

# Wszechświat cząstek elementarnych

## *Wykład 15: Ciemna Strona Wszechświata*

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

# Ciemna Strona Wszechświata

- Soczewkowanie grawitacyjne  
Jak możemy zobaczyć ciemną materię
- Mikrofalowe promieniowanie tła  
Zdjęcie narodzin Wszechświata
- Ciemna energia  
W jakim Wszechświecie żyjemy?
- 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  
⇒ materia **“światlista”**

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

- z pomiaru zawartości **lekkich pierwiastków** + model **nukleosyntezy (Wielki Wybuch)**  
⇒ materia **“barionowa”**

$$\Omega_b \sim 0.04$$

- z pomiaru oddziaływań **gravitacyjnych**  
⇒ materia **“gravitacyjna” (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:

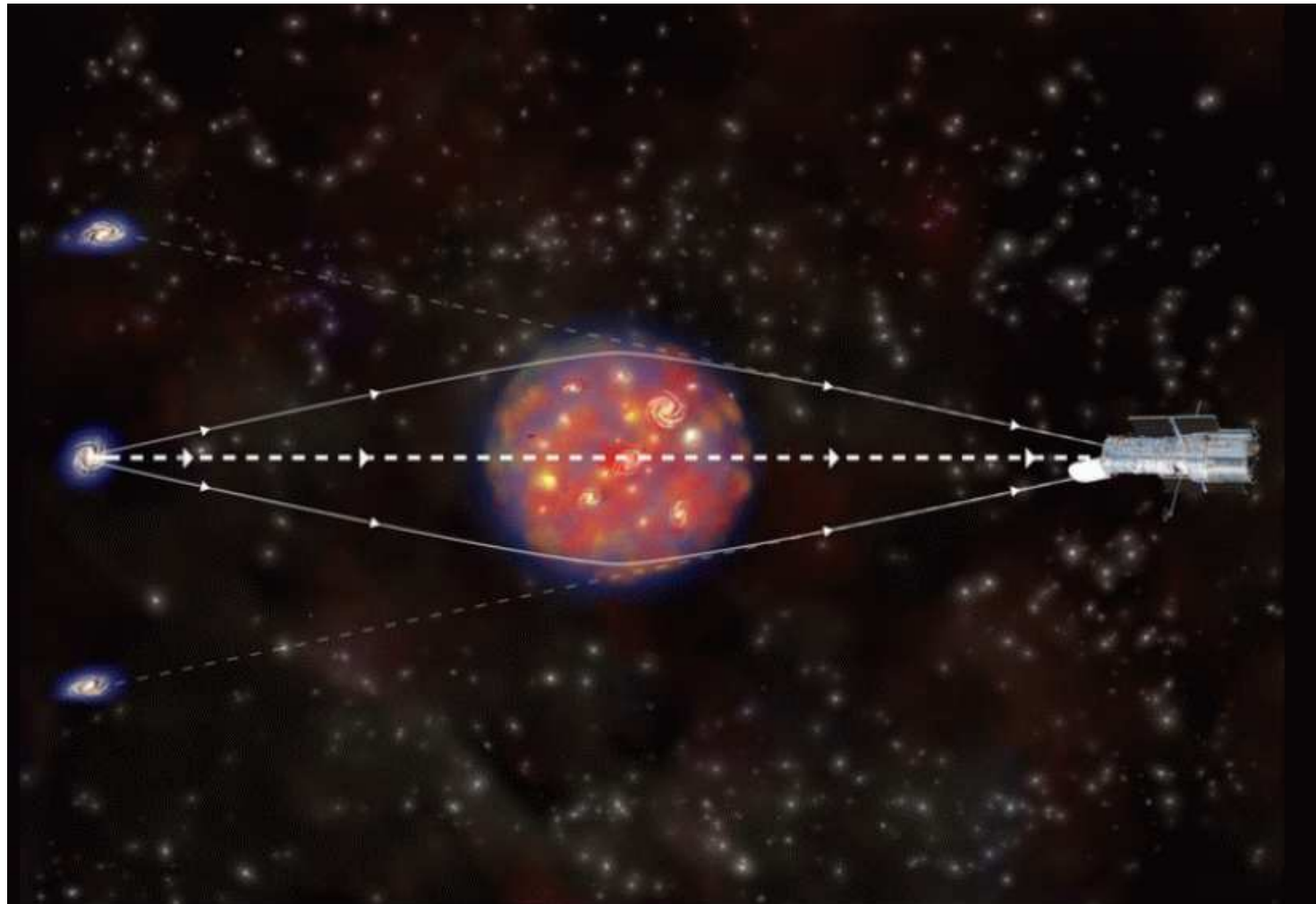
- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

