

# Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

## Wykład III

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

# Prawo Hubblea

## Przesunięcie ku czerwieni

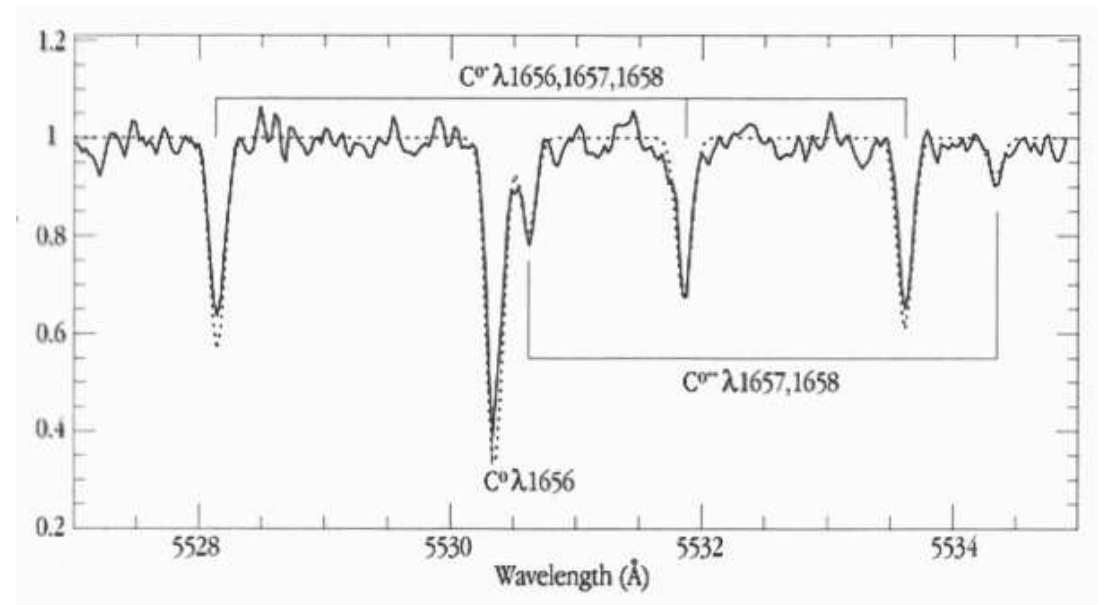
Jeśli źródło światła oddala się od obserwatora następuje wydłużenie fali:

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

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

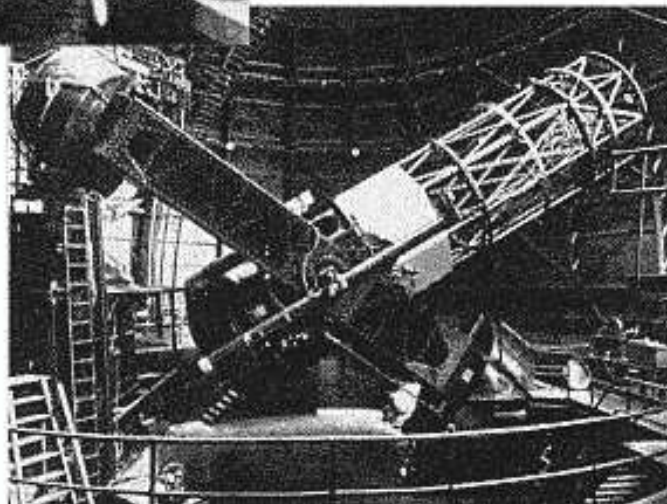
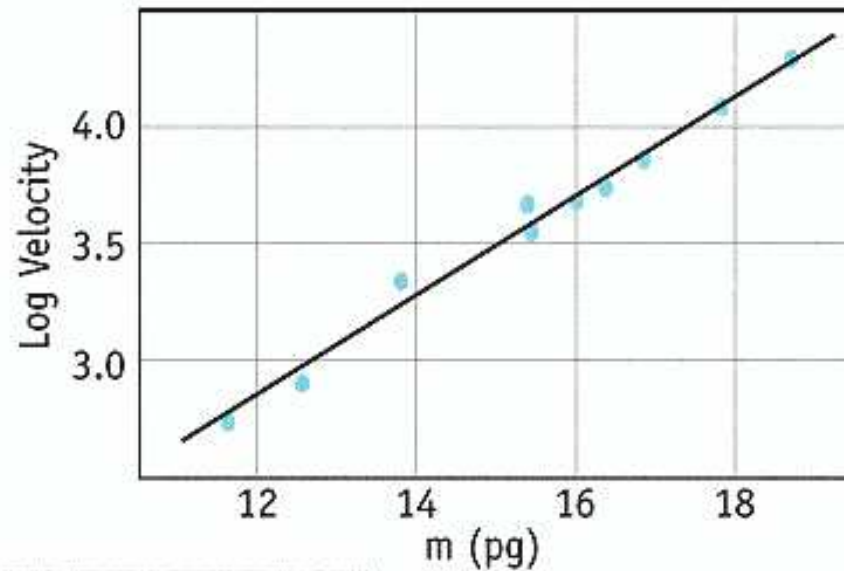
$$(\lambda' = 3.34 \lambda) !$$

# 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)

$$v = H r$$

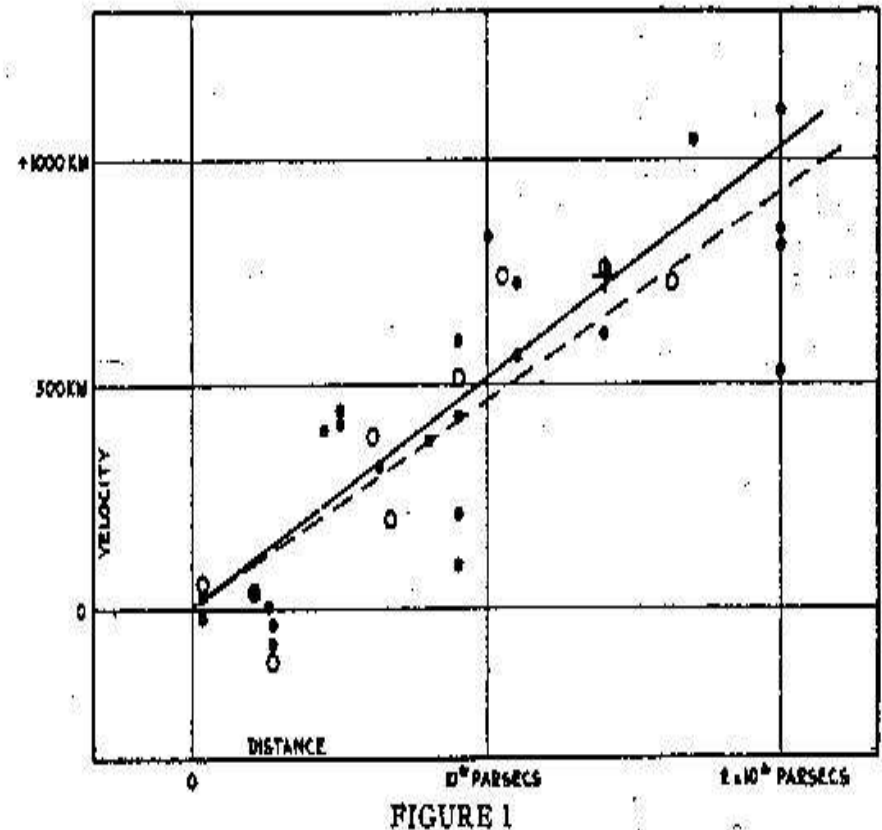
$r$  - odległość od Ziemi,  $H$  - stała Hubble'a

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)

$$v = H r$$

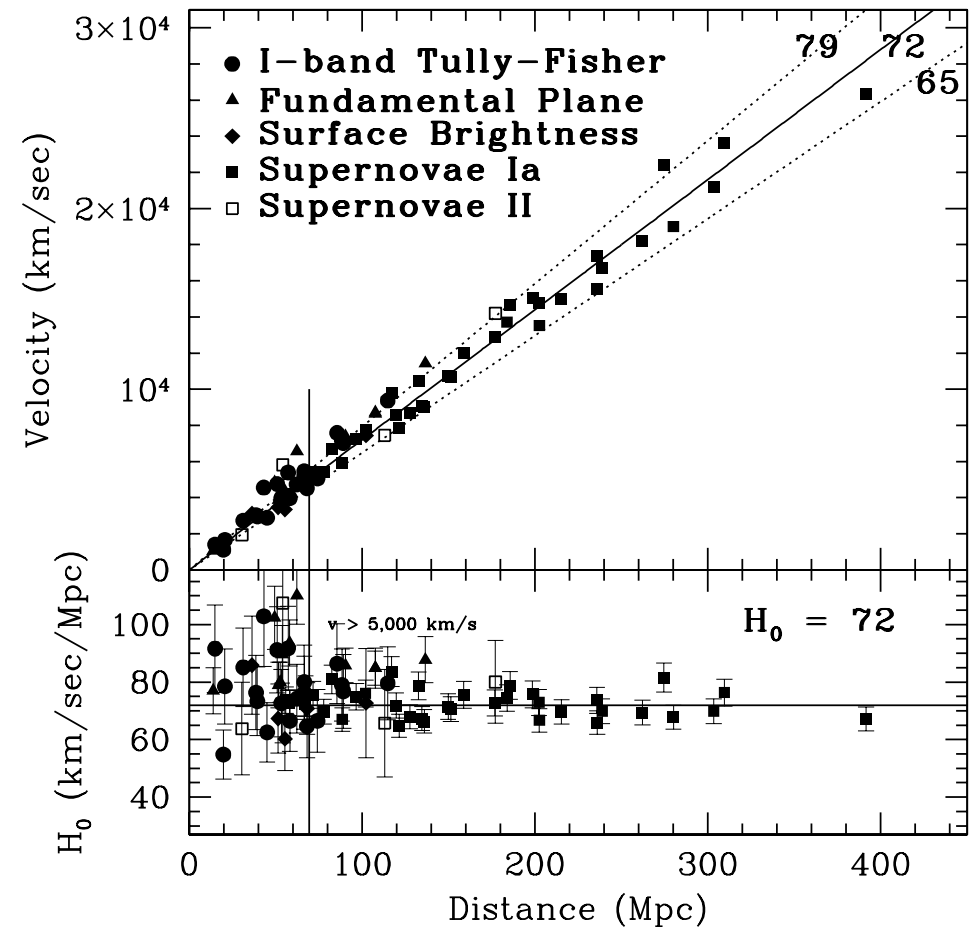
$r$  - odległość od Ziemi,  $H$  - stała Hubble'a

Wartość podana przez Hubble'a:

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

prawie rząd wielkości za dużo :-)

Obecne pomiary:  $H \sim 68 \text{ km/s/Mpc}$

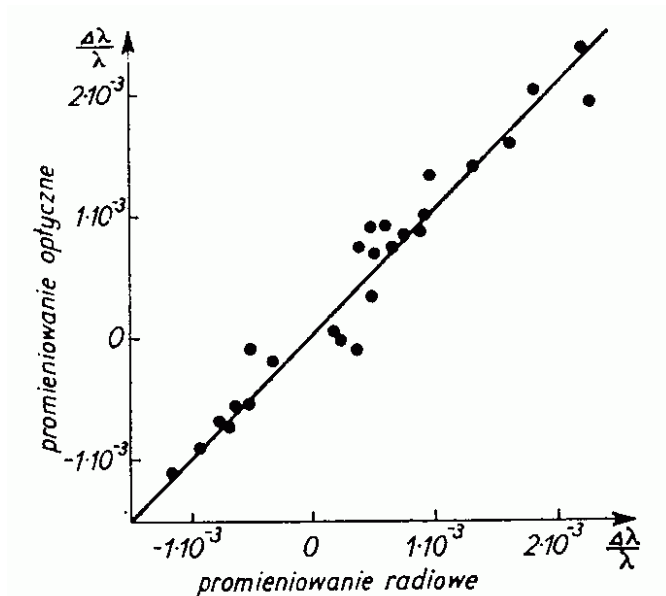


# Prawo Hubble'a

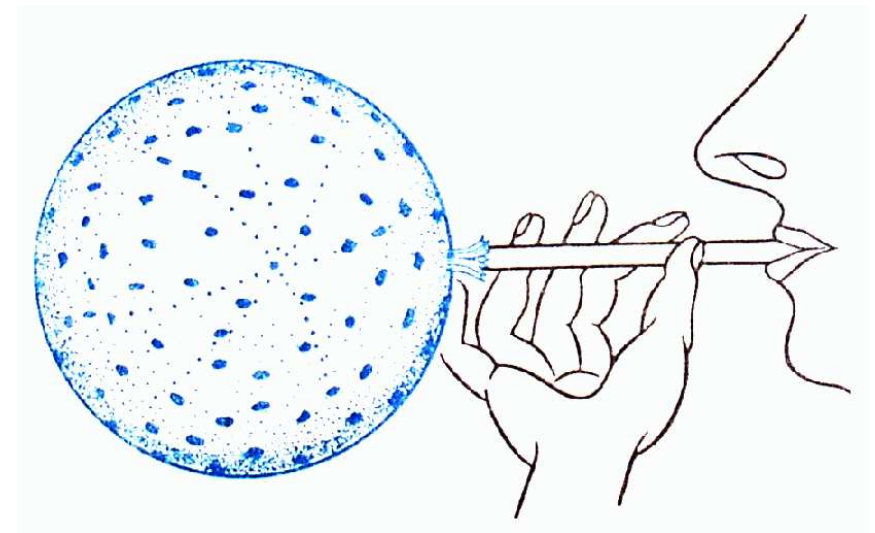
## Przesunięcie ku czerwieni

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**

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:** dla metryki Minkowskiego:  $A(r) \equiv B(r) \equiv 1$

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

# Ewolucja Wszechświata

## Metryka

Nasza przestrzeń może być “płaska”, ale też musimy dopuścić możliwość, że tak nie jest.  
Najprostsza możliwość: **3-wymiarowa sfera** w przestrzeni o 4 wymiarach.

$$\begin{aligned} \text{odległość w 4-D:} \quad dl^2 &= dx^2 + dy^2 + dz^2 + dw^2 \\ \text{równanie sfery:} \quad R^2 &= x^2 + y^2 + z^2 + w^2 \end{aligned}$$

Na powierzchni sfery:

$$\begin{aligned} 0 &= dR^2 = 2R dR = 2x dx + 2y dy + 2z dz + 2w dw \\ \Rightarrow dw &= -\frac{x dx + y dy + z dz}{\sqrt{R^2 - r^2}} = -\frac{r dr}{\sqrt{R^2 - r^2}} \\ \text{gdzie:} \quad r^2 &= x^2 + y^2 + z^2 \end{aligned}$$

Możemy wprowadzić współrzędne sferyczne na sferze 3-D:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi \quad y = r \sin \theta \sin \phi \quad z = r \cos \theta \\ \Rightarrow dl^2 &= dr^2 + r^2 (d\theta^2 + d\phi^2 \sin^2 \theta) + \frac{r^2 dr^2}{R^2 - r^2} = \frac{R^2 dr^2}{R^2 - r^2} + r^2 d\Omega^2 \end{aligned}$$



# Ewolucja Wszechświata

## Metryka

Wstawiając uzyskany wynik do wyrażenia na interwał czasoprzestrzenny otrzymujemy metrykę (w uogólnionej postaci):

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

Z niezmienniczości translacyjnej wynika, że są tylko trzy możliwe kategorie metryki odpowiadające wartości  $k = -1, 0, 1$  ( $k$ : krzywizna przestrzeni) kula 3-D:  $k = +1$

Metryka może też być przedstawiona w równoważnej postaci:

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

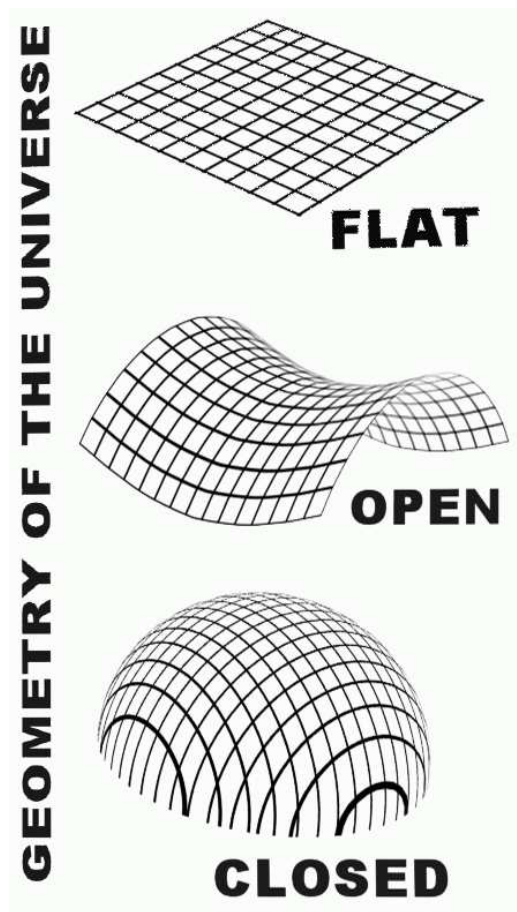
gdzie:

$$\frac{r}{R} \equiv S(\chi) = \begin{cases} \sin(\chi) & \text{dla } k = +1 \\ \chi & k = 0 \\ \sinh(\chi) & k = -1 \end{cases}$$

Ewolucję opisujemy poprzez zależność  $R(t)$  - metryka Friedmanna-Robertsona-Walkera

# 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:  $\rho$  - gęstość materii,  $p$  - ciśnienie

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

# Ewolucja Wszechświata

## Gęstość krytyczna

Zakładając, że Wszechświat wypełniony jest nierelatywistycznym “pyłem” (brak ciśnienia:  $p \equiv 0$ ) oraz pomijając stałą kosmologiczną:

z pierwszego równania: 
$$H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{R^2}$$

Parametr krzywizny:

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

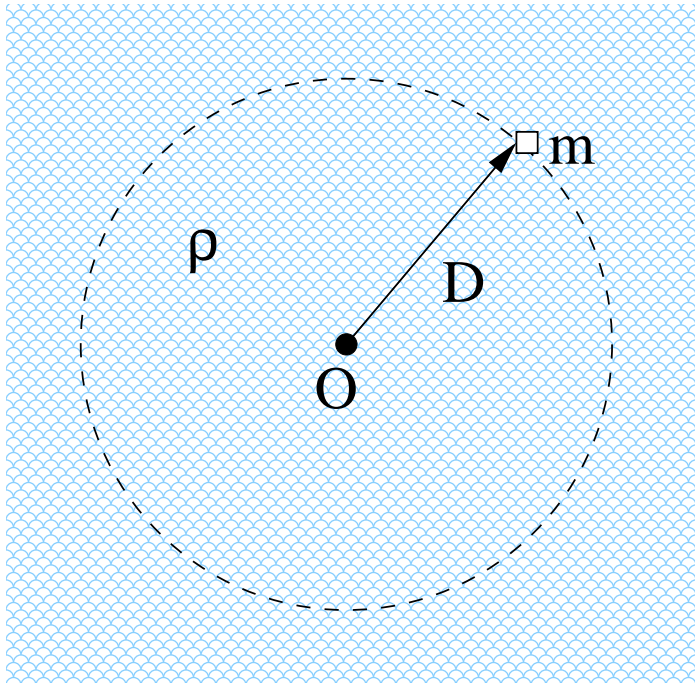
Krzywizna Wszechświata jest ściśle związana z gęstością materii !

