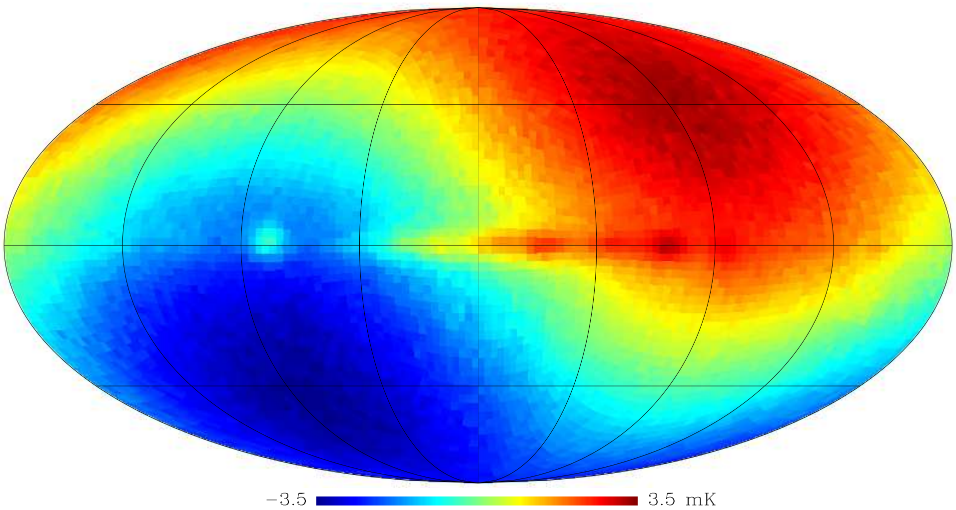
Promieniowanie tła

Rozkład kątowy

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



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

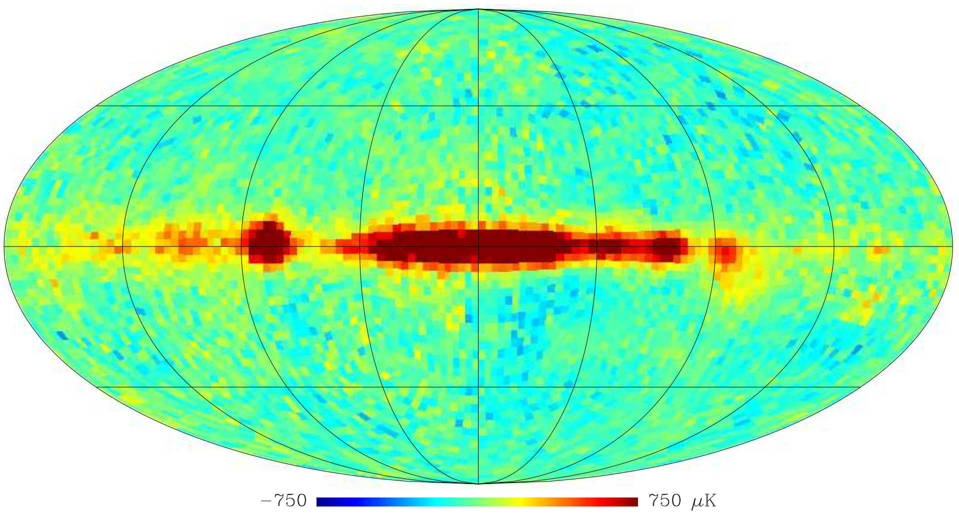


widzimy wpływ ruchu Ziemi względem 'globalnego' układu.

