

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład III

- Wielki Wybuch
- Ewolucja Wszechświata
- Promieniowanie tła
- Pomiary fluktuacji CMB

Prawo Hubble'a

Przesunięcie ku czerwieni

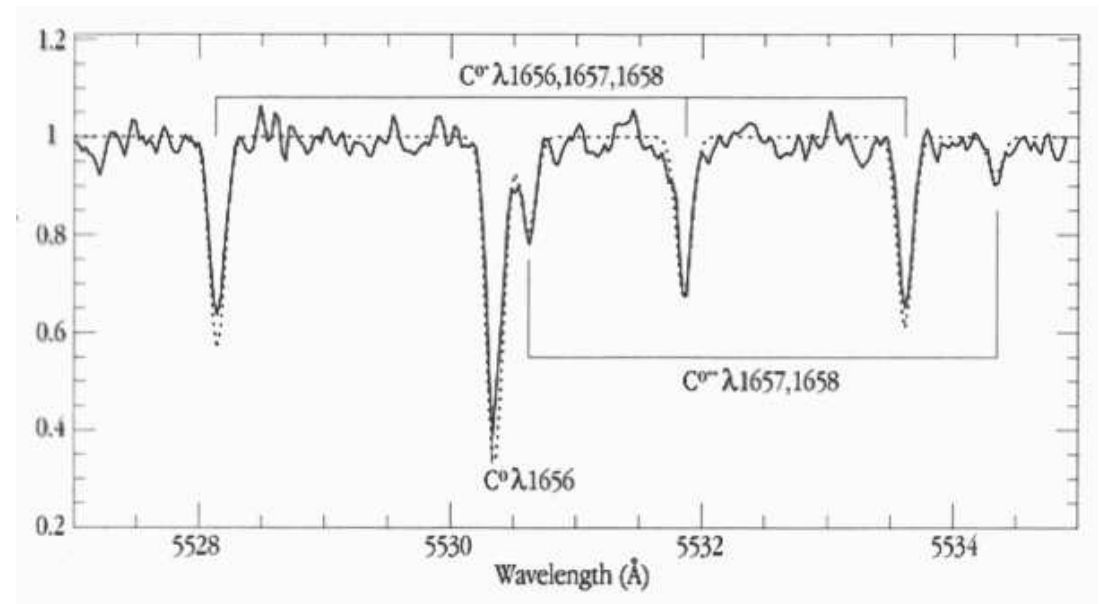
Jeśli źródło światła oddala się od obserwatora następuje wydłużenie fali:

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

$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$: 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 $z=2.34$

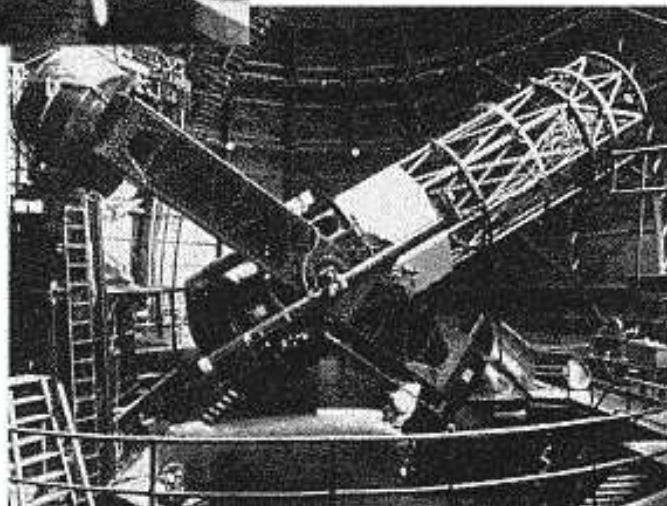
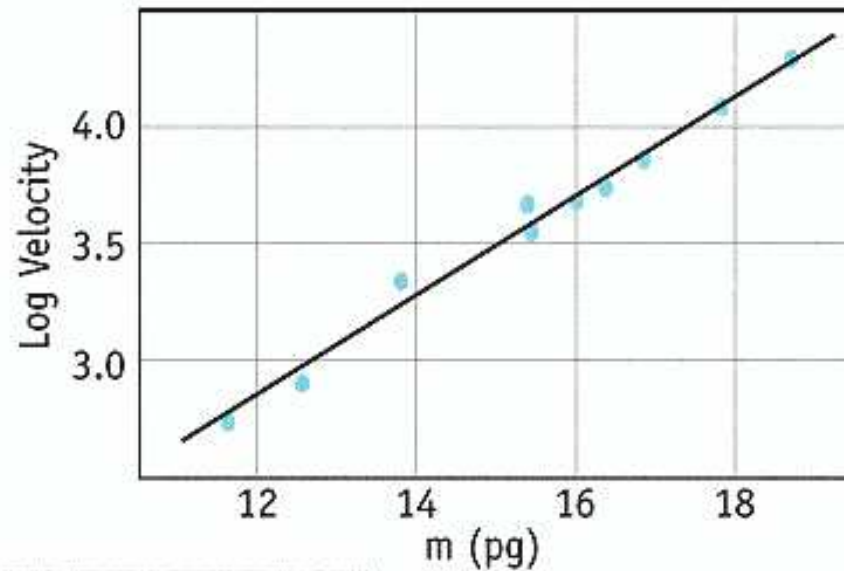
$$(\lambda' = 3.34 \lambda) !$$

Prawo Hubble

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

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)

$$v = H r$$

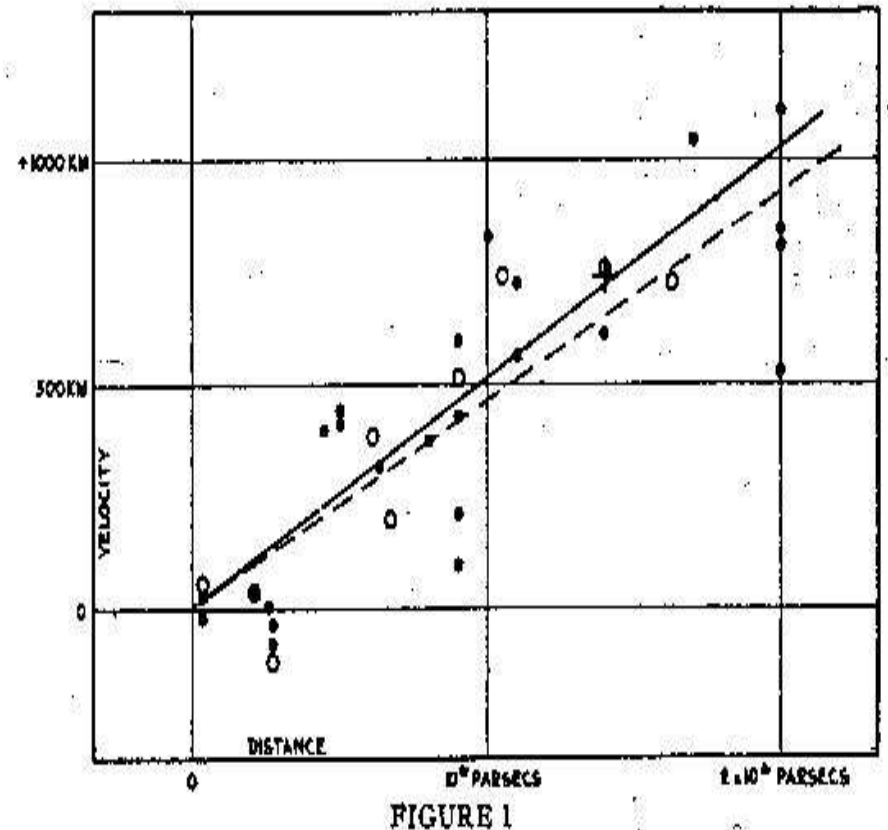
r - odległość od Ziemi, H - stała Hubble'a

Wartość podana przez Hubble'a:

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

prawie rząd wielkości za dużo :-)

Oryginalne wyniki Hubble'a:



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)

$$v = H r$$

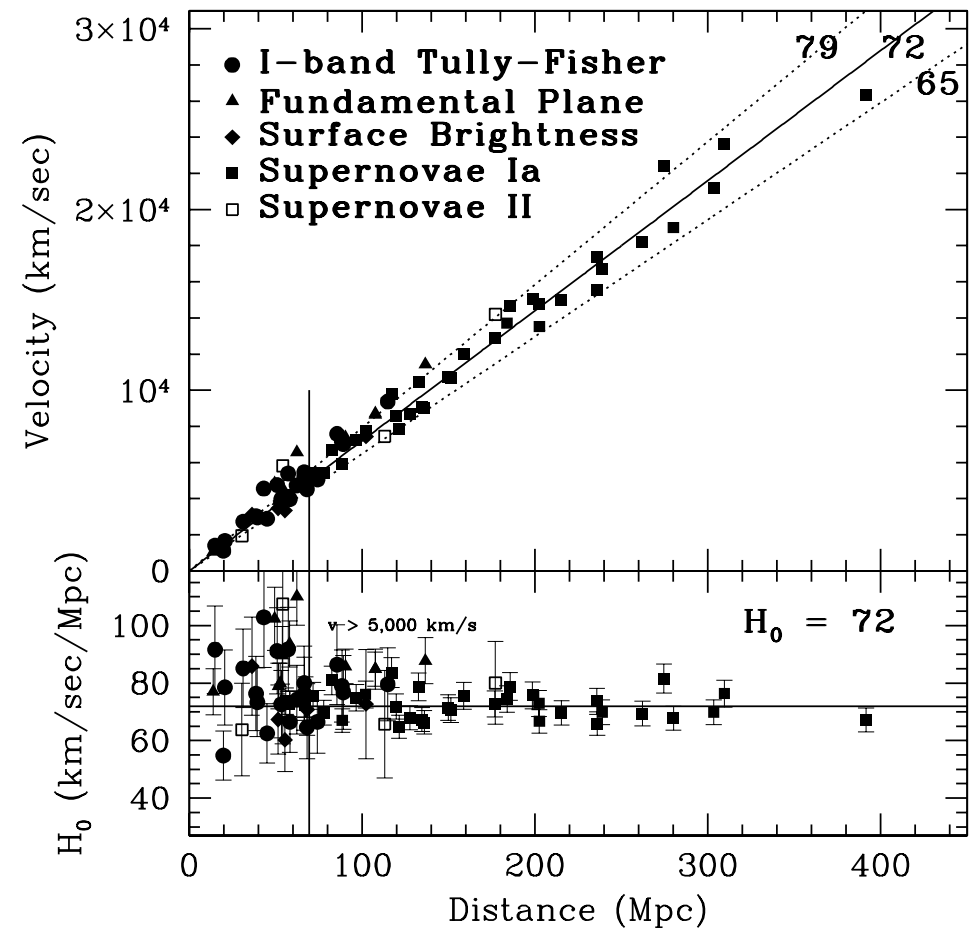
r - odległość od Ziemi, H - stała Hubble'a

Wartość podana przez Hubble'a:

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

prawie rząd wielkości za dużo :-)

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

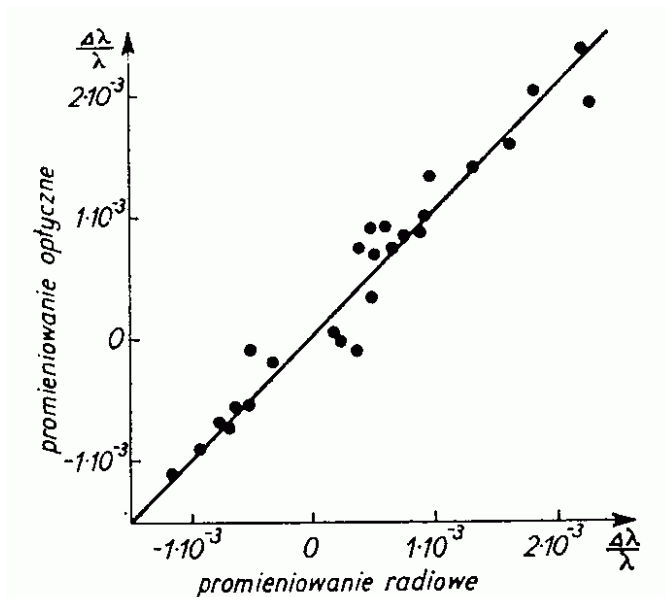


Prawo Hubble'a

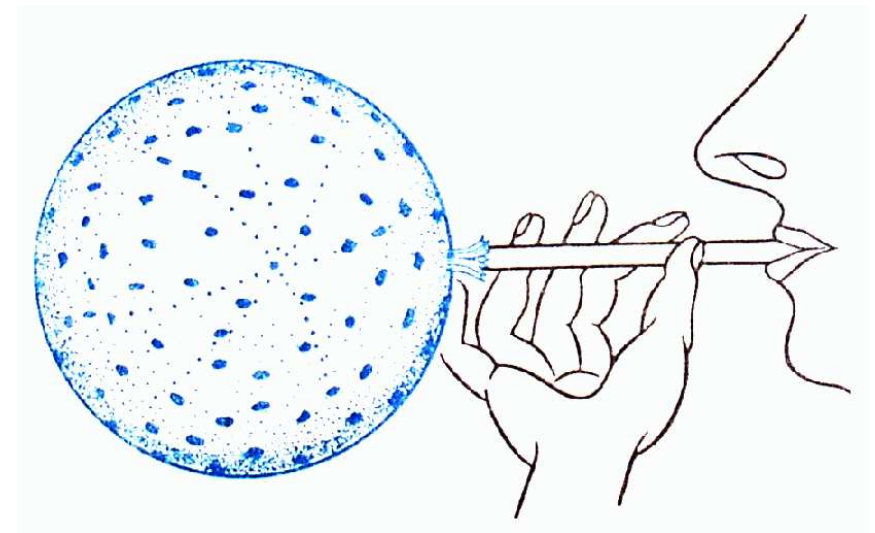
Przesunięcie ku czerwieni

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.
Skala czasowa tych procesów \ll tempo rozszerzania

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...

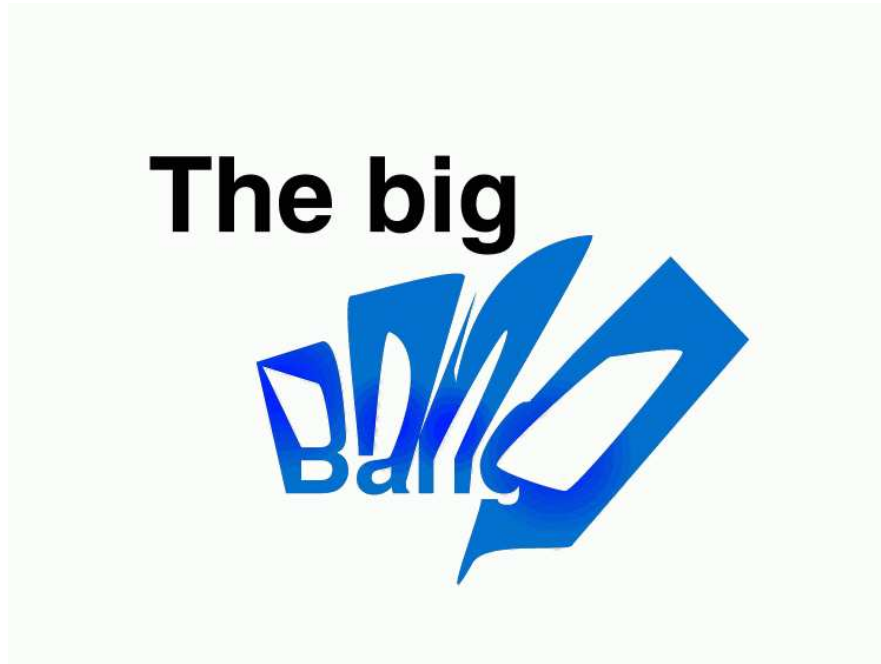
Wielki Wybuch

Początki Wszechświata

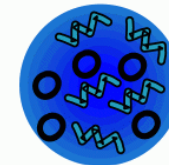
Przyjmujemy, że Wszechświat rozpoczął swoją ewolucję od **pojedynczego punktu**, osobliwości, o nieskończonej gęstości energii...

