

# Wszechświat cząstek elementarnych dla humanistów

## *Wykład 14: Ciemna Strona Wszechświata*

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

# Ciemna Strona Wszechświata

- Gromada Pocisk  
Jak jeszcze możemy zobaczyć ciemną materię
- Mikrofalowe promieniowanie tła  
Zdjęcie narodzin Wszechświata
- Ciemna energia  
W jakim Wszechświecie żyjemy?
- Fale grawitacyjne
- Podsumowanie

# Ciemna materia

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od **gęstości materii**.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

$$\Omega \equiv \rho / \rho_c$$

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej  
 $\Rightarrow$  materia “światlista”

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

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

$$\Omega_b \sim 0.04$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych  
 $\Rightarrow$  materia “grawitacyjna” (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow \text{Ciemna materia !}$$

# Ciemna materia

Wiemy że ciemna materia:

- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok.  $1/4$  gęstości krytycznej ( $5 \times$  materia barionowa)

Nie wiemy:

- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

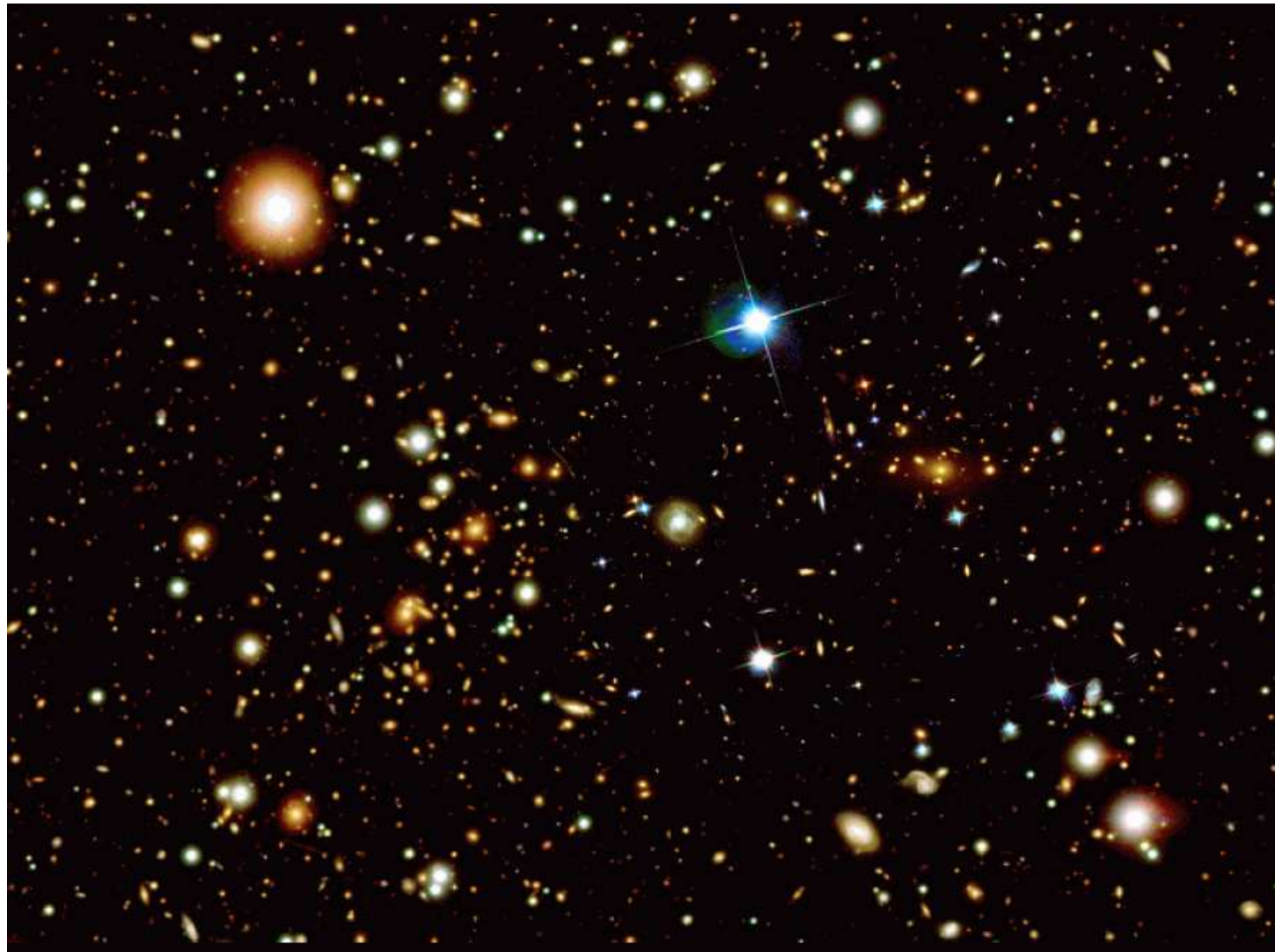
Wiele teorii “nowej fizyki” przewiduje istnienie tego typu cząstek.

Najczęściej wymienianym kandydatem jest LSP - najlżejsza cząstka supersymetryczna. Mamy nadzieję, że LHC zdoła ją znaleźć.



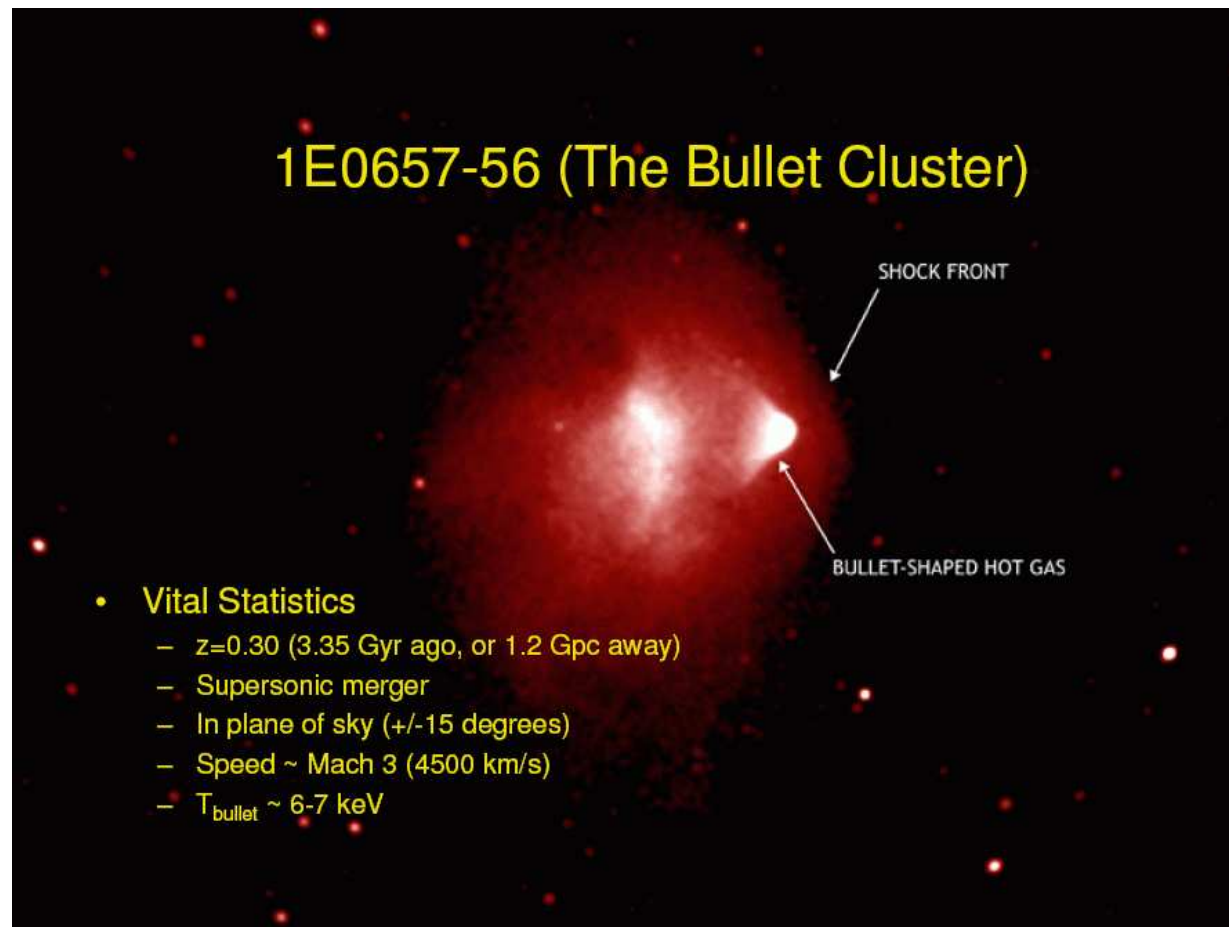
# Kosmiczna kolizja

Gromada Pocisk (Bullet Cluster) widziana przez teleskop Hubble



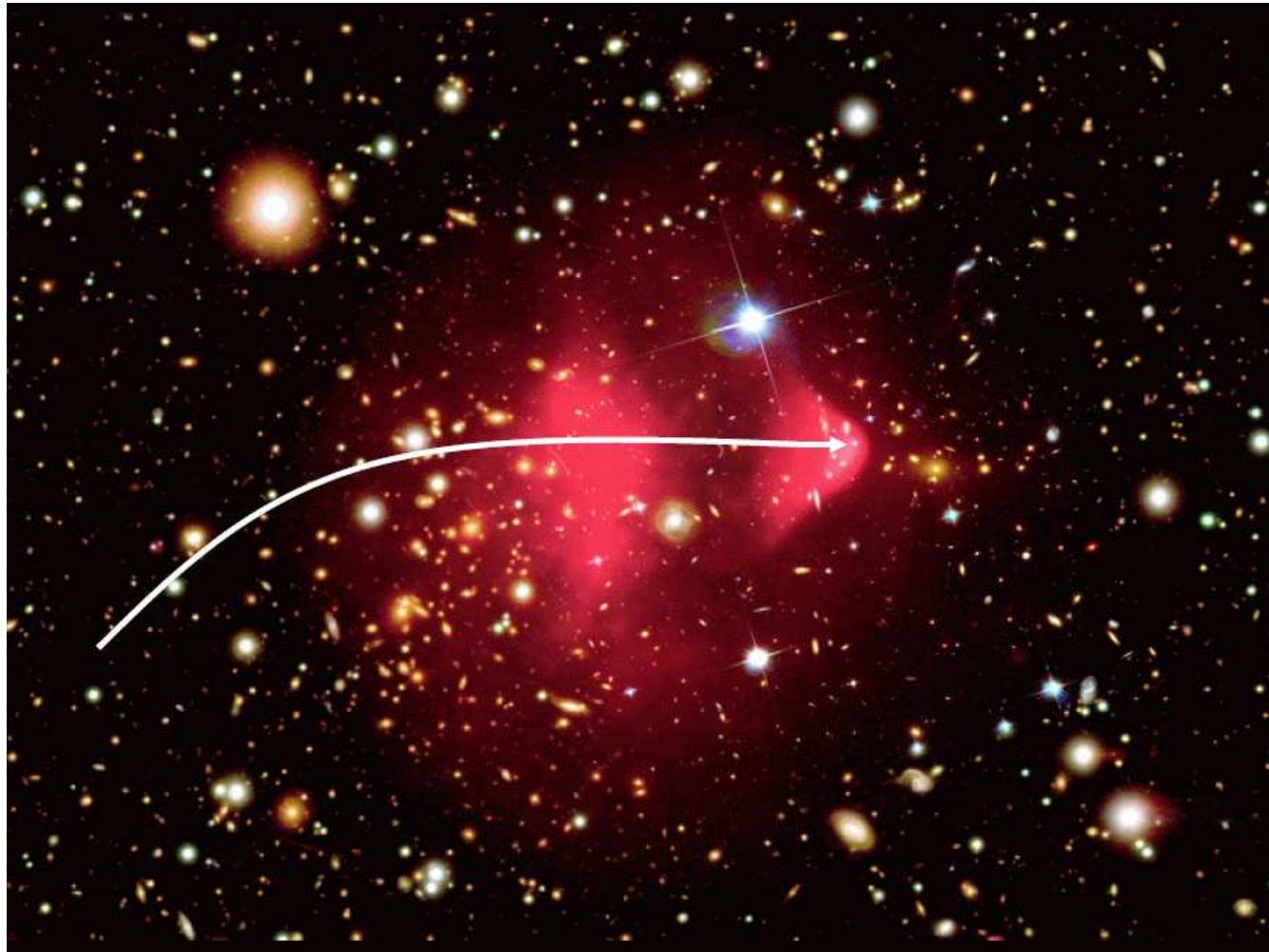
# Kosmiczna kolizja

Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. Rozkład atomów w Gromadzie Pocisk zmierzony przez teleskop satelitalny **Chandra**.



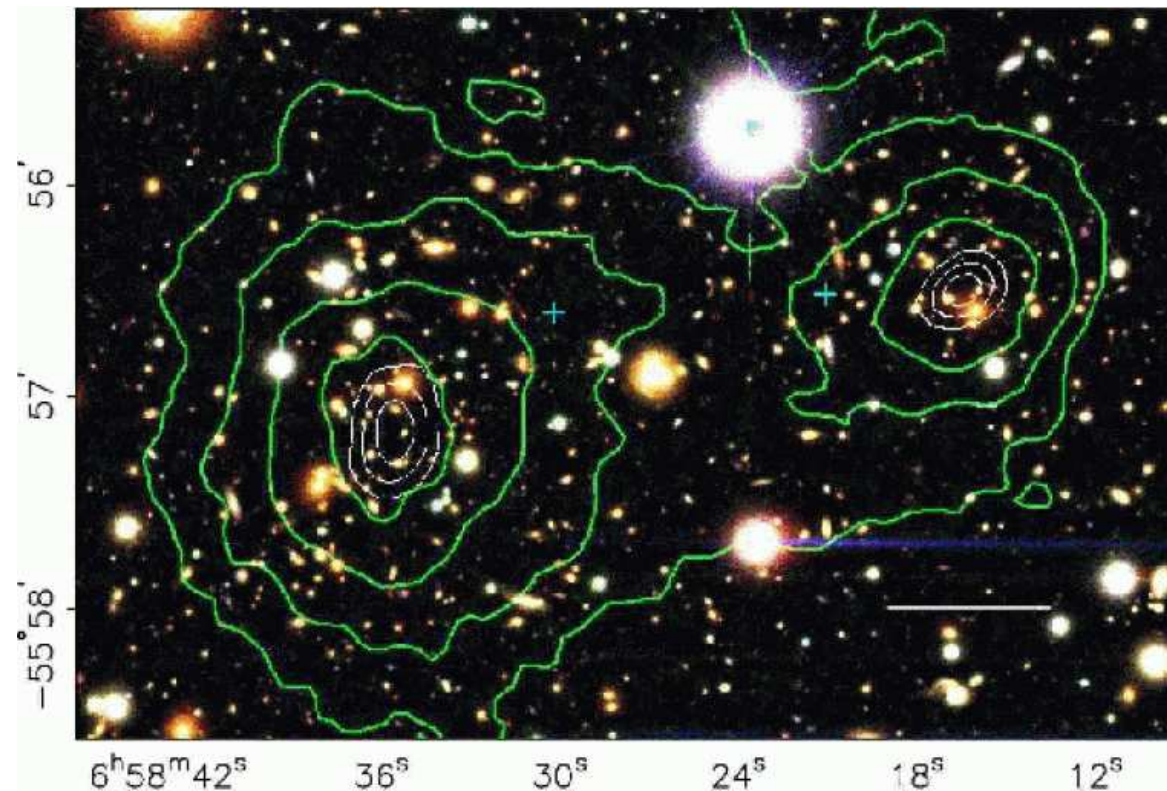
# Kosmiczna kolizja

Nakładając na siebie te dwa obrazy widzimy, że musiało dojść do “kolizji” dwóch gromad galaktyk



# Kosmiczna kolizja

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "gravitacyjnej" w widocznym układzie. Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.