Jednym z głównych kandydatów jest najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP), którą mamy nadzieję odkryć w LHC.



# Soczewkowanie grawitacyjne

**Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.



# Soczewkowanie grawitacyjne

**Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.

Kosmiczny Teleskop  
Hubble'a



# Soczewkowanie grawitacyjne

**Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.

Zdjęcie z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a

**Niebieskie łuki** - wielokrotny obraz odległej galaktyki położonej za masywną gromadą galaktyk.



# Soczewkowanie grawitacyjne

## ***Silne soczewkowanie grawitacyjne***

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.



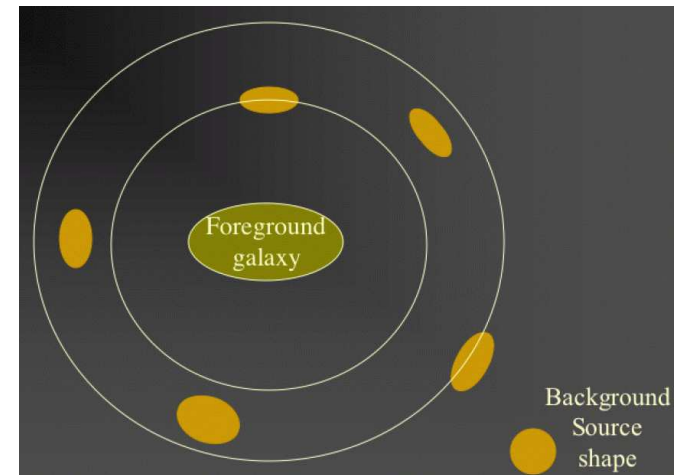
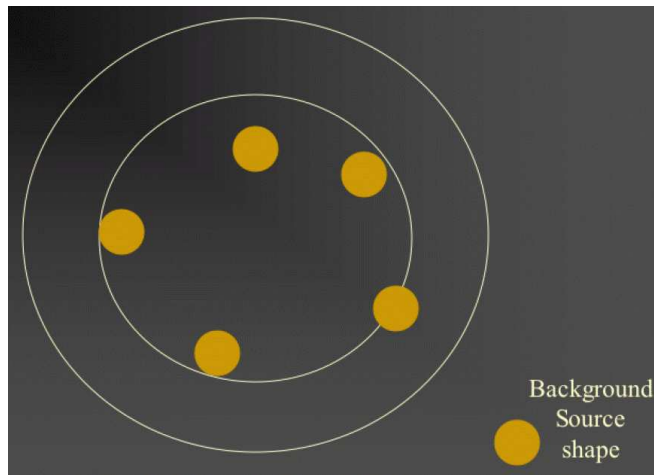
# Soczewkowanie grawitacyjne