Wszechświat może być płaski ( $k = 0$ ) tylko dla:

$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi G} = \rho_c \quad \text{gęstość krytyczna}$$

# 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

## Gęstość krytyczna

Z równań Friedmanna wynika 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  $\rho_c$ ):

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

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  $\Omega_{tot} > 1$

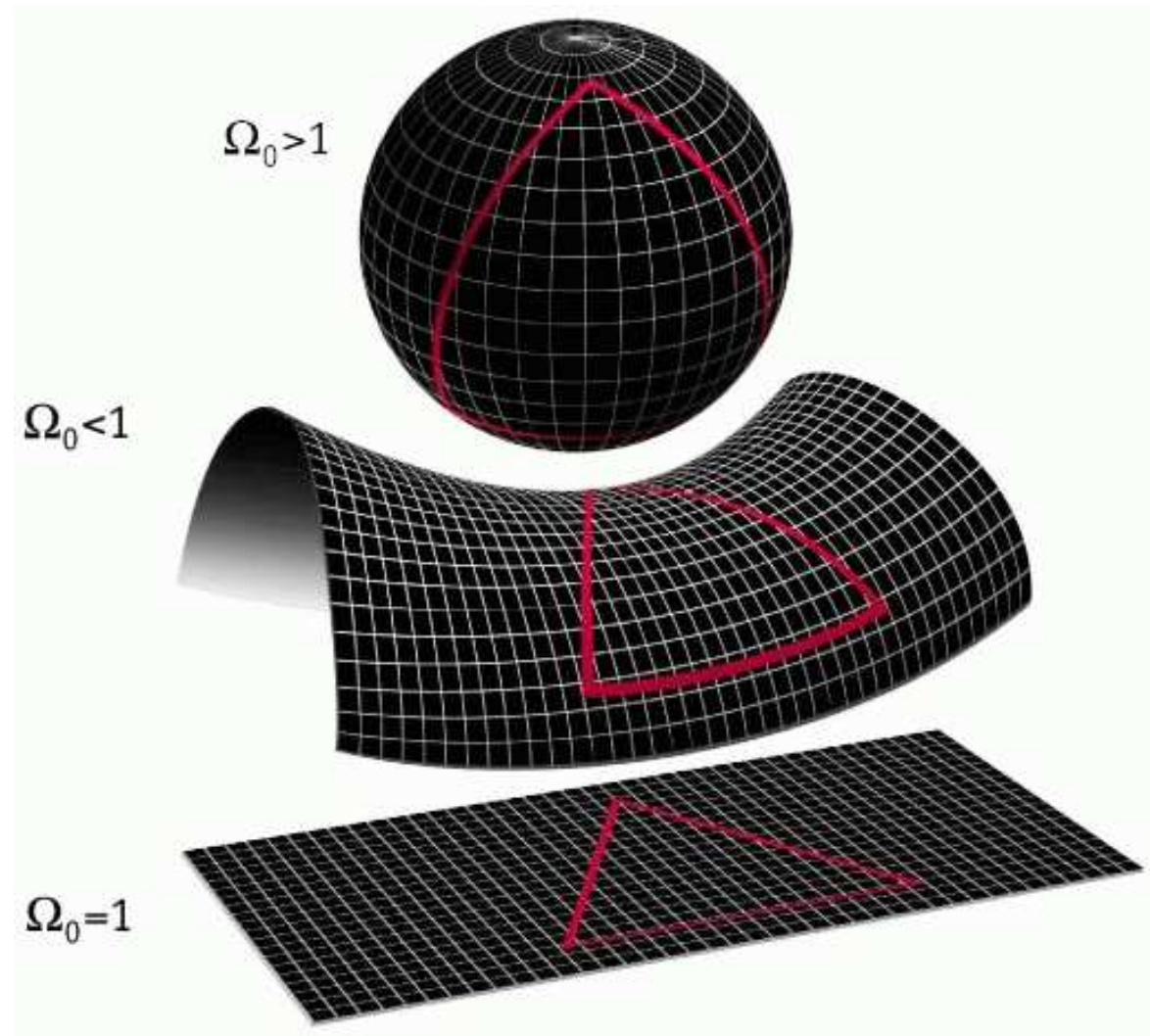
⇒ Wszechświat 'zamknięty'  
krzywizna  $k = +1$

# Ewolucja Wszechświata

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

**Lokalnie** wiemy, że przestrzeń jest **płaska** (suma kątów trójkąta wynosi  $180^\circ$ ).

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

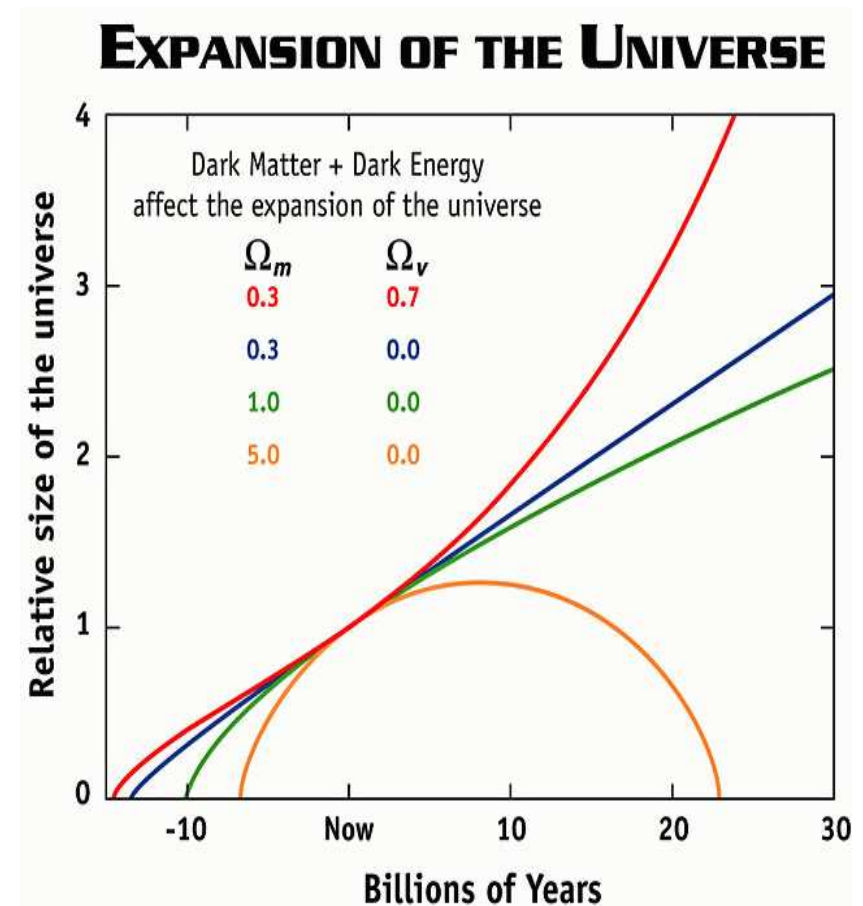
$$\Omega_m > 1 \quad (k = +1)$$

⇒ Wszechświat kiedyś zacznie się zapadać

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

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

Scenariusze ewolucji Wszechświata



# Ewolucja Wszechświata

## Szybkość ekspansji

Charakter ewolucji wszechświata zmienia się w czasie, w zależności od tego jaki jego składnik ma największy wkład.

Dla Wszechświata zdominowanego przez promieniowanie ( $p = \frac{1}{3}\rho$ ):

$$R^4(t) \cdot \rho = const \Rightarrow R(t) \sim t^{1/2}$$

Dla Wszechświata zdominowanego przez materię (“pył” bez ciśnienia):

$$R^3(t) \cdot \rho = const \Rightarrow R(t) \sim t^{2/3}$$

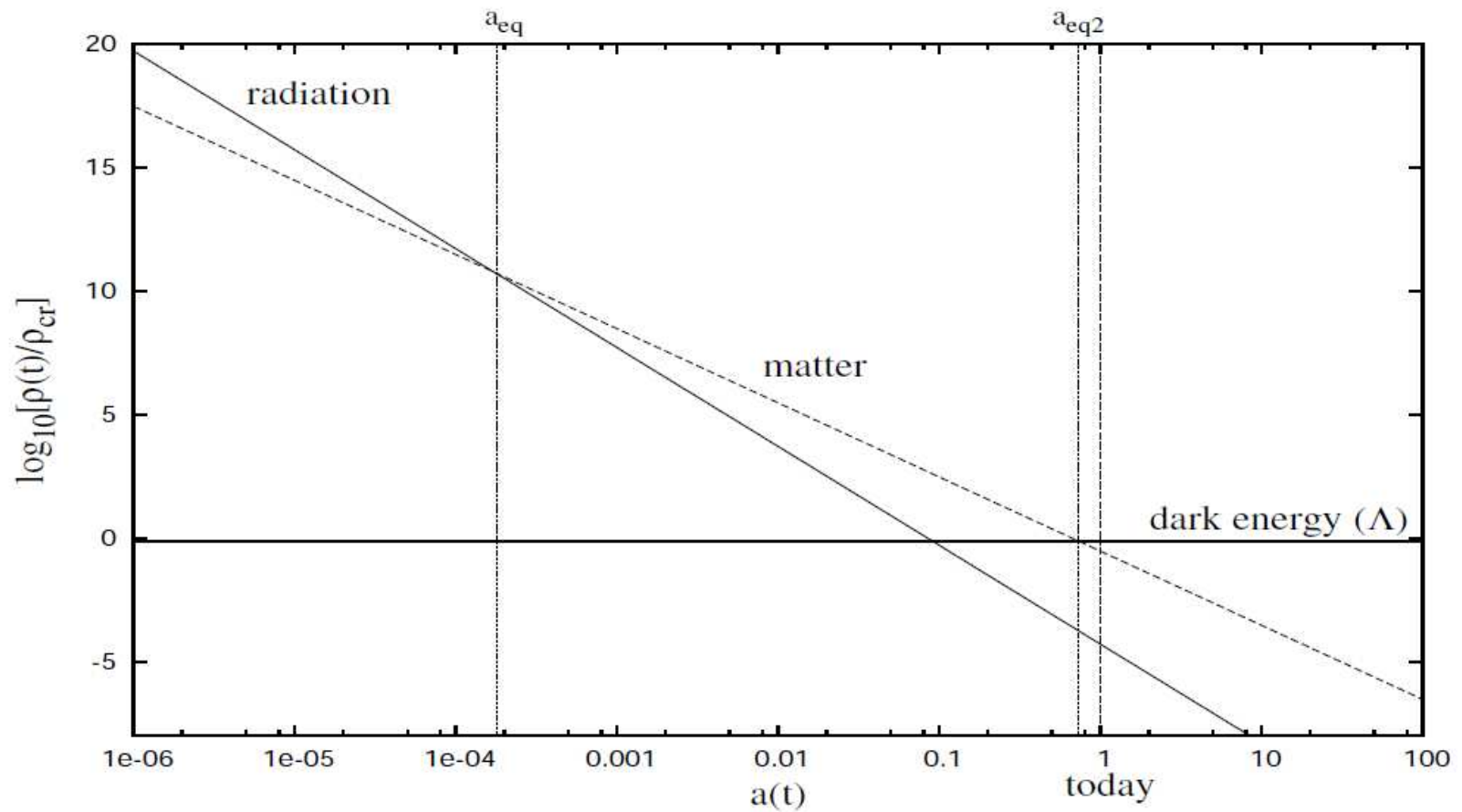
Dla Wszechświata zdominowanego przez stałą kosmologiczną ( $p = -\rho$ ):

$$\rho = const \Rightarrow R(t) \sim e^{\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t}$$