Promieniowanie tła

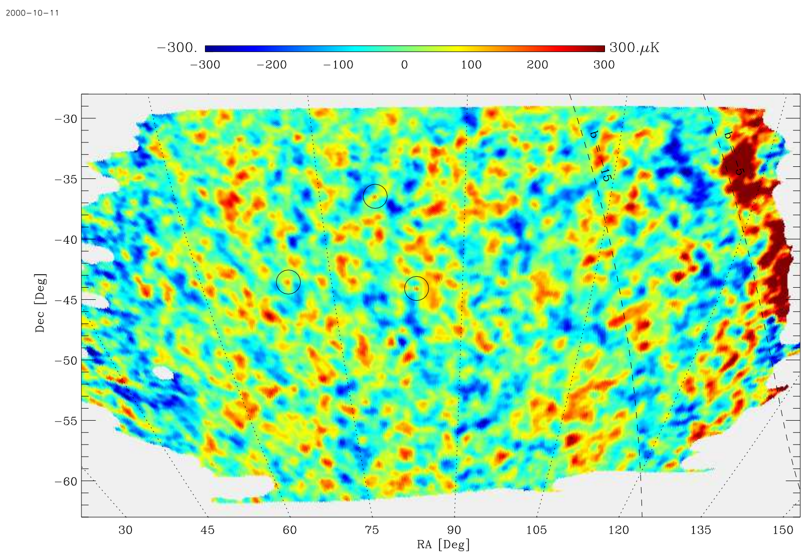
Rozkład kątowy

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



$\Rightarrow$ widzimy promieniowanie naszej galaktyki...

Spójżmy więc poza płaszczyznę galaktyki ($\Delta T \sim 100 \mu K$):



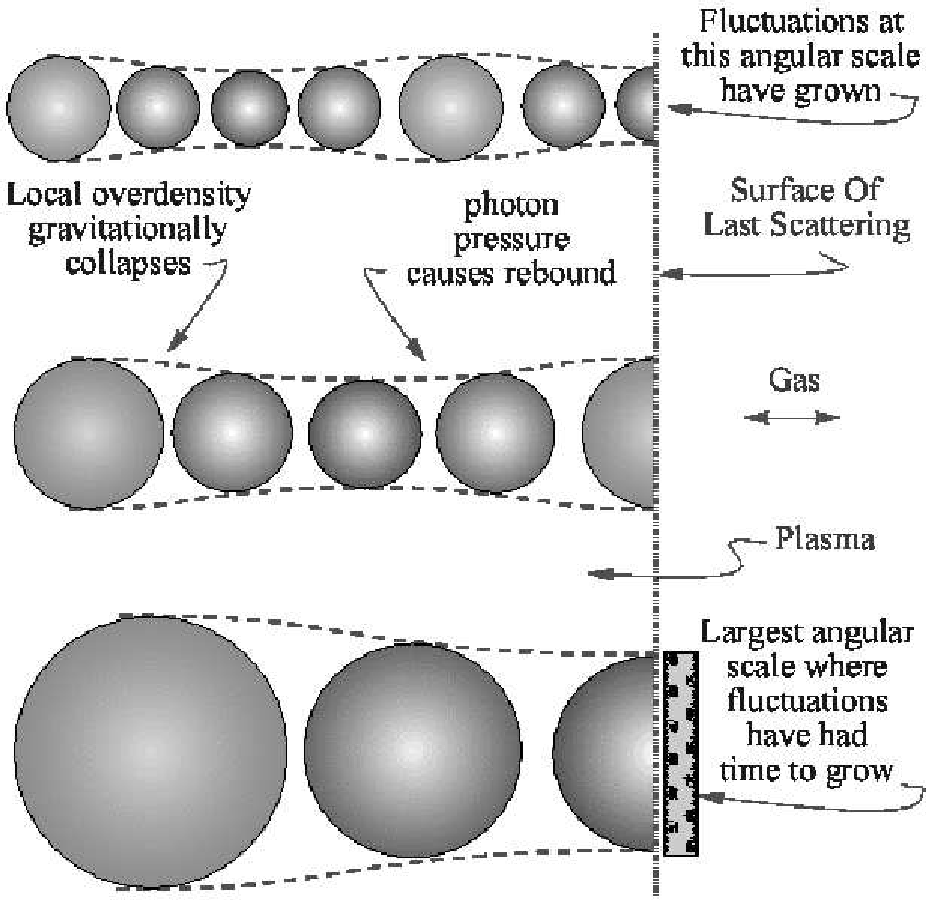
$\Rightarrow$ zaczyna być ciekawie !!!