10^{-43} sekundy

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



10^{-43} seconds



10^{32} degrees

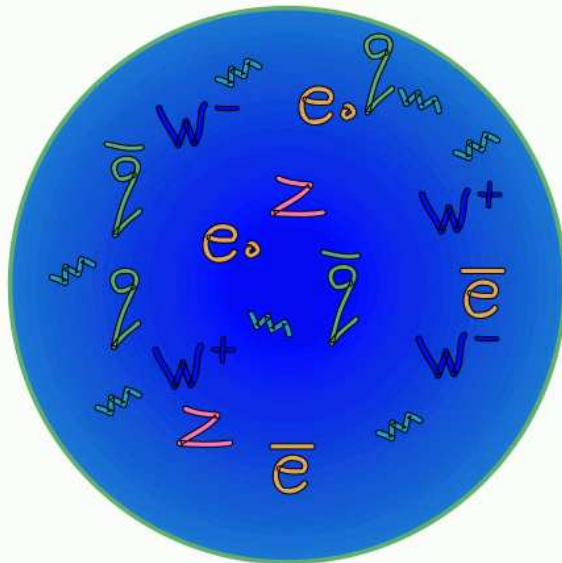
źródło: CERN, <http://outreach.web.cern.ch/>

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

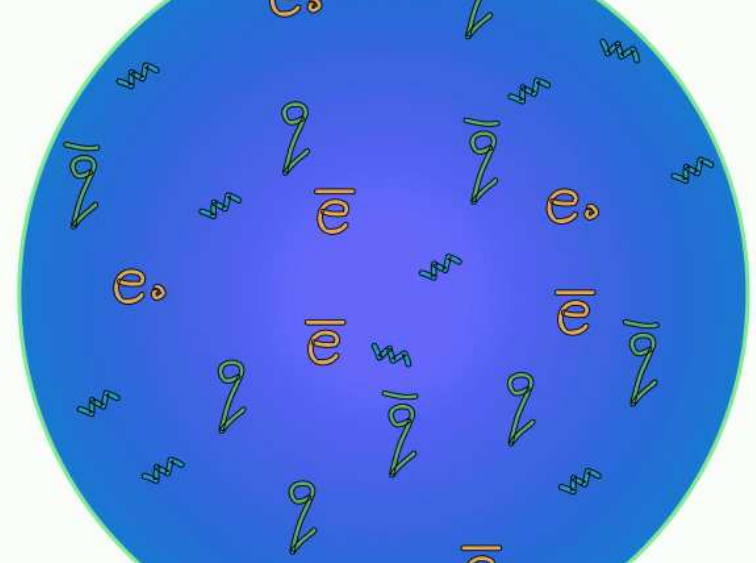


10^{27} degrees

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



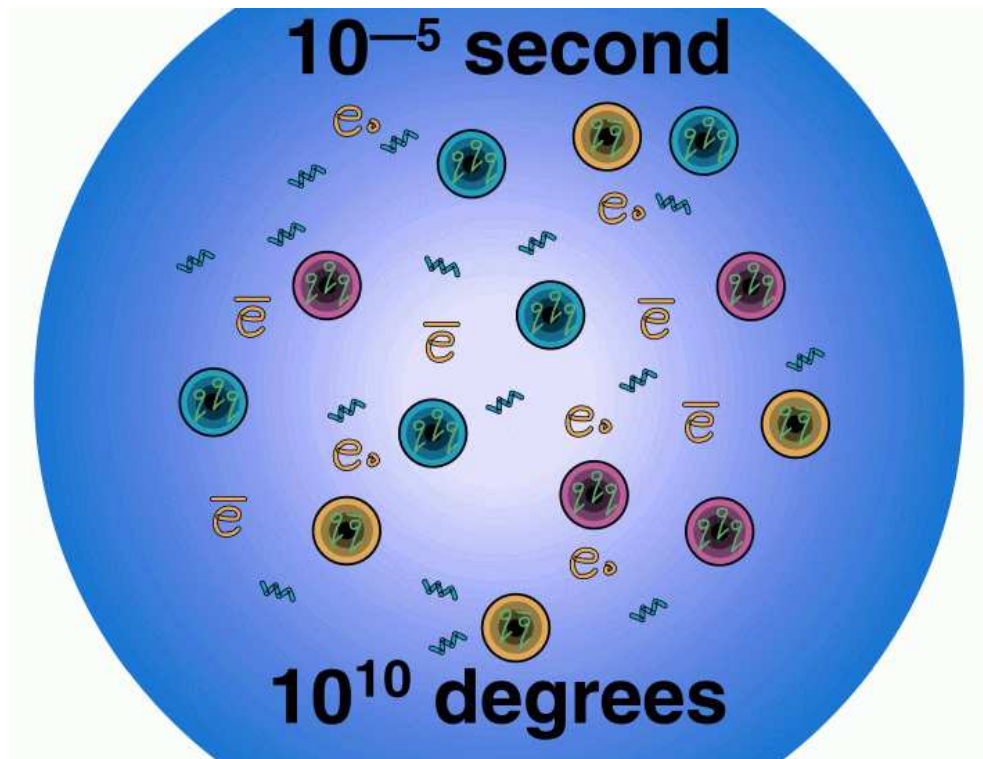
10^{15} degrees

Wielki Wybuch

10^{-5} sekundy

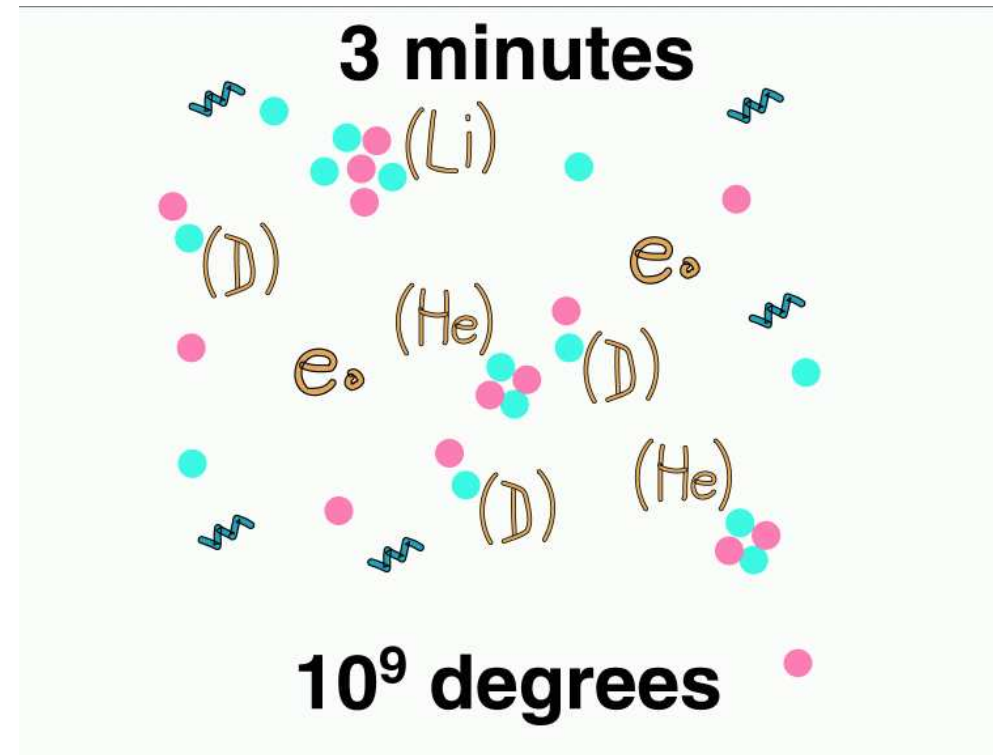
Kwarki formują **neutrony i protony**. **Antymateria zaczyna zanikać** bo promieniowanie jest już zbyt słabe aby ją wciąż wytwarzać.

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.



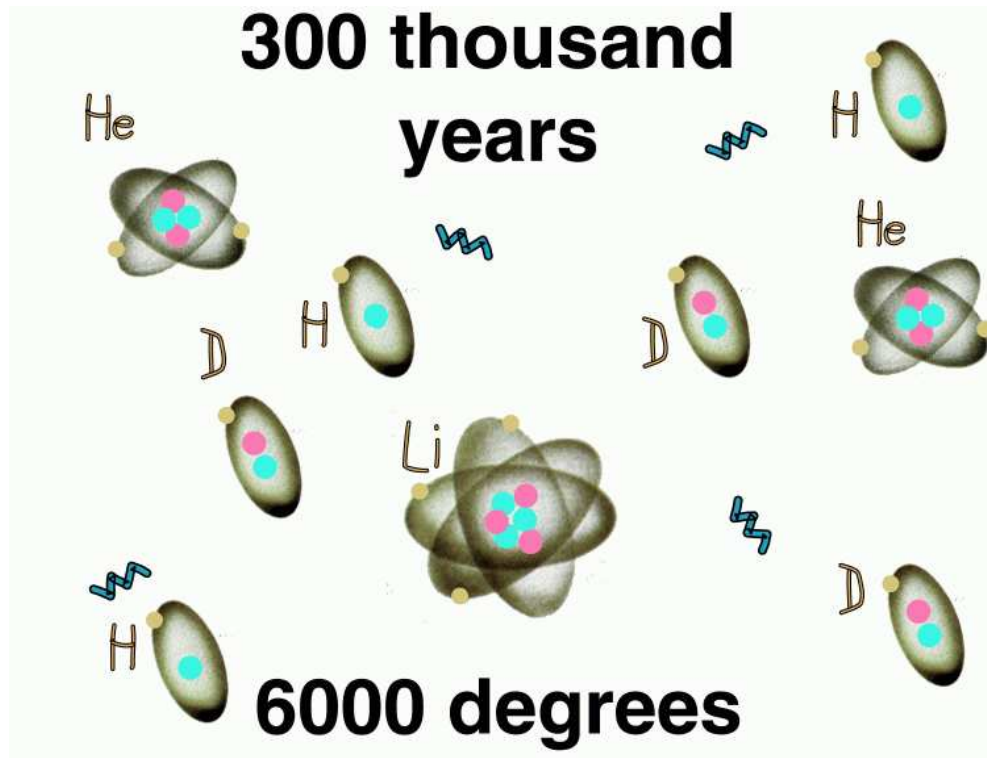
Wielki Wybuch

300 000 lat

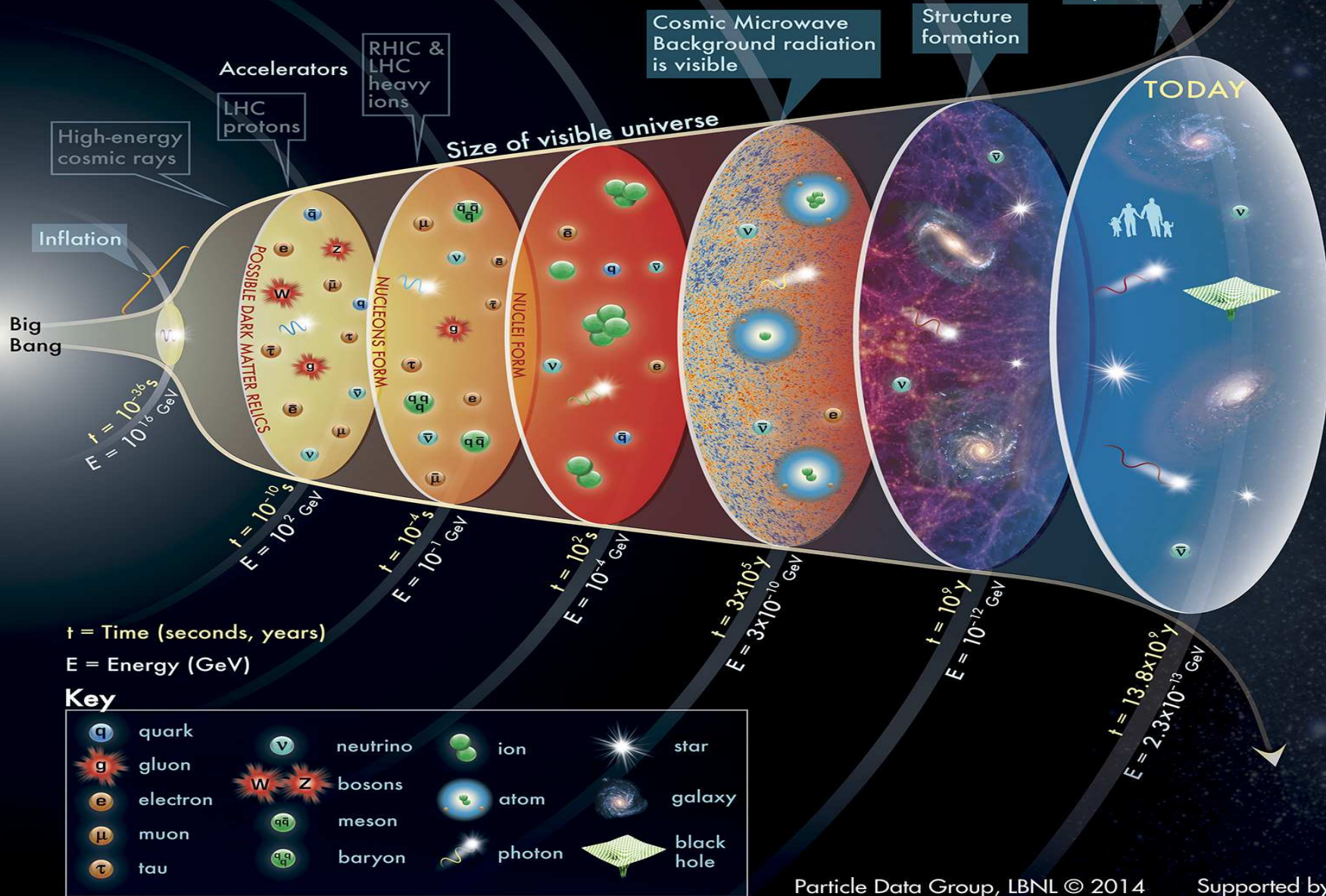
Elektrony wychwytywane przez jądra tworzą atomy. Wszechświat staje się **przezroczysty dla fotonów**.

1 000 000 000 lat

Formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach.



HISTORY OF THE UNIVERSE



Wielki Wybuch

Sukcesy modelu Wielkiego Wybuchu

- Tłumaczy rozszerzanie się Wszechświata
- Tłumaczy obecność mikrofalowego promieniowania tła
- Tłumaczy fluktuacje mikrofalowego promieniowania tła
- Tłumaczy skład Wszechświata (pierwotna nukleosynteza)

Pytania na które wciąż nie mamy pełnej odpowiedzi

- Dlaczego znikła antymateria?
- Jak formowały się struktury we Wszechświecie?
- Czym jest ciemna materia?
- Czy istnieje ciemna energia?

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

Metryka

Metryka **Minkowskiego**:

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

Metryka **Friedmanna-Robertsona-Walkera**:

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

$k = -1, 0, 1$: krzywizna przestrzeni

może też być przedstawiona w równoważnej postaci:

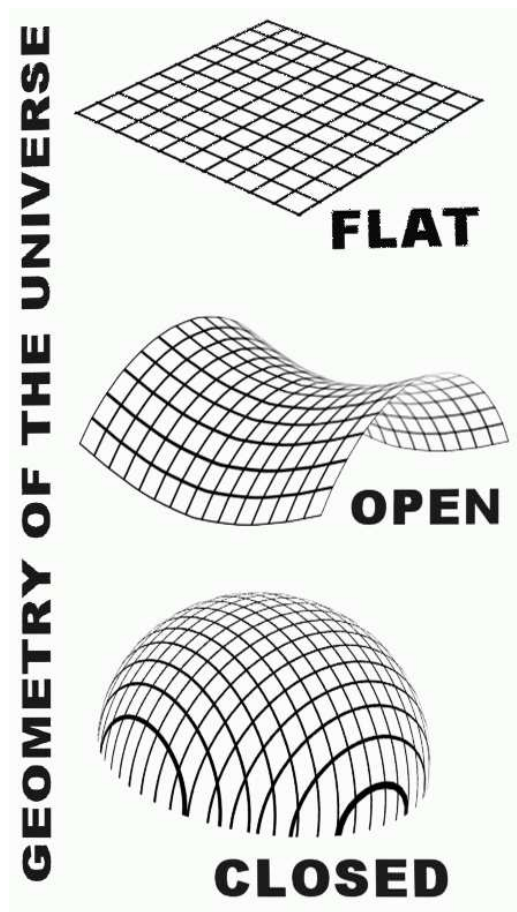
$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left[d\chi^2 + S(\chi)^2 (d\theta^2 + d\phi^2 \sin^2 \theta) \right]$$

Z niezmienniczości translacyjnej wynika, że są tylko trzy możliwe rodziny rozwiązań:

$$S(\chi) = \begin{cases} \sin(\chi) & \text{co odpowiada } k = +1 \\ \chi & k = 0 \\ \sinh(\chi) & k = -1 \end{cases}$$

Ewolucja Wszechświata

Krzywizna przestrzeni



$$k = 0$$

$$k = -1$$

$$k = +1$$

Równania Friedmann'a

W metryce FRW Równanie Einsteina sprowadza się do równań na skalę $R(t)$:

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

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

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 również zależność między **gęstością** materii we Wszechświecie a **krzywizną** przestrzeni.