# Ewolucja Wszechświata

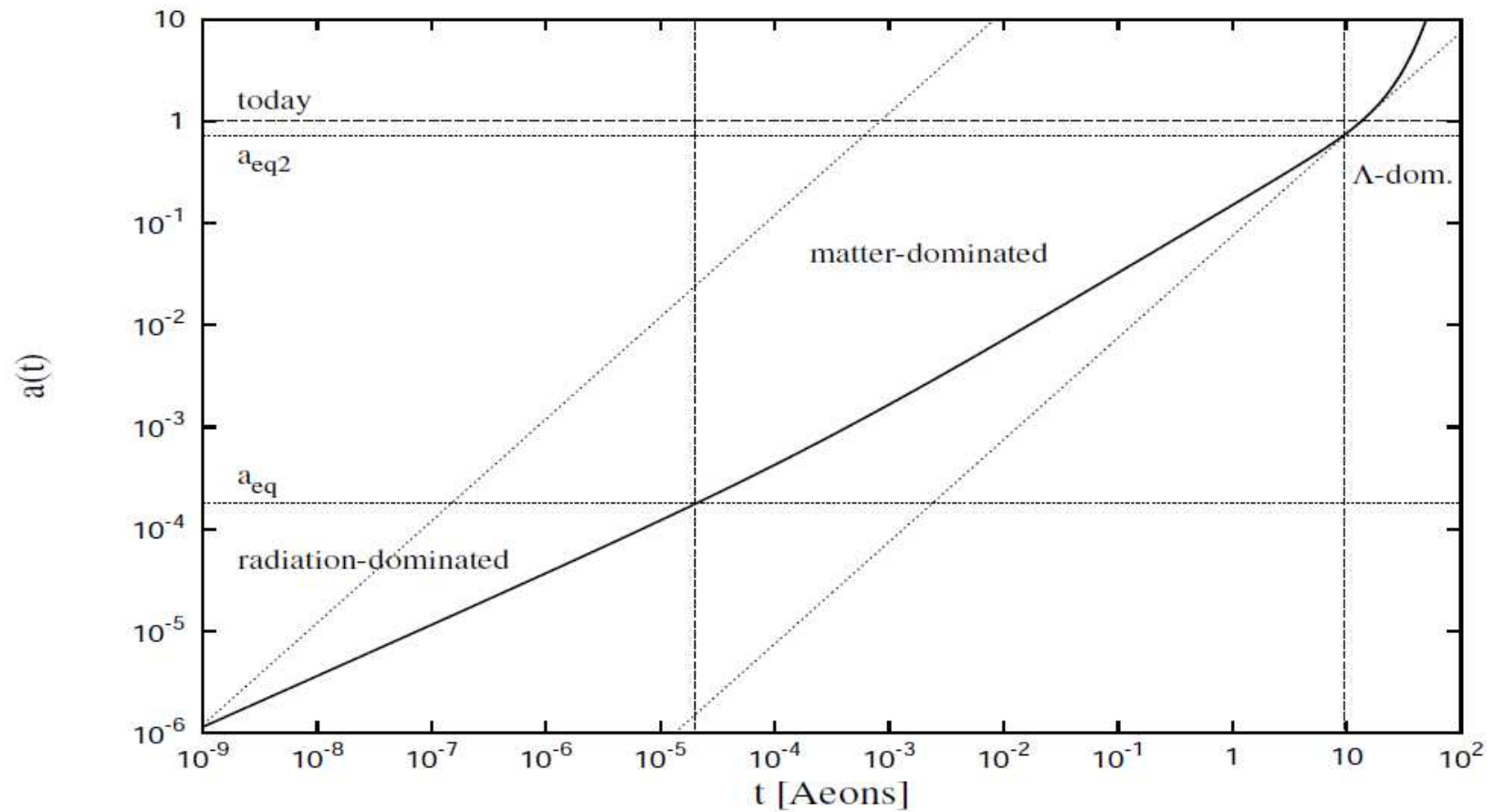
## Ewolucja gęstości Wszechświata



<http://nicadd.niu.edu/~bterzic/PHYS652/index.htm>

# Ewolucja Wszechświata

## Ewolucja skali Wszechświata



<http://nicadd.niu.edu/~bterzic/PHYS652/index.htm>

# 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...

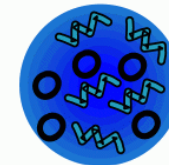
## $10^{-43}$ sekundy

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

The big



$10^{-43}$  seconds



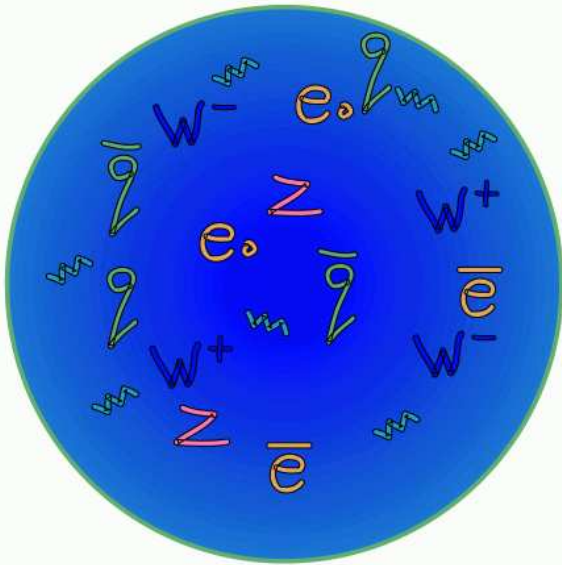
$10^{32}$  degrees

# Wielki Wybuch

$10^{-34}$  sekundy

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

**$10^{-34}$  seconds**

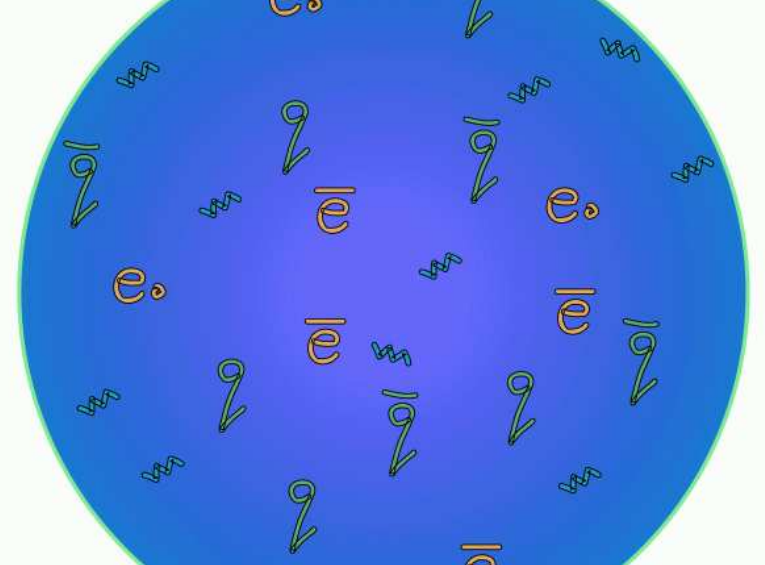


**$10^{27}$  degrees**

$10^{-10}$  sekundy

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

**$10^{-10}$  seconds**



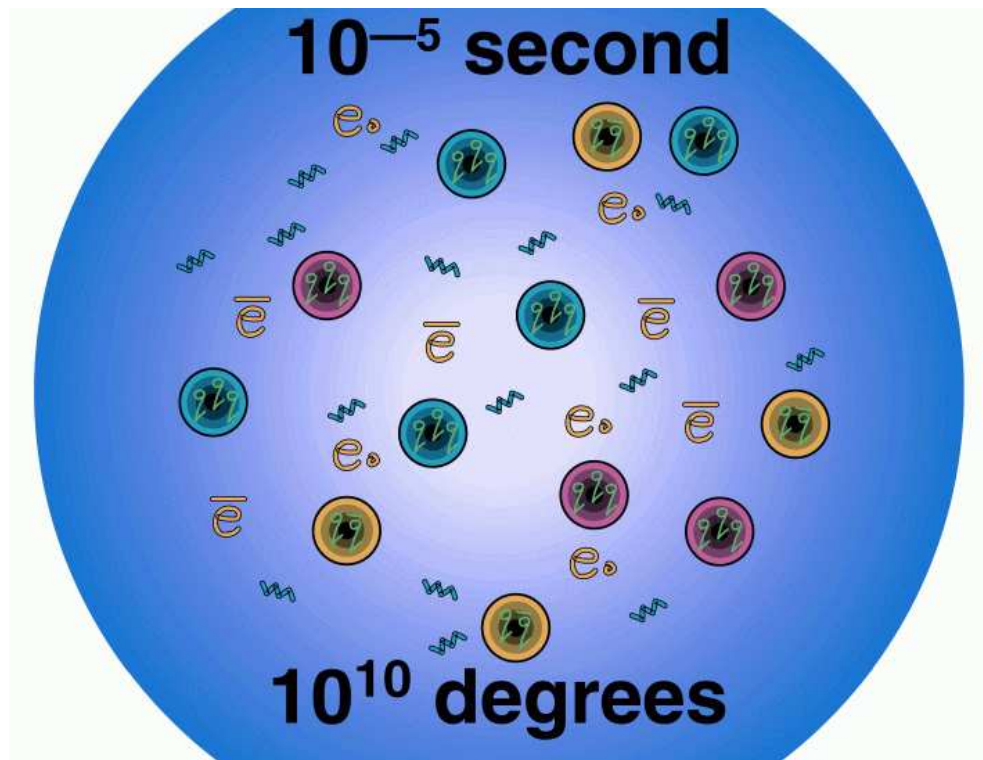
**$10^{15}$  degrees**

# Wielki Wybuch

$10^{-5}$  sekundy

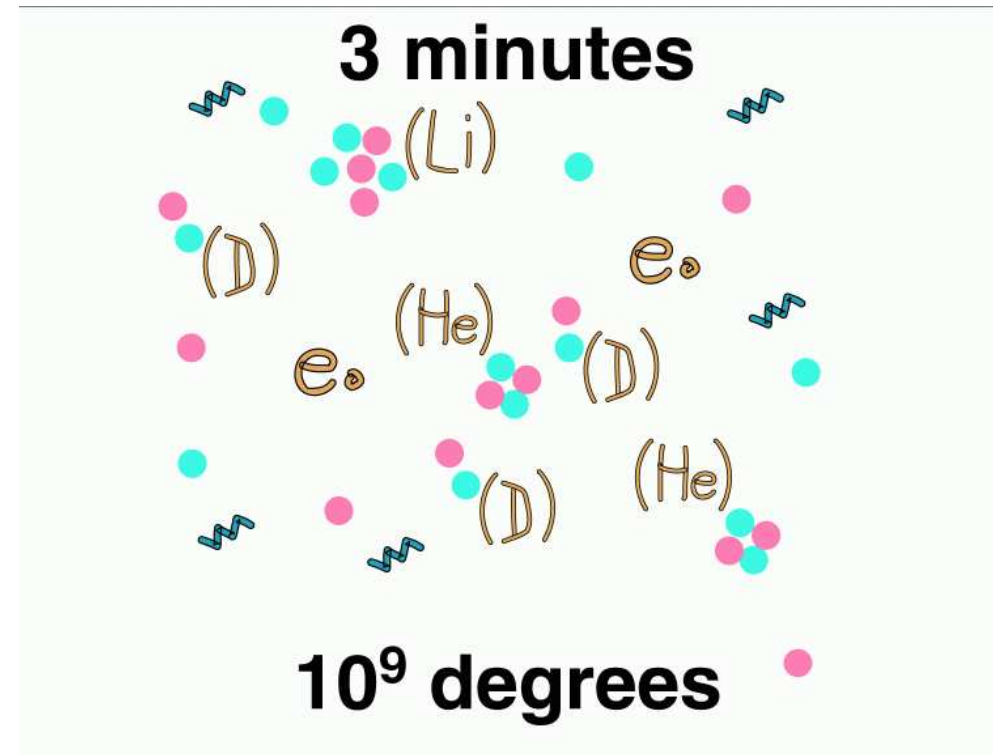
Kwarki formują **neutrony i protony**. **Antymateria zaczyna zanikać** bo promieniowanie jest już zbyt słabe aby ją wciąż wytwarzać.

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.



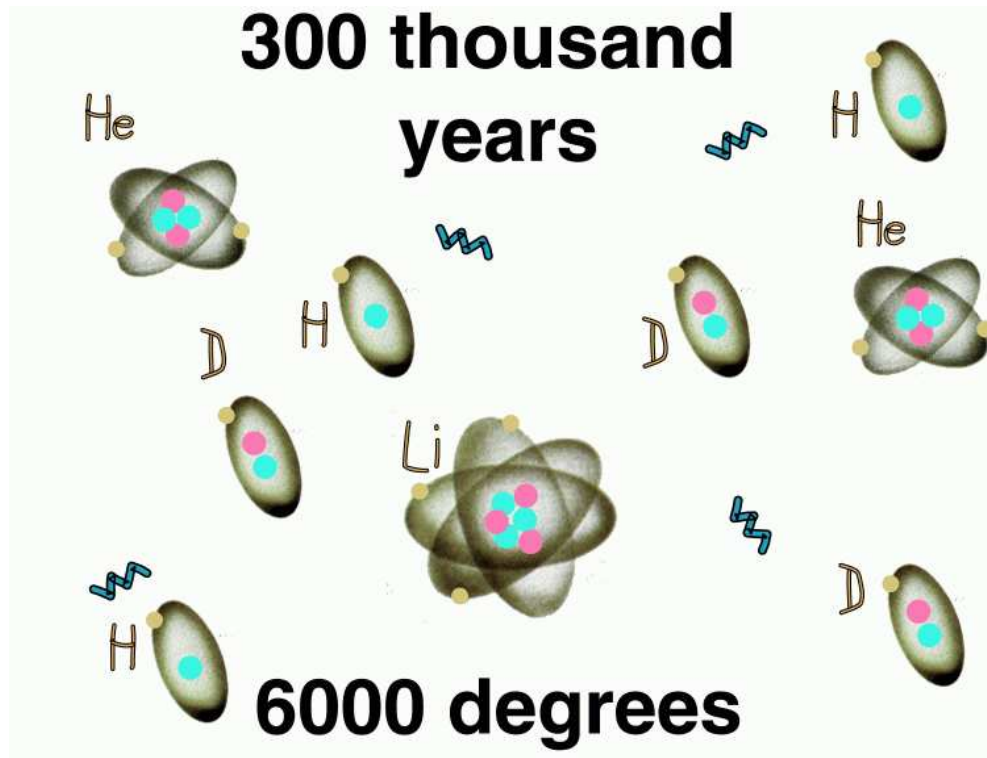
# Wielki Wybuch

300 000 lat

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

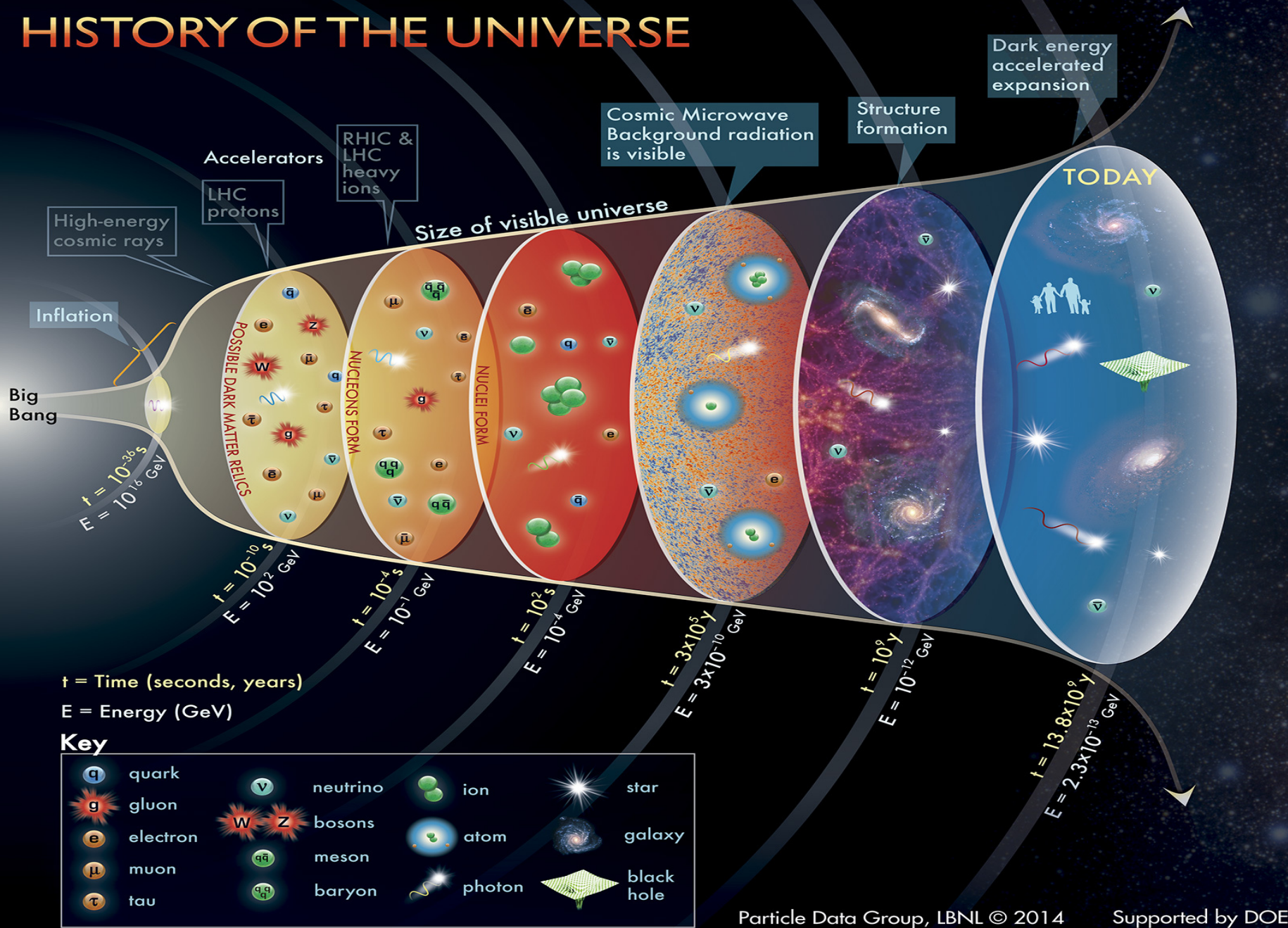
1 000 000 000 lat

Formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach.





# HISTORY OF THE UNIVERSE





# Wielki Wybuch

## Sukcesy modelu Wielkiego Wybuchu

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

## Pytania na które wciąż nie mamy pełnej odpowiedzi

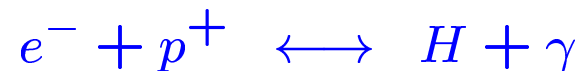
- Dlaczego zanikła antymateria?
- Jak formowały się struktury we Wszechświecie?
- Czym jest ciemna materia?
- Czy istnieje ciemna energia?

# 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.

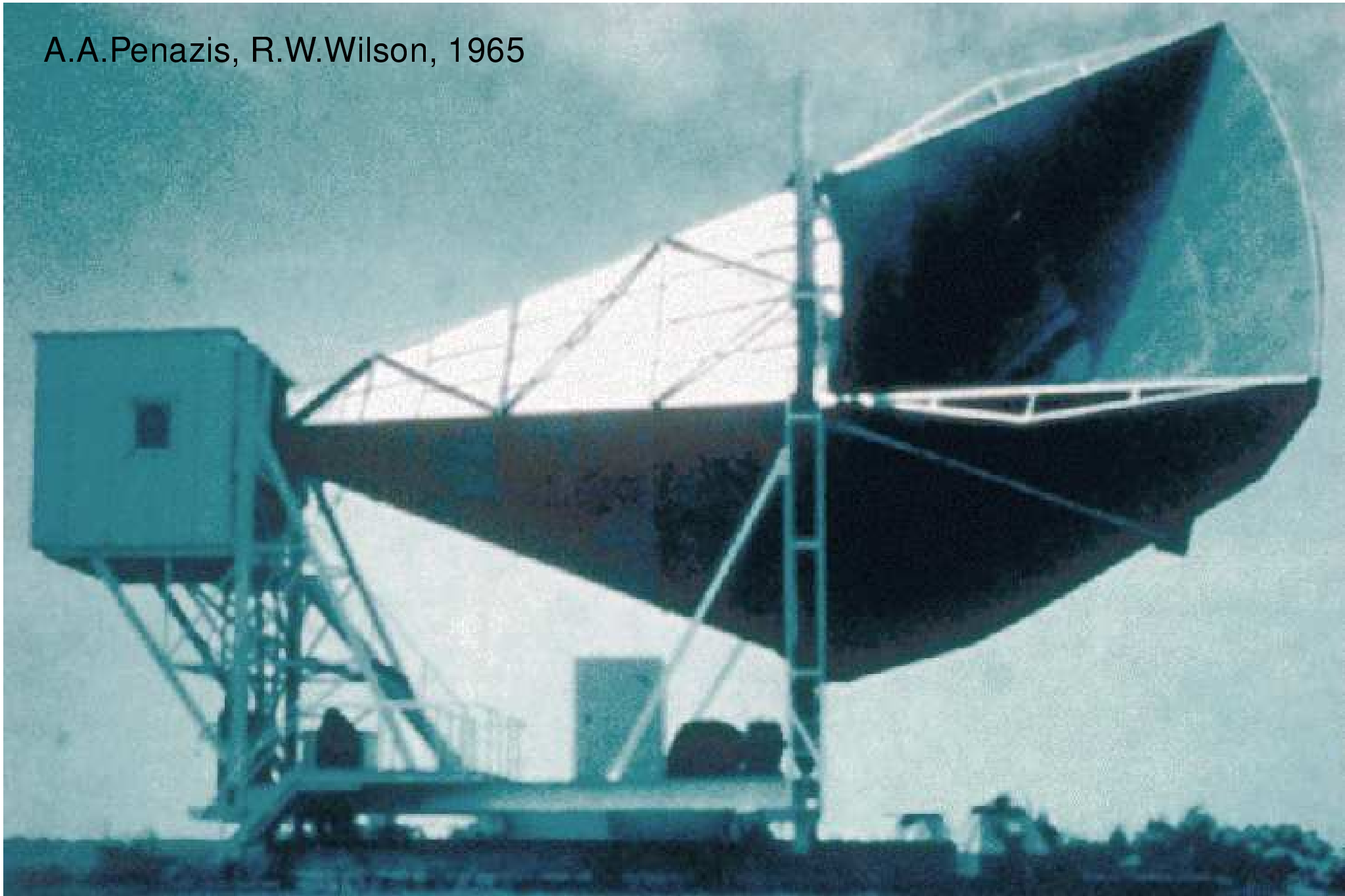
Jest to tzw. **promieniowanie reliktowe** inaczej nazywane też **mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB)**

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

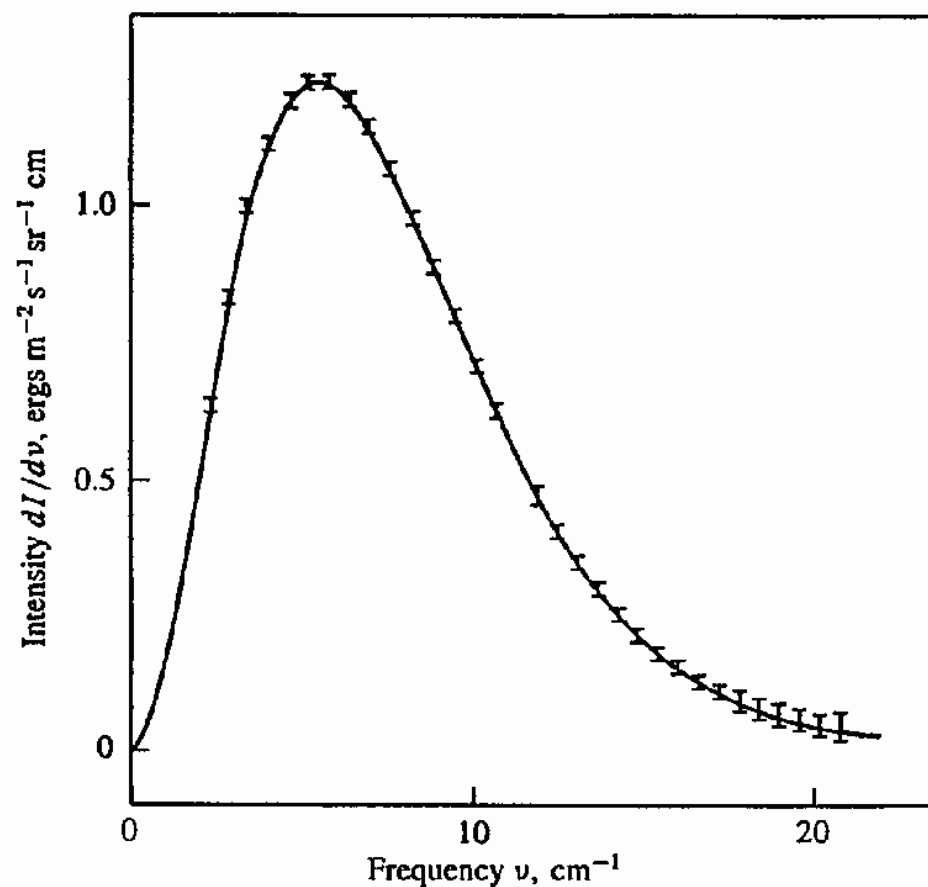
Mikrofalowe promieniowanie tła (CMB) zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzisa i R.W.Wilsona.