Promieniowanie tła

Fluktuacje

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

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



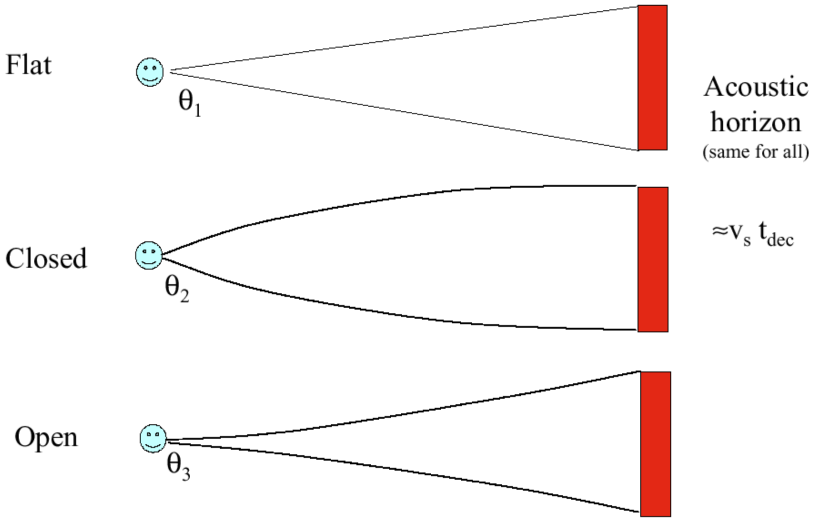
Charakter fluktuacji w promieniowaniu tła zależą od 'kształtu' Wszechświata w chwili oddzielenia promieniowania...

$\Rightarrow$ zależą od parametrów modelu

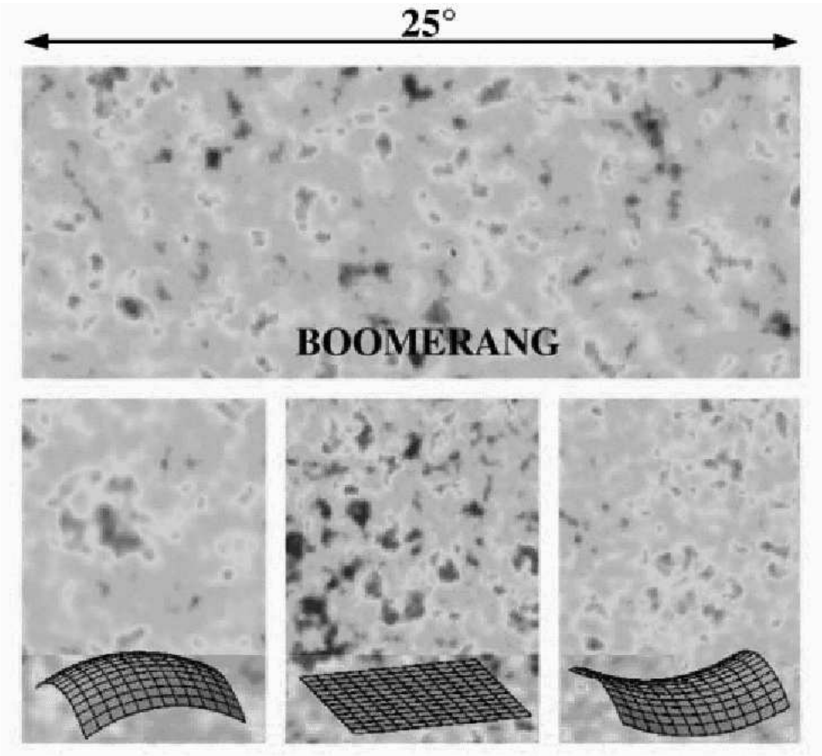
Promieniowanie tła

Fluktuacje

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



Wyniki symulacji:

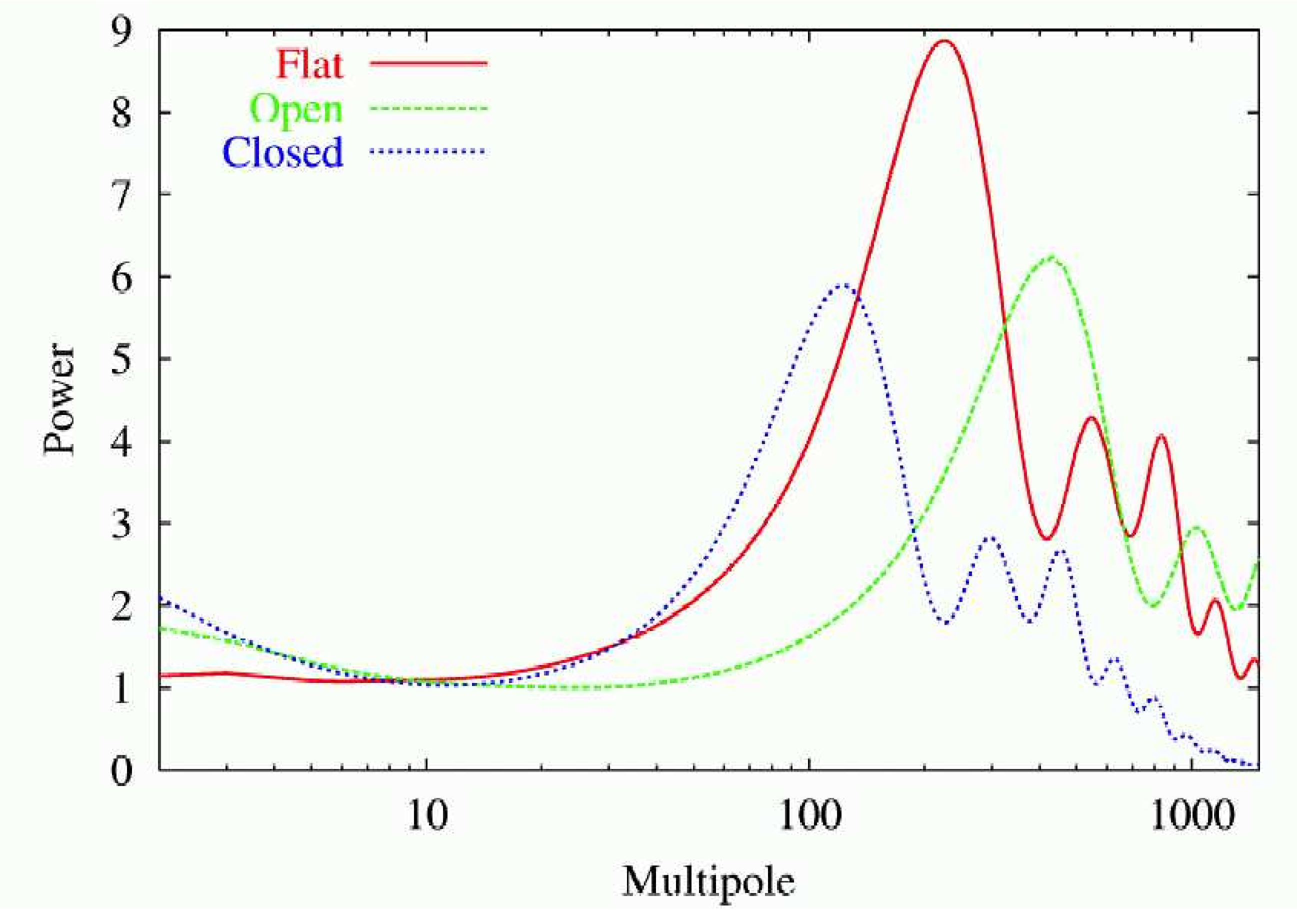


Promieniowanie tła

Fluktuacje

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

Oczekiwany rozkład natężenia dla poszczególnych 'multipoli' (wielomianów danego rzędu):