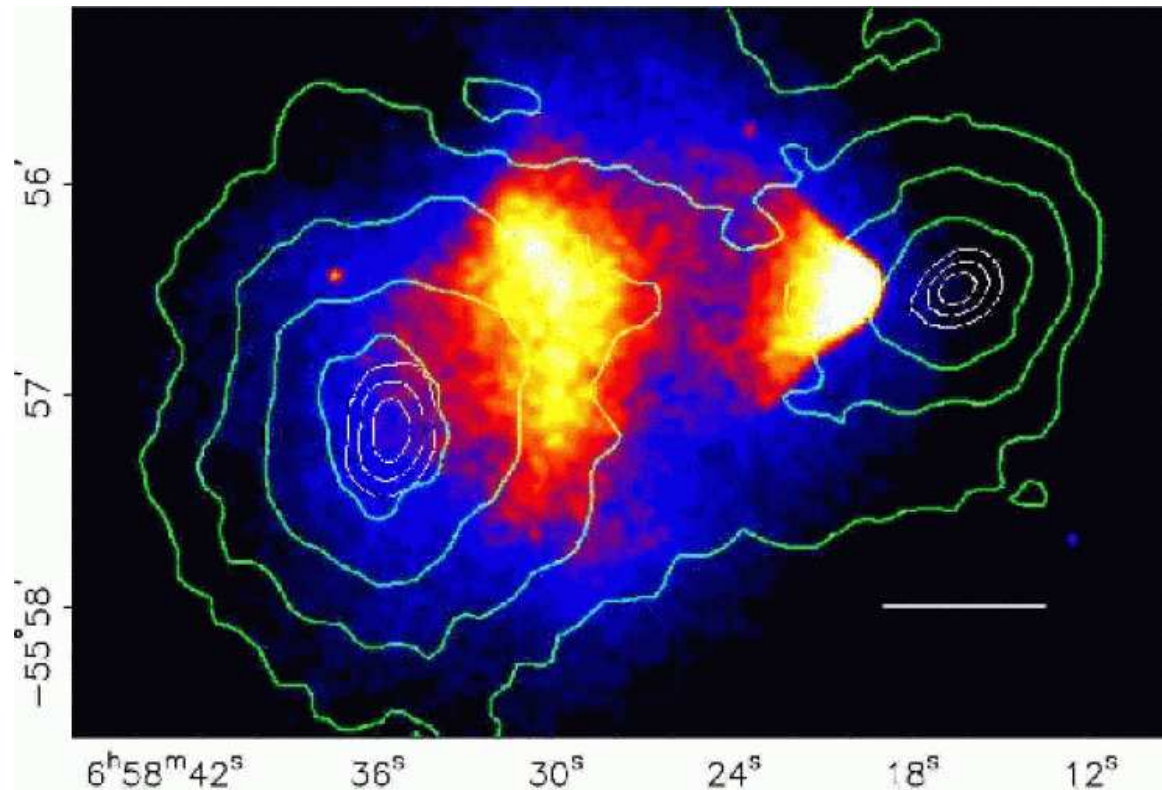


# Kosmiczna kolizja

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "grawitacyjnej" w widocznym układzie.

Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.

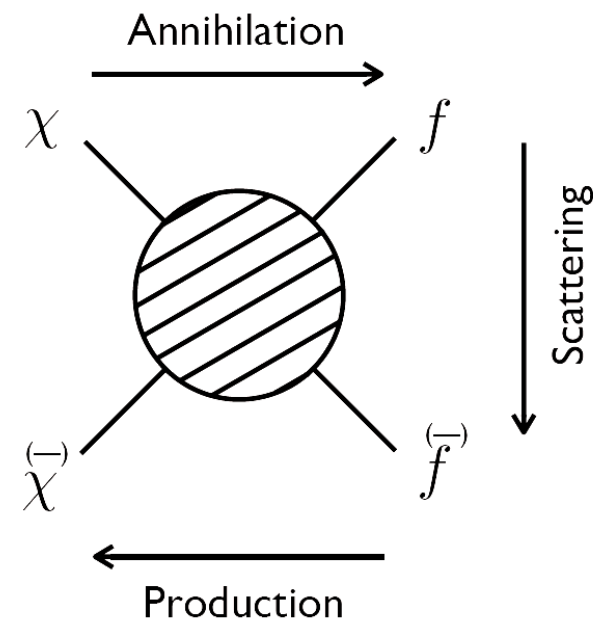
**Nie zgadza się** z rozkładem "zwykłej" materii (**atomów**).



# Poszukiwanie Ciemnej Materii

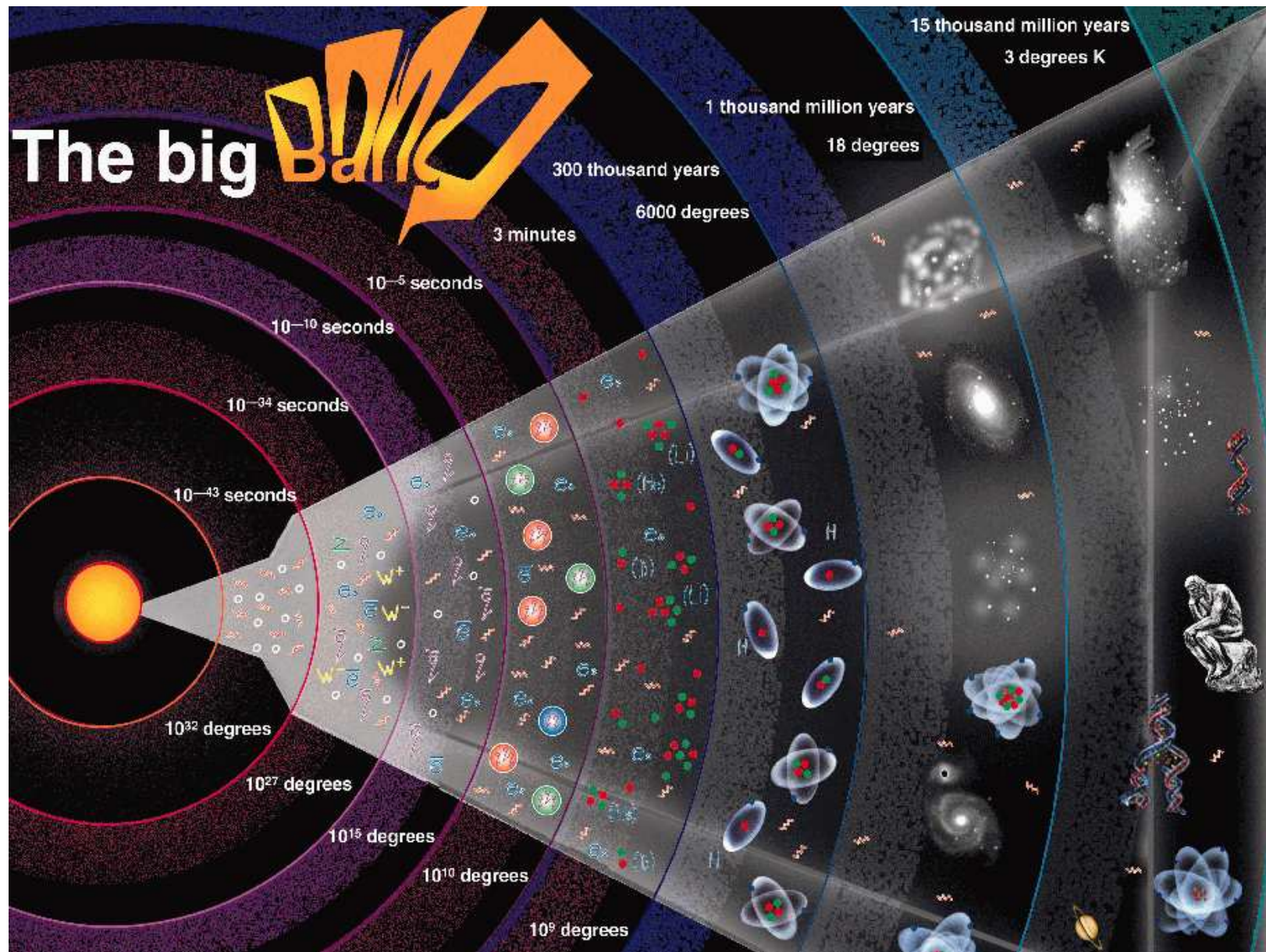
Także na Ziemi możemy poszukiwać cząstek ciemnej materii (DM).  
Robimy to na trzy sposoby:

- **produkcja**  
bezpośrednia **produkcja** cząstek ciemnej materii np. w LHC
- **detekcja bezpośrednia**  
poszukiwanie sygnałów oddziaływania (**rozpraszania**) DM w detektorach
- **detekcja pośrednia**  
poszukiwanie sygnałów oddziaływania (**anihilacji**) DM we Wszechświecie



**Ale do tej pory nie znaleźliśmy, żadnych "śladów" ich istnienia...**

# Ewolucja Wszechświata



# Promieniowanie tła

W miarę **rozszerzania** się Wszechświata malały energie zderzających się cząstek. Stopniowo zanikały cięższe cząstki (przestawały być produkowane, a rozpadały się).

Gdy Wszechświat miał kilka godzin pozostały już tylko **jądra** lekkich pierwiastków, **elektrony** i **fotony**.

Elektrony i jądra mogły tworzyć atomy, ale były one nieustannie "rozbijane" w wyniku zderzeń z fotonami.



# Promieniowanie tła

W miarę **rozszerzania** się Wszechświata malały energie zderzających się cząstek. Stopniowo zanikały cięższe cząstki (przestawały być produkowane, a rozpadały się).

Gdy Wszechświat miał kilka godzin pozostały już tylko **jądra** lekkich pierwiastków, **elektrony** i **fotony**.

Elektrony i jądra mogły tworzyć atomy, ale były one nieustannie "rozbijane" w wyniku zderzeń z fotonami.



Około **300'000 lat po Wielkim Wybuchu** fotony nie mają już dość energii, żeby jonizować atomy. Elektrony łączą się z jądrami tworząc obojętne atomy. Pozostają tylko atomy i **fotony**.

# Promieniowanie tła

W przezroczystym Wszechświecie fotony praktycznie nie oddziałują. Jedynie ich energia wciąż maleje (**długość fali rośnie**).

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)**

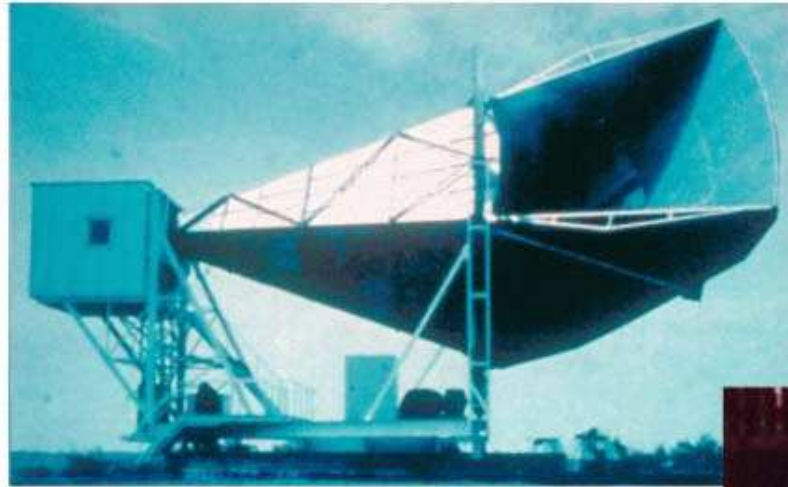
Rozkład widmowy promieniowania powinien odpowiadać rozkładowi **promieniowania ciała doskonale czarnego**.

$$T \sim 5 K$$

# Promieniowanie tła

zostało odkryte w 1965 roku przez [A.A.Penzisa](#) i [R.W.Wilsona](#).

## DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

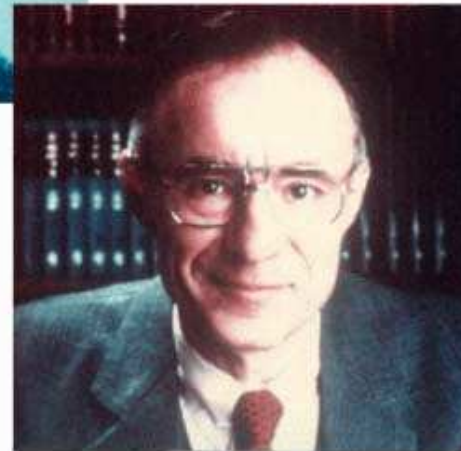


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

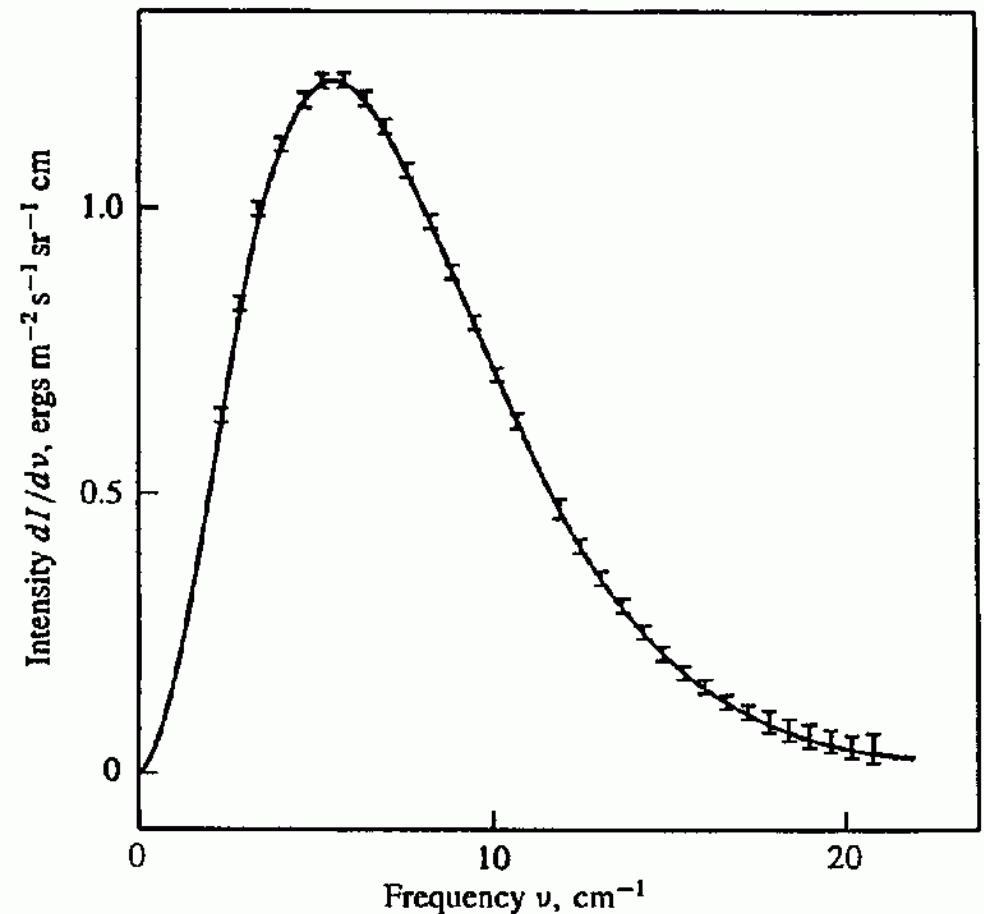
# Promieniowanie tła

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)