Gęstość krytyczna:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \sim 10 \frac{\text{GeV}}{c^2/\text{m}^3}$$

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 $\Omega_{tot} < 1$

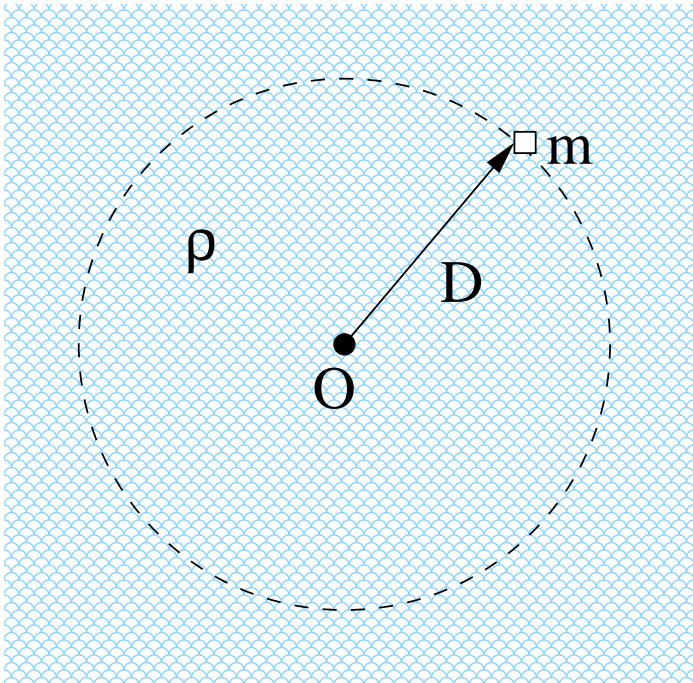
⇒ Wszechświat 'otwarty'
krzywizna $k = -1$

Jeśli $\Omega_{tot} > 1$

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

Ewolucja Wszechświata

Model klasyczny



Przyspieszenie masy m znajdującej się w odległości $D = r \cdot R(t)$ od początku układu:

$$m\ddot{D} = -\frac{GmM}{D^2} = -\frac{Gm}{D^2} \cdot \frac{4\pi}{3} D^3 \rho$$

Sprowadza się do równania na $R(t)$ ($r = \text{const}$):

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

Natomiast zasada zachowania energii:

$$\frac{m\dot{D}^2}{2} - \frac{GmM}{D} = \text{const}$$

Prowadzi do:

$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho R^2 - k$$

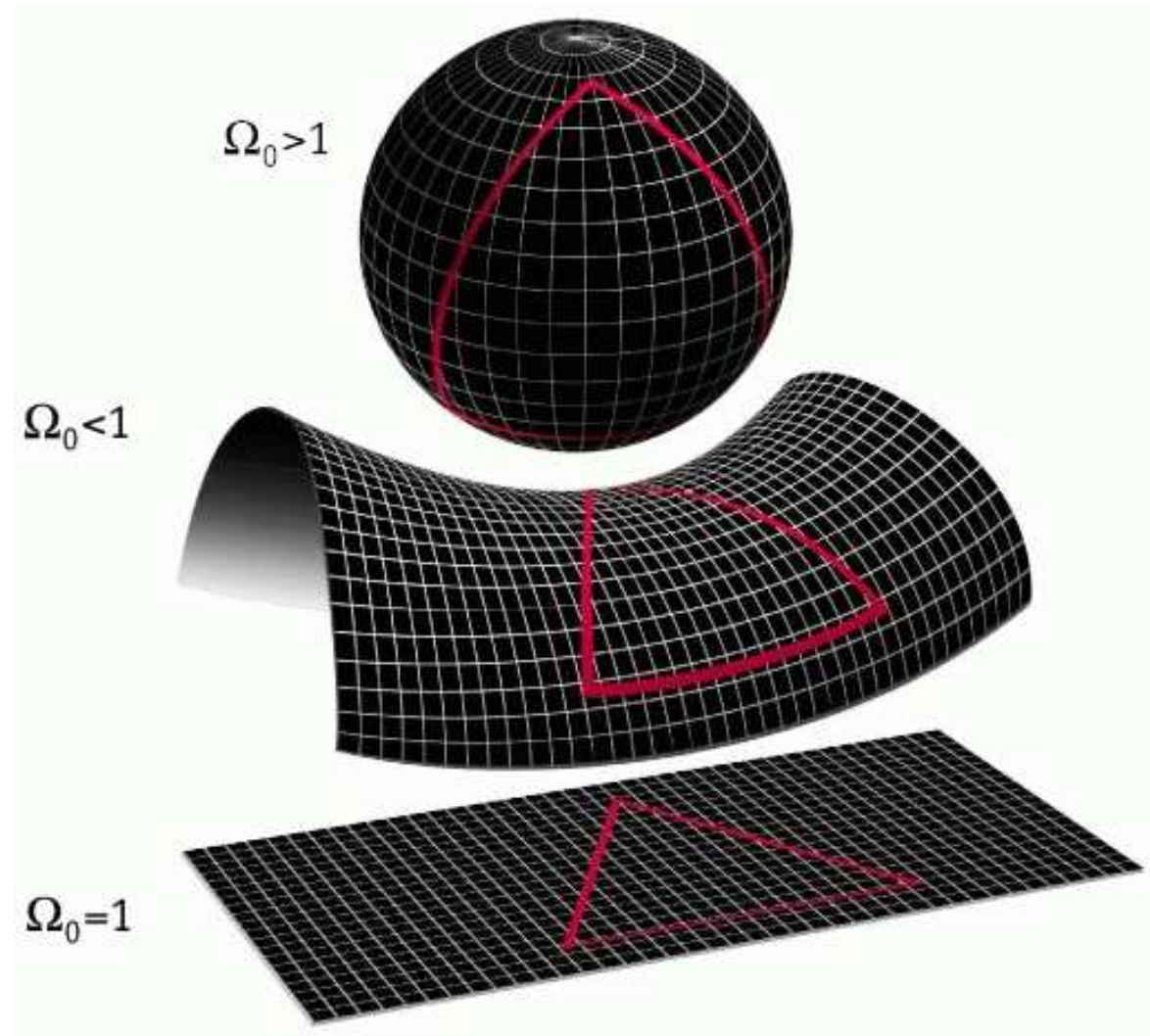
Znak k jest przeciwny znakowi całkowitej energii...

Ewolucja Wszechświata

Całkowita **gęstość materii/energii** we Wszechświecie decyduje też o **geometrii przestrzeni** na skalach kosmologicznych!

Lokalnie wiemy, że przestrzeń jest **płaska** (suma kątów trójkąta wynosi 180°).

Ale na dużych odległościach trudno to sprawdzić...



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

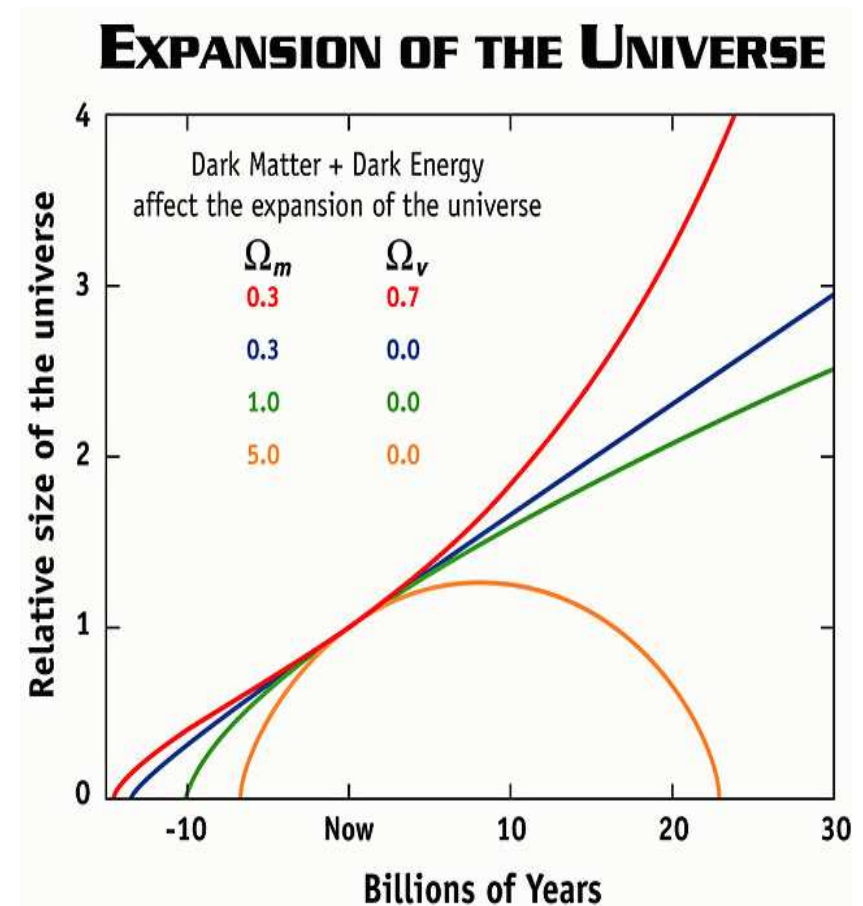
$$\Omega_m > 1 \quad (k = +1)$$

⇒ Wszechświat kiedyś zacznie się zapadać

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

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

Scenariusze ewolucji Wszechświata

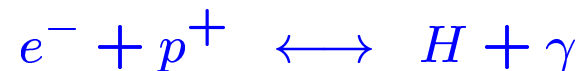


Promieniowanie tła

Przewidywania

W miarę **rozszerzania** się Wszechświata malały energie zderzających się cząstek. Cięższe cząstki stopniowo zanikały (przestawały być produkowane, albo rozpadały się).

Gdy Wszechświat miał kilka godzin pozostały już tylko **jądra** lekkich pierwiastków, **elektrony** i **fotony**. Atomy były natychmiast "rozbijane" w wyniku zderzeń z fotonami.



Dopiero około **300'000 lat po Wielkim Wybuchu** fotony nie miały już dość energii, żeby jonizować atomy. Elektrony łączą się z jądrami, pozostają tylko obojętne atomy i **fotony**.

W przezroczystym Wszechświecie fotony praktycznie nie oddziałują.

Jedynie ich energia wciąż maleje (**długość fali rośnie**) w miarę jego rozszerzania.

Promieniowanie tła

Przewidywania

W 1948 **George Gamow**, Ralph Alpher i Robert Herman doszli do wniosku, że fotony powstałe 300'000 lat po Wielkim Wybuchu muszą wciąż wypełniać Wszechświat.

Tylko ich energia jest tak mała, że nie jesteśmy w stanie ich obserwować.

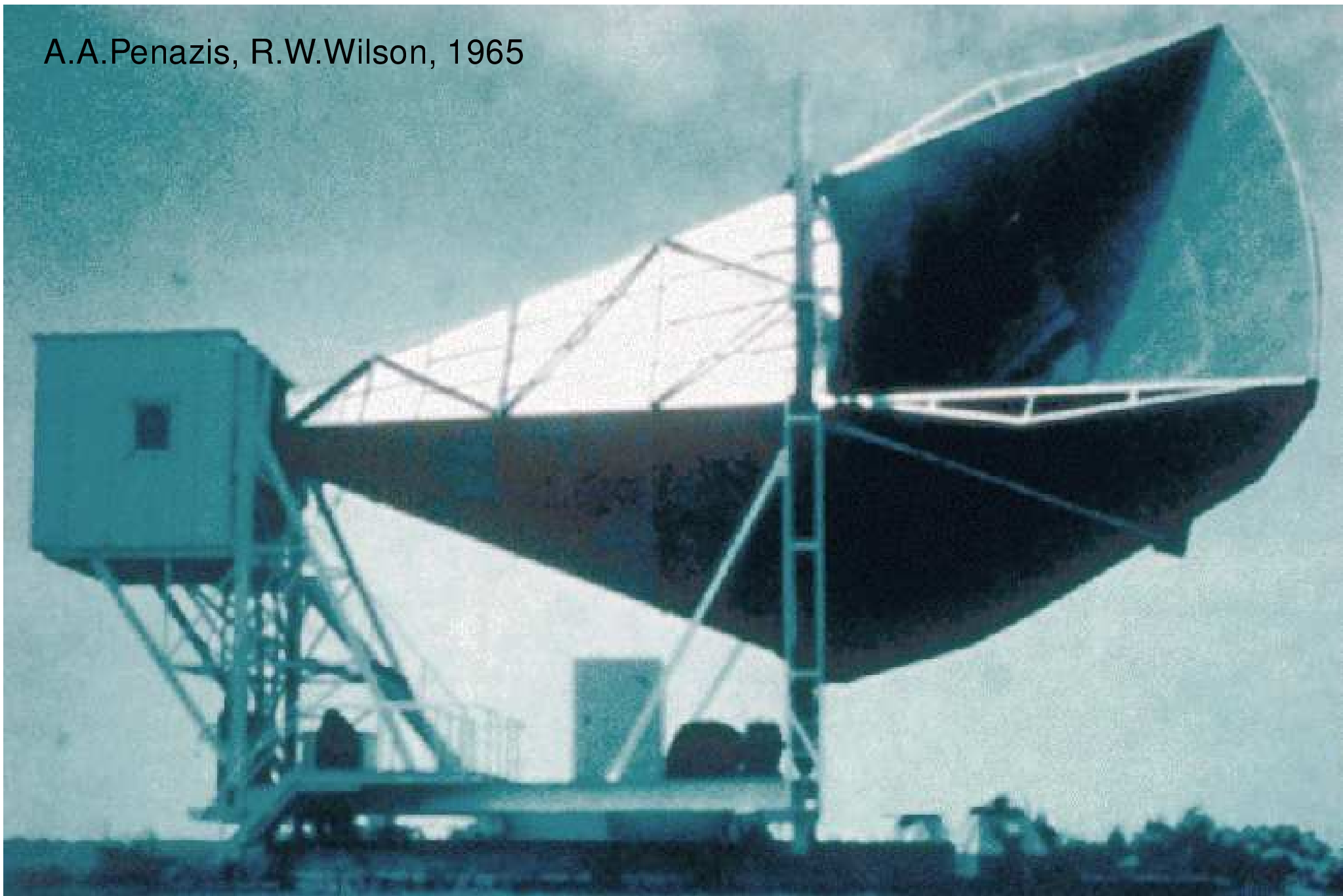
Jest to tzw. **promieniowanie reliktowe** inaczej nazywane też **mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB)**

Rozkład widmowy promieniowania powinien odpowiadać rozkładowi **promieniowania ciała doskonale czarnego**

$$T \sim 5 K$$

Obserwacja **CMB** była rozstrzygającym dowodem **Wielkiego Wybuchu** i "pogrzebała" model statycznego Wszechświata.