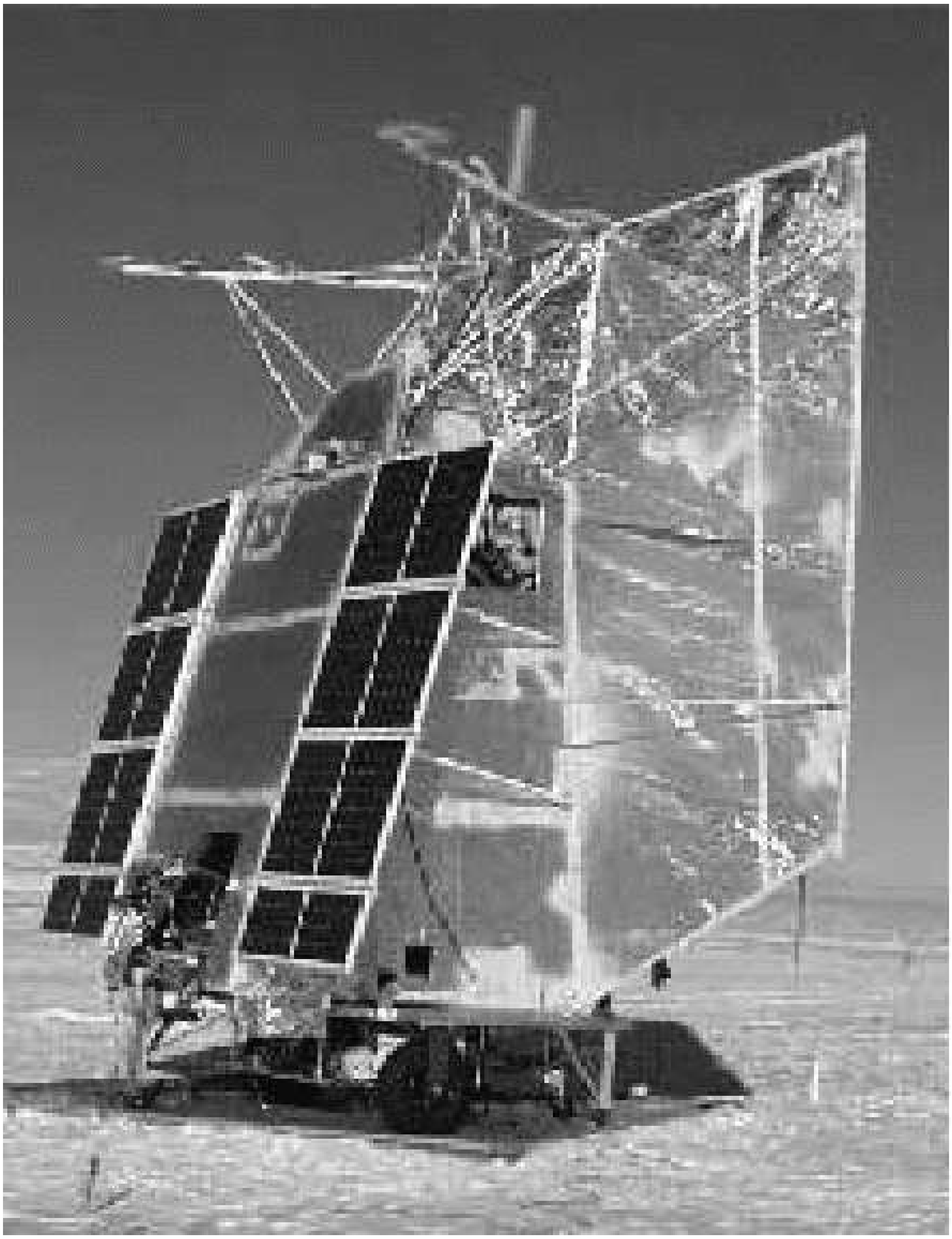


np. dla płaskiego Wszechświata oczekujemy dominującego wkładu od $P_{\sim 200}(\cos\theta_{ij})$