# Promieniowanie tła

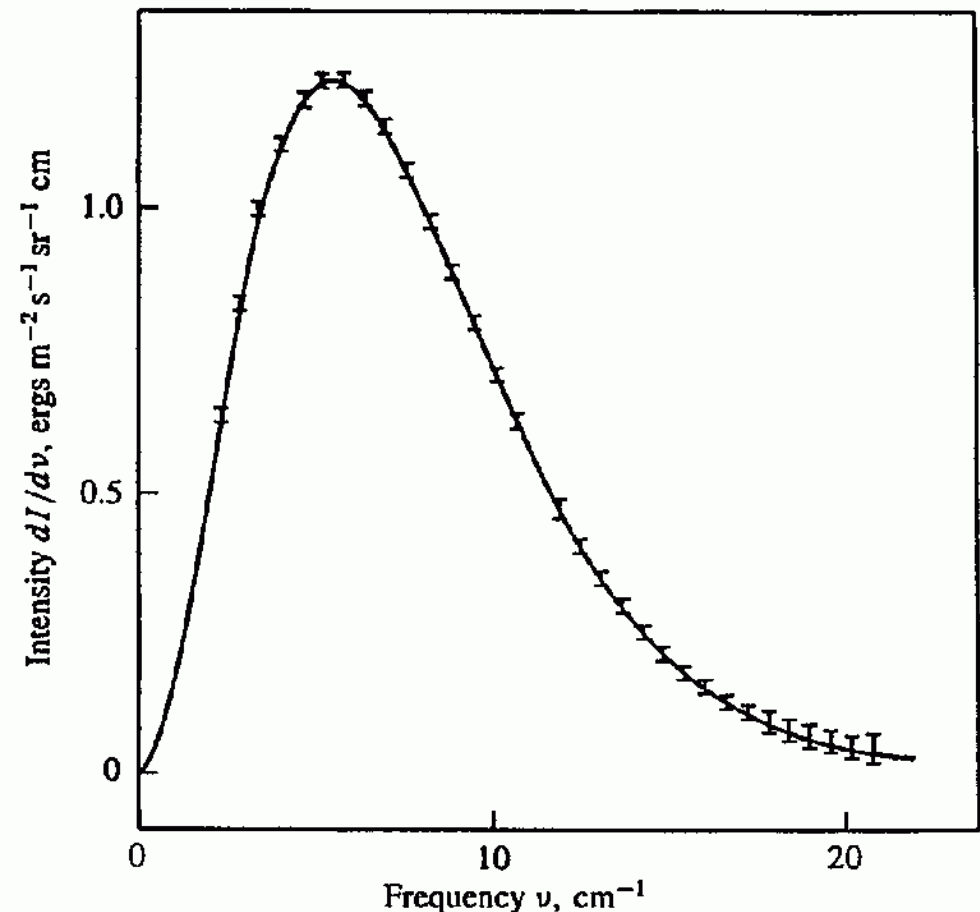
zostało odkryte w 1965 roku przez **A.A.Penzisa** i **R.W.Wilsona**.

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

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

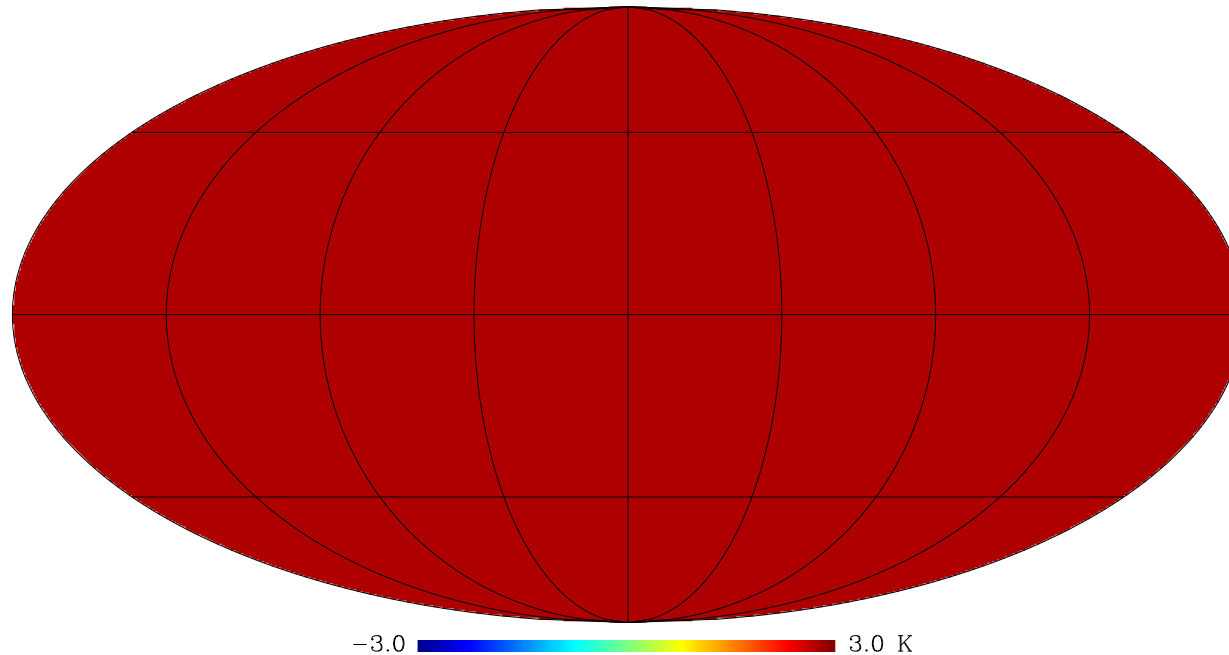
Obserwacja **CMB** była rozstrzygającym dowodem **Wielkiego Wybuchu** i "pogrzebała" model statycznego Wszechświata.

Wyniki z satelity **COBE**: (1999)



# Promieniowanie tła

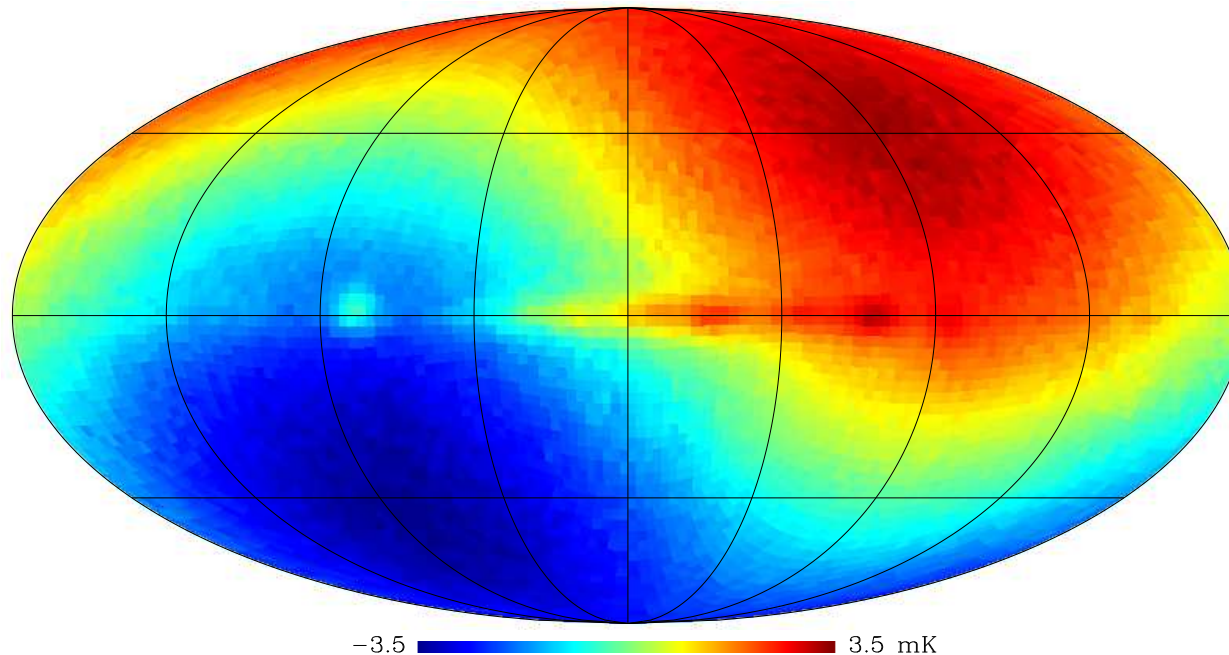
W pierwszym przybliżeniu  $(\Delta T \sim 1K)$



promieniowanie tła jest **izotropowe**, wypełnia jednolicie całe niebo.

# Promieniowanie tła

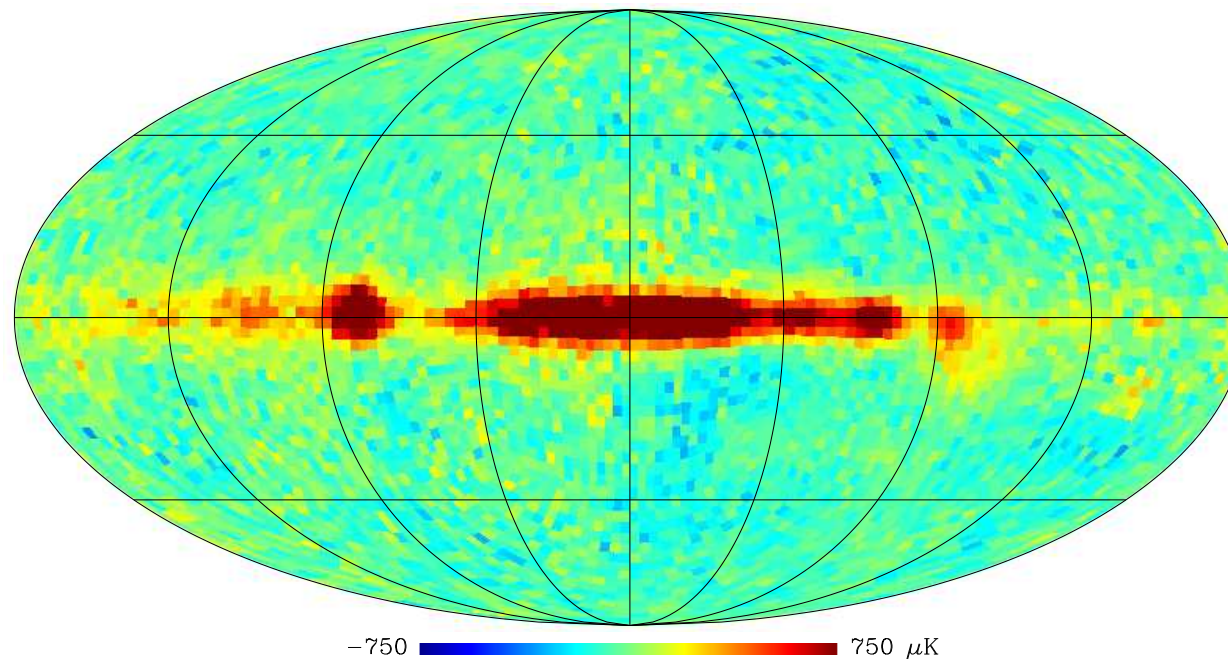
Jednak gdy przyjrzymy się bliżej  $(\Delta T \sim 1\text{mK})$



widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem 'globalnego' układu.  
"Zwykły" efekt Dopplera...

# Promieniowanie tła

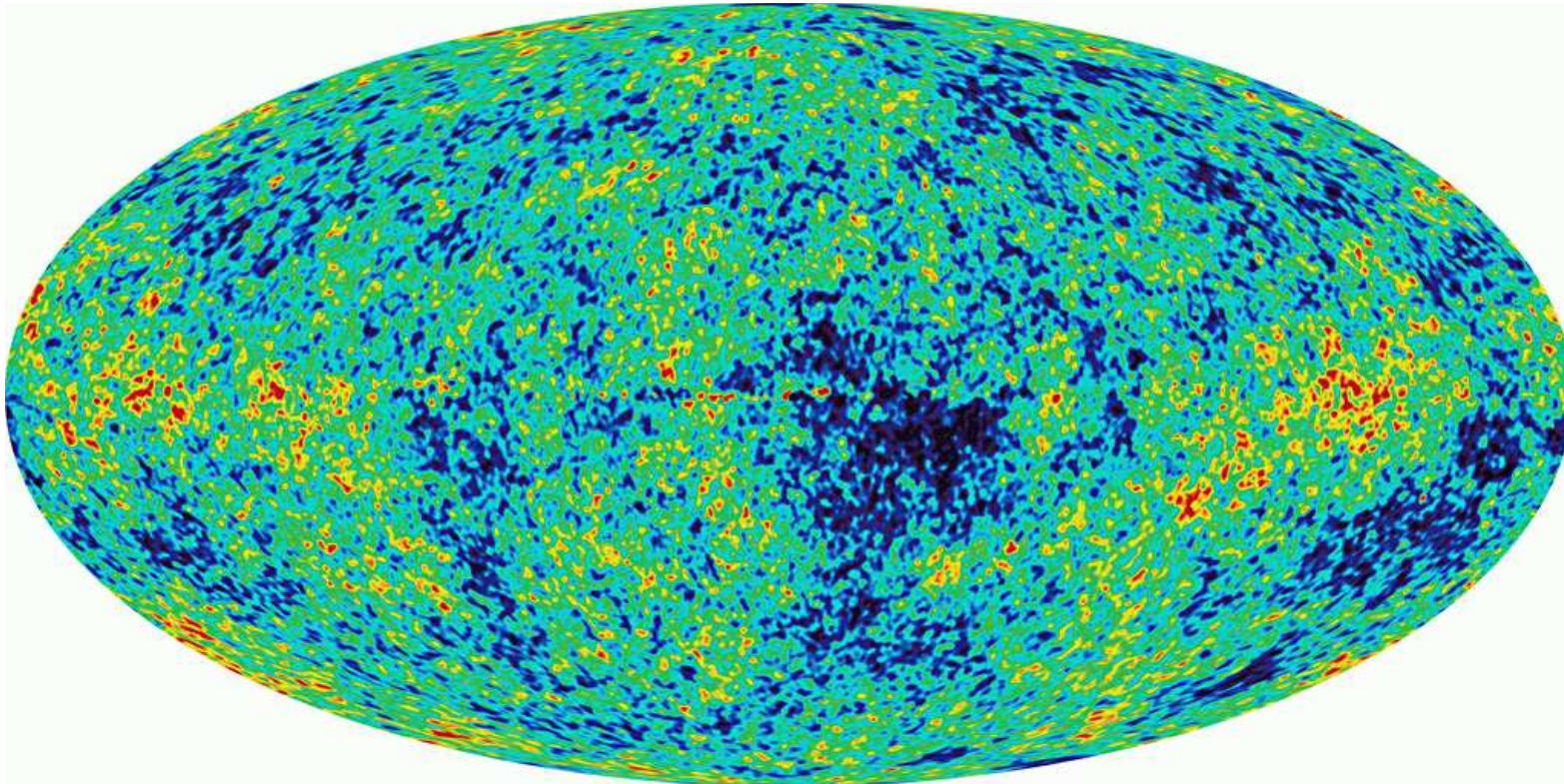
Odejmując wpływ efektu Dopplera ( $\Delta T \sim 200 \mu K$ )