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



Promieniowanie tła

Odkrycie

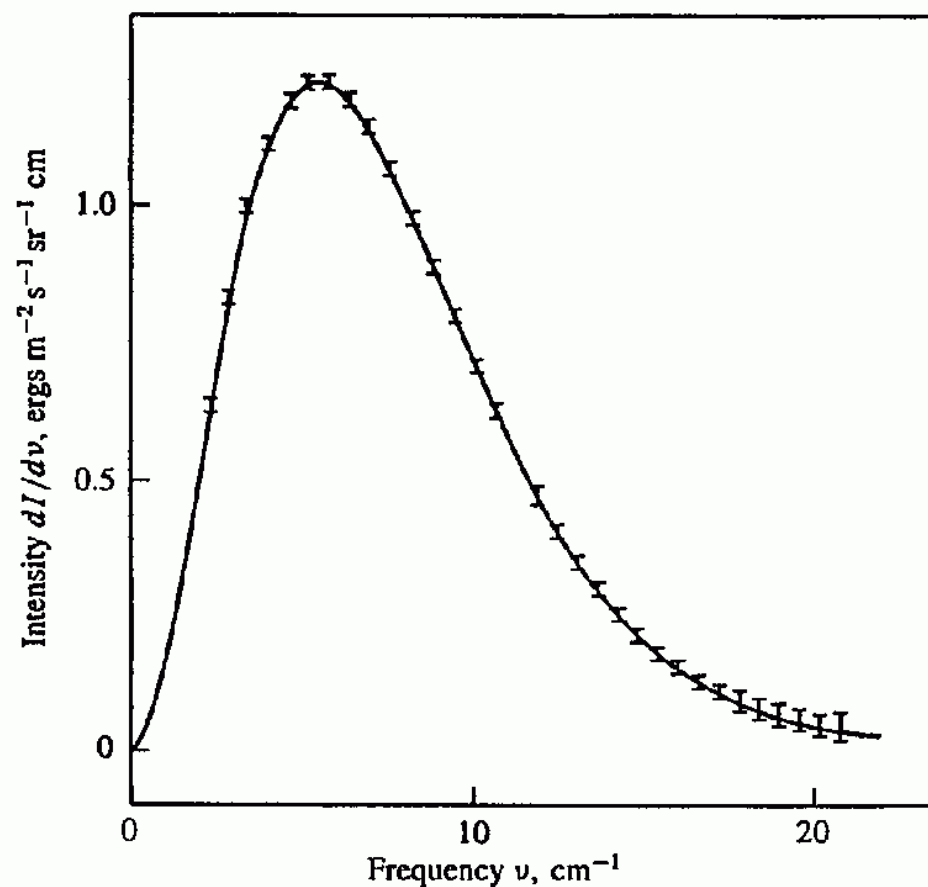
Mikrofalowe promieniowanie tła (CMB) zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzisa i R.W.Wilsona.

Przez kolejne dekady było coraz intensywniej badane.

Potwierdzono, że rozkład widmowy promieniowania zgadza się z widmem promieniowania ciała doskonale czarnego.

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

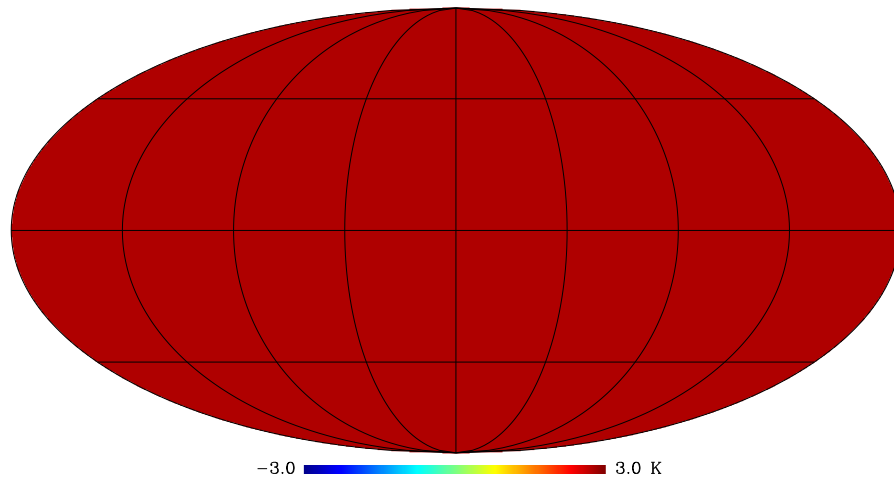
Wyniki z satelity COBE: (1999)



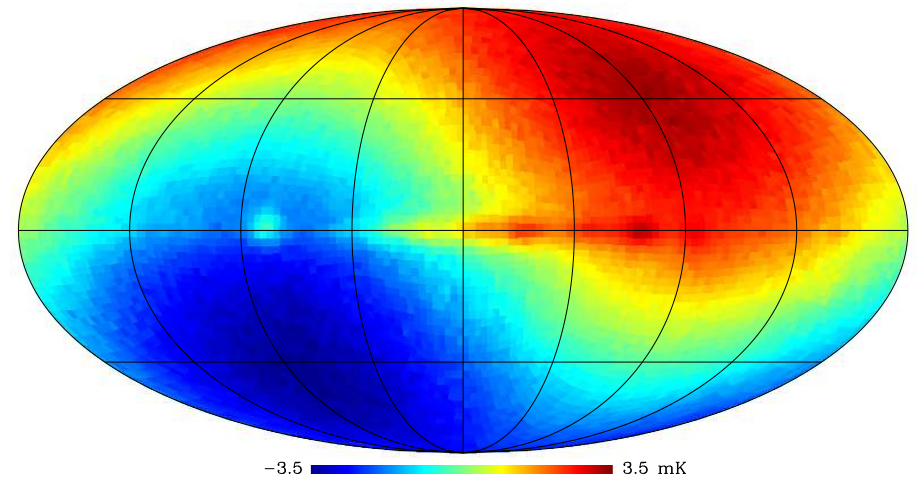
Promieniowanie tła

Rozkład kątowy

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



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

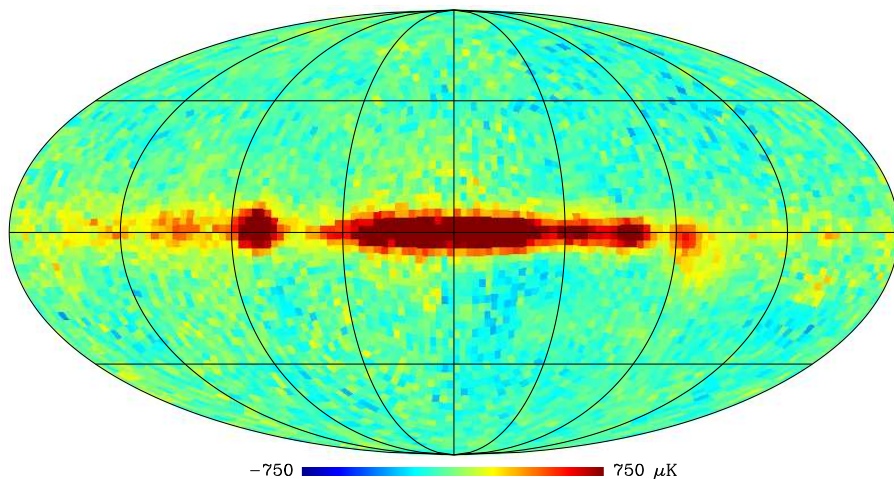


widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem
'globalnego' układu.

Promieniowanie tła

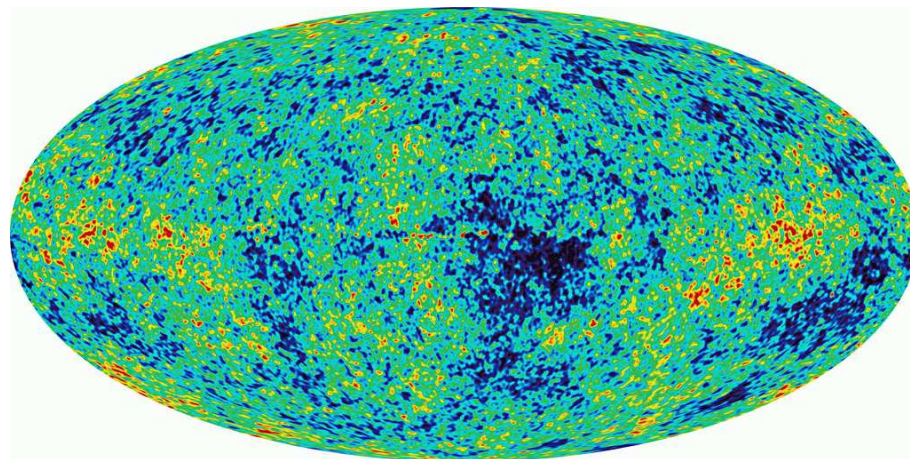
Rozkład kątowy

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

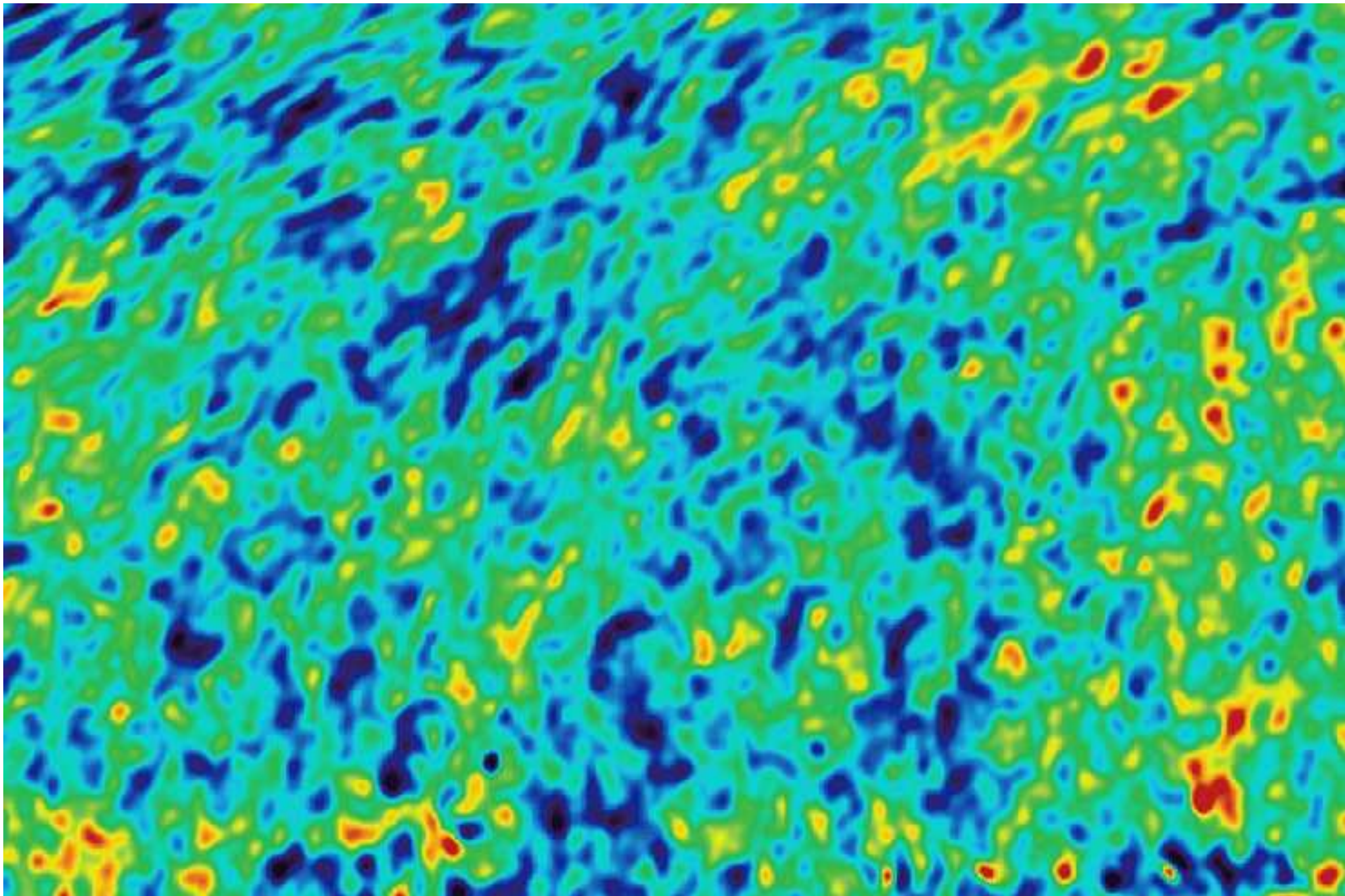


⇒ widzimy promieniowanie naszej galaktyki (**Drogi Mlecznej**)...

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



⇒ zaczyna być ciekawie !!!



Promieniowanie tła

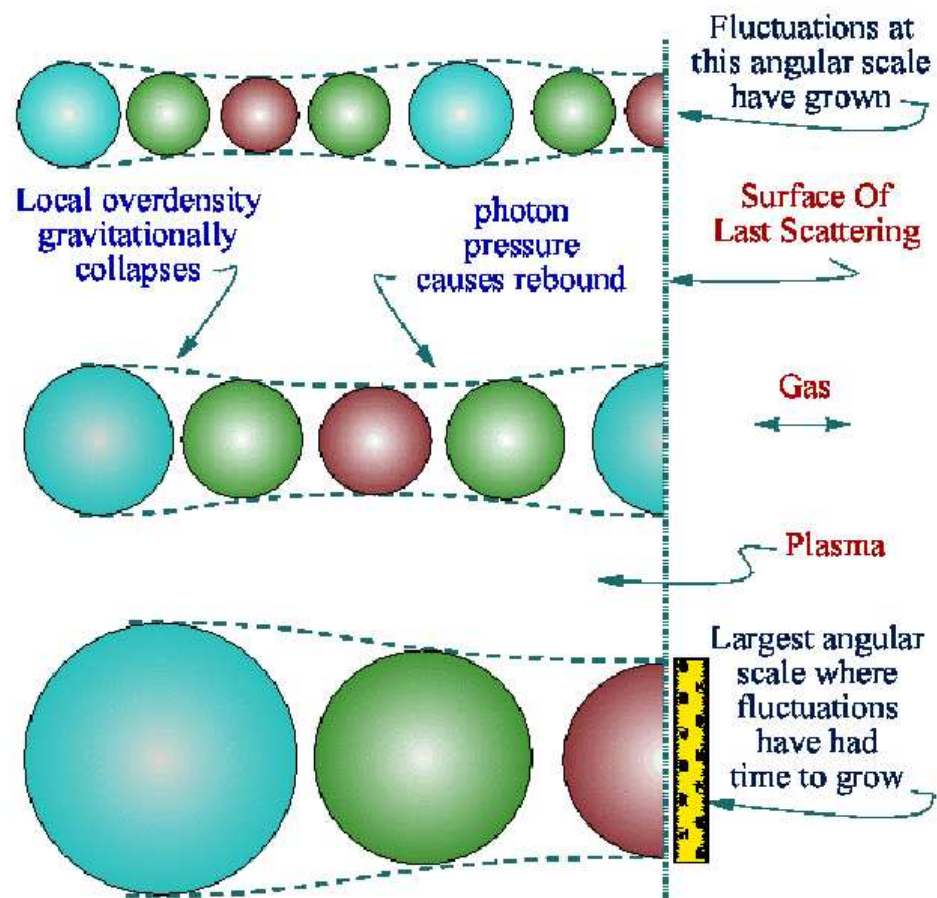
Fluktuacje

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

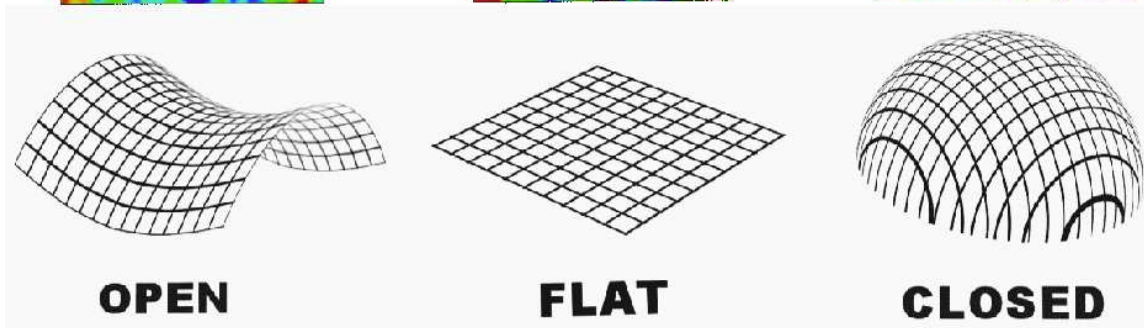
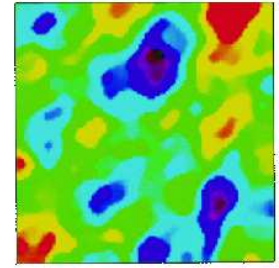
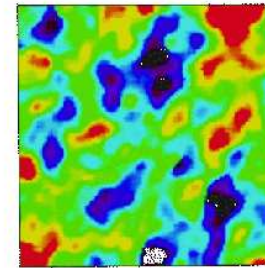
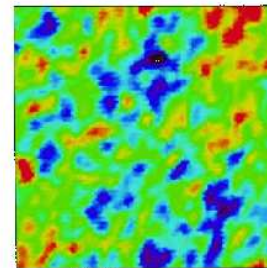
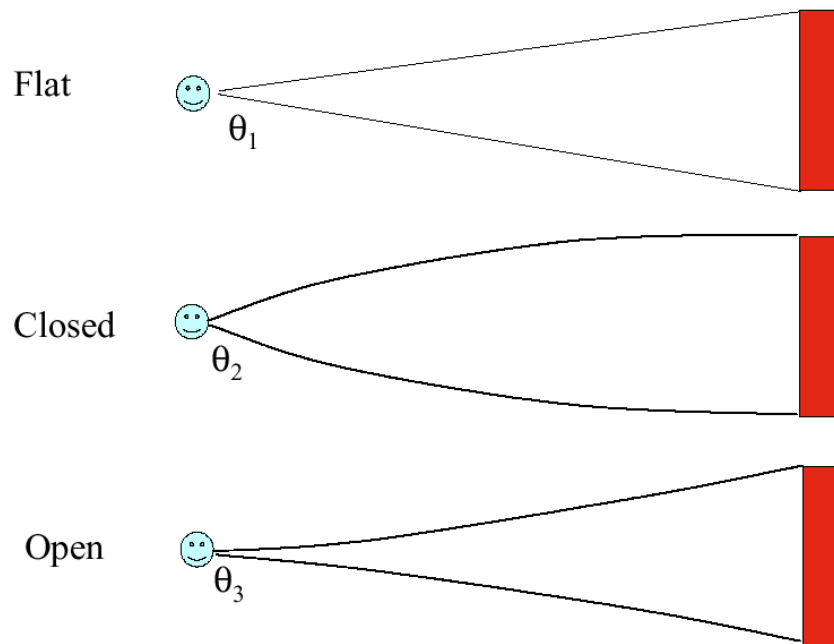