## **Silne soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.

## **Słabe soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **zniekształcenie obrazu**.



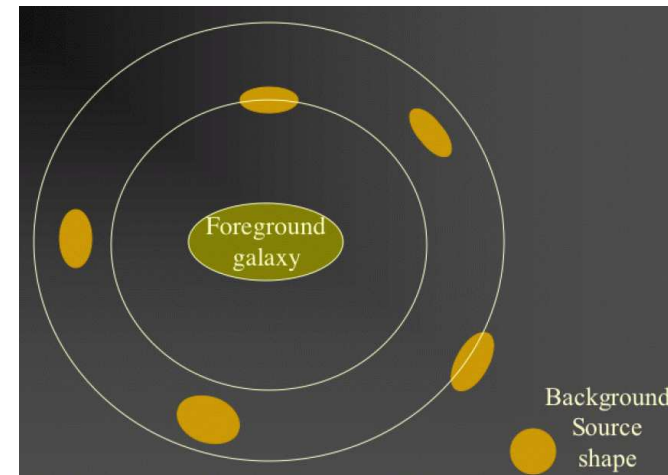
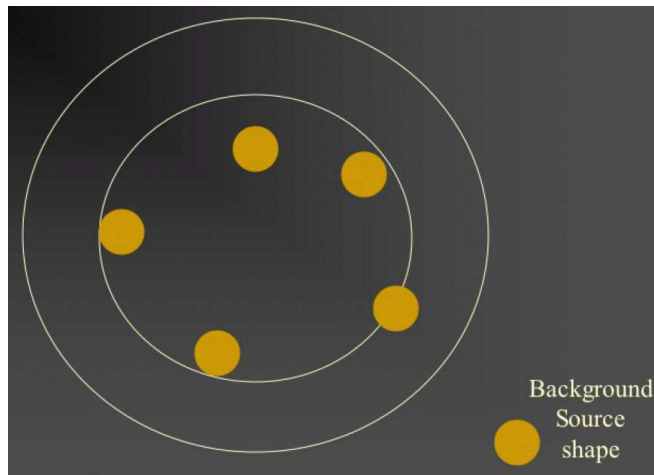
# Soczewkowanie grawitacyjne

## **Silne soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.

## **Słabe soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **zniekształcenie obrazu**.



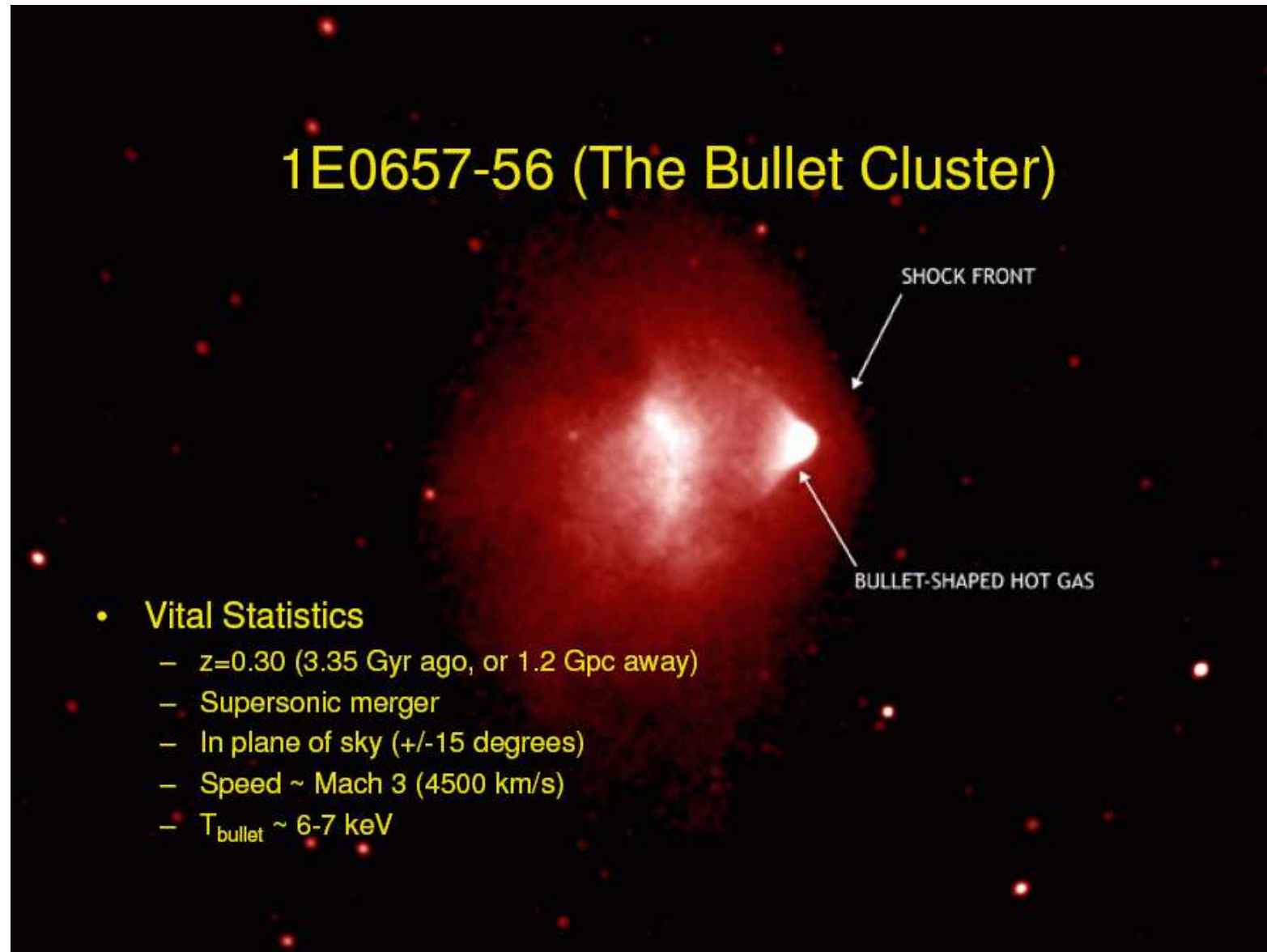
W obu przypadkach możemy wnioskować o **masie** obiektów znajdujących się na drodze promieni świetlnych.