Przez kolejne dekady było coraz intensywniej badane.

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

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

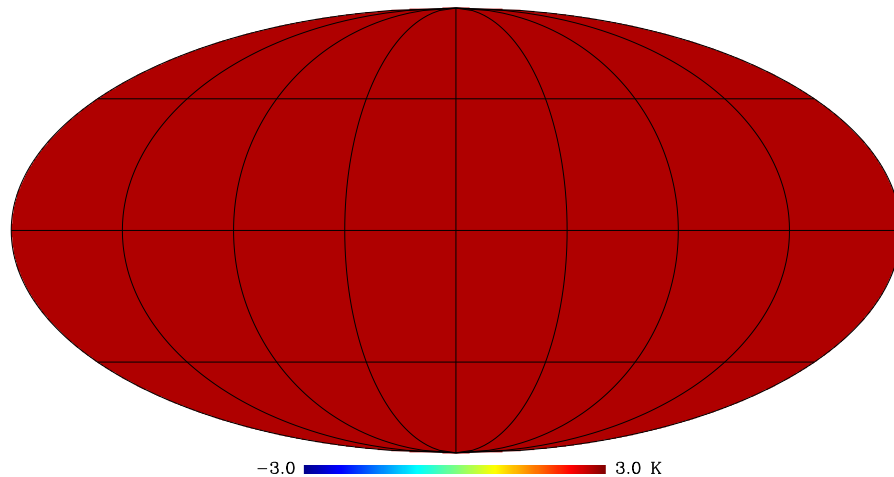
Wyniki z satelity COBE: (1999)



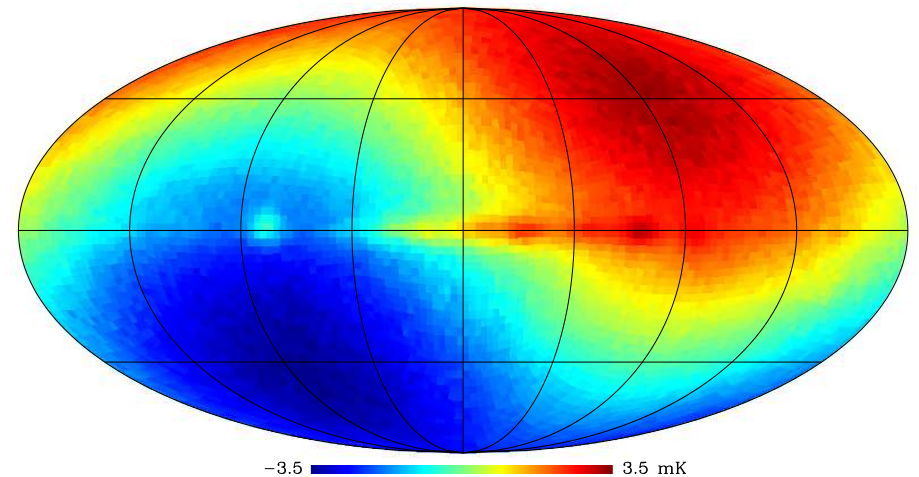
# Promieniowanie tła

## Rozkład kątowy

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



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

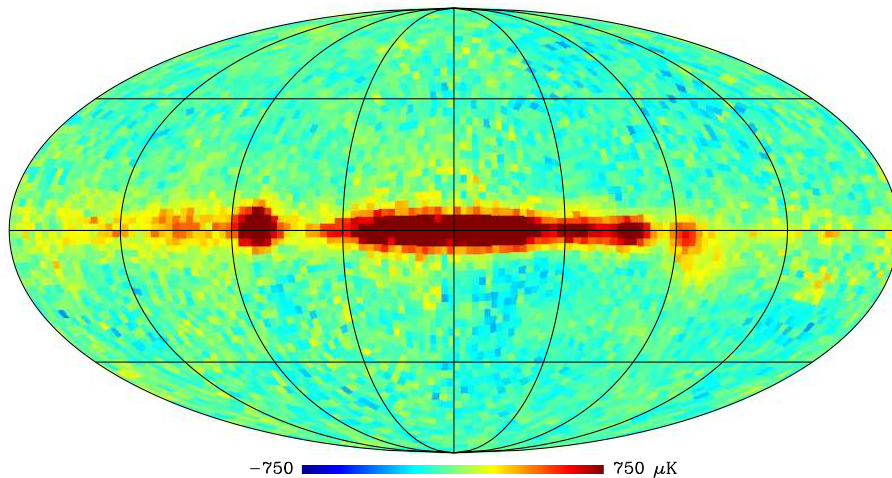


widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem  
'globalnego' układu.

# Promieniowanie tła

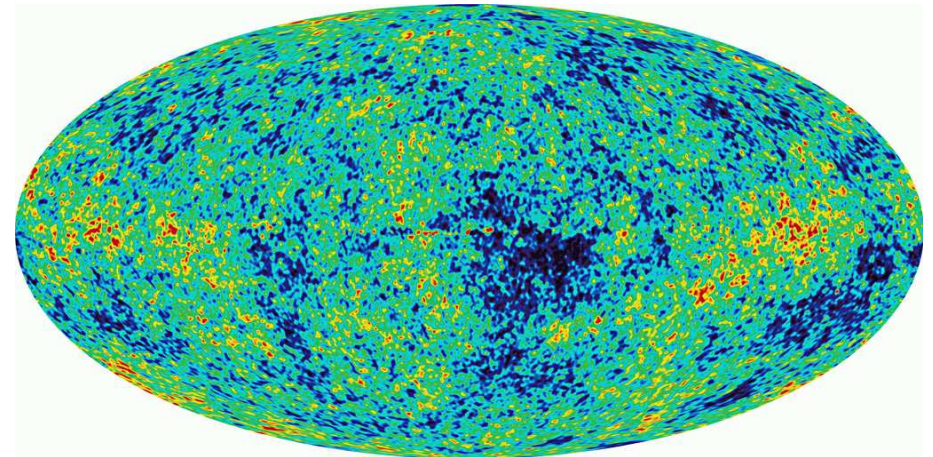
## Rozkład kątowy

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



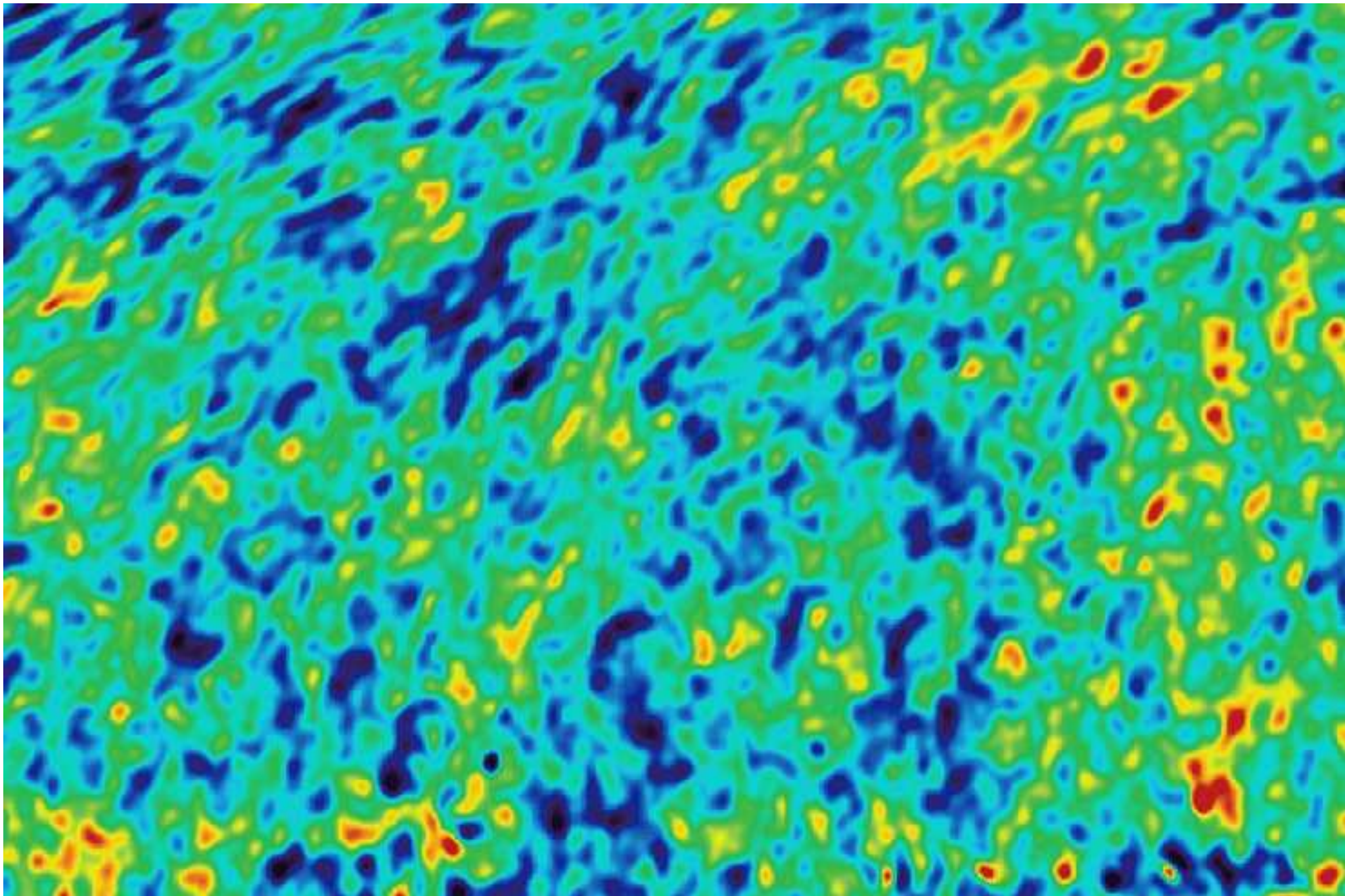
⇒ widzimy promieniowanie naszej galaktyki (Drogi Mlecznej)...

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



⇒ zaczyna być ciekawie !!!







# Promieniowanie tła

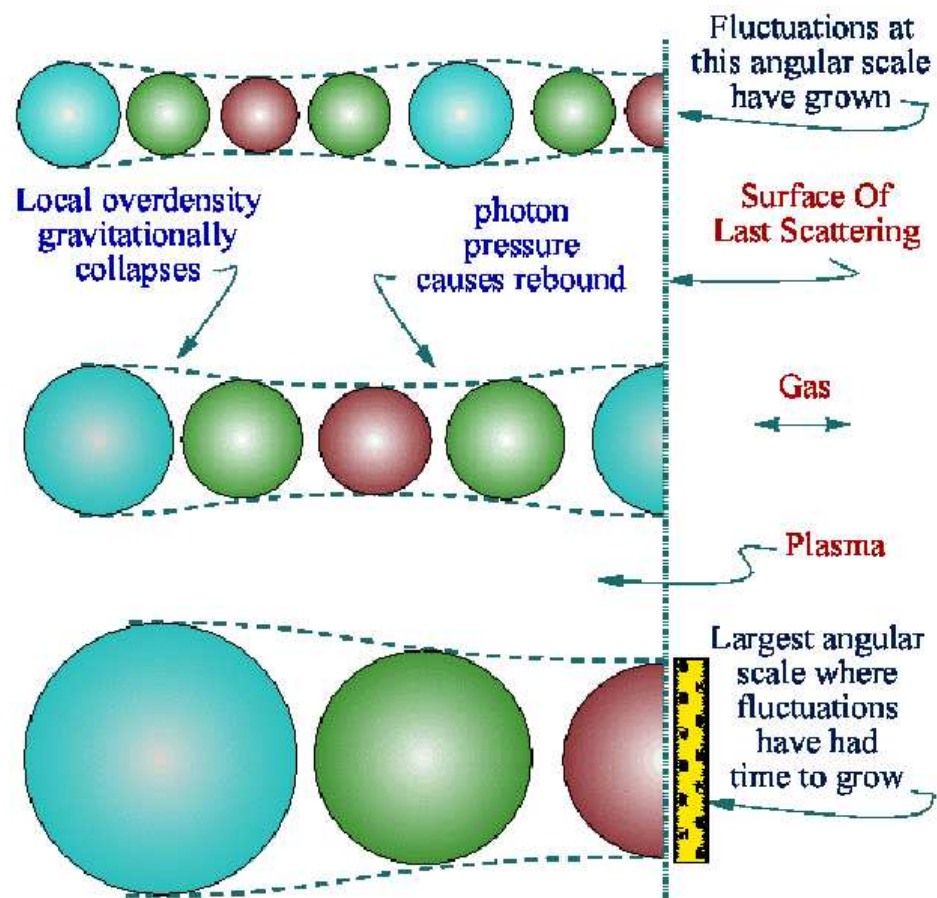
## Fluktuacje

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

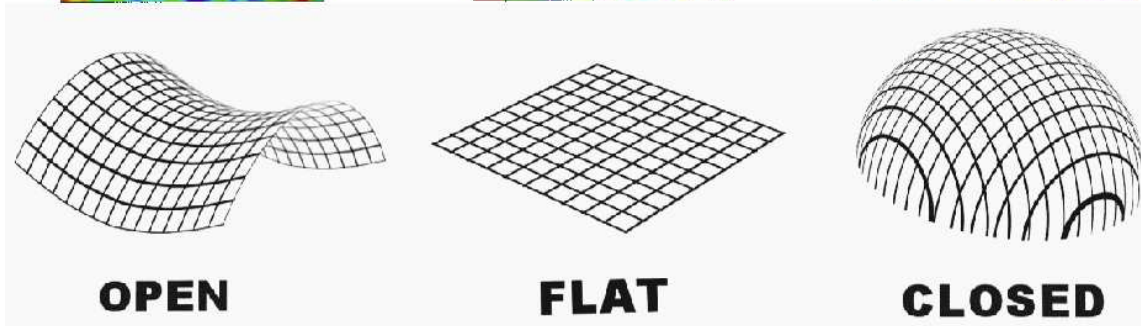
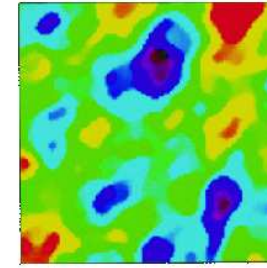
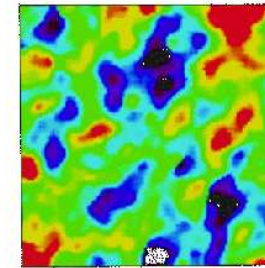
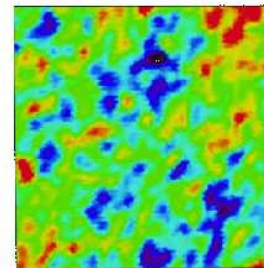
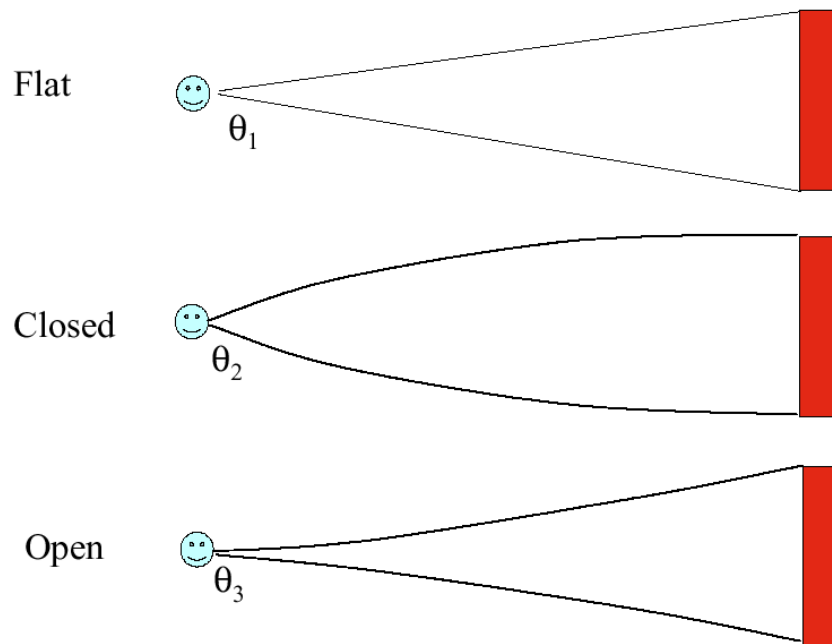


# Promieniowanie tła

## Fluktuacje

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

Wyniki symulacji:

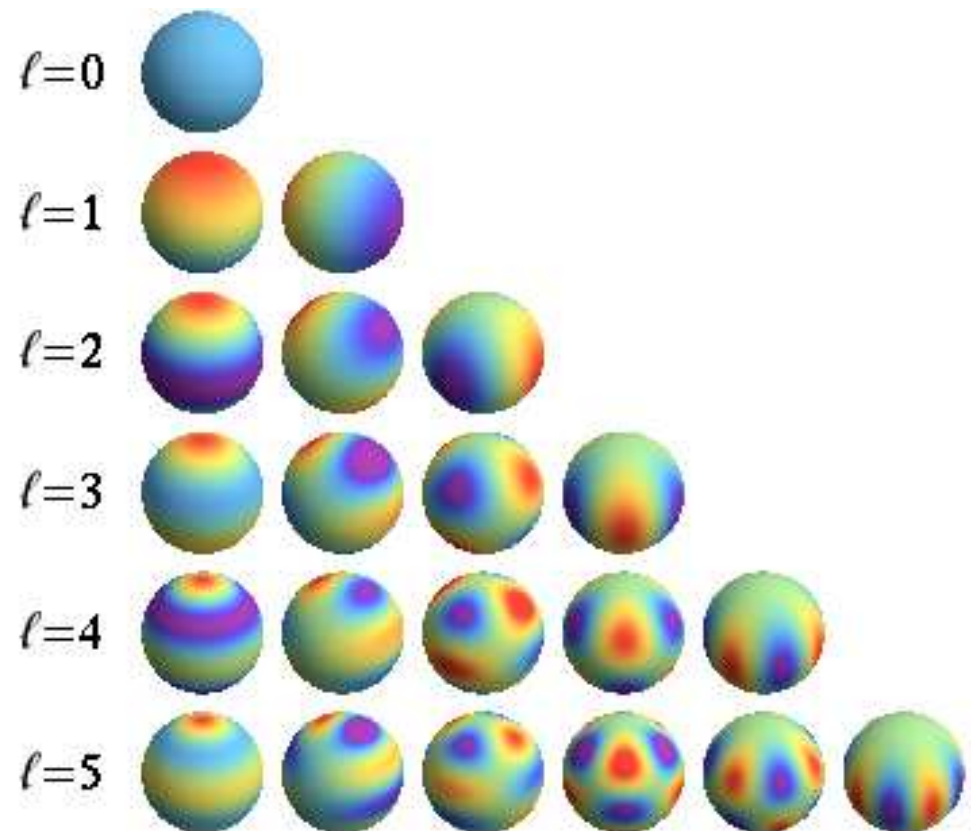


# Promieniowanie tła

## 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

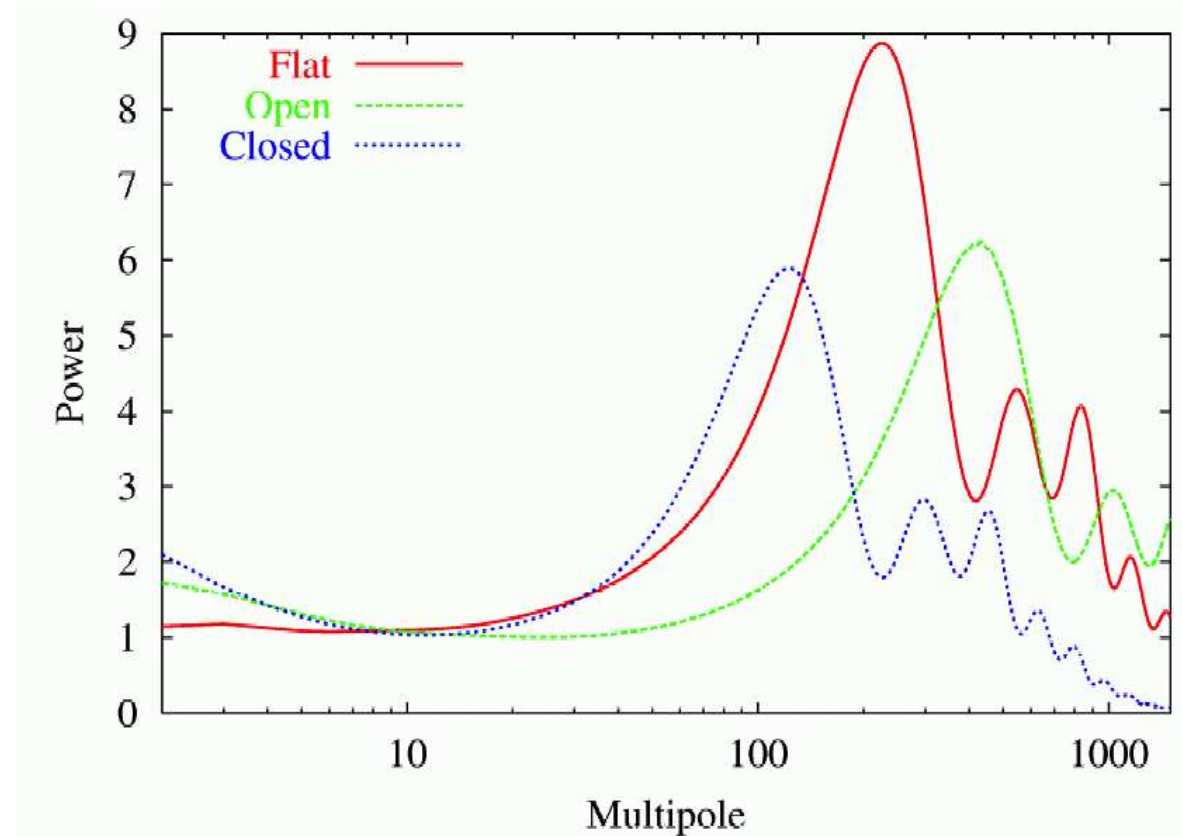
## Fluktuacje

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  $l \sim 200$

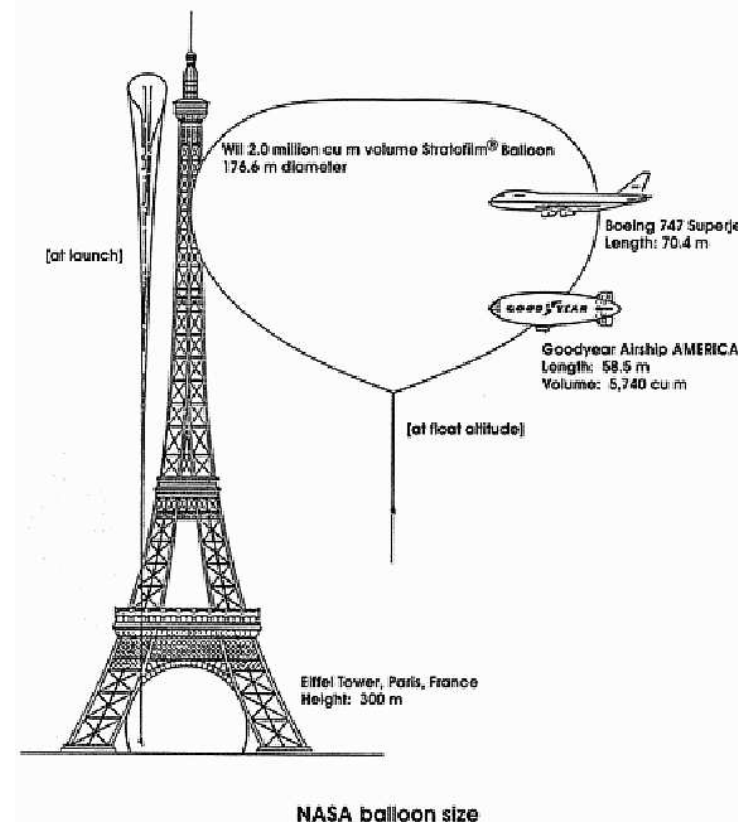
Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów:



# 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.

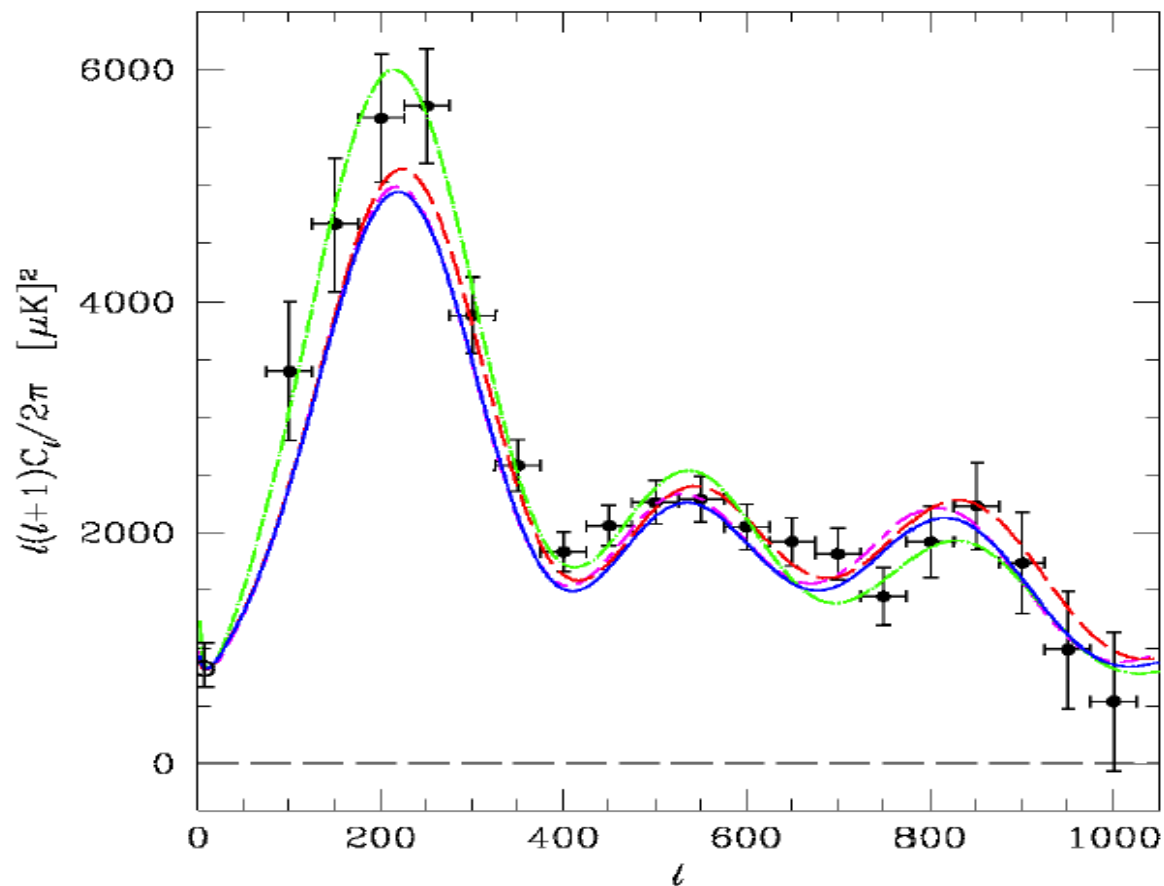


Aby zapewnić optymalne warunki pracy eksperyment wykonano na biegunie południowym, lot trwał 10 dni (1998/99).

# 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

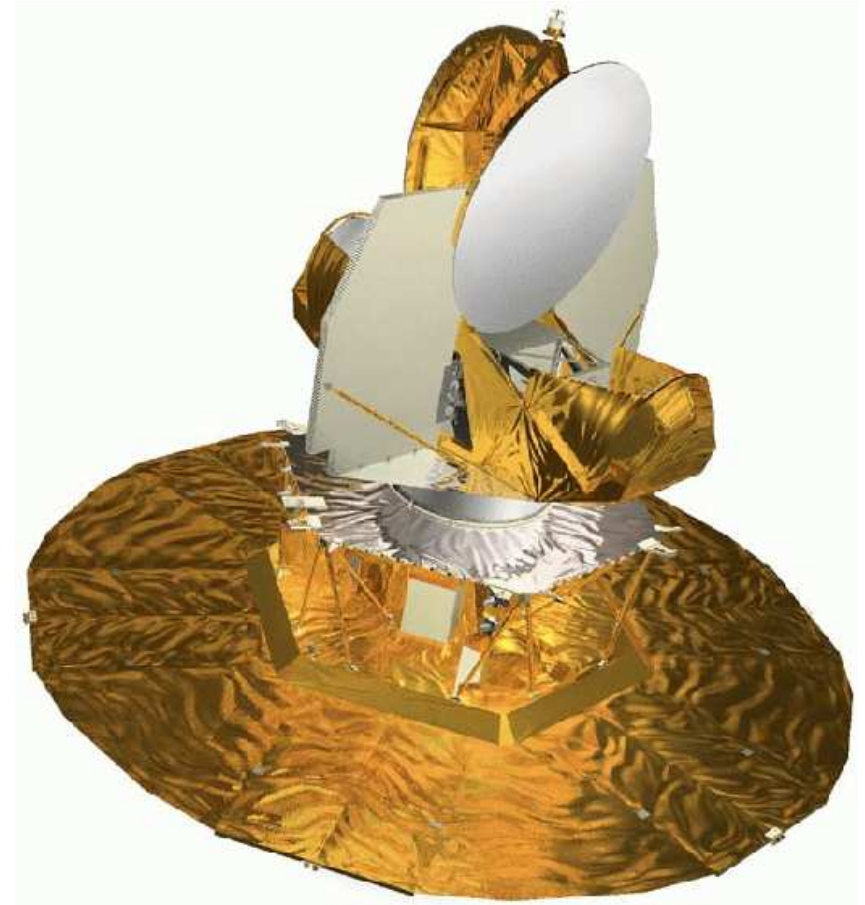
w 5 przedziałach częstości:

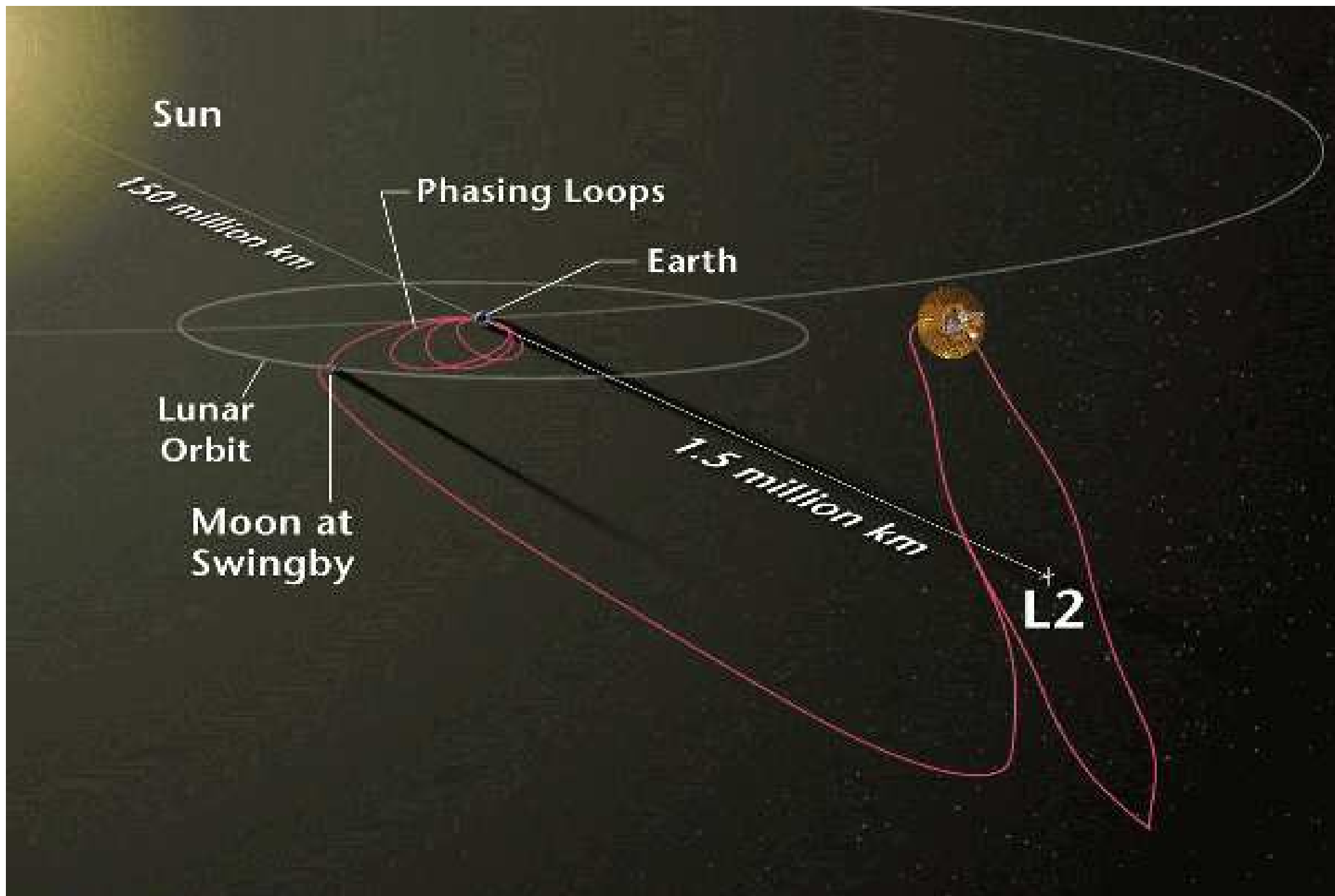
od 23 GHz (13 mm) do 94 GHz (3.2 mm).