Promieniowanie tła

Fluktuacje

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

Wyniki symulacji:

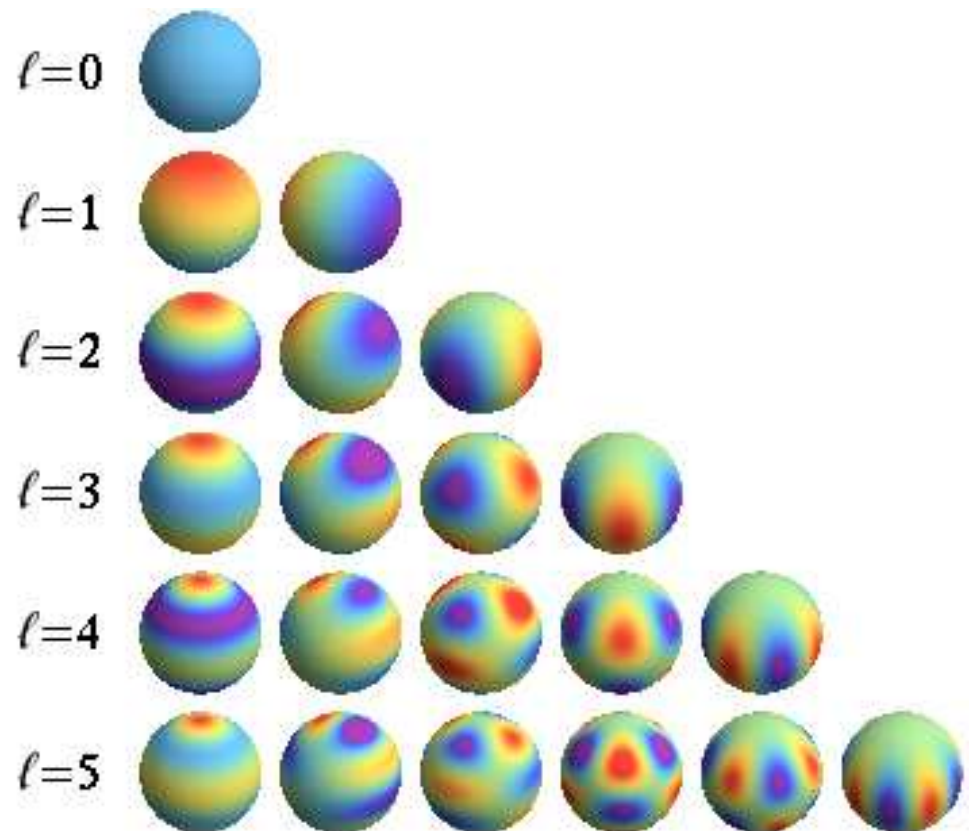


Promieniowanie tła

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).

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{l m} \Theta_{lm} Y_l^m(\cos \theta, \phi)$$



Promieniowanie tła

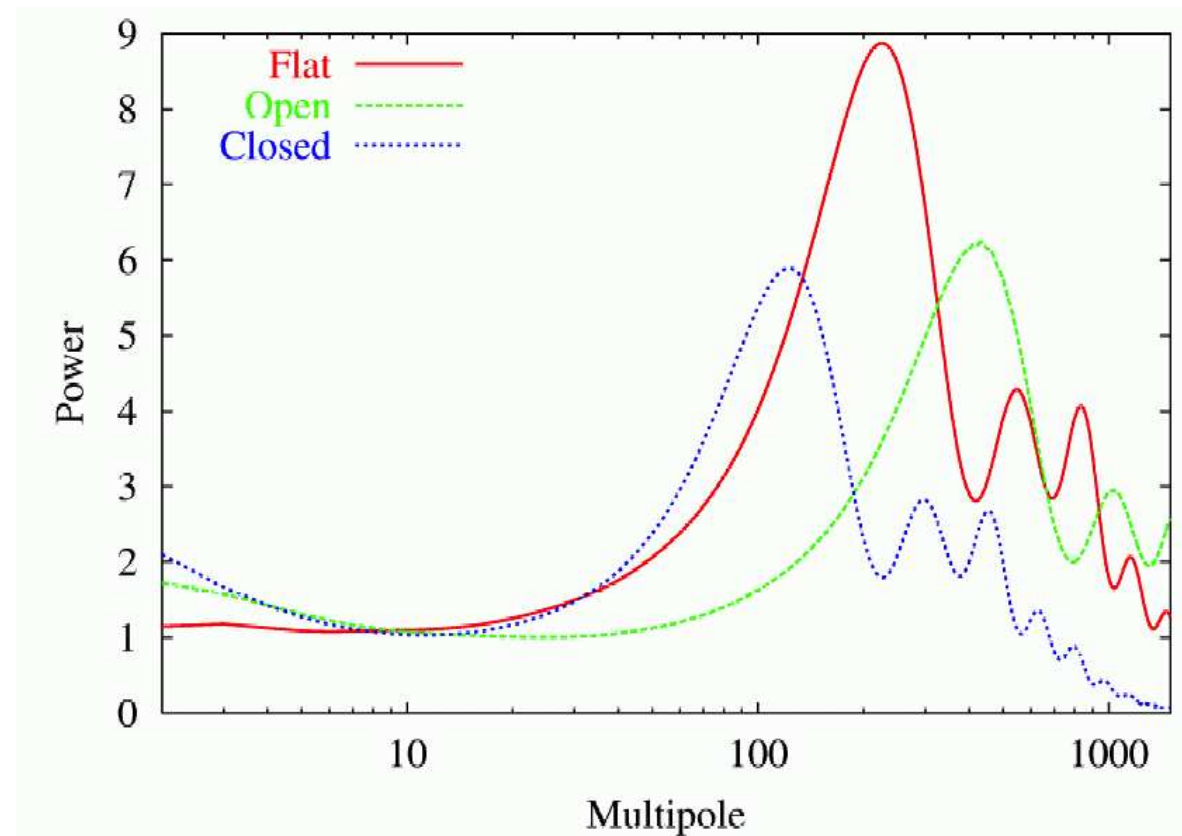
Fluktuacje

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 $l \sim 200$

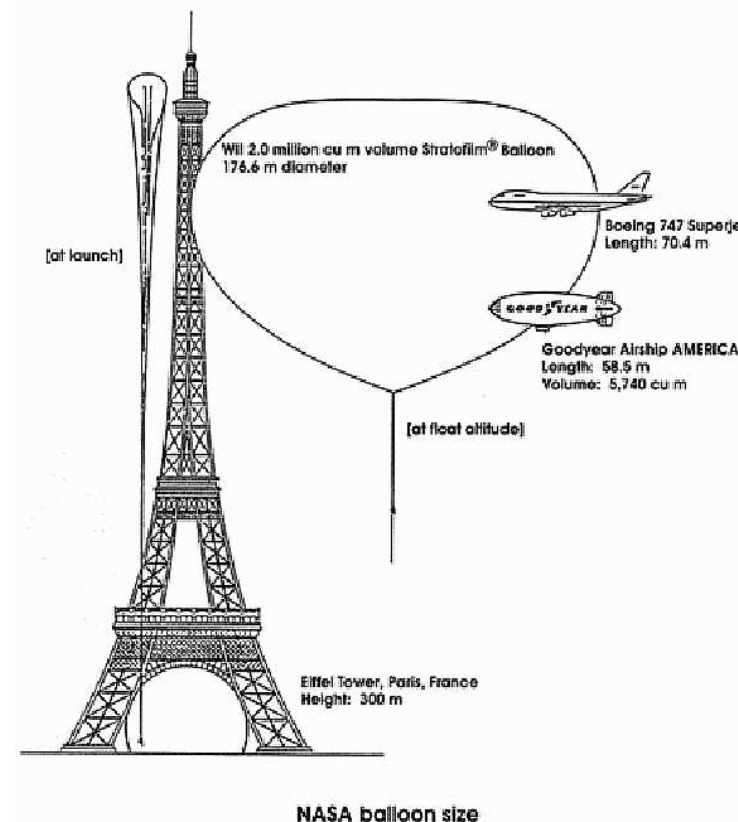
Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów:



Promieniowanie tła

Boomerang Baloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geomagnetics

Detektor z teleskopami mierzącymi promieniowanie mikrofalowe w zakresie od 90 do 400 GHz został wyniesiony na wysokość ok 40 km przez specjalny balon.

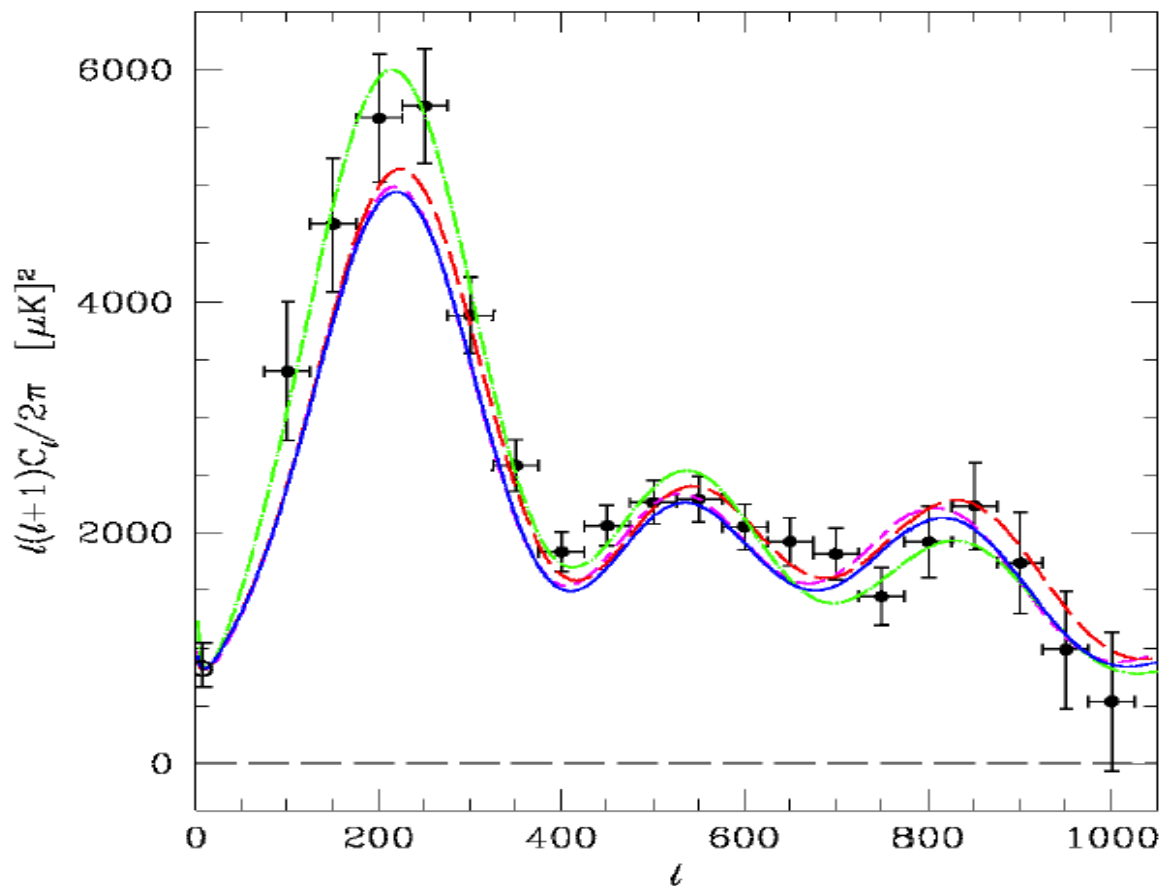


Aby zapewnić optymalne warunki pracy eksperyment wykonano na biegunie południowym, lot trwał 10 dni (1998/99).

Promieniowanie tła

Boomerang

Pierwsze przesłanki za tym, że Wszechświat jest płaski: $\Omega_{tot} = 1.03 \pm 0.06$



WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Detektor

Sonda kosmiczna wystrzelona 30.06.2001.