# Kosmiczna kolizja

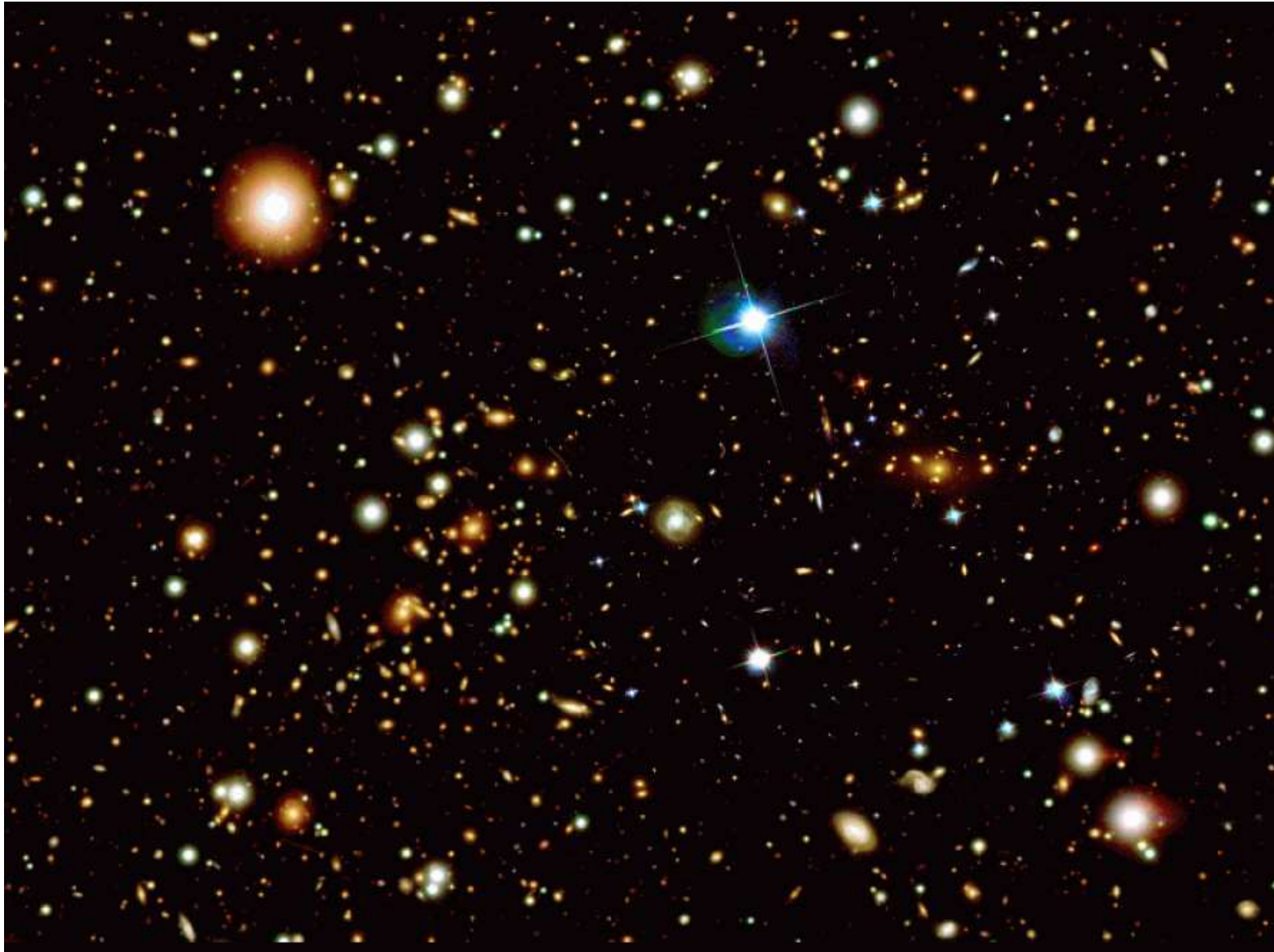
Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. W ostatnich latach bardzo dokładne pomiary tego promieniowania stały się możliwe dzięki wystrzeleniu teleskopu kosmicznego **Chandra**.