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

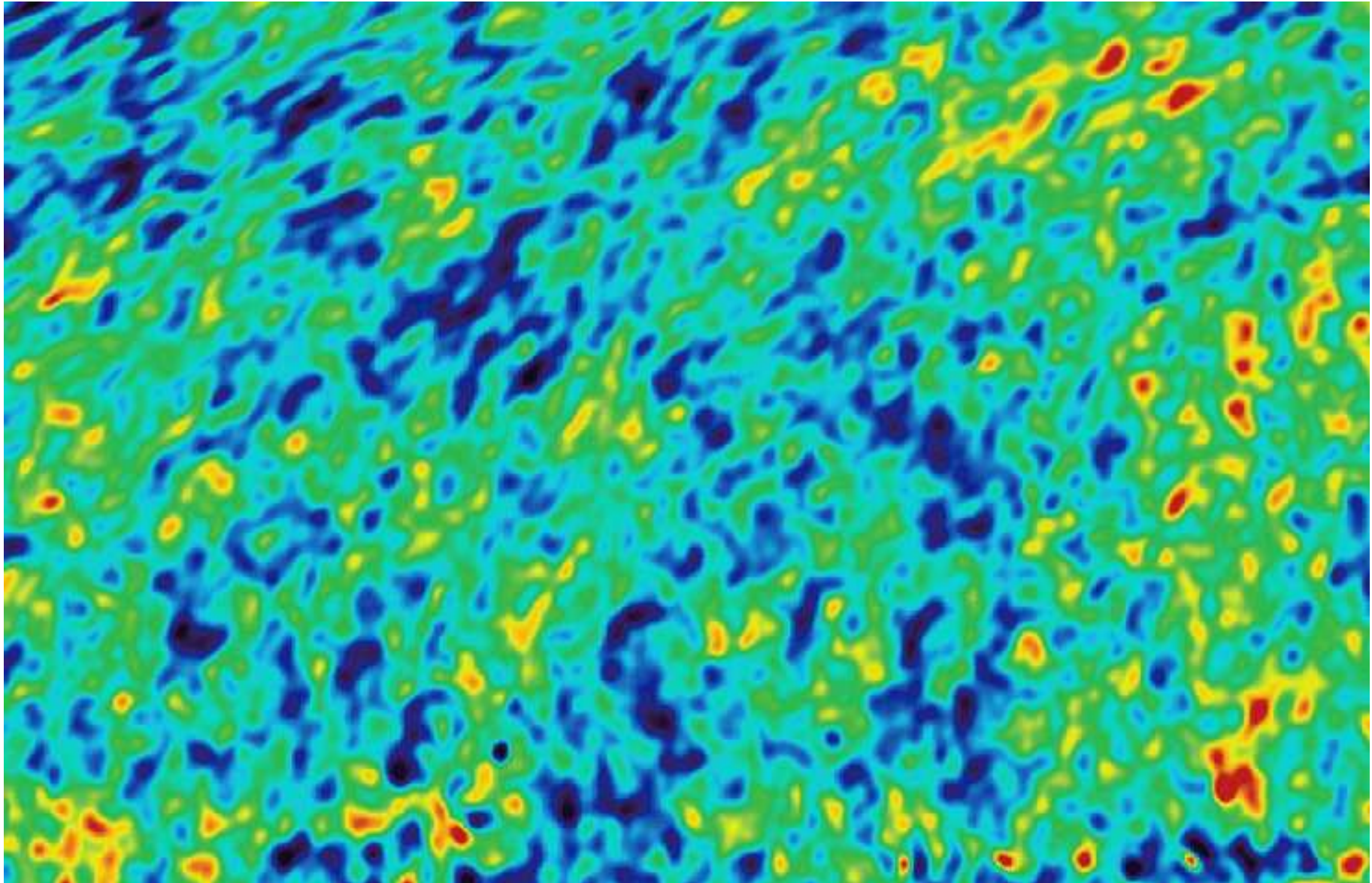
# Promieniowanie tła

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



widzimy przypadkowe fluktuacje w rozkładzie energii promieniowania  
⇒ czy w tym chaosie tkwi jakaś informacja?

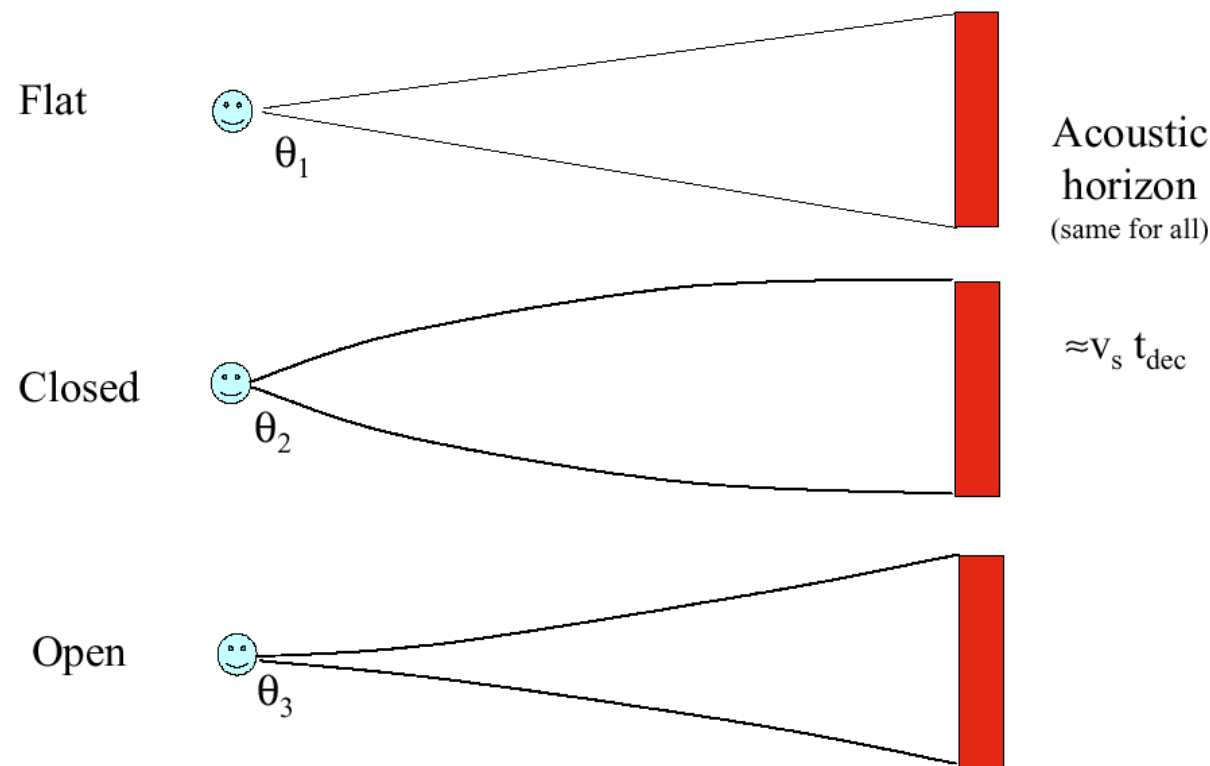
# Promieniowanie tła



# Promieniowanie tła

Model Wielkiego Wybuchu **przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła.

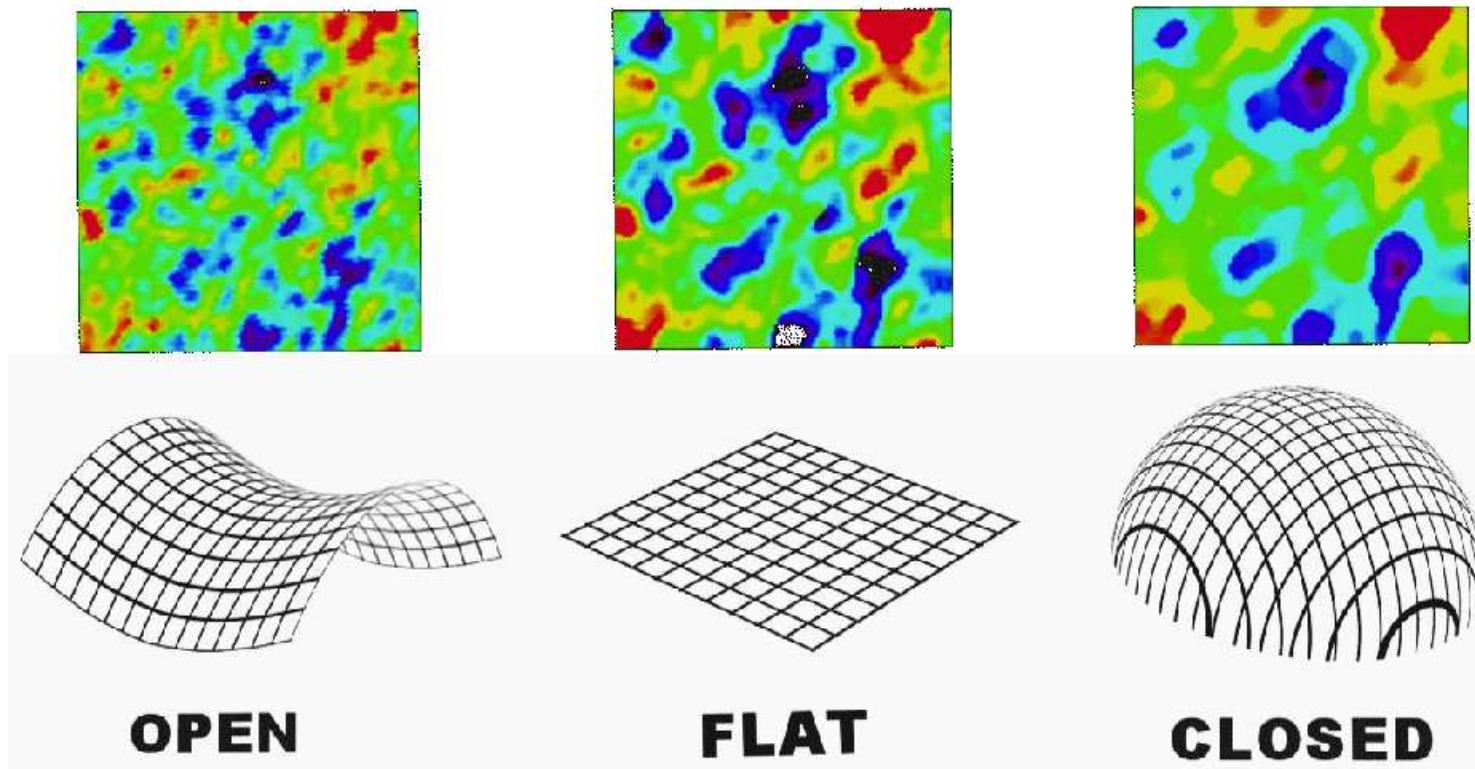
Rozmiary jakie obecnie **obserwujemy** zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



# Promieniowanie tła

Model Wielkiego Wybuchu **przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła.

Rozmiary jakie obecnie **obserwujemy** zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



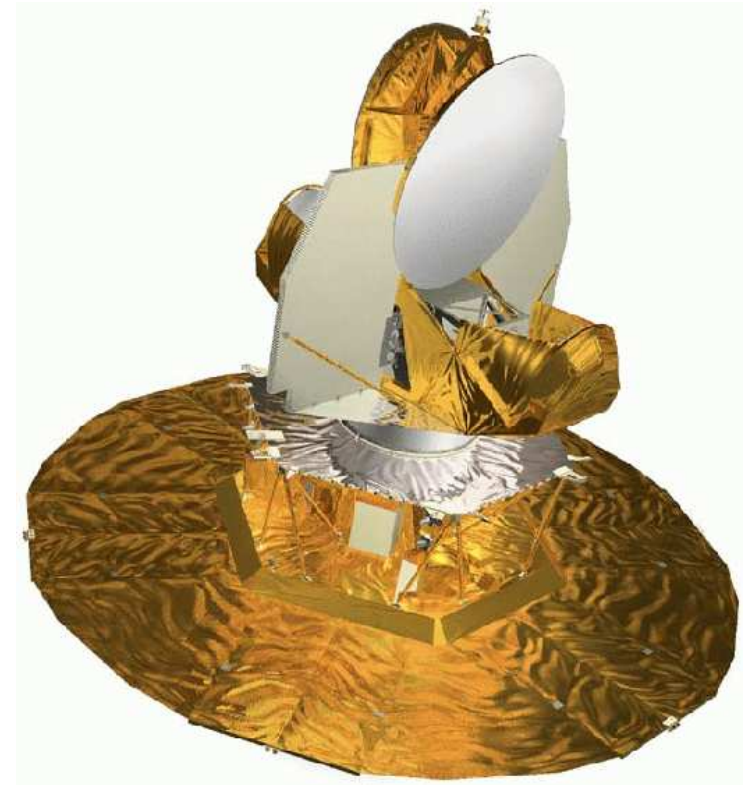


# WMAP

## Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.  
Pomiar promieniowania mikrofalowego  
w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w **różnych zakresach** częstości umożliwia efektywne **odjęcie tła** pochodzącego od Galaktyki.