Pomiar promieniowania mikrofalowego

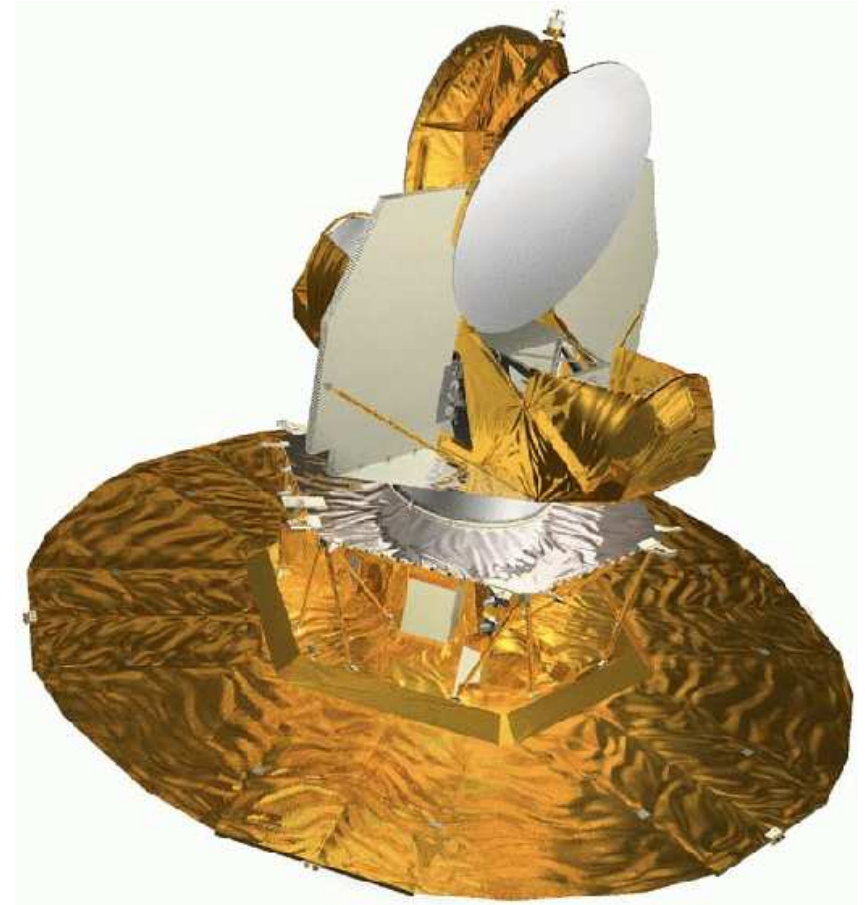
w 5 przedziałach częstości:

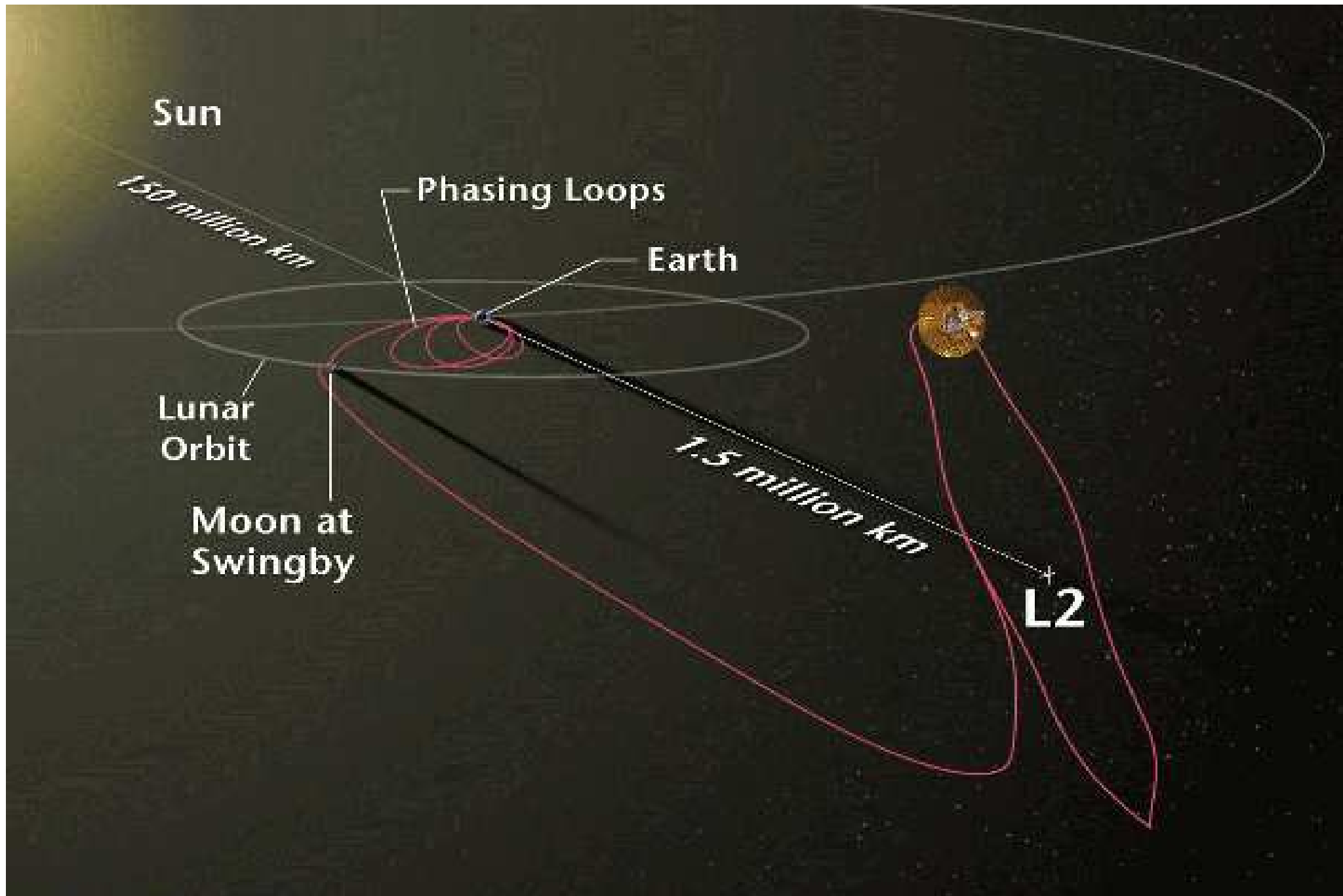
od 23 GHz (13 mm) do 94 GHz (3.2 mm).

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



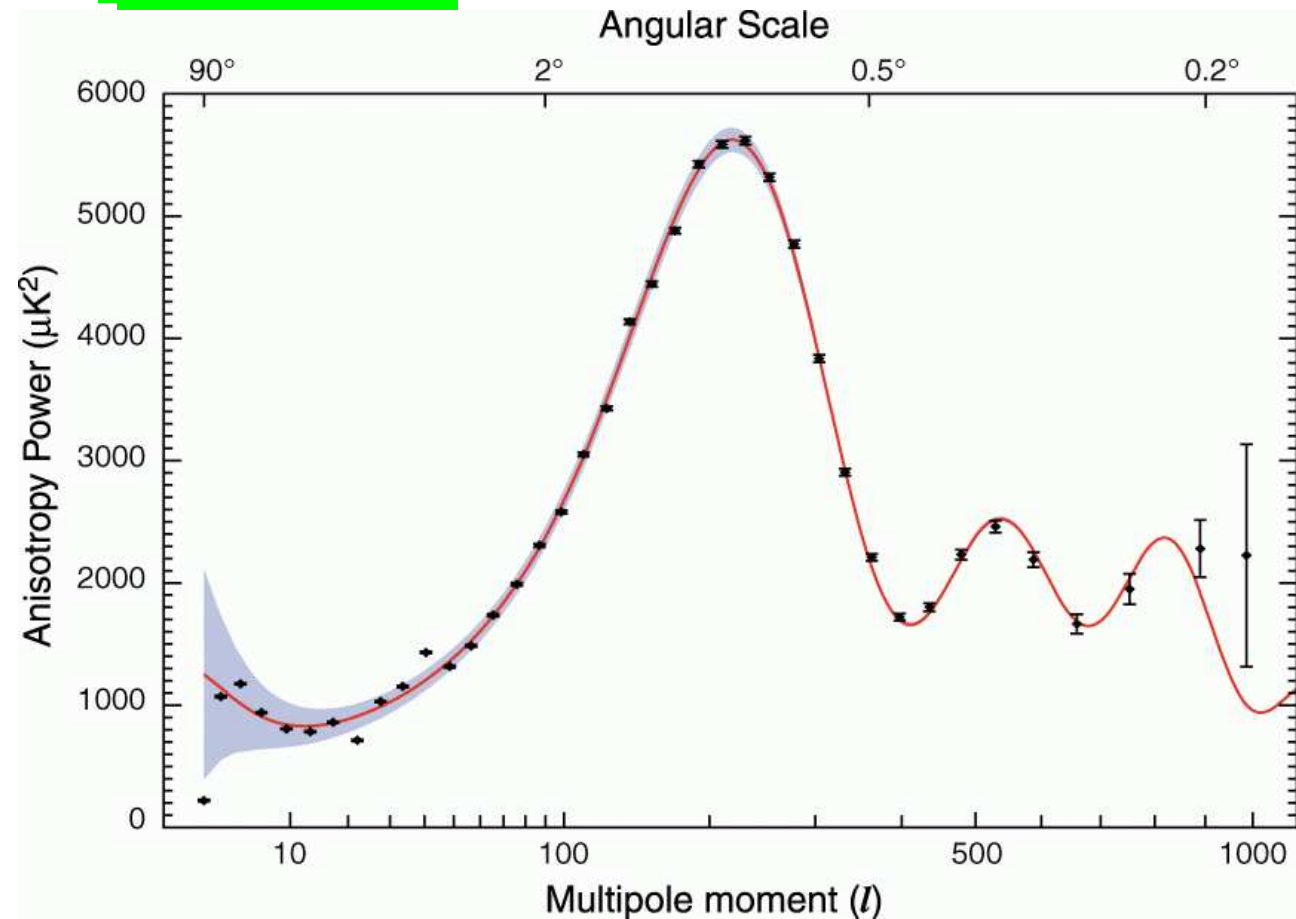


WMAP

Wyniki (2006)

Bardzo precyzyjny pomiar korelacji kątowych w promieniowaniu tła.

Możliwe jednoczesne dopasowanie wielu parametrów kosmologicznych



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

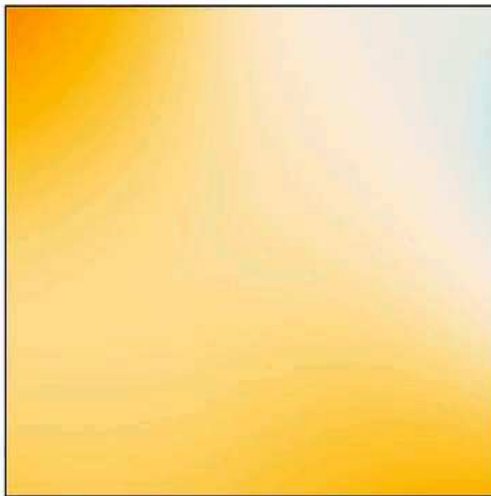
⇒ gęstość całkowita: $\Omega_{tot} = 1.00 \pm 0.03$

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

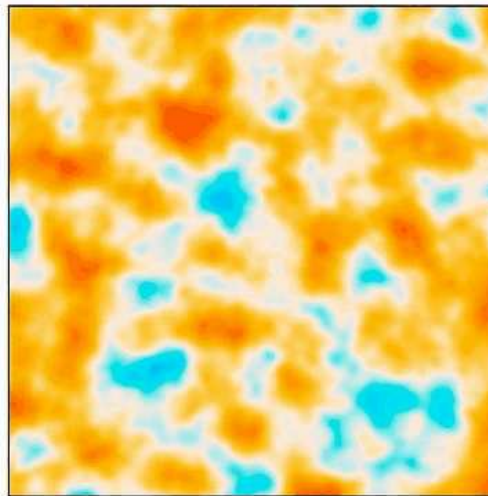
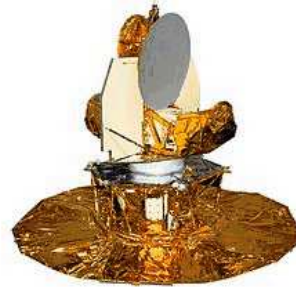
Planck

Satelite CMB

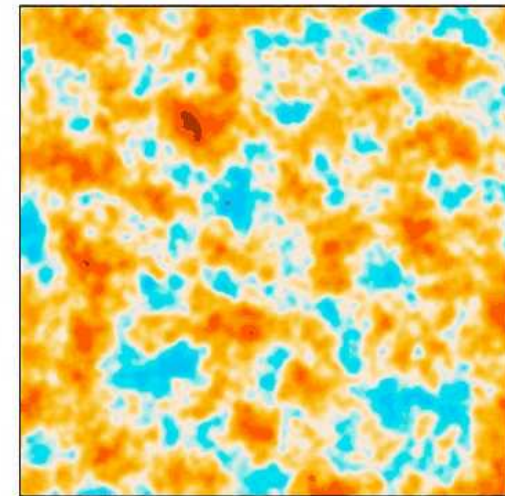
Najlepszy sposób na precyzyjne pomiary



COBE
1989



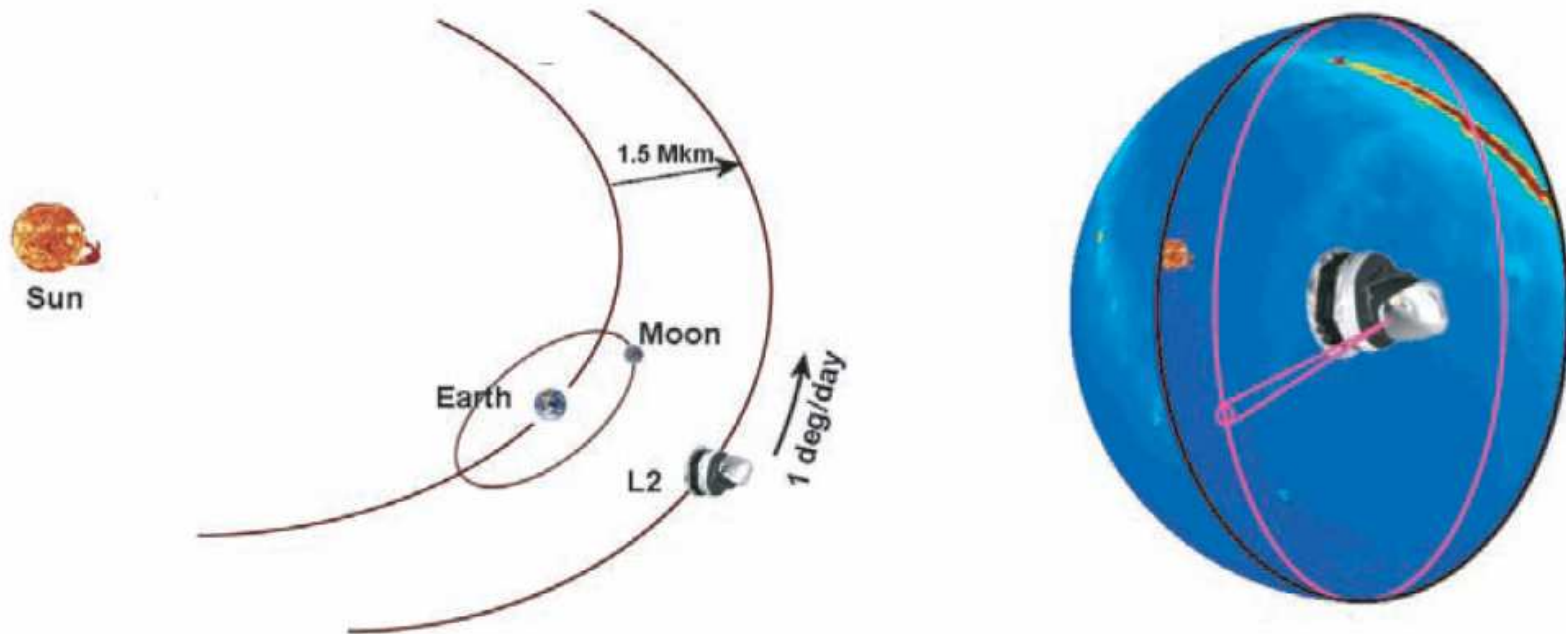
WMAP
2001



Planck
2009

Planck

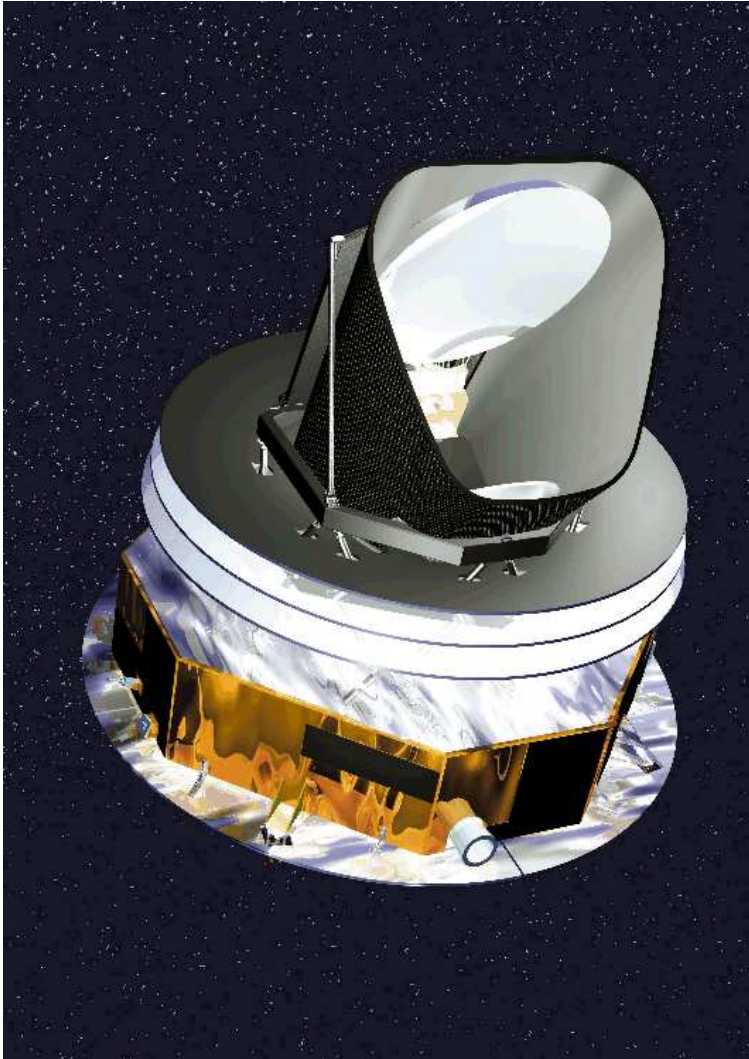
Satelita wystrzelony przez ESA w 2009, umieszczony na tzw. orbicie L2.
Skan całego nieba w 6 miesięcy.