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





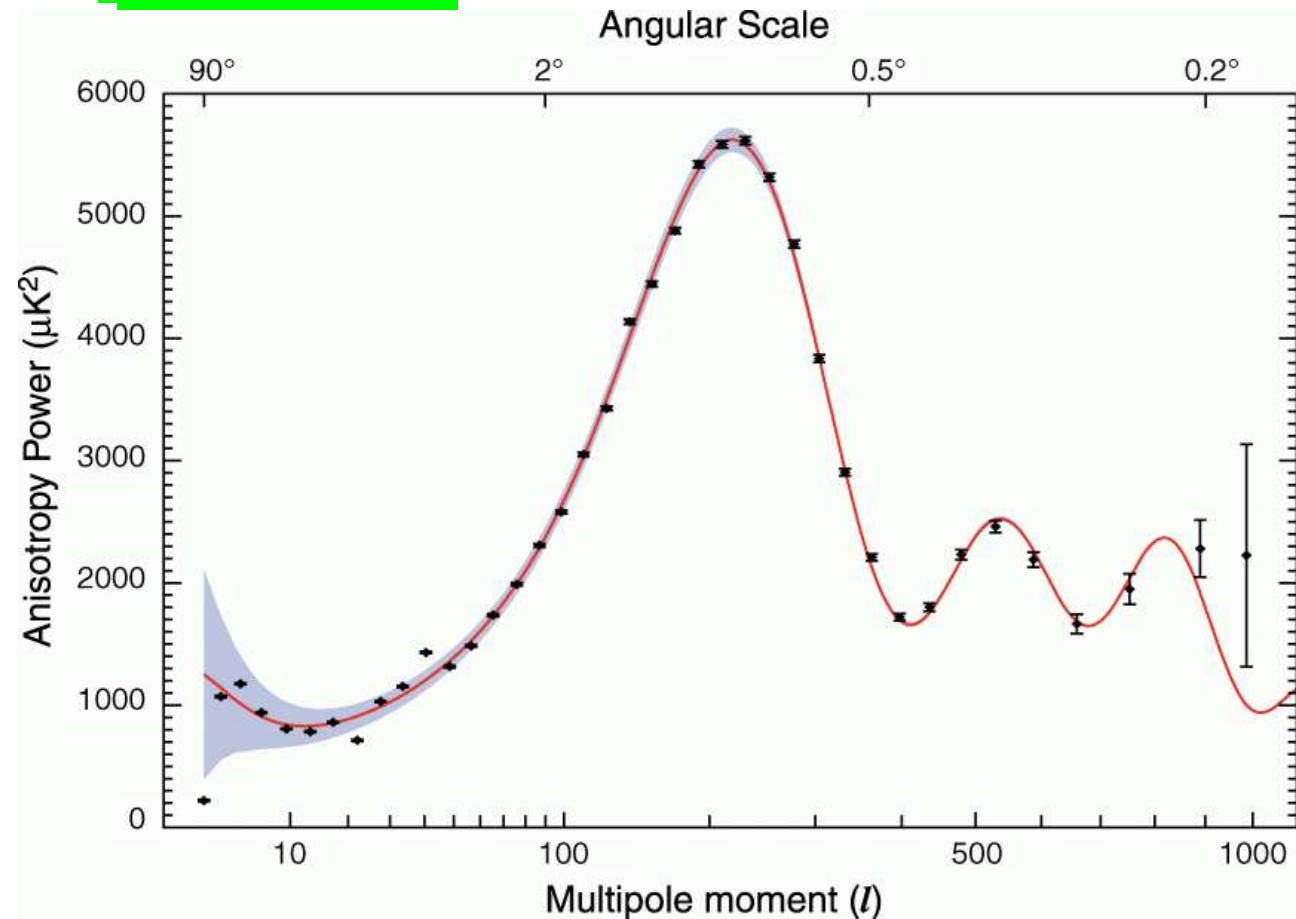


# WMAP

## Wyniki (2006)

Bardzo precyzyjny pomiar korelacji kątowych w promieniowaniu tła.

Możliwe jednoczesne dopasowanie wielu parametrów kosmologicznych



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

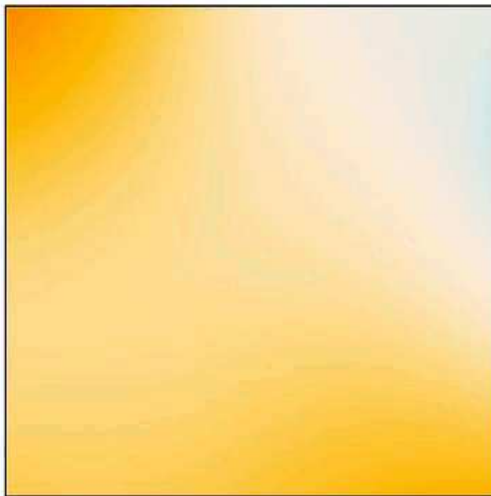
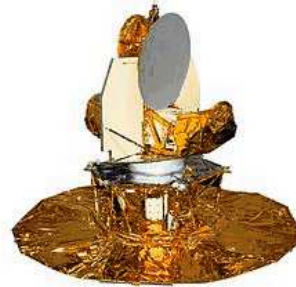
$\Rightarrow$  gęstość całkowita:  $\Omega_{tot} = 1.00 \pm 0.03$

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

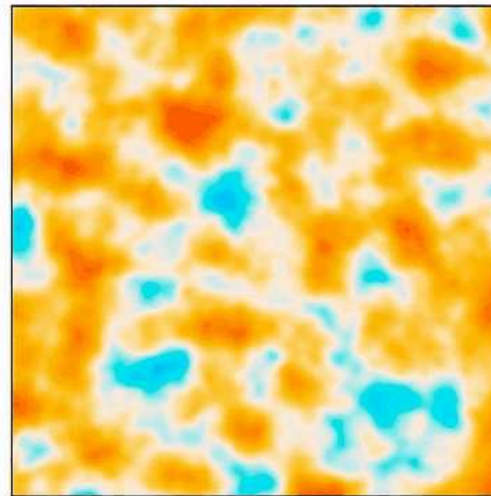
# Planck

## Satelite CMB

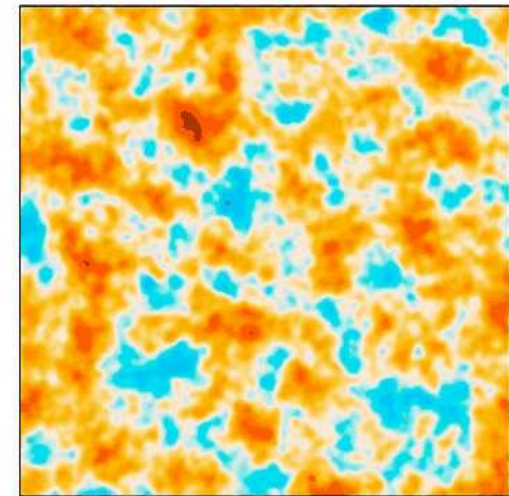
Najlepszy sposób na precyzyjne pomiary



COBE  
1989



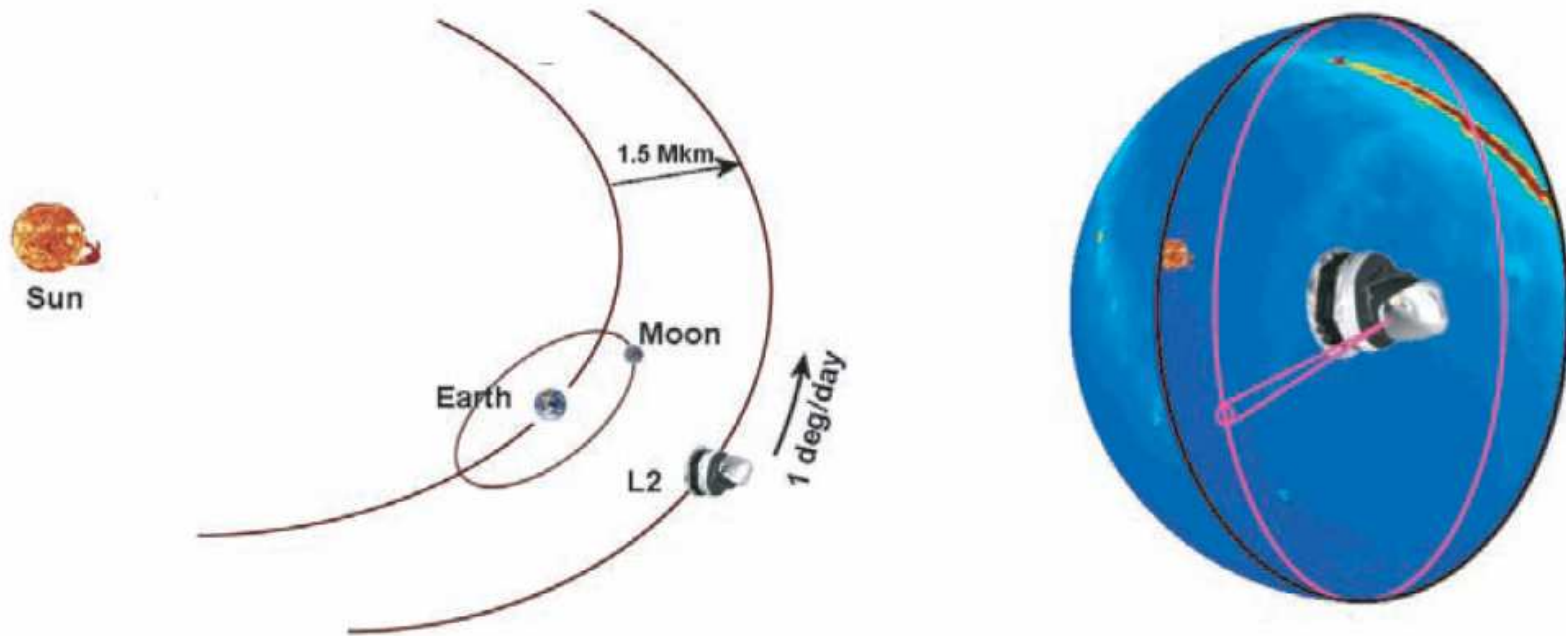
WMAP  
2001



Planck  
2009

# Planck

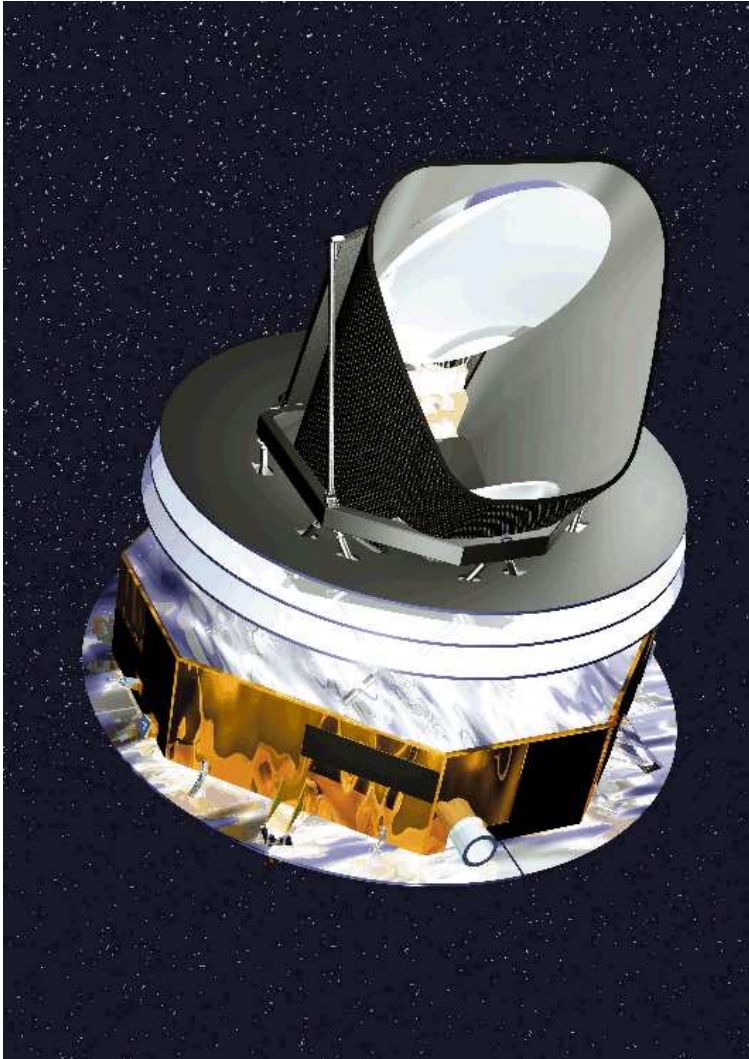
Satelita wystrzelony przez ESA w 2009, umieszczony na tzw. orbicie L2.  
Skan całego nieba w 6 miesięcy.



75 detektorów w 9 zakresach częstości.

W porównaniu do WMAP poziom szumów zmniejszony 25 razy !

# Planck



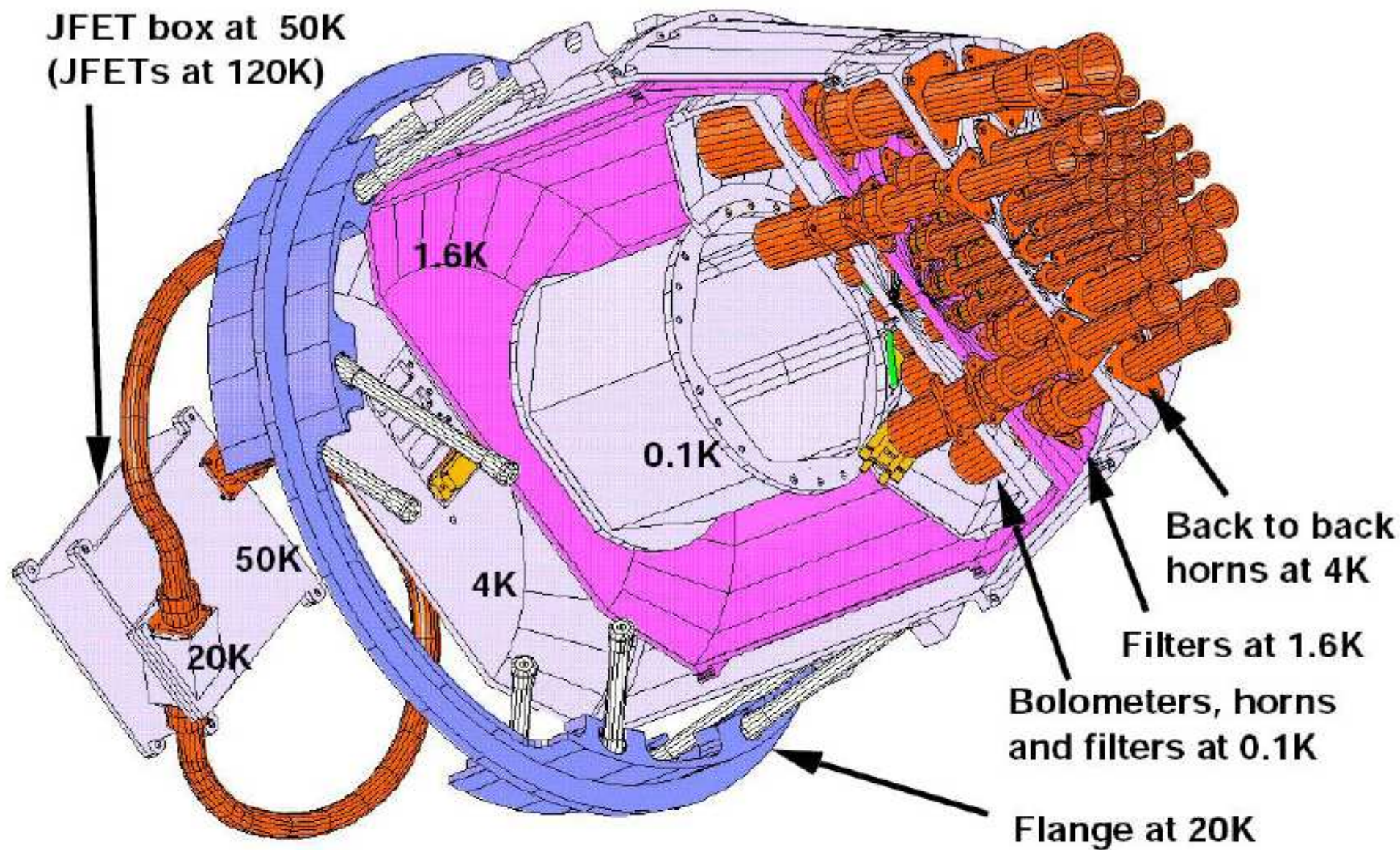
Dwa główne zestawy detektorów:

- 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



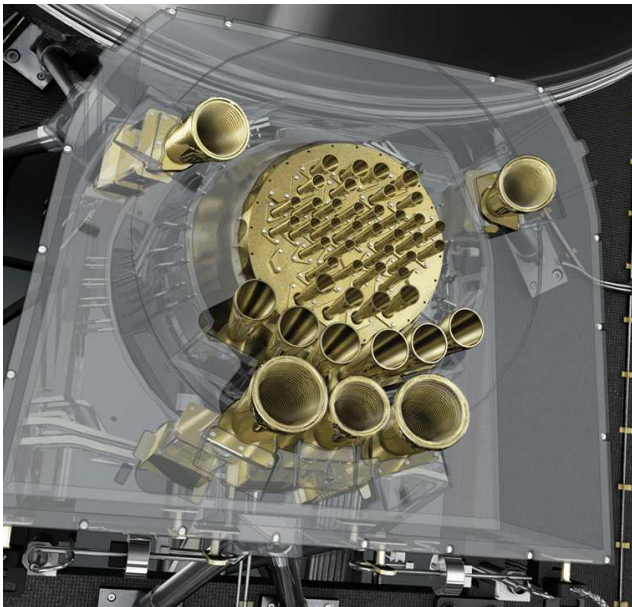
# Układ chłodzenia PLANCK

JFET box at 50K  
(JFETs at 120K)