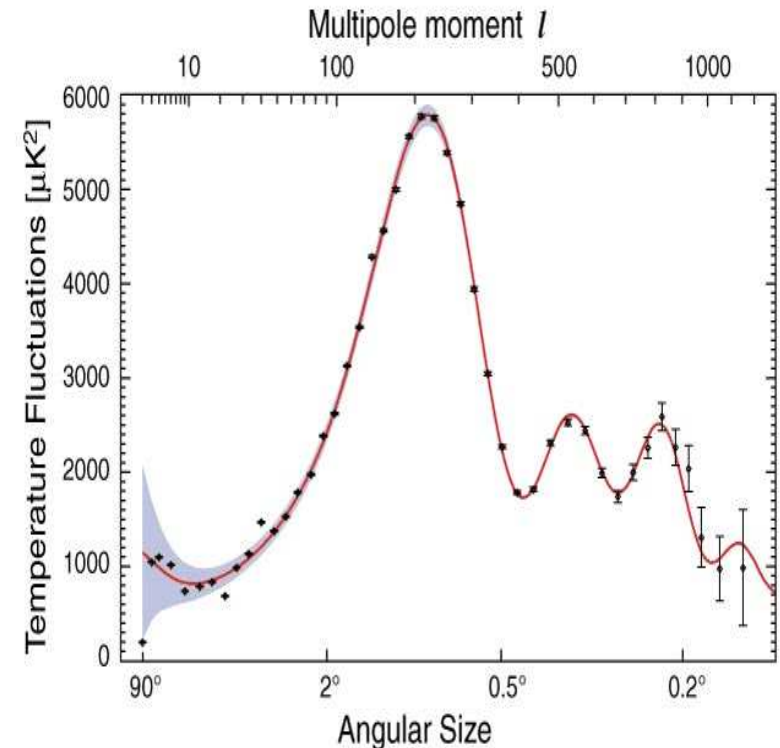
# WMAP

## Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.  
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w **różnych zakresach** częstości umożliwia efektywne **odjęcie tła** pochodzącego od Galaktyki.

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu  $0.8^\circ$



# WMAP

## Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

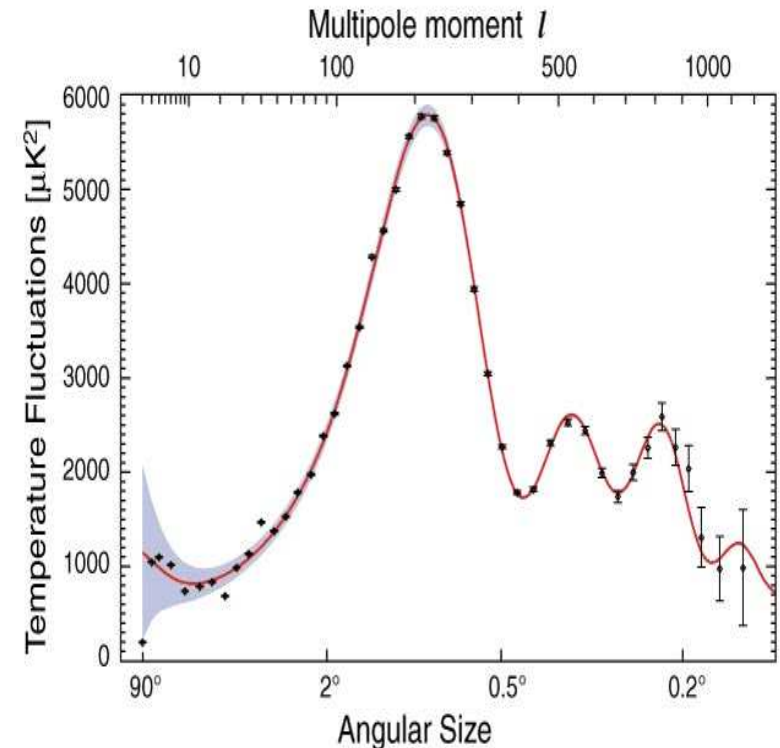
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.  
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w różnych zakresach częstości umożliwia efektywne odjęcie tła pochodzącego od Galaktyki.

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu  $0.8^\circ$

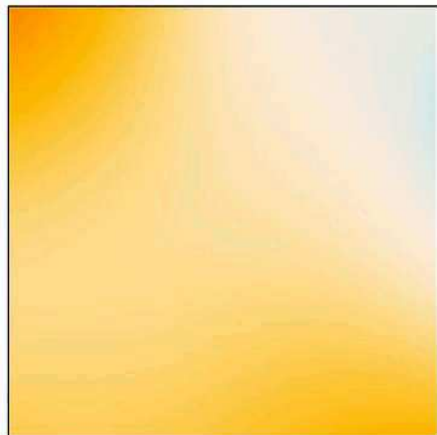
⇒ Wszechświat jest płaski !

⇒ całkowita gęstość materii/energii:  $\rho_{tot} = 1.02(\pm 0.02) \rho_c$   
(w granicach błędów zgodna z gęstością krytyczną)

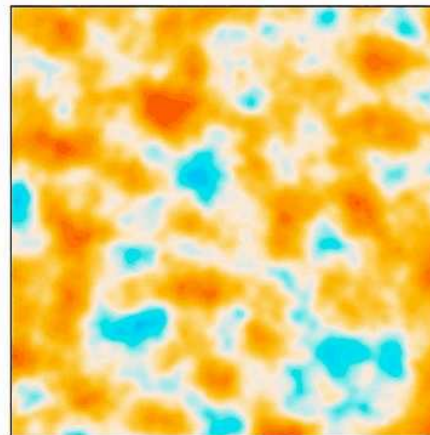
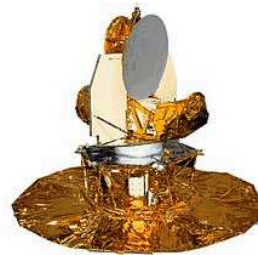


# Planck

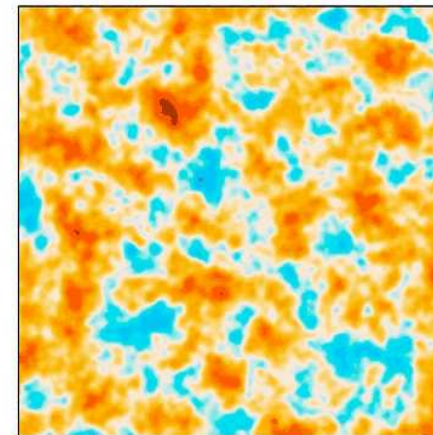
W roku 2009 wystrzelono satelitę Planck, pierwsze uzyskane z jego obserwacji wyniki zaprezentowano w roku 2013



COBE



WMAP

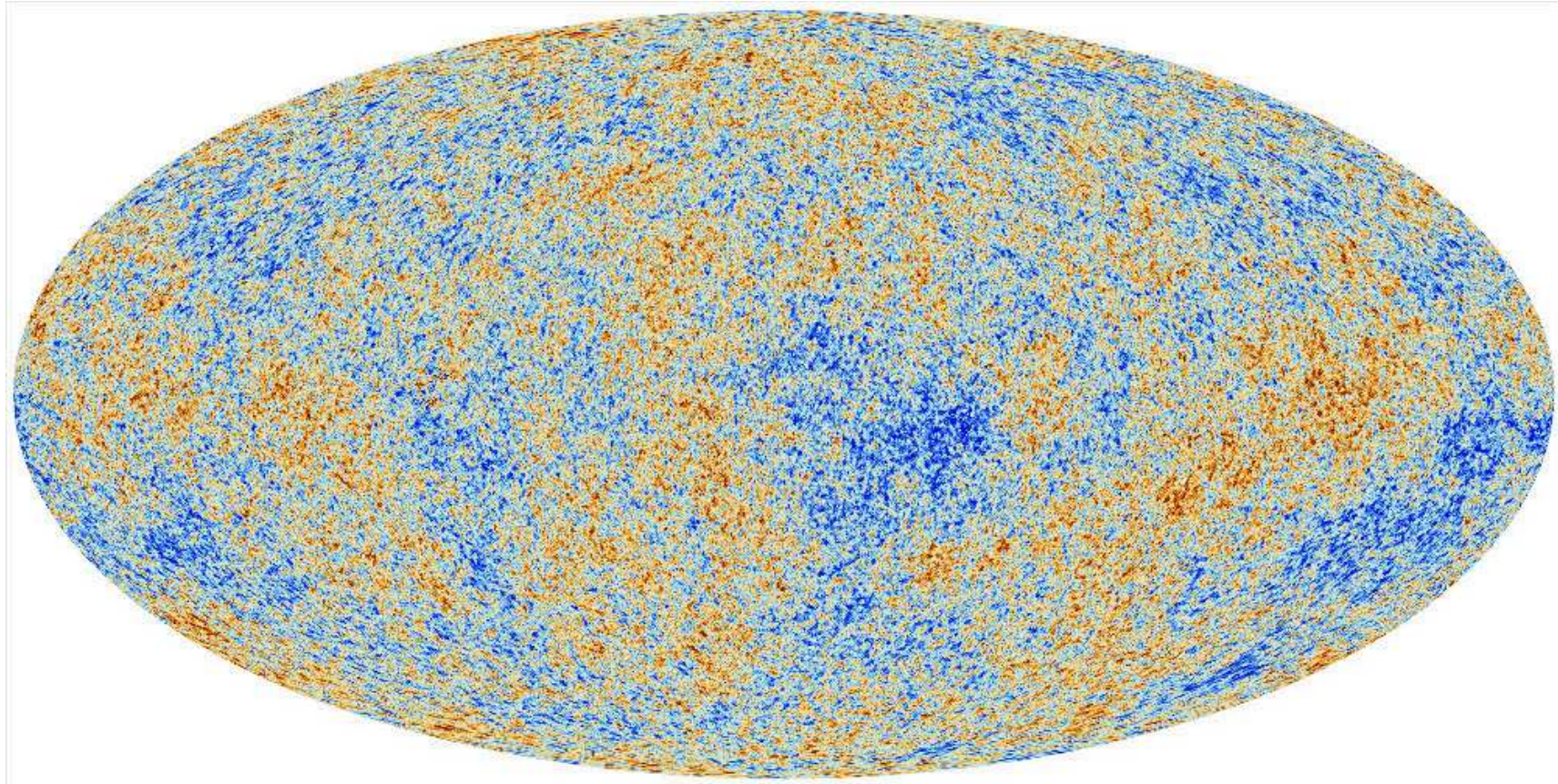


Planck

Jakościowy wzrost precyzji pomiarów

# Planck

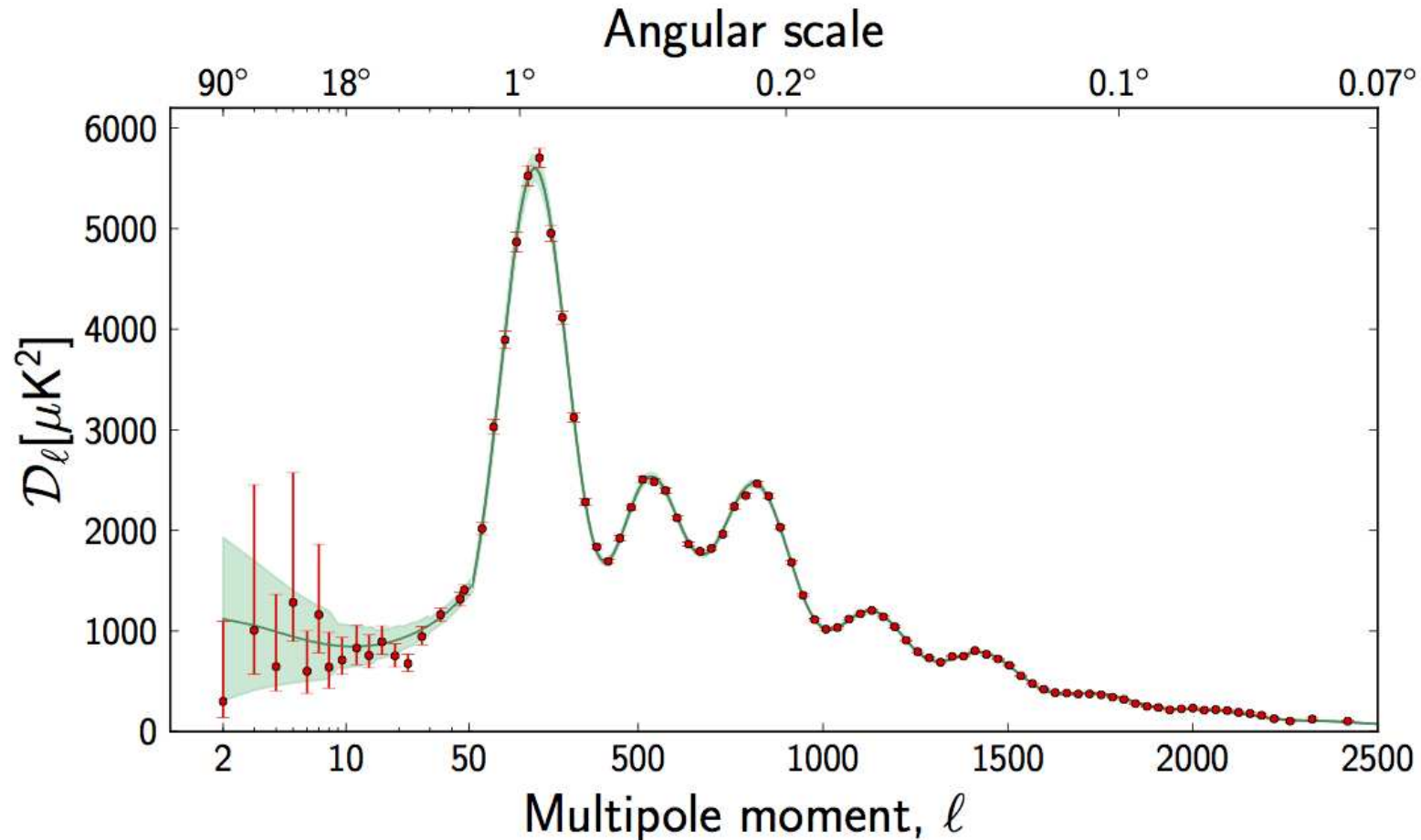
W roku 2009 wystrzelono satelitę Planck, pierwsze uzyskane z jego obserwacji wyniki zaprezentowano w roku 2013



Znacznie dokładniejsze pomiary wciąż dobrze opisane przez teorię...

# Planck

Dopasowanie modelu do widma fluktuacji promieniowania tła:



Rozmiar fluktuacji wskazuje na  $\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda \approx 1 \pm 0.0025$



# Ewolucja Wszechświata

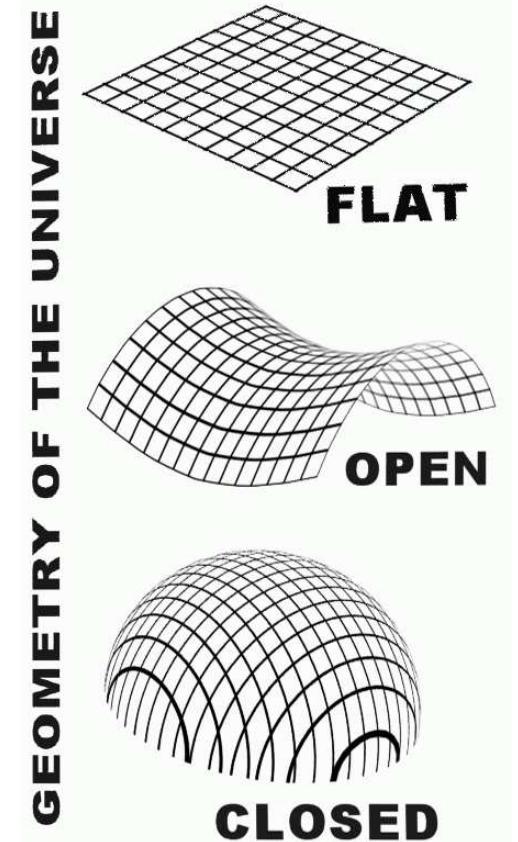
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** wiąże się ściśle z **krzywizną** przestrzeni i zależy od **gęstości** materii  $\rho$ .