Boomerang

Baloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geomagnetics

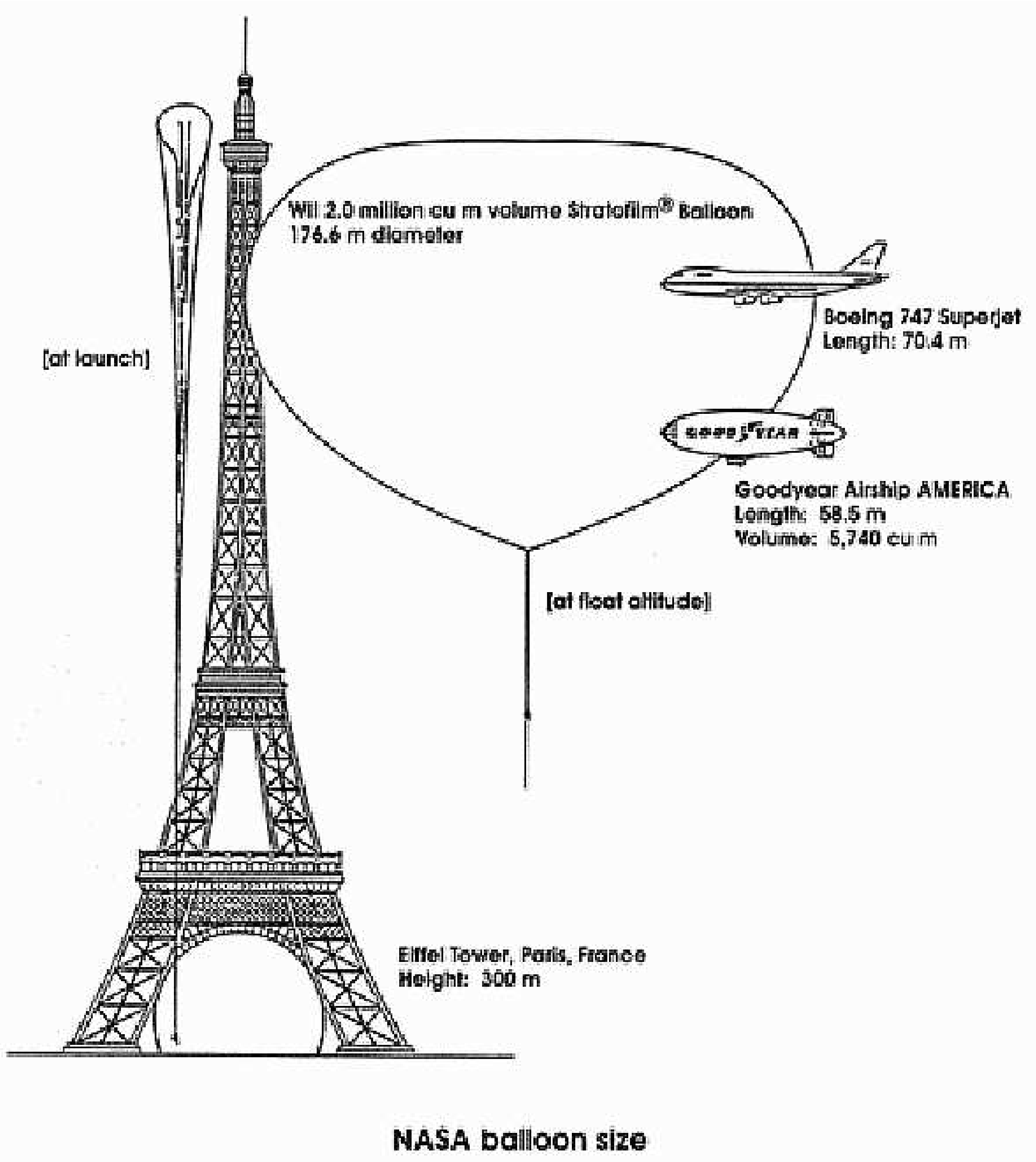
Detektor



Boomerang

Balon

’Satelita’ z teleskopami mierzącymi promieniowanie mikrofalowe w zagresie od 90 do 400 GHz został wyniesiony na wysokość ok 40’000 km przez specjalny balon.