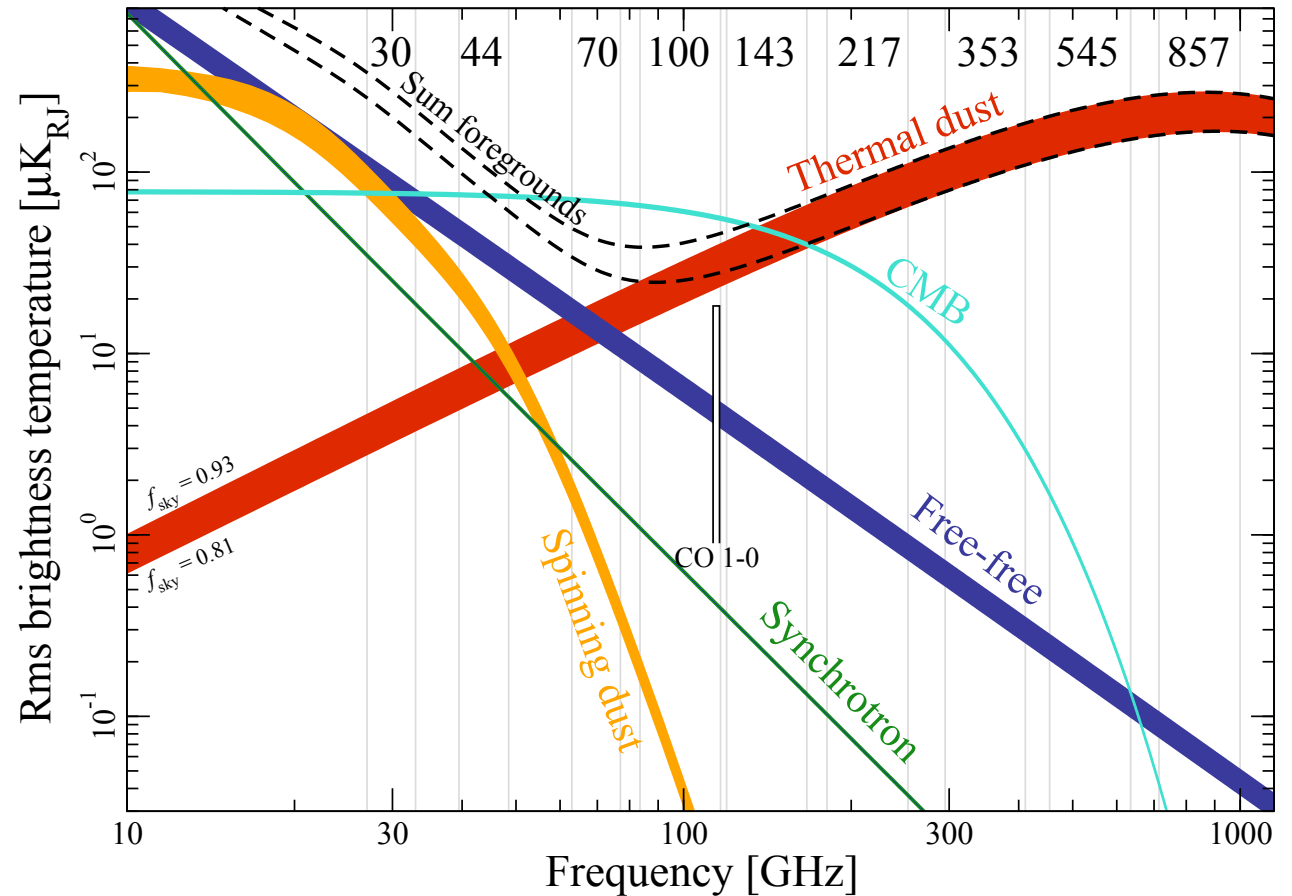


# Planck

## Detektory

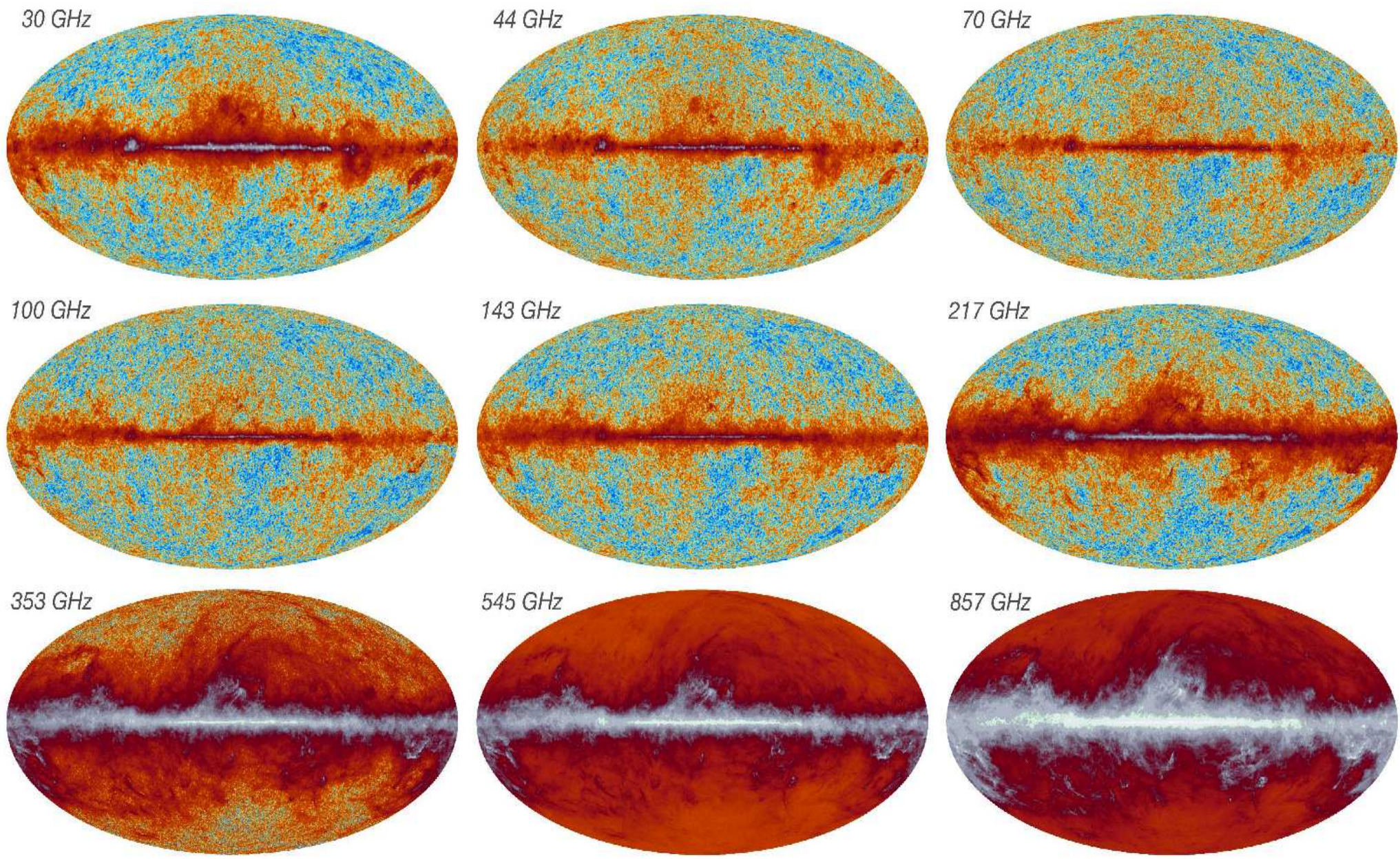


Dlaczego musimy mierzyć w tylu zakresach widma?

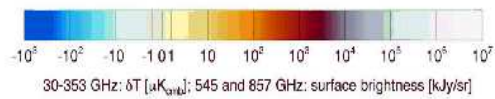


Niezbędne do precyzyjnego odjęcia tła od innych źródeł promieniowania...

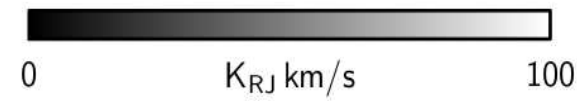
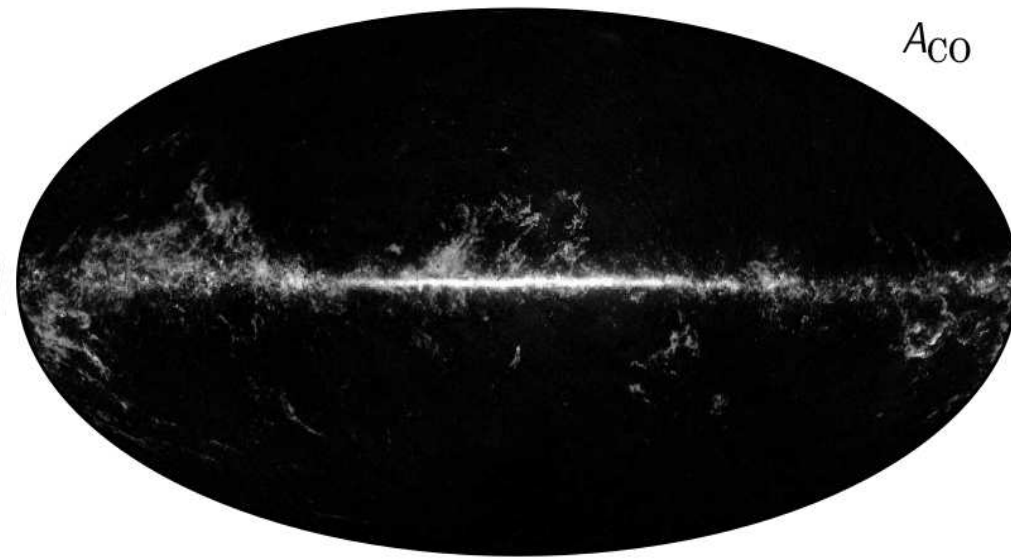
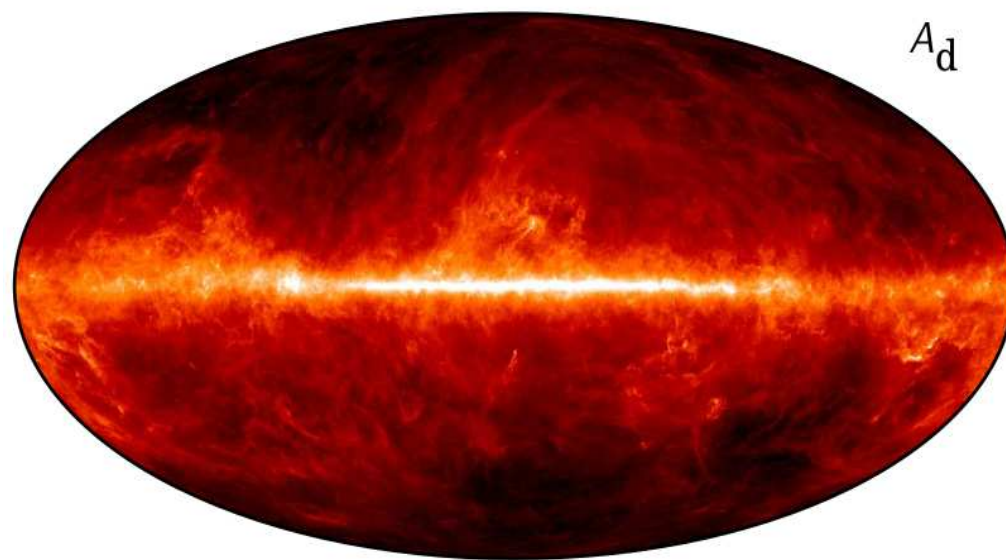
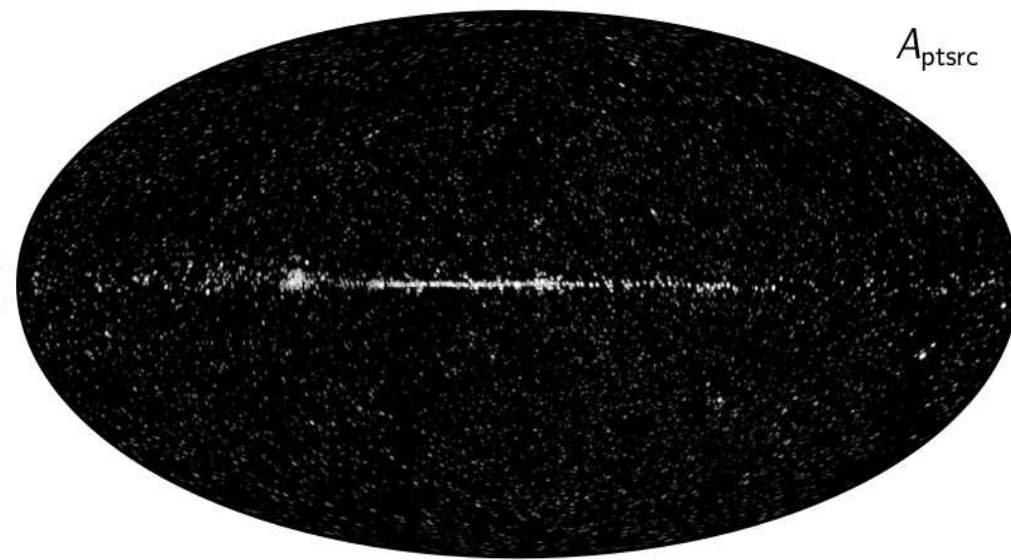
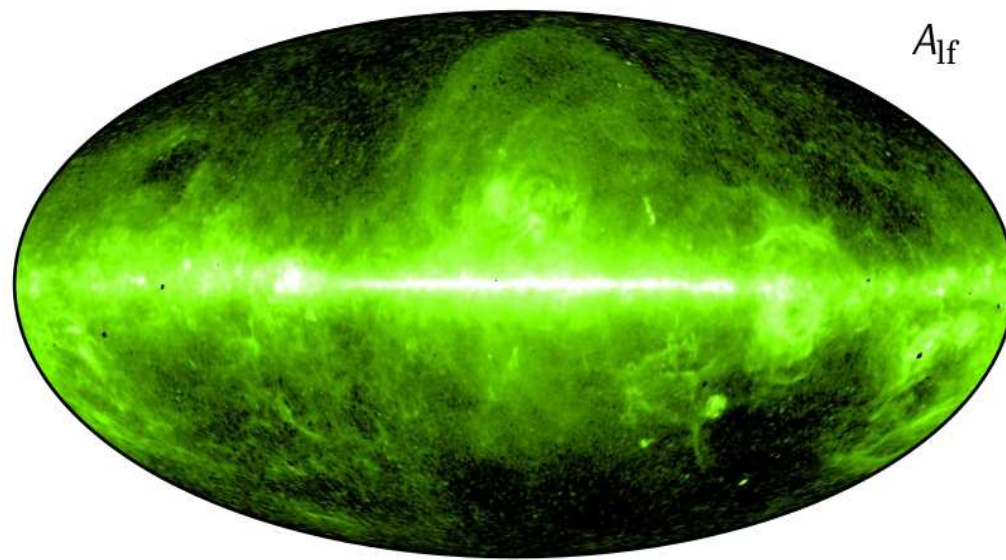




PLANCK 2018

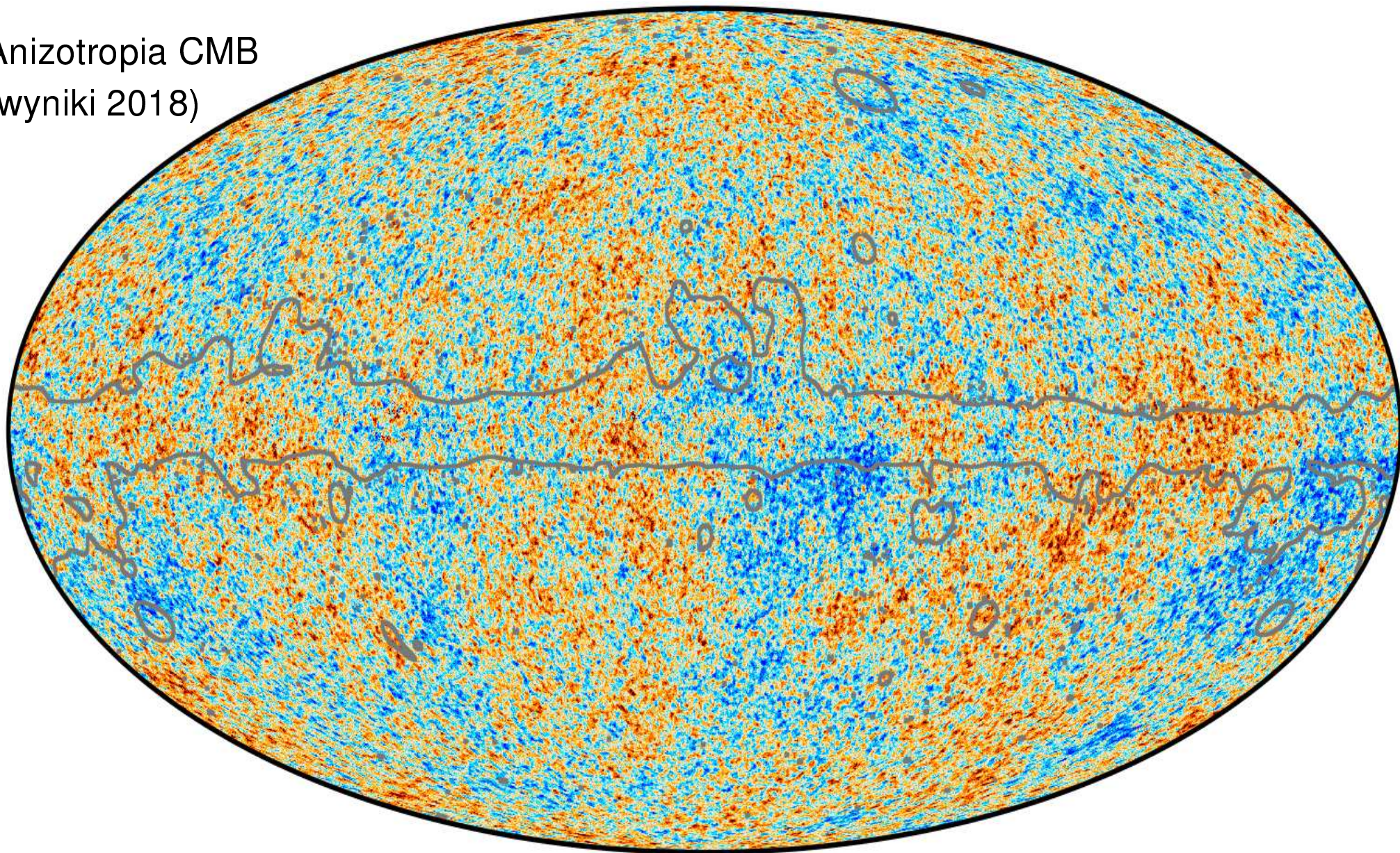








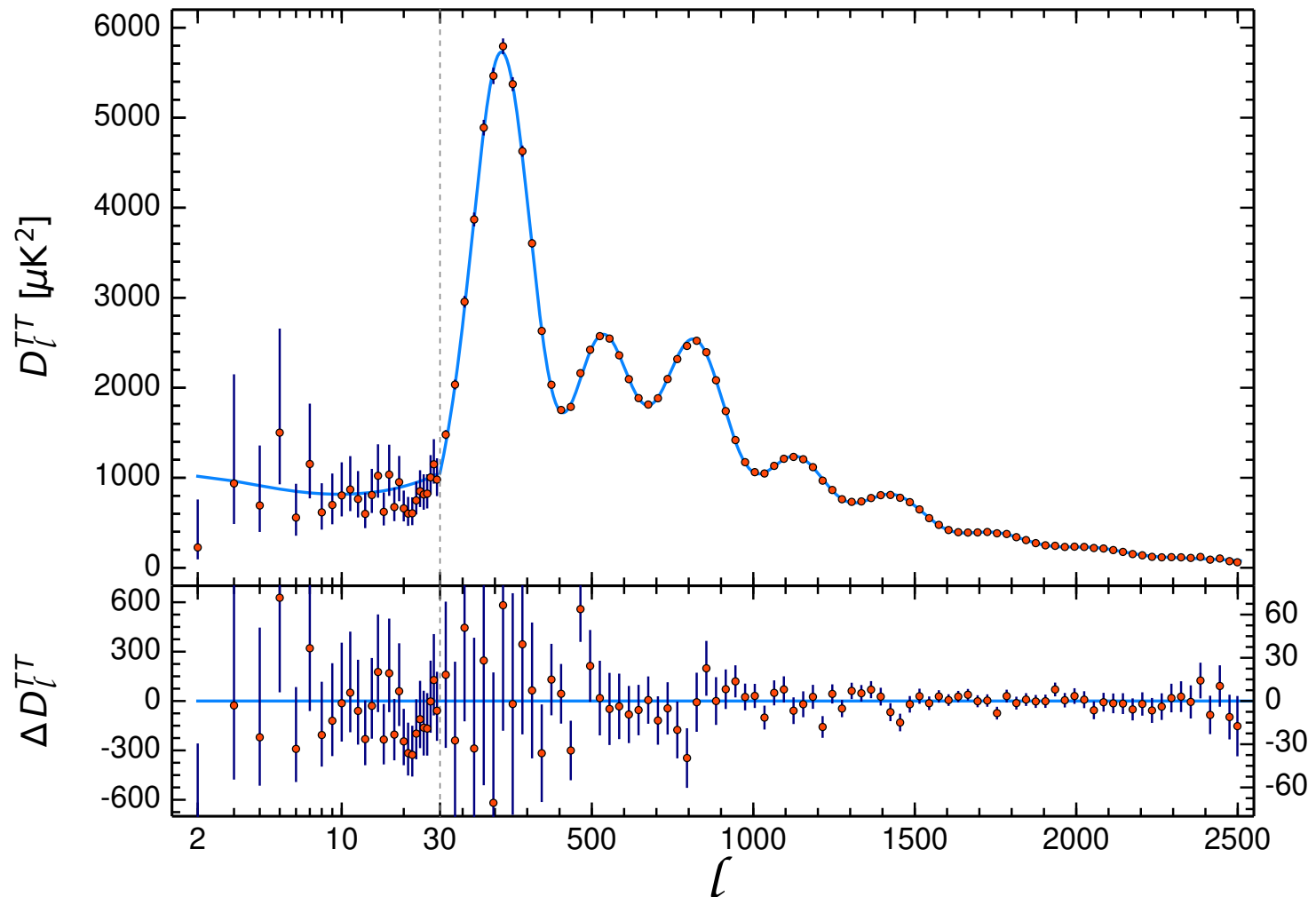
Anizotropia CMB  
(wyniki 2018)