75 detektorów w 9 zakresach częstości.

W porównaniu do WMAP poziom szumów zmniejszony 25 razy !

Planck

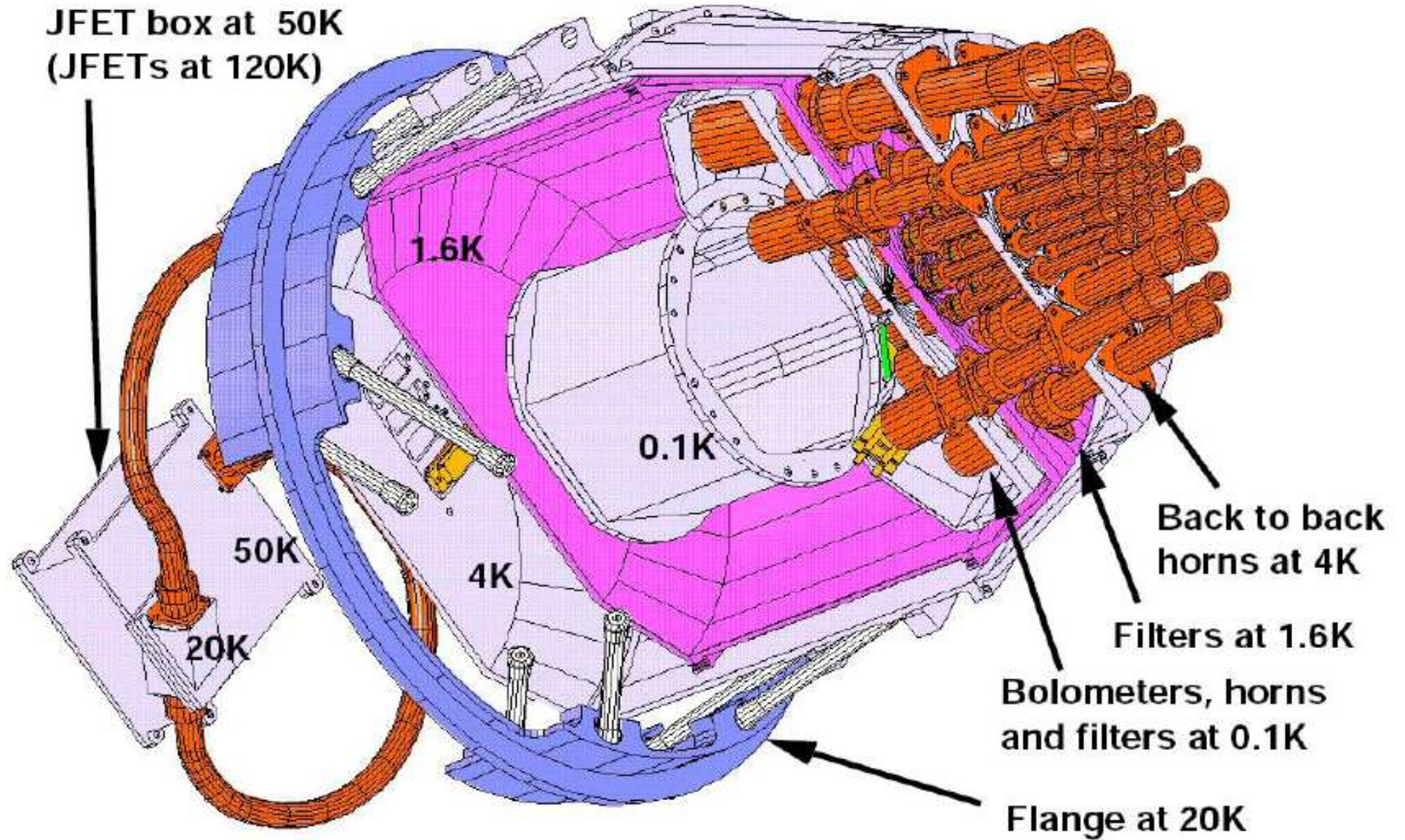


Dwa główne zestawy detektorów:

- LFI (Low Frequency Instrument)
 - zakres 30-100 GHz
 - sensory HEMT (High-electron-mobility transistor)
 - chłodzenie do 20K
- HFI (High Frequency Instrument)
 - zakres 100-857 GHz
 - pomiar temperatury
 - chłodzenie do 0.1K

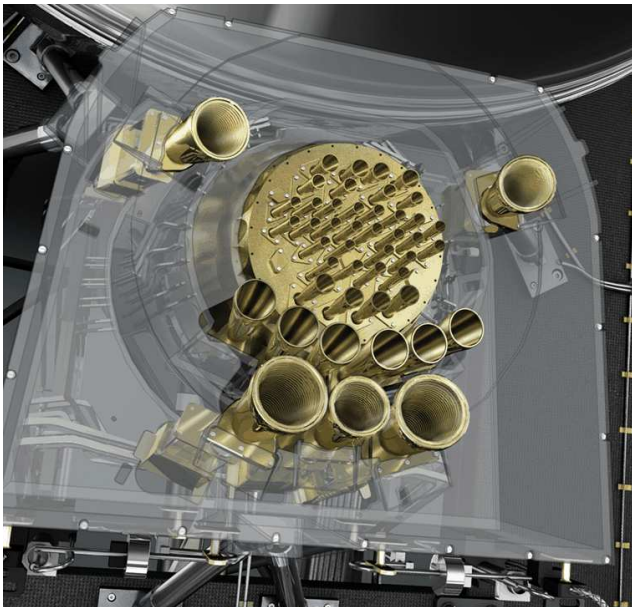
Układ chłodzenia PLANCK

JFET box at 50K
(JFETs at 120K)

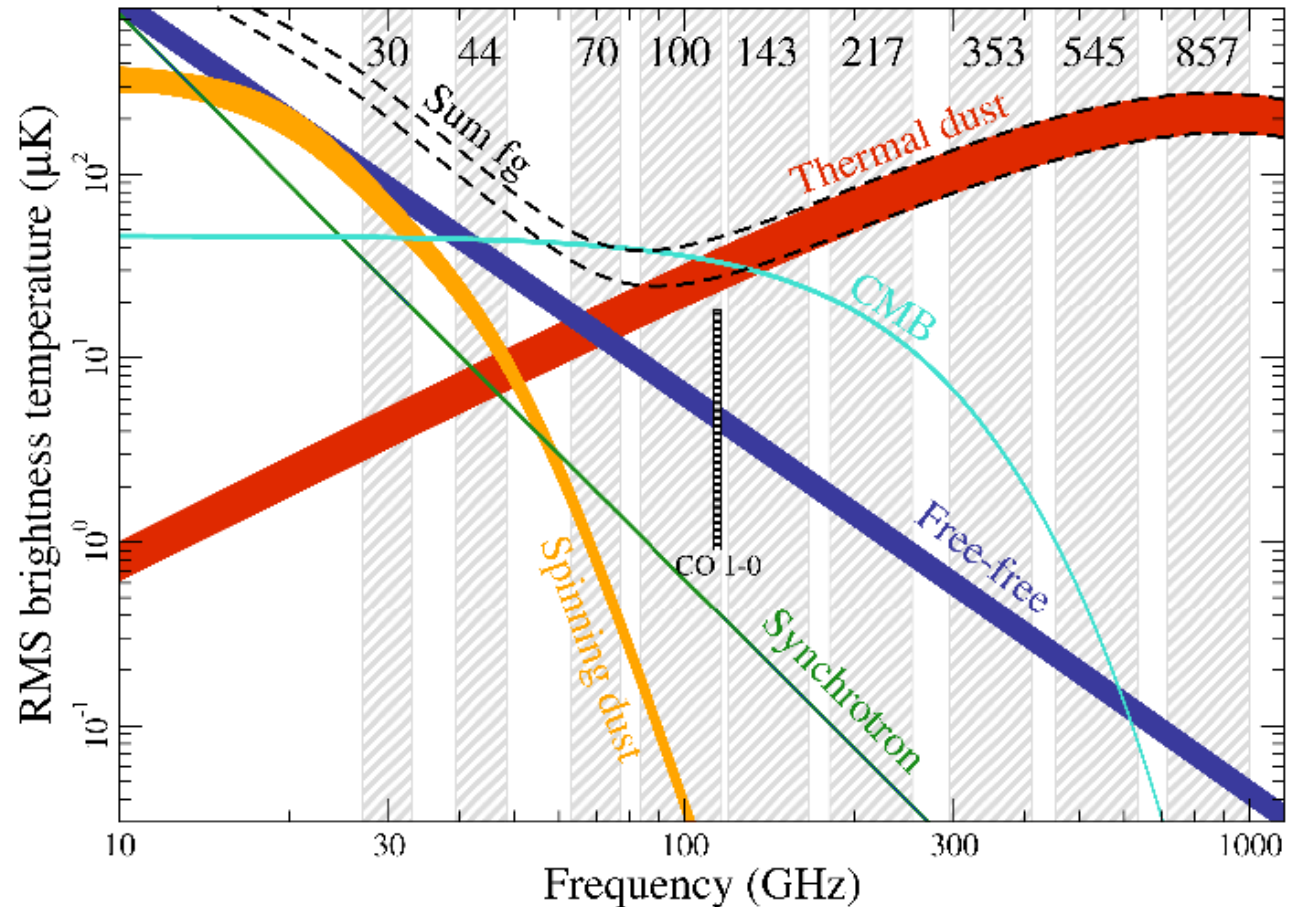


Planck

Detektory



Dlaczego musimy mierzyć w tylu zakresach widma?

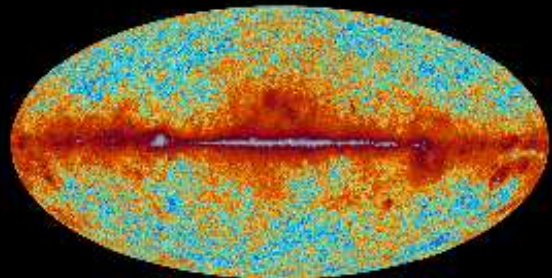


Niezbędne do precyzyjnego odjęcia tła od innych źródeł promieniowania...