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

$\rho = \rho_c$  asymptotycznie “zatrzyma” się

$\rho < \rho_c$  będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$  kiedyś zacznie się zapadać



Ale pod warunkiem, że pomijamy wkład od stałej kosmologicznej!!!

# Wyniki

Pomiar całkowitej gęstości materii we Wszechświecie, na podstawie oddziaływań grawitacyjnych:

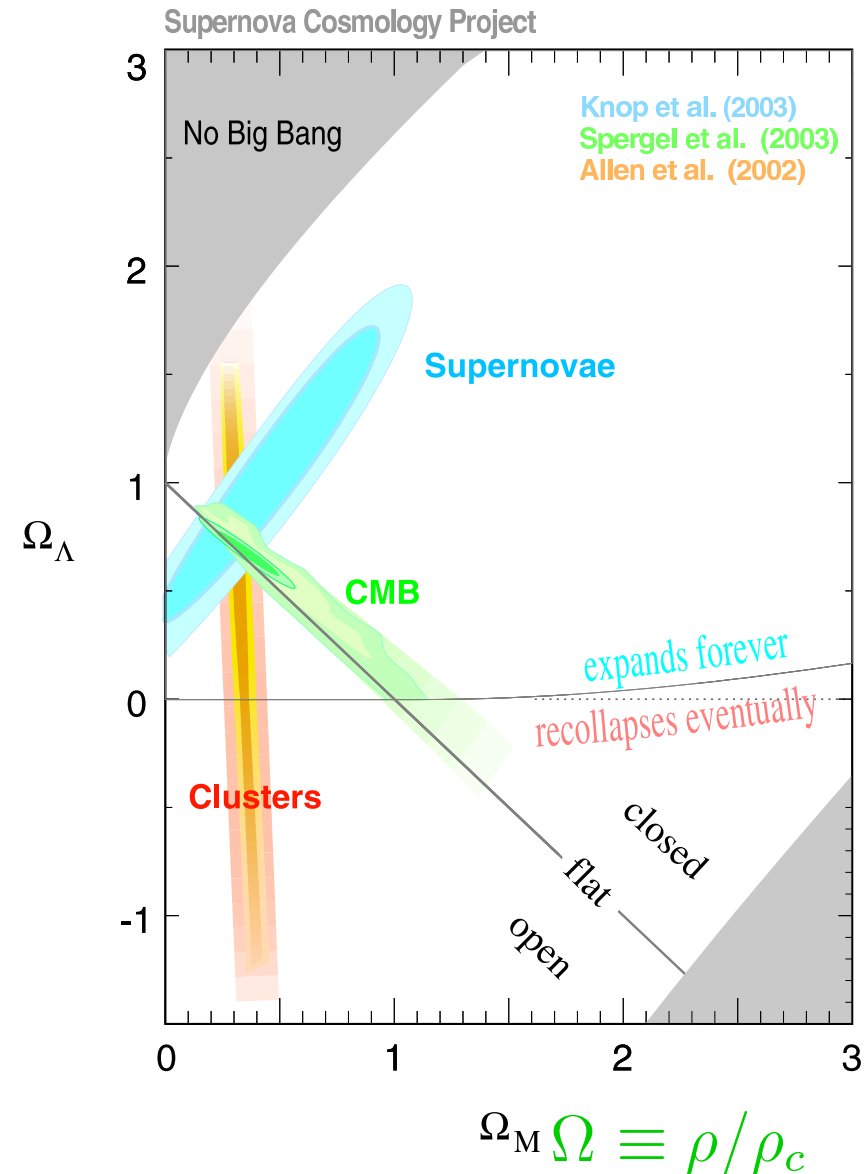
$$\rho_m \approx 0.3 \rho_c$$

Gęstość oczekiwana na podstawie wyznaczone krzywizny Wszechświata:

$$\rho \approx \rho_c$$

⇒ jedynym sposobem na pogodzenie tych wyników jest **stała kosmologiczna**

$$\rho = \rho_m + \rho_\Lambda$$

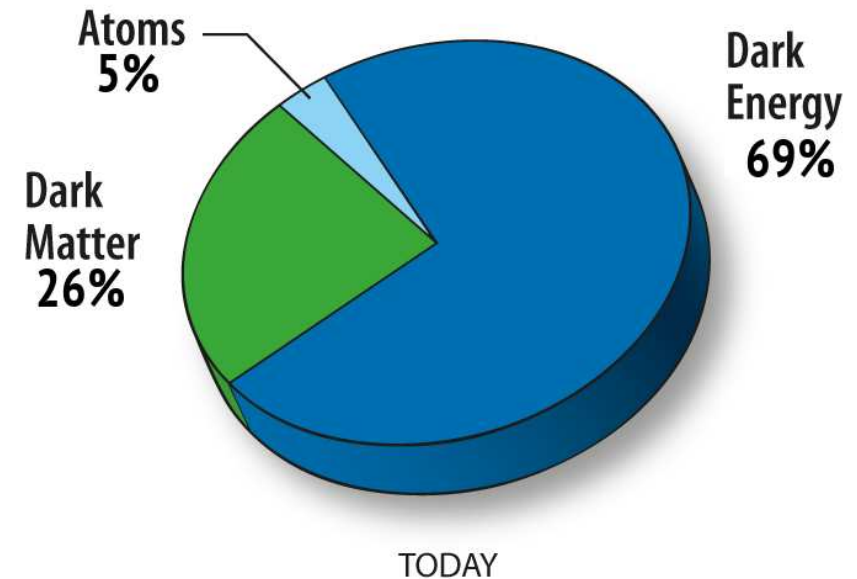




# Wyniki

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia**...
- **69%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )



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

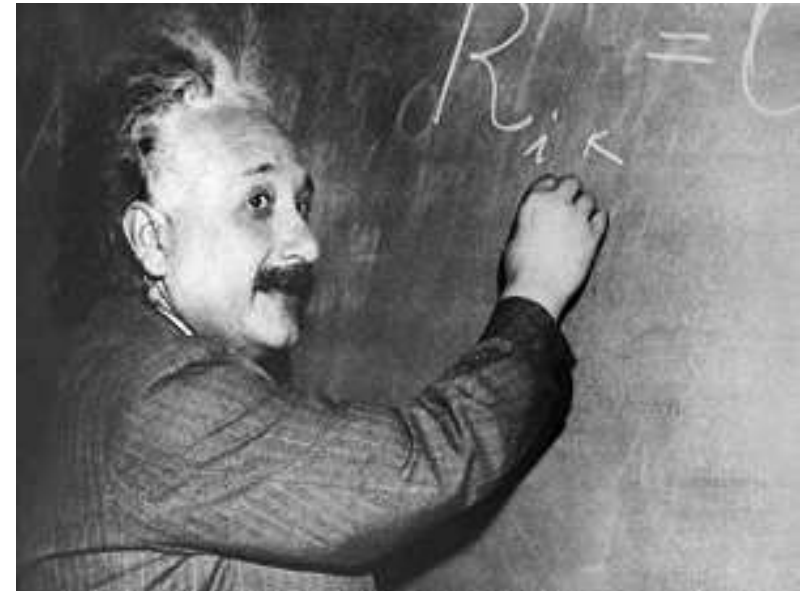
Wiek Wszechświata:  $T = 13.799 \pm 0.038 \text{ Gyr}$

# Fale grawitacyjne

Ogólna Teoria Względności, sformułowana przez Einsteina w 1916, opisuje ewolucję Wszechświata na “skalach kosmologicznych”

Zakładamy, że na bardzo dużych odległościach Wszechświat jest **jednorodny i izotropowy**.

Ale co się dzieje na **mniejszych skalach**?  
**Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...**



# Fale grawitacyjne

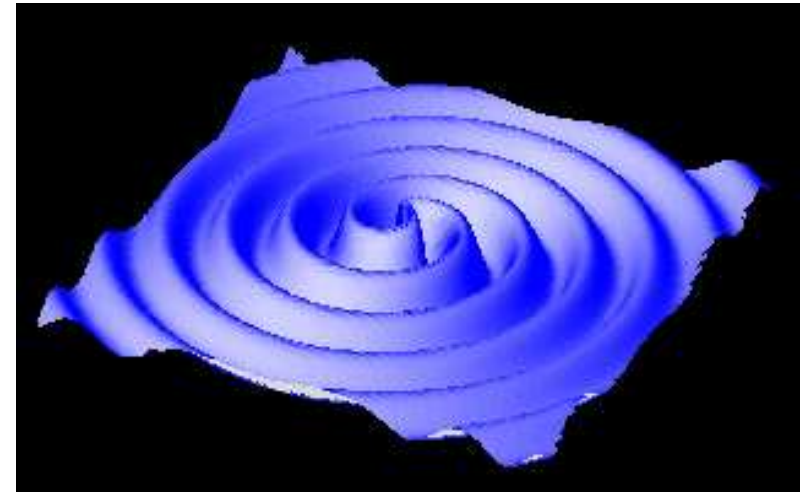
Ogólna Teoria Względności, sformułowana przez Einsteina w 1916, opisuje ewolucję Wszechświata na “skalach kosmologicznych”

Zakładamy, że na bardzo dużych odległościach Wszechświat jest **jednorodny i izotropowy**.

Ale co się dzieje na **mniej** skalach?  
**Wiemy, że Wszechświat nie jest jednorodny...**

Jeśli masy poruszają się z przyspieszeniem, mogą emitować **fale grawitacyjne** (podobnie jak przyspieszane ładunki fale E-M).

Tylko fale grawitacyjne są **dużo, dużo słabsze...**



# Fale grawitacyjne

## Detekcja pośrednia

W 1974 Joseph Taylor i Russell Hulse odkryli pulsar PSR 1913+16.

Zauważyli regularne zmiany w jego okresie pulsacji (59 ms), które wynikały z efektu Dopplera

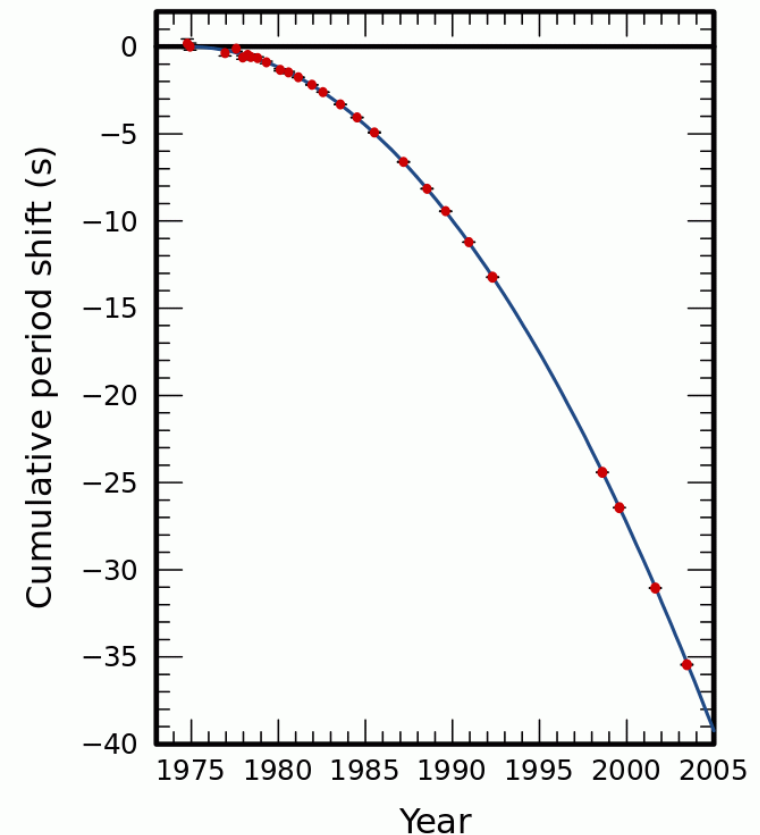
⇒ pulsar krąży dookoła innej gwiazdy w układzie podwójnym (okres 7.75 h)

Długoczasowe obserwacje pokazały, że okres obiegu się skraca

⇒ układ wiruje coraz szybciej

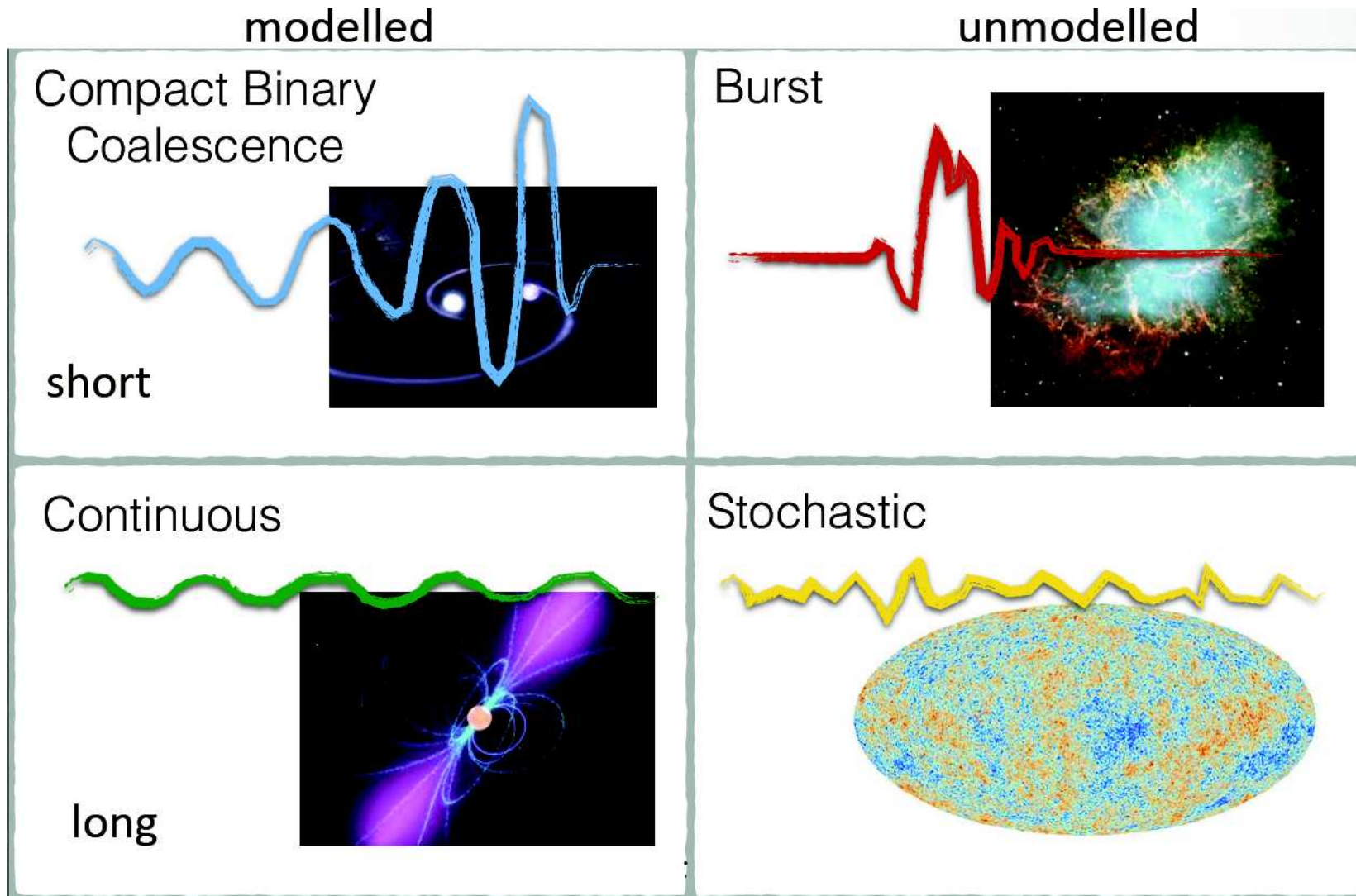
⇒ straty energii powodowane emisją fal grawitacyjnych

W bardzo dobrej zgodności z przewidywaniami OTW ⇒ Nobel 1993



# Fale grawitacyjne

## Możliwe źródła



# Fale grawitacyjne

## **Własności**

Fale grawitacyjne zachowują się podobnie do fal elektromagnetycznych:

- poruszają się z tą samą prędkością (prędkość światła)
- podlegają odchyleniom na skutek zakrzywienia czasoprzestrzeni
- podlega przesunięciu ku czerwieni
- niosą energię, pęd i moment pędu (!)