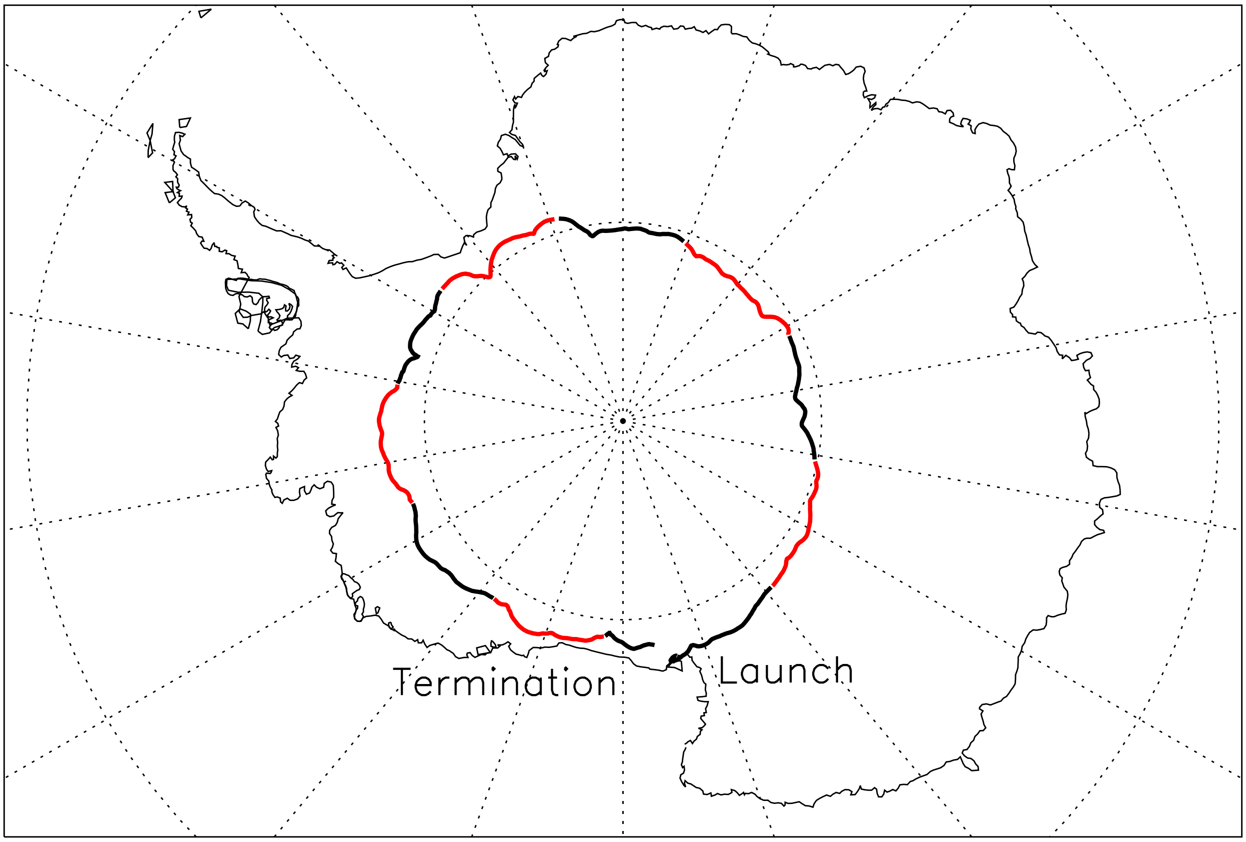


Boomerang

Lot

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

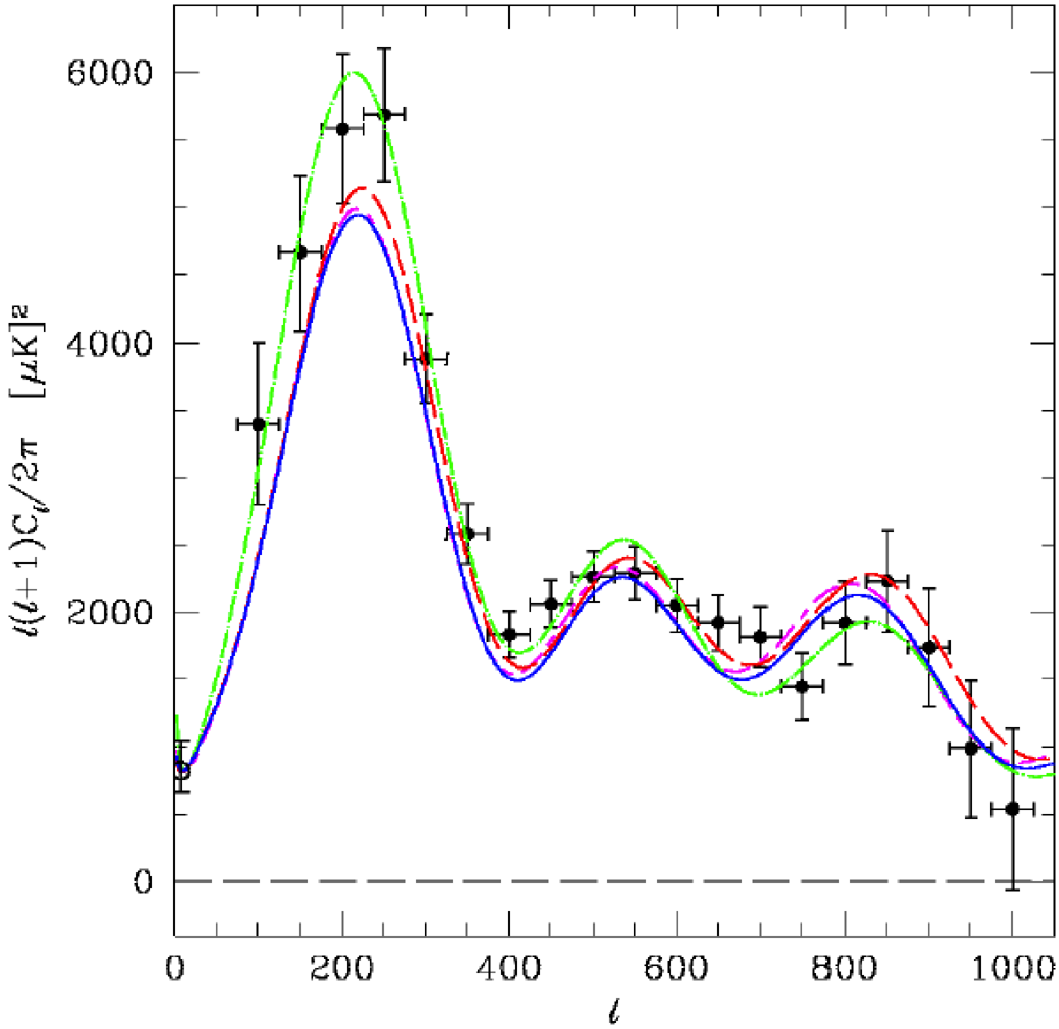
Trasa 10 dniowego lotu (1998/99):