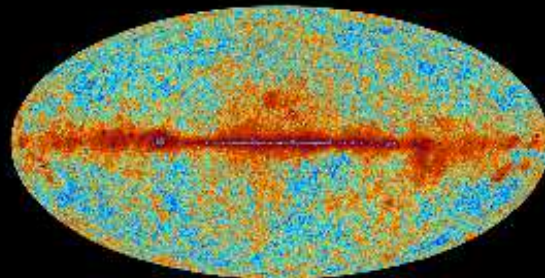


planck

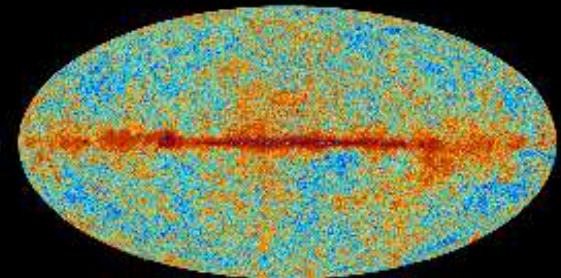
The sky as seen by Planck



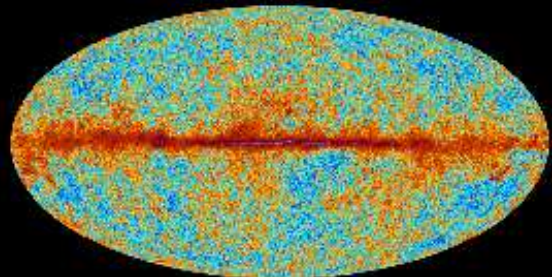
30 GHz



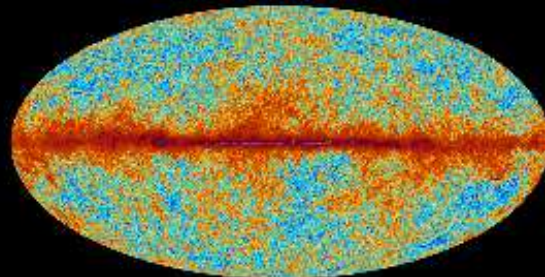
44 GHz



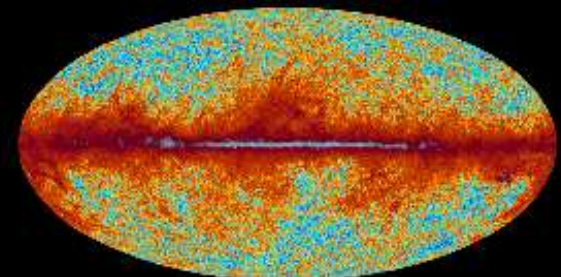
70 GHz



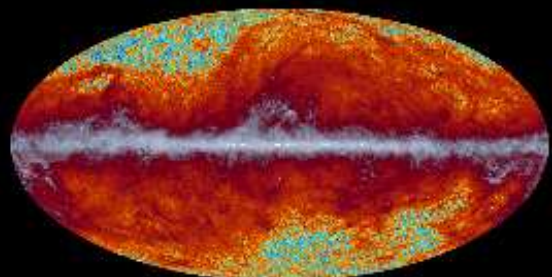
100 GHz



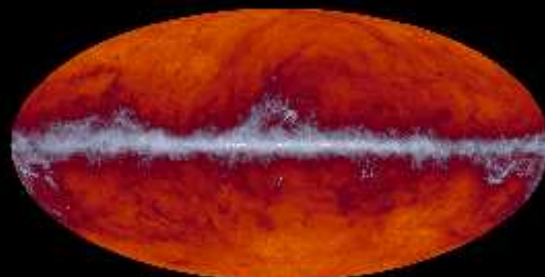
143 GHz



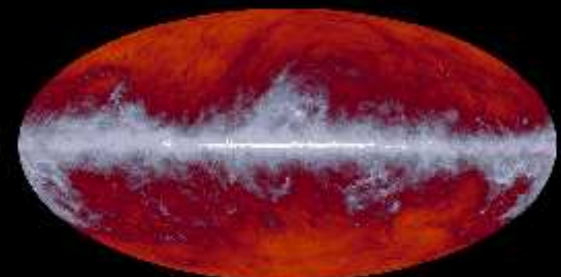
217 GHz



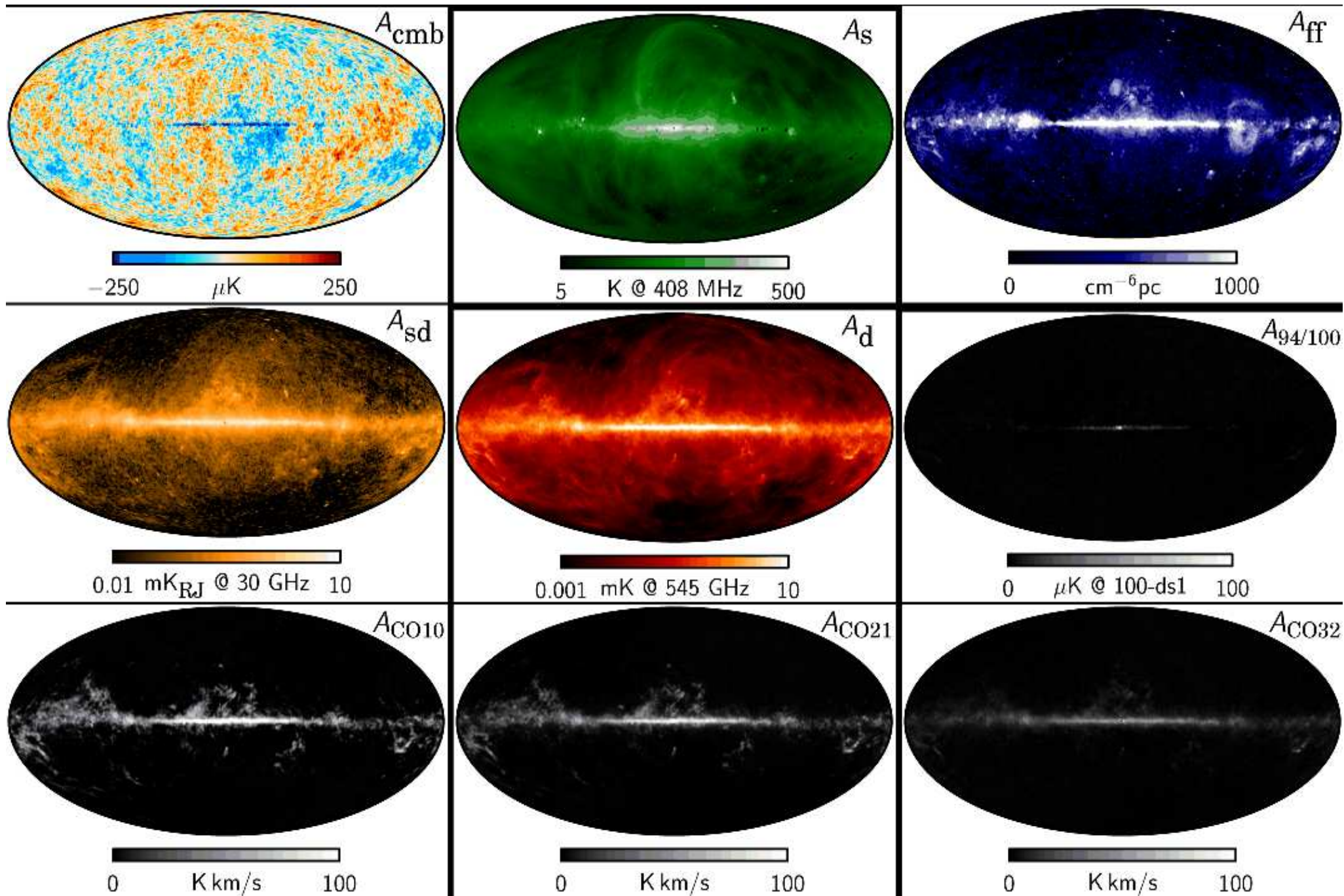
353 GHz



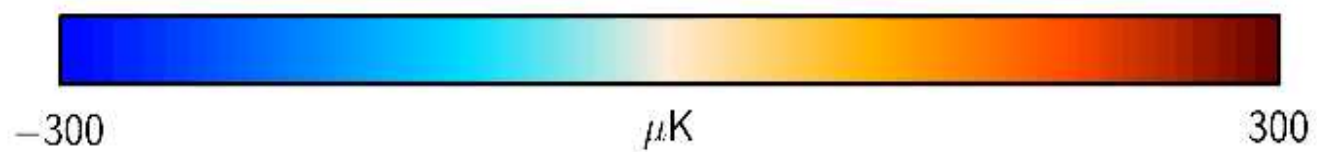
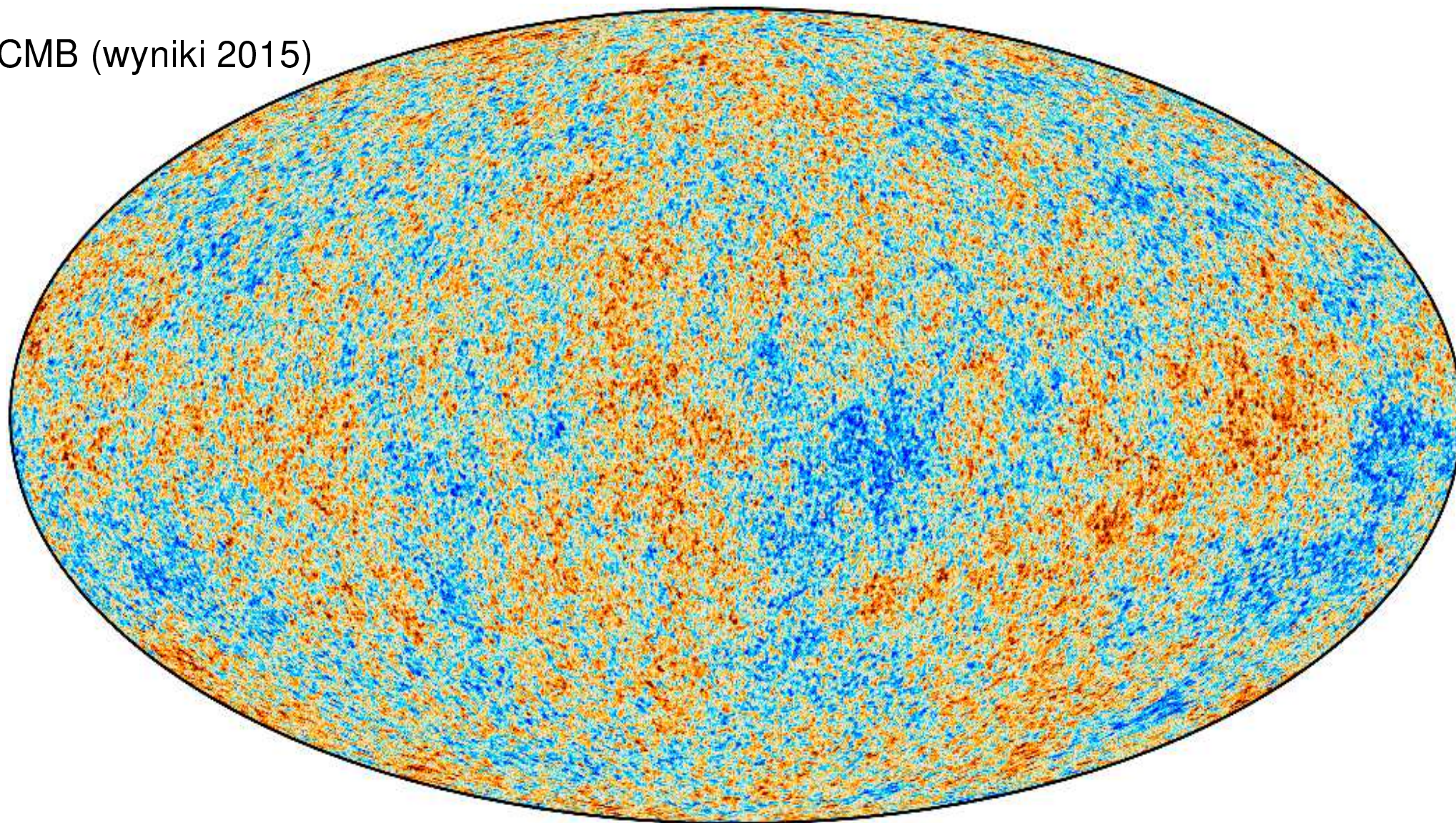
545 GHz



857 GHz

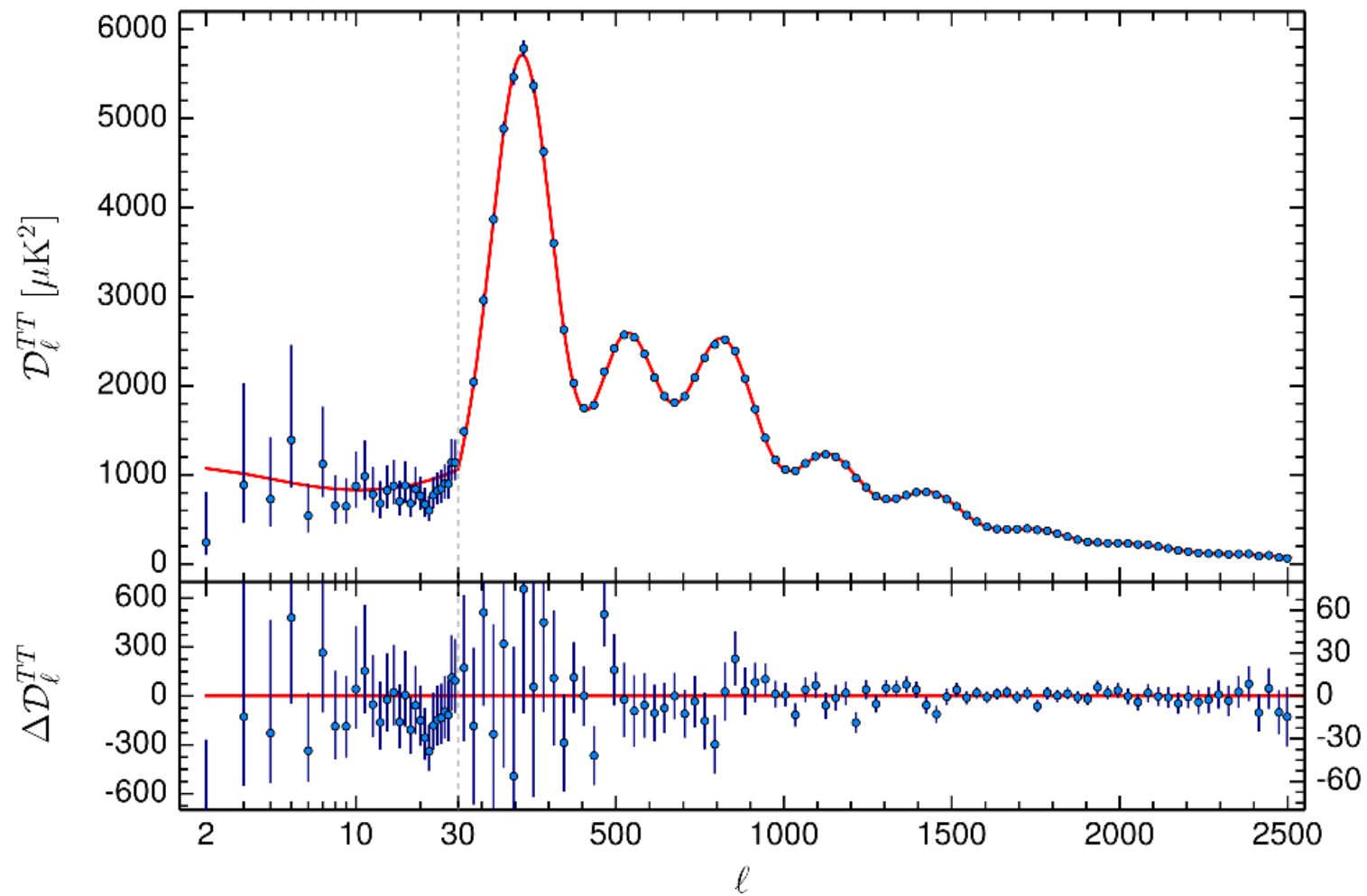


CMB (wyniki 2015)



Planck

Wyniki 2015



Planck

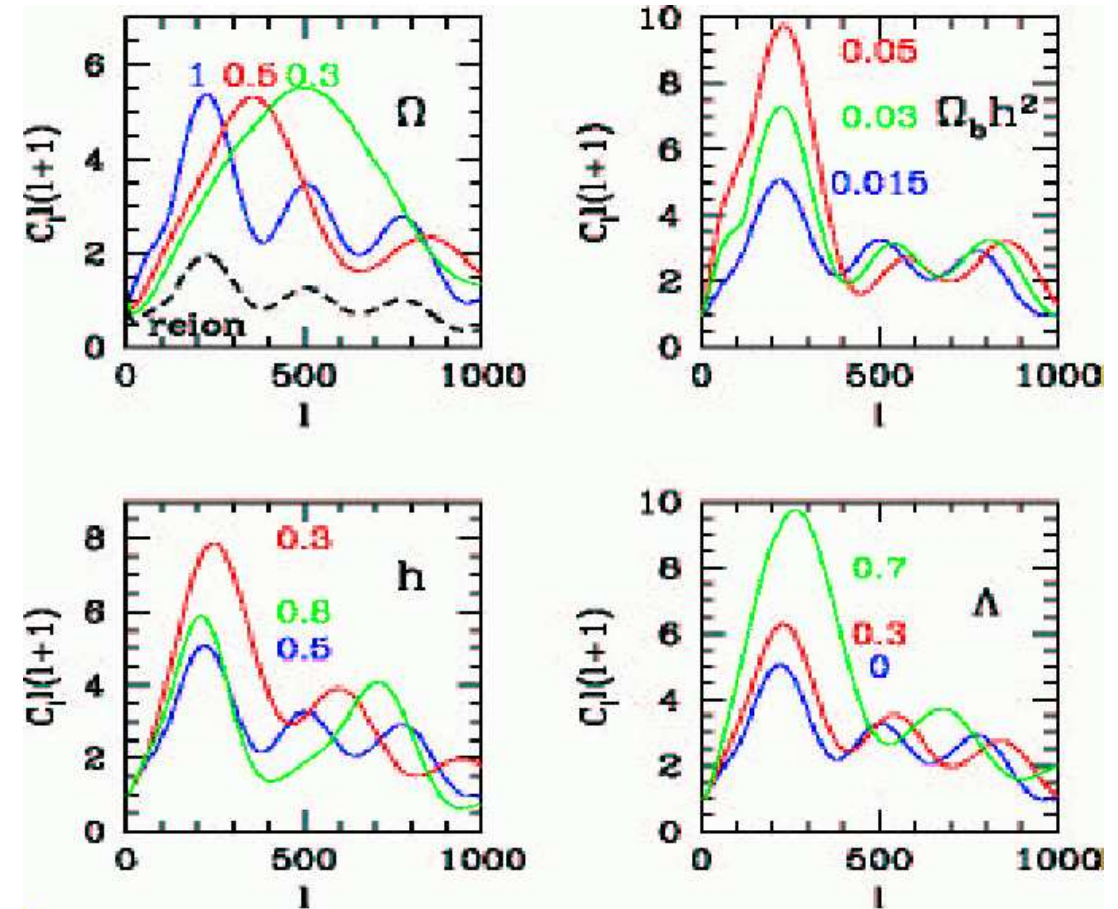
Model kosmologiczny

Oczekiwany rozkład natężenia dla poszczególnych 'multipoli' zależy też od innych parametrów modelu.

Model wykorzystany w analizie danych Planck zakłada udział 5 składników:

- fotony (\Rightarrow CMB)
- bariony
- neutrina
- zimna ciemna materia (CDM)
- stała kosmologiczna (Λ)

Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów:



\Rightarrow ewolucję Wszechświata można opisać przez sześć wolnych parametrów dopasowania

Planck

Wyniki 2015

Wszechświat wydaje się płaski
z dokładnością do 0.25% ($\Omega \approx 1$)

Całkowita **gęstość materii** to ok. **31%**
gęstości krytycznej (Ω_m)

⇒ aby Wszechświat był płaski musimy
uwzględnić stałą kosmologiczną Λ
(ciemna energia?)

Przy czym tylko niecałe **5%** pochodzi
od **materii barionowej** (Ω_b)

⇒ reszta materii musi występować w
nieznanej nam dotychczas formie:

ciemna materia

Parameter	<i>Planck</i> TT+lowP+lensing
$\Omega_b h^2$	0.02226 ± 0.00023
$\Omega_c h^2$	0.1186 ± 0.0020
$100\theta_{MC}$	1.04103 ± 0.00046
τ	0.066 ± 0.016
$\ln(10^{10} A_s)$	3.062 ± 0.029
n_s	0.9677 ± 0.0060
H_0	67.8 ± 0.9
Ω_m	0.308 ± 0.012
$\Omega_m h^2$	0.1415 ± 0.0019
$\Omega_m h^3$	0.09591 ± 0.00045
σ_8	0.815 ± 0.009
$\sigma_8 \Omega_m^{0.5}$	0.4521 ± 0.0088
Age/Gyr	13.799 ± 0.038
r_{drag}	147.60 ± 0.43
k_{eq}	0.01027 ± 0.00014

Planck

Skala czasowa