Jednak fale grawitacyjne w bardzo niewielkim stopniu podlegają absorpcji w materii  $\Rightarrow$  dlatego jej wykrycie jest tak trudne

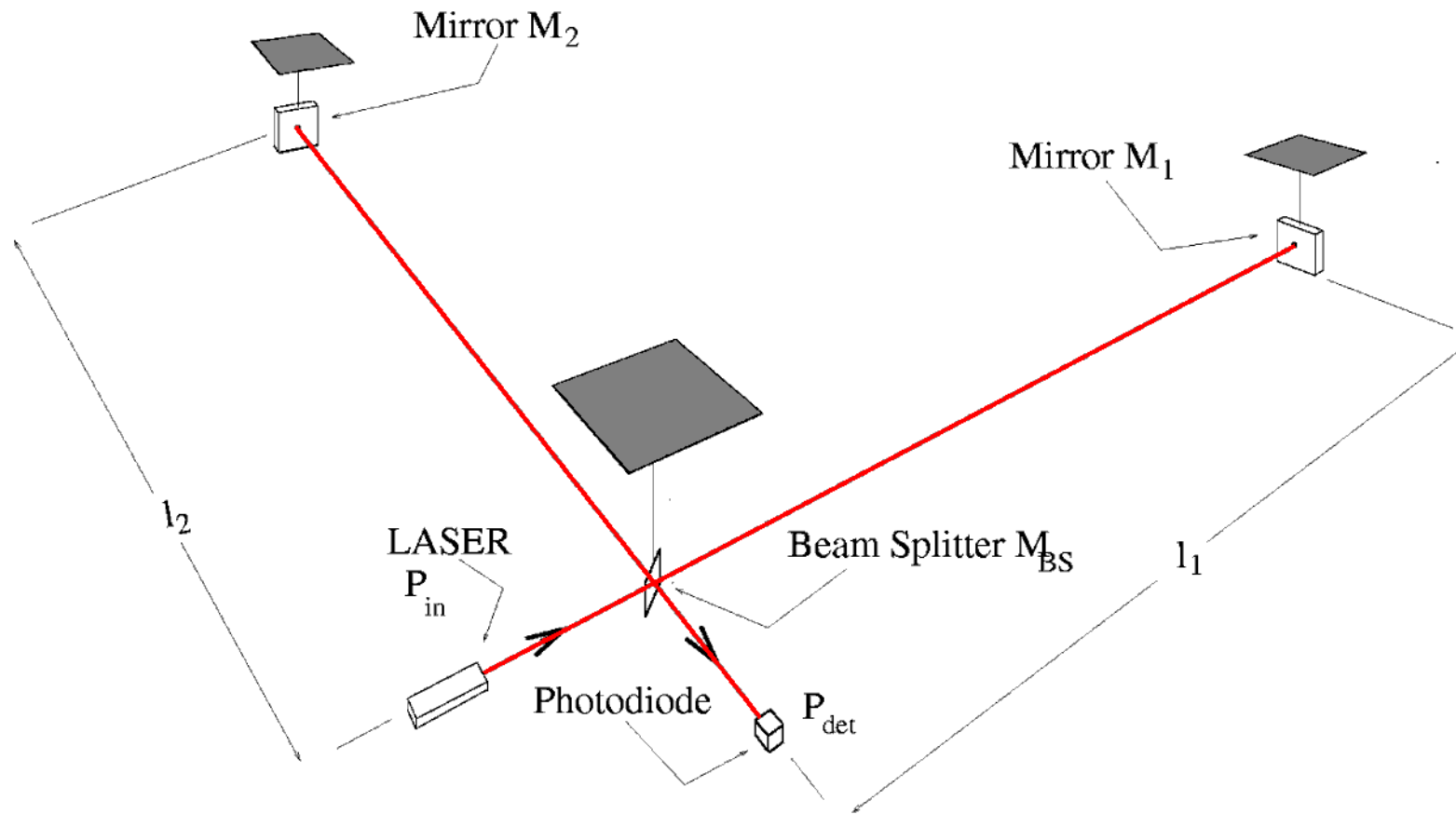
Fala grawitacyjna nie wpływa na ruch obiektów !  
deformacja przestrzeni  $\Rightarrow$  zmiana odległości między obiektami  
 $\Rightarrow$  pomiary interferometryczne

# Fale grawitacyjne

## Interferometry

Idea: powtórzenie eksperymentu Michelsona-Morleya

Szukamy periodycznych zmian czasu propagacji (prędkości światła)

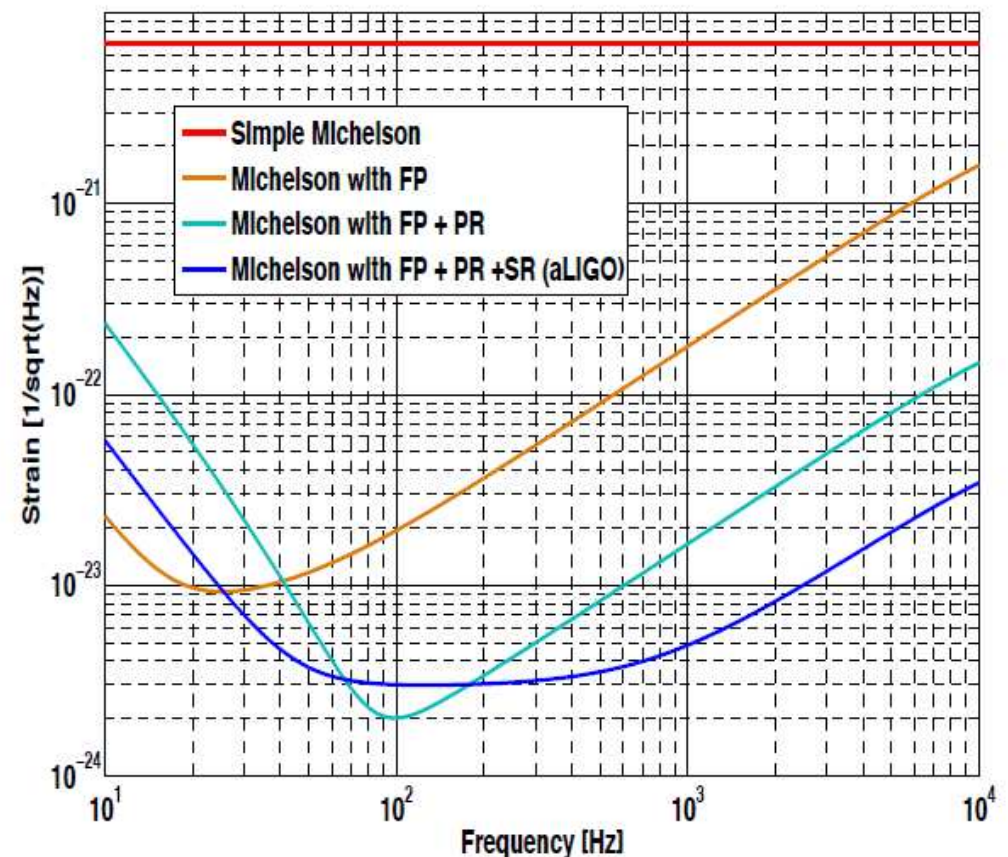
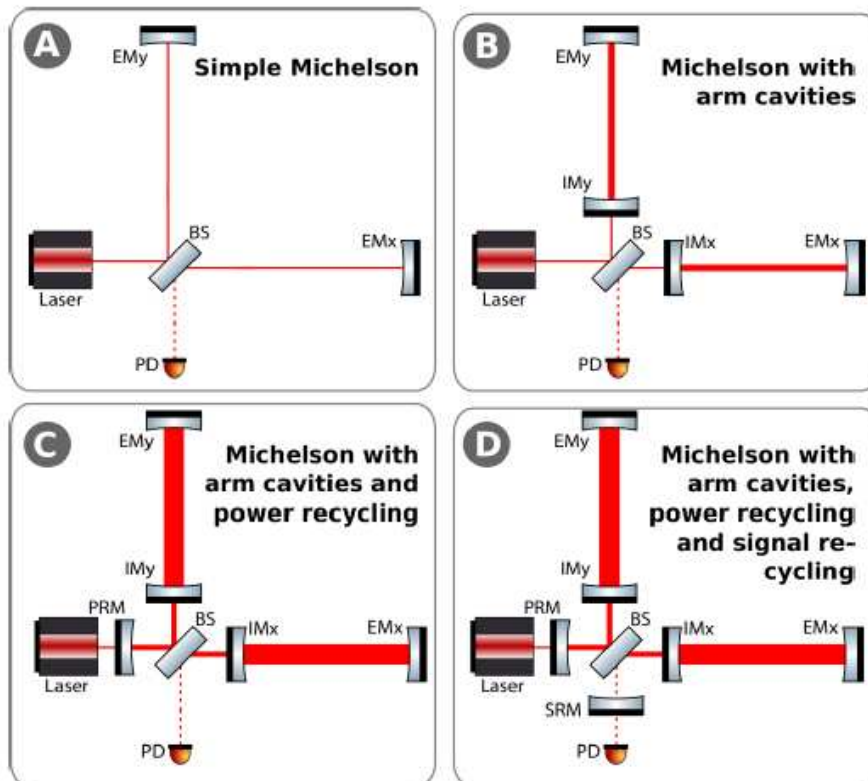


# Fale grawitacyjne

## Interferometry

Szukamy jednak ekstremalnie małych zmian!  $\Delta L/L \sim 10^{-21}$

⇒ wnętrza rezonansowe pozwalają wydłużyć drogę impulsów światła





# VIRGO (Włochy) ramiona o długości 3 km



LIGO (Hanford, USA) ramiona o długości 4 km



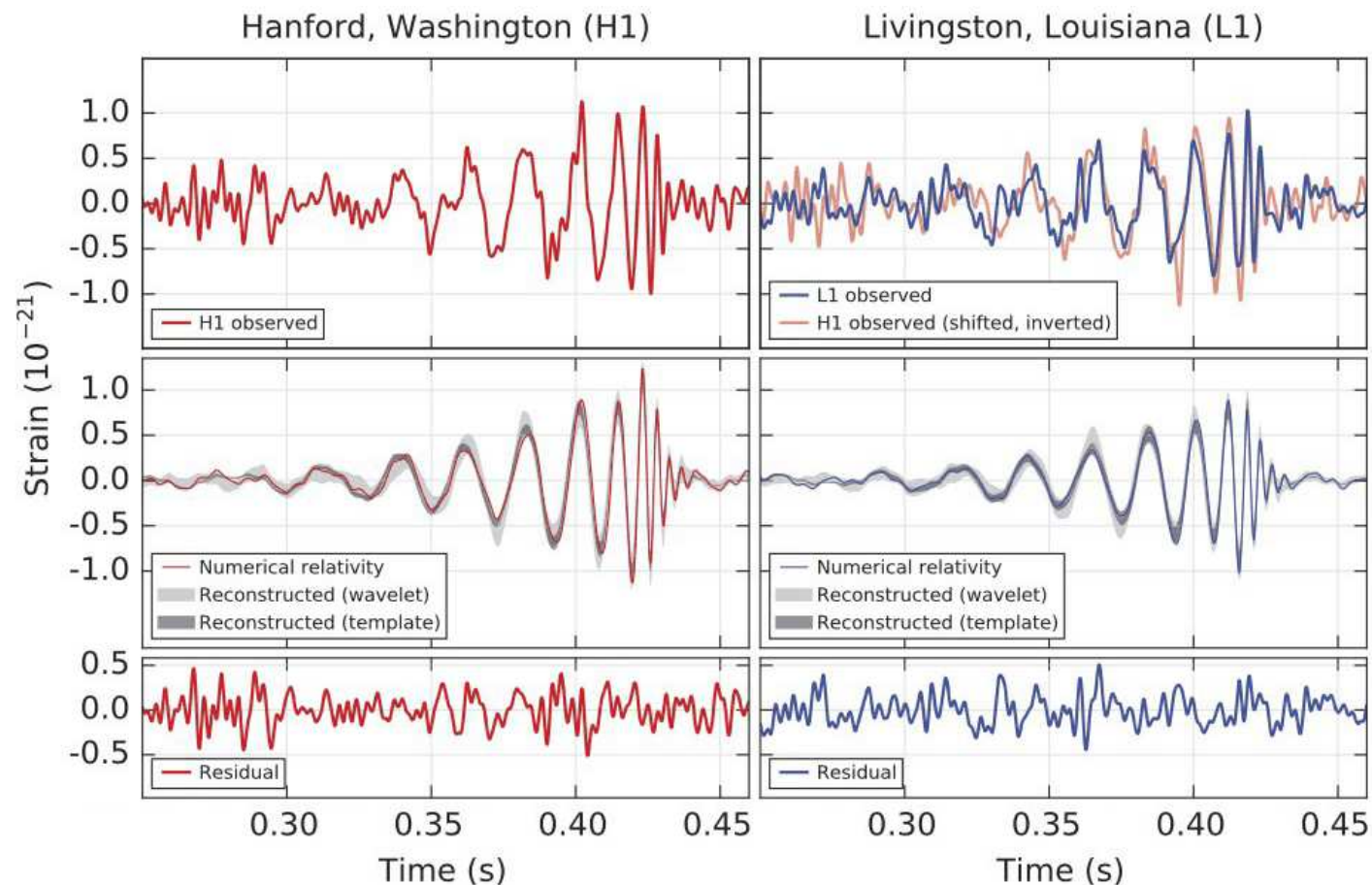
LIGO (Livingston, USA) ramiona o długości 4 km