Boomerang

Wyniki

Dopasowanie modelu do mierzonych natężeń poszczególnych multipoli:



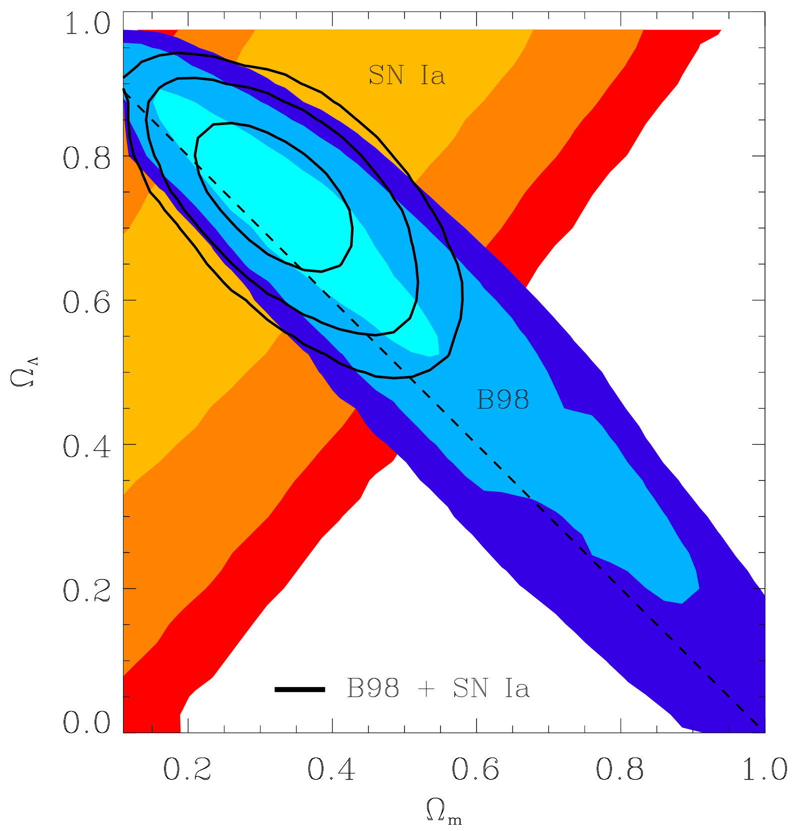
$\Rightarrow$ Wszechświat jest PŁASKI !!!

$$\Omega_{tot} \;=\; 1.03 \pm 0.06$$

Podsumowanie

Wyniki

Znacznie więcej o ewolucji Wszechświata możemy powiedzieć gdy połączymy informacje z pomiaru fluktuacji promieniowania tła i odległych supernowych:



$$\Omega_m \sim 0.3$$
$$\Omega_\Lambda \sim 0.7$$

$\Rightarrow$ Wszechświat 'zdominowany' przez stałą kosmologiczną

Ciemna energia ???

Podsumowanie

Wyniki

Z dopasowania do omówionych danych oraz innych obserwacji (mniej istotnych) można też wyznaczyć wiek Wszechświata:

$$T = 13.7 \pm 1.3 \;\; GYr$$

Oraz obecną wartość stałej Hubbla:

$$H = 67 \pm 9 \;\; km/(s \cdot MPc)$$

Pytania

Wciąż pozostaje jednak wiele pytań:

- z czego się składa ciemna materia
  (gwiazdy dają tylko ok. 15% materii we Wrzechświecie)
- skąd się bierze stała kosmologiczna
- dlaczego nie ma symetrii materii i antymaterii
- ...