# Planck

## Wyniki 2018



# Planck

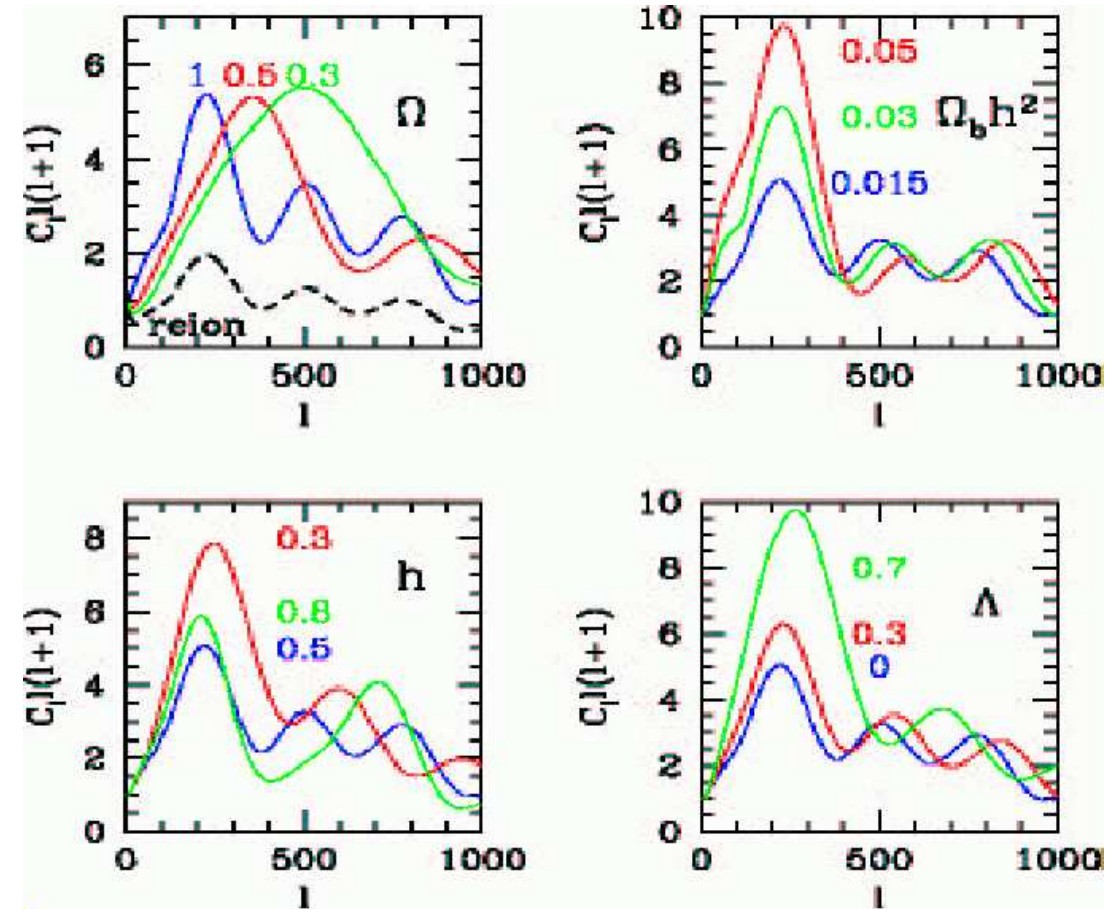
## Model kosmologiczny

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
- neutrino
- zimna ciemna materia (CDM)
- stała kosmologiczna ( $\Lambda$ )

Wyniki symulacji dla różnych wartości parametrów:



$\Rightarrow$  ewolucję Wszechświata można opisać przez sześć wolnych parametrów dopasowania

# Planck

## Wyniki 2018

Wszechświat wydaje się płaski

$$1 - \Omega_{tot} = 0.0007 \pm 0.0019$$

Całkowita gęstość materii to ok. 31% gęstości krytycznej ( $\Omega_m$ )

⇒ aby Wszechświat był płaski musimy uwzględnić stałą kosmologiczną  $\Lambda$  (ciemna energia?)

Przy czym tylko niecałe 5% pochodzi od materii barionowej ( $\Omega_b$ )

⇒ reszta materii musi występować w nieznanej nam dotychczas formie:

ciemna materia

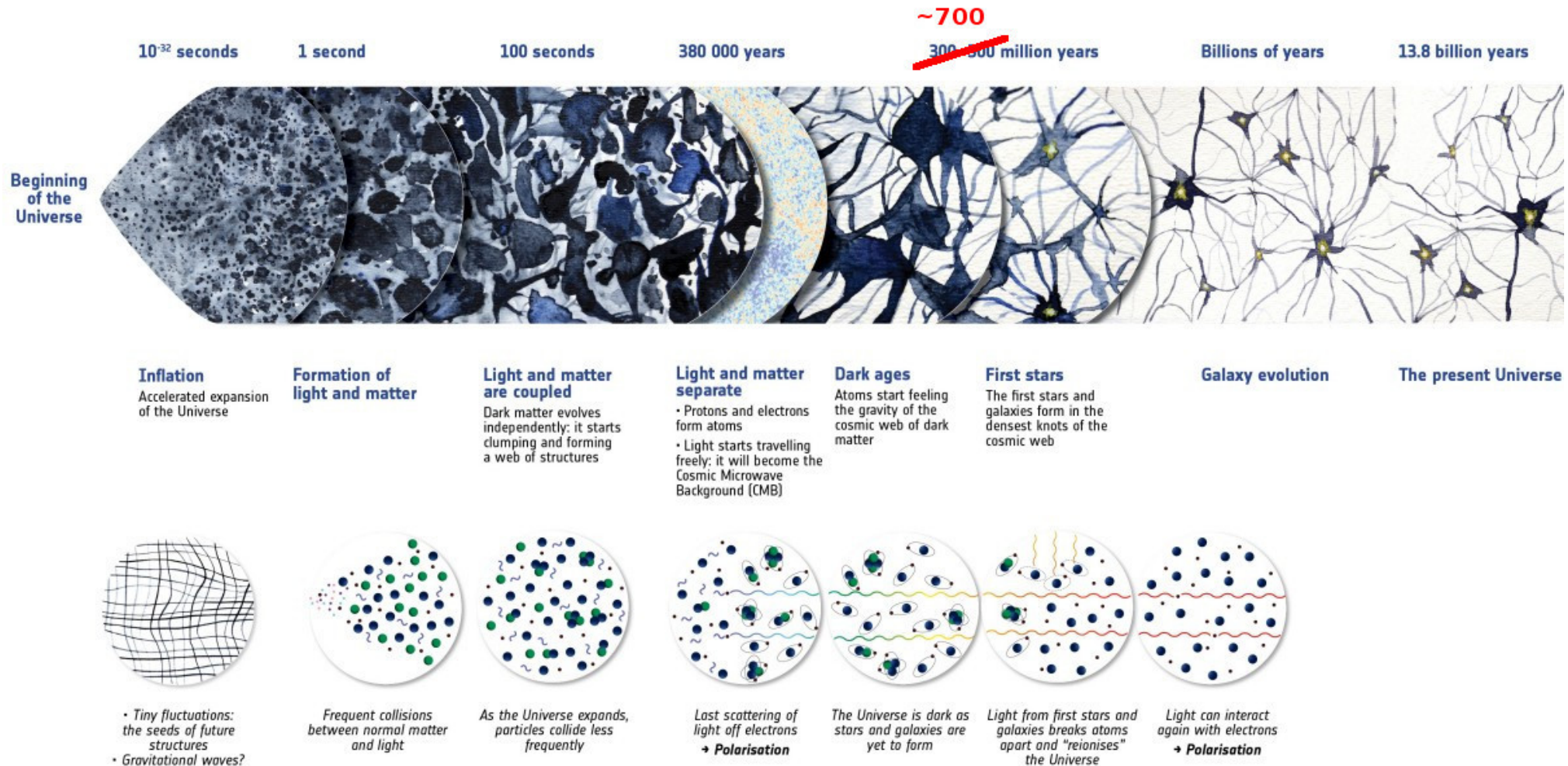
Parameter	Planck alone	Planck + BAO
$\Omega_b h^2$ . . . . .	$0.02237 \pm 0.00015$	$0.02242 \pm 0.00014$
$\Omega_c h^2$ . . . . .	$0.1200 \pm 0.0012$	$0.11933 \pm 0.00091$
$100\theta_{MC}$ . . . . .	$1.04092 \pm 0.00031$	$1.04101 \pm 0.00029$
$\tau$ . . . . .	$0.0544 \pm 0.0073$	$0.0561 \pm 0.0071$
$\ln(10^{10} A_s)$ . . . . .	$3.044 \pm 0.014$	$3.047 \pm 0.014$
$n_s$ . . . . .	$0.9649 \pm 0.0042$	$0.9665 \pm 0.0038$
$H_0$ . . . . .	$67.36 \pm 0.54$	$67.66 \pm 0.42$
$\Omega_\Lambda$ . . . . .	$0.6847 \pm 0.0073$	$0.6889 \pm 0.0056$
$\Omega_m$ . . . . .	$0.3153 \pm 0.0073$	$0.3111 \pm 0.0056$
$\Omega_m h^2$ . . . . .	$0.1430 \pm 0.0011$	$0.14240 \pm 0.00087$
$\Omega_m h^3$ . . . . .	$0.09633 \pm 0.00030$	$0.09635 \pm 0.00030$
$\sigma_8$ . . . . .	$0.8111 \pm 0.0060$	$0.8102 \pm 0.0060$
$\sigma_8(\Omega_m/0.3)^{0.5}$ . . . . .	$0.832 \pm 0.013$	$0.825 \pm 0.011$
$z_{re}$ . . . . .	$7.67 \pm 0.73$	$7.82 \pm 0.71$
Age[Gyr] . . . . .	$13.797 \pm 0.023$	$13.787 \pm 0.020$
$r_*$ [Mpc] . . . . .	$144.43 \pm 0.26$	$144.57 \pm 0.22$
$100\theta_*$ . . . . .	$1.04110 \pm 0.00031$	$1.04119 \pm 0.00029$
$r_{drag}$ [Mpc] . . . . .	$147.09 \pm 0.26$	$147.57 \pm 0.22$
$z_{eq}$ . . . . .	$3402 \pm 26$	$3387 \pm 21$
$k_{eq}[\text{Mpc}^{-1}]$ . . . . .	$0.010384 \pm 0.000081$	$0.010339 \pm 0.000063$



# Ewolucja Wszechświata wg. Planck

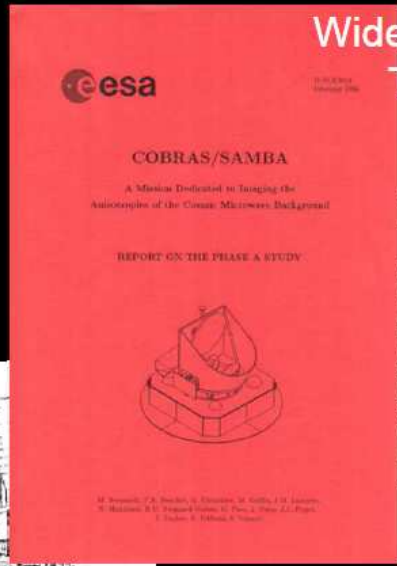
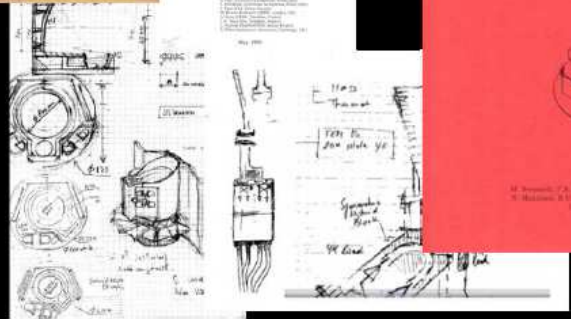
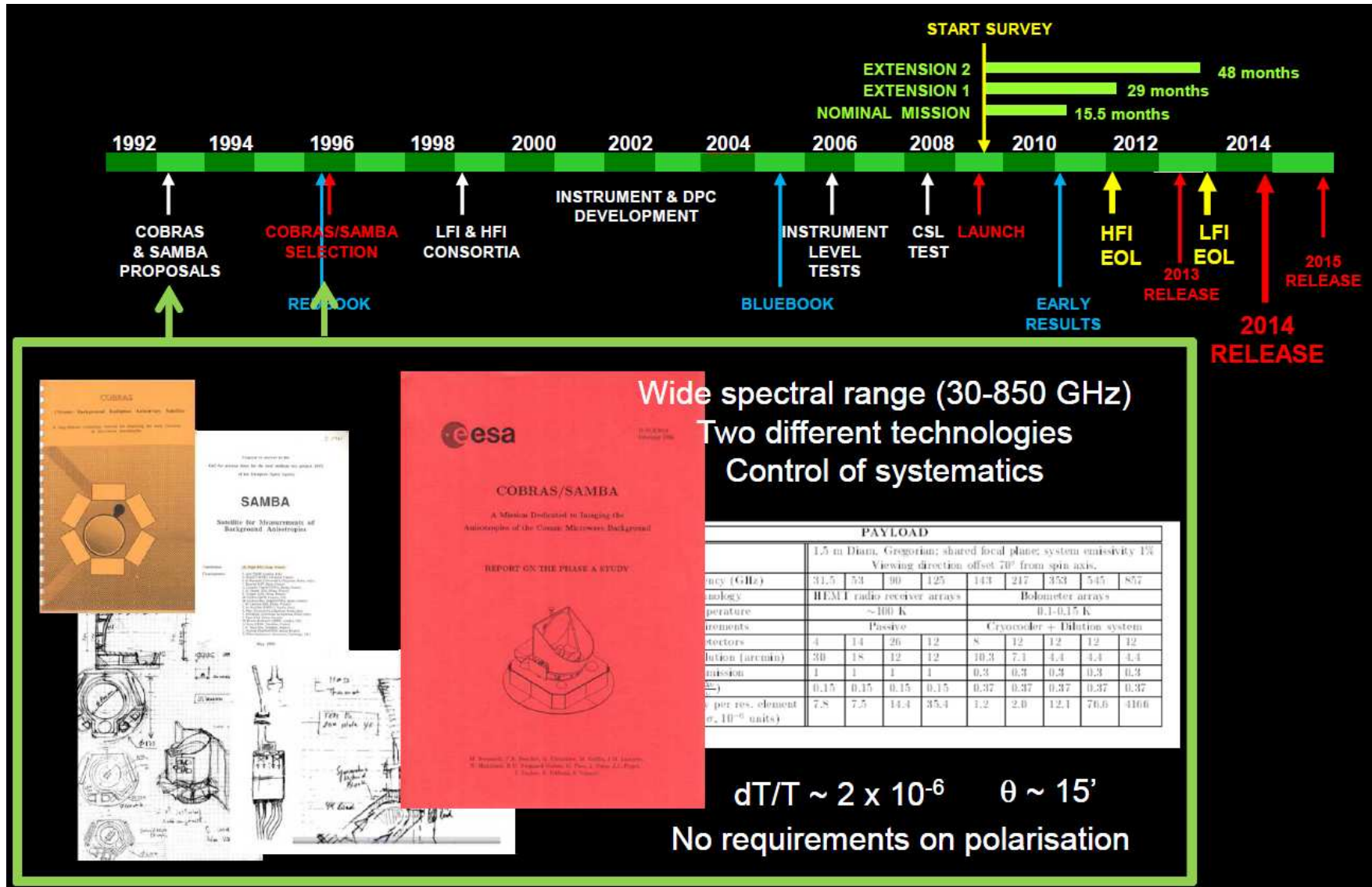


## → COSMIC HISTORY



# Planck

## Skala czasowa



Wide spectral range (30-850 GHz)  
Two different technologies  
Control of systematics

PAYLOAD									
1.5 m Diam. Gregorian; shared focal plane; system emissivity 1%									
Viewing direction offset 70° from spin axis.									
Frequency (GHz)	31.5	53	90	125	143	217	353	545	857
Technology	HEMT radio receiver arrays				Bolometer arrays				
Temperature	~100 K				0.1-0.15 K				
Refrigerants	Passive				Cryocooler + Dilution system				
Detectors	4	14	26	12	8	12	12	12	12
Resolution (arcmin)	30	18	12	12	10.3	7.1	4.4	4.4	4.4
Mission	1	1	1	1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
SEV	0.15	0.15	0.15	0.15	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
SEV per res. element	7.8	7.5	14.4	35.4	1.2	2.0	12.1	76.6	4166

$dT/T \sim 2 \times 10^{-6}$      $\theta \sim 15'$   
No requirements on polarisation