# Fale grawitacyjne

## Odkrycie

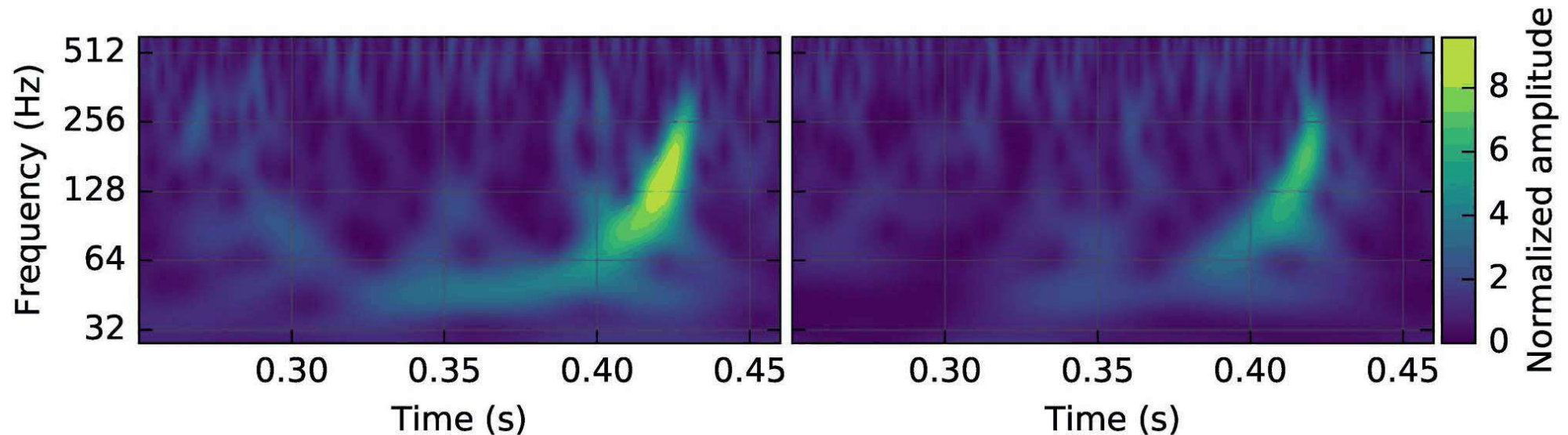
14 września 2015, o 09:50:45 UTC, sygnał w obu detektorach LIGO “znaleziony” przez algorytm szukający kolapsu układu podwójnego



# Fale grawitacyjne

## Odkrycie

Badzo silny sygnał, wyraźnie widoczny na rozkładzie czas-częstość

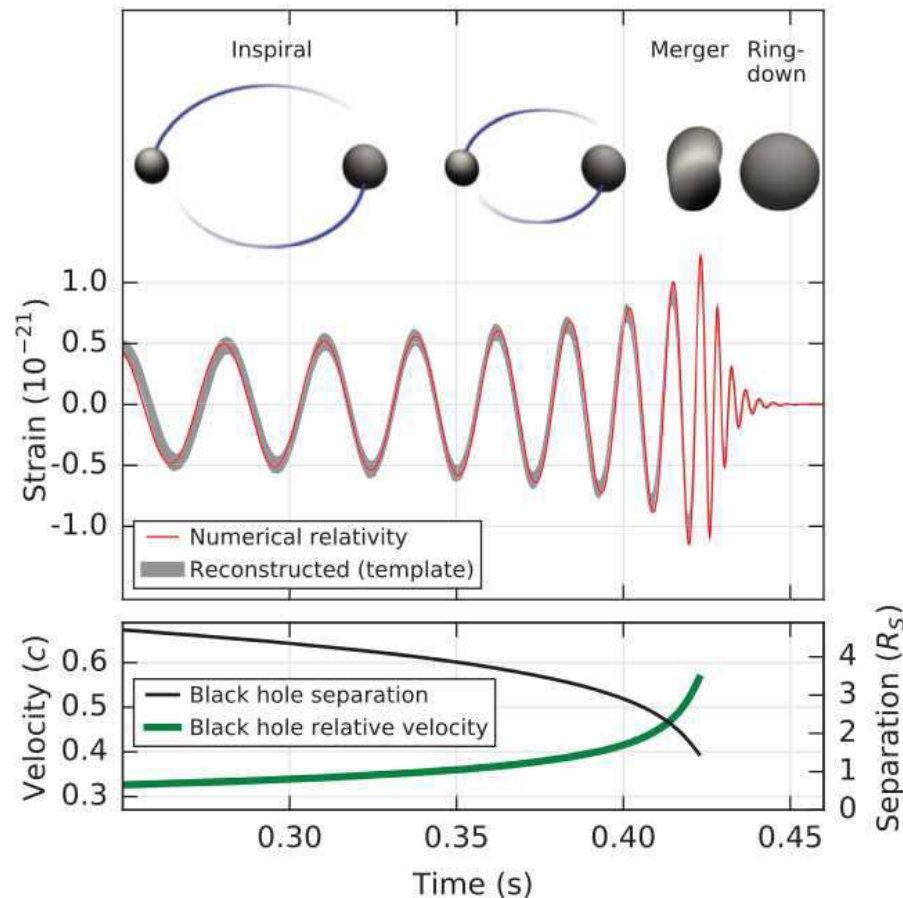


Oczekiwany poziom tła dla tego natężenia sygnału:

1 przypadek na 203'000 lat !

# Fale grawitacyjne

GW150914 wygląda jak zlanie się dwóch masywnych czarnych dziur



Dobra zgodność z OTW

Początkowe masy:

$$M_1 = 36_{-4}^{+5} M_{\odot}$$

$$M_2 = 29_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Końcowa czarna dziura:

$$M_f = 62_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

Odległość:

$$d = 410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$$

$$= 1.34_{-0.59}^{+0.52} \text{ Gly}$$

# Asymetria brionowa

Model Wielkiego Wybuchu tłumaczy jak powstał Wszechświat.  
Jednak nie tłumaczy dlaczego... zbudowany jest tylko z **materii!**

Jak złamana została początkowa symetria **materia-antymateria?**

# Asymetria brionowa

Model Wielkiego Wybuchu tłumaczy jak powstał Wszechświat. Jednak nie tłumaczy dlaczego... zbudowany jest tylko z **materii!**

Jak złamana została początkowa symetria **materia-antymateria?**

Szukamy zjawisk, które łamią tę symetrię - tzw. łamanie **symetrii CP**

**C** - tzw. sprzężenie ładunkowe: zamiana cząstek na antycząstki

**P** - tzw. parzystość: "odbicie" w przestrzeni



# Asymetria brionowa

Model Wielkiego Wybuchu tłumaczy jak powstawał Wszechświat. Jednak nie tłumaczy dlaczego... zbudowany jest tylko z **materii!**

Jak złamana została początkowa symetria **materia-antymateria?**

Szukamy zjawisk, które łamią tę symetrię - tzw. łamanie **symetrii CP**

**C** - tzw. sprzężenie ładunkowe: zamiana cząstek na antycząstki

**P** - tzw. parzystość: "odbicie" w przestrzeni

Praktycznie wszystkie zjawiska w przyrodzie są niezmiennicze ze względu na **symetrię CP**



# Asymetria brionowa

Model Wielkiego Wybuchu tłumaczy jak powstawał Wszechświat. Jednak nie tłumaczy dlaczego... zbudowany jest tylko z **materii!**

Jak złamana została początkowa symetria **materia-antymateria?**

Szukamy zjawisk, które łamią tę symetrię - tzw. łamanie **symetrii CP**

**C** - tzw. sprzężenie ładunkowe: zamiana cząstek na antycząstki

**P** - tzw. parzystość: "odbicie" w przestrzeni

Praktycznie wszystkie zjawiska w przyrodzie są niezmiennicze ze względu na **symetrię CP**



Ale mierzymy już też zjawiska, w których CP jest naruszone...

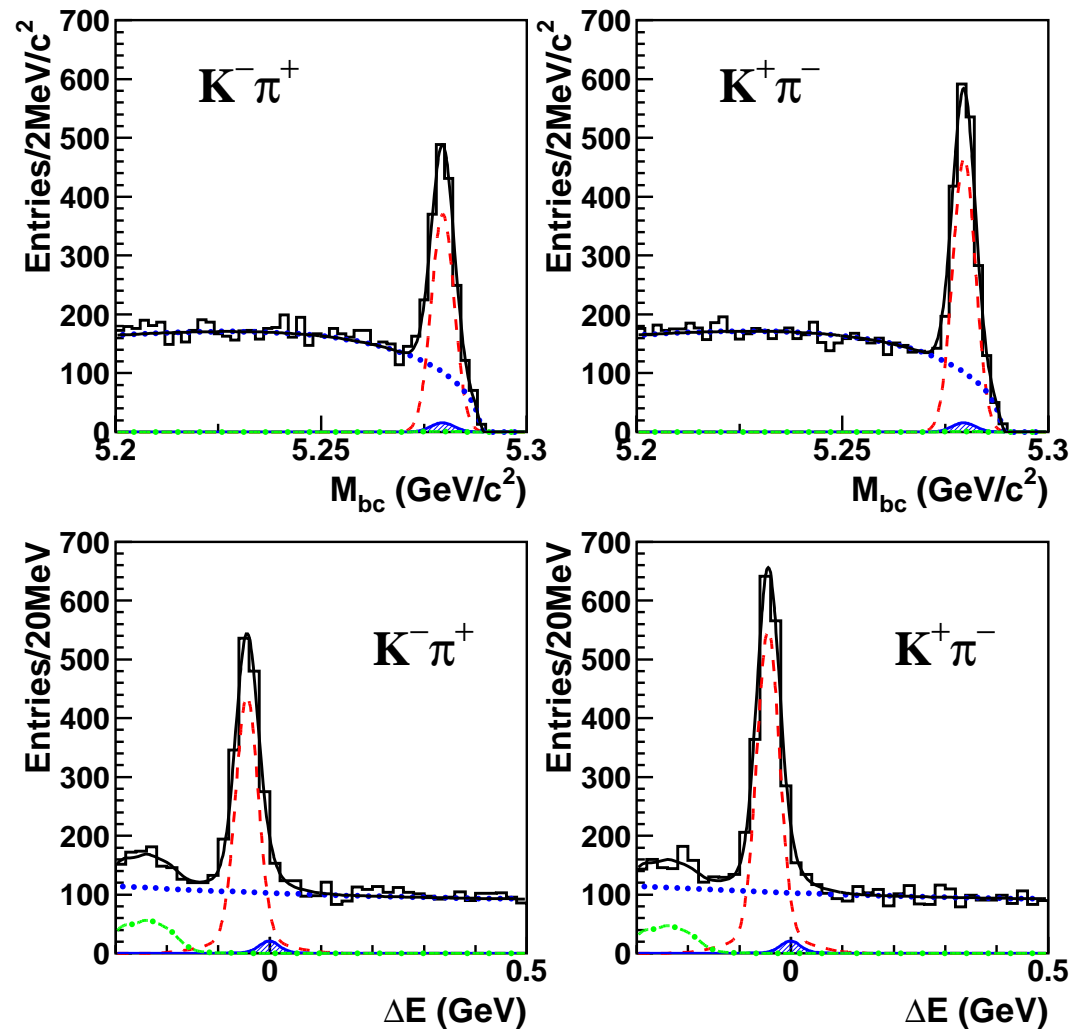
# Asymetria barionowa

## Łamanie CP w rozpadach $B^0$

Gdyby CP było ściśle zachowane, rozpady  $B^0$  i  $\bar{B}^0$  zachodziłyby tak samo...

W niektórych kanałach  $B^0$  rozpada się szybciej niż  $\bar{B}^0$ .

Ale obserwowane różnice zbyt małe, żeby wytłumaczyć asymetrię barionową we Wszechświecie!



# Podsumowanie

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (**np. cząstki supersymetryczne**)

# Podsumowanie

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...

# Podsumowanie

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie  
 $\Rightarrow$  jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?  
**Wymaga złamania symetrii CP**, znacznie silniejszego niż w SM...

# Podsumowanie

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie  
 $\Rightarrow$  jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?  
**Wymaga złamania symetrii CP**, znacznie silniejszego niż w SM...
- cząstki o bardzo wysokich energiach w **promieniowaniu kosmicznym**, błyski  $\gamma$ , ...

# Podsumowanie

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

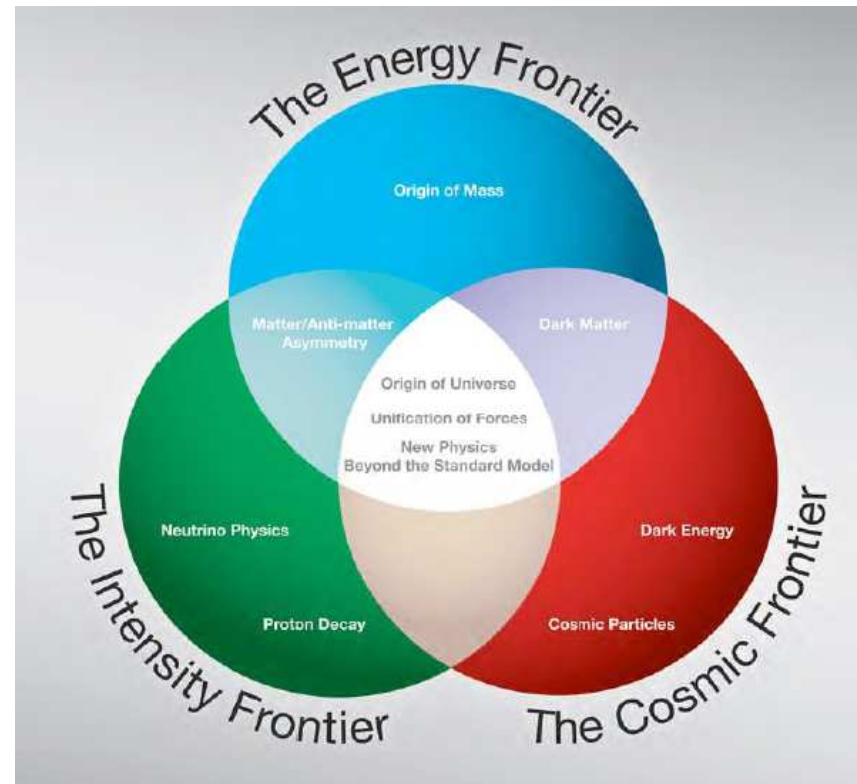
Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie  
 $\Rightarrow$  jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?  
**Wymaga złamania symetrii CP**, znacznie silniejszego niż w SM...
- cząstki o bardzo wysokich energiach w **promieniowaniu kosmicznym**, błyski  $\gamma$ , ...
- kwantowy **opis grawitacji** (włączenie jej do Modelu Standardowego). **Na razie nie ma dla niej miejsca...**



# Podsumowanie

Podstawowe pytania, które stawia przed nami teoria i doświadczenie, wymagają dziś wykorzystania różnych metod badawczych.



Badania przy kolajderach, obserwacje kosmologiczne oraz pomiary z wykorzystaniem bardzo intensywnych źródeł uzupełniają się.