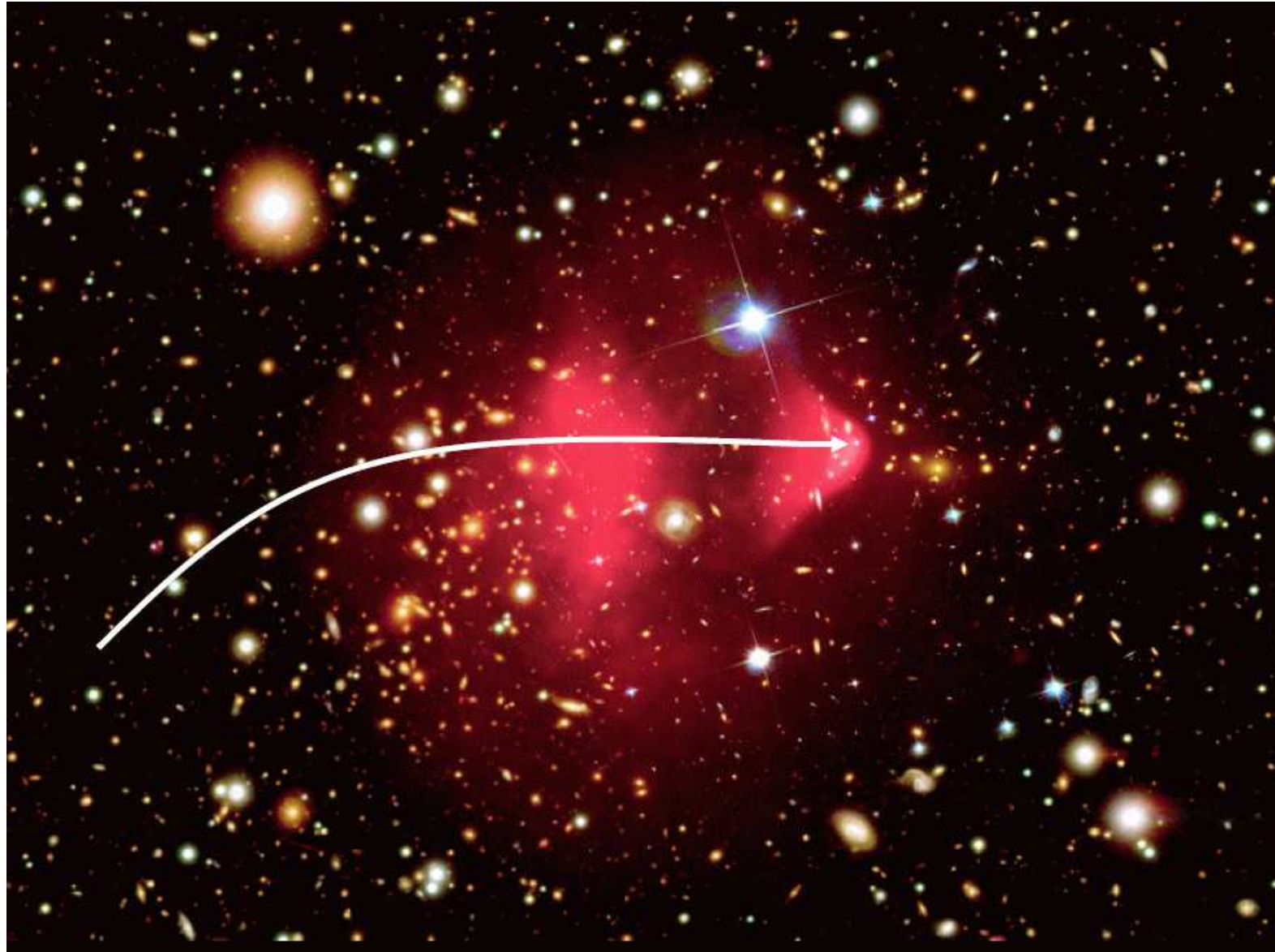
# Kosmiczna kolizja



# Kosmiczna kolizja

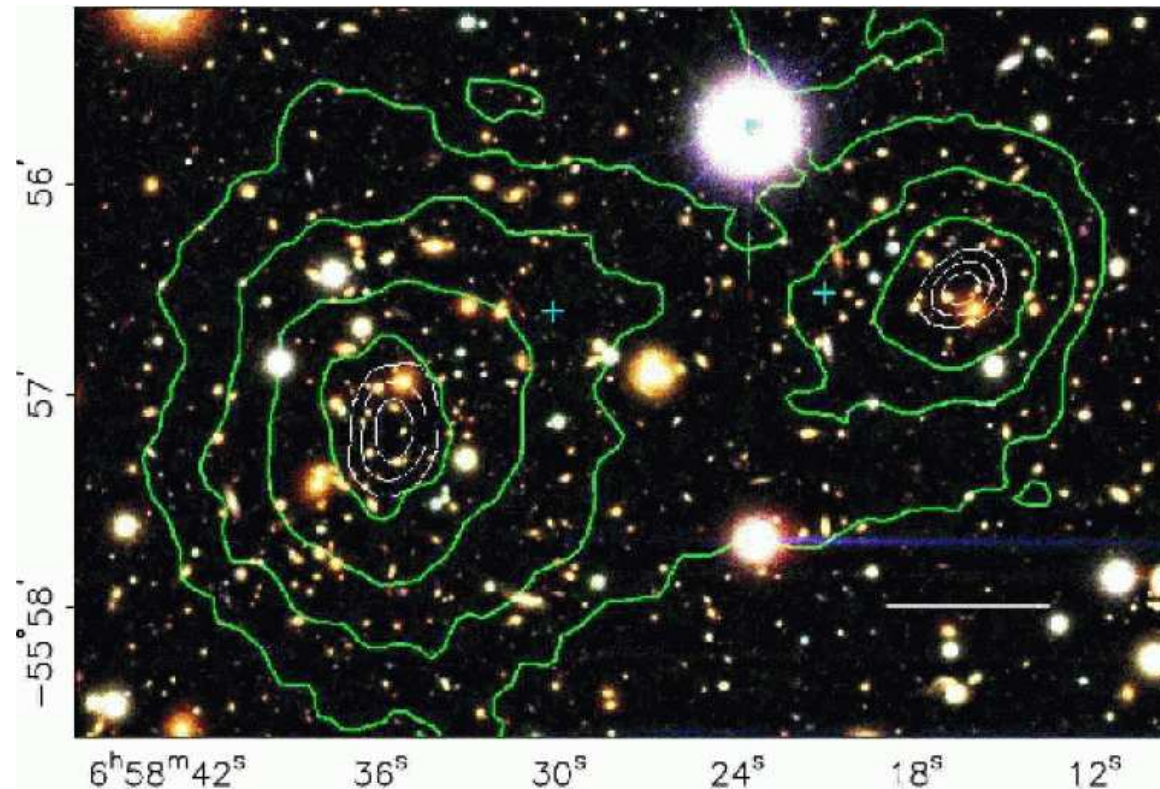


# Kosmiczna kolizja



# Kosmiczna kolizja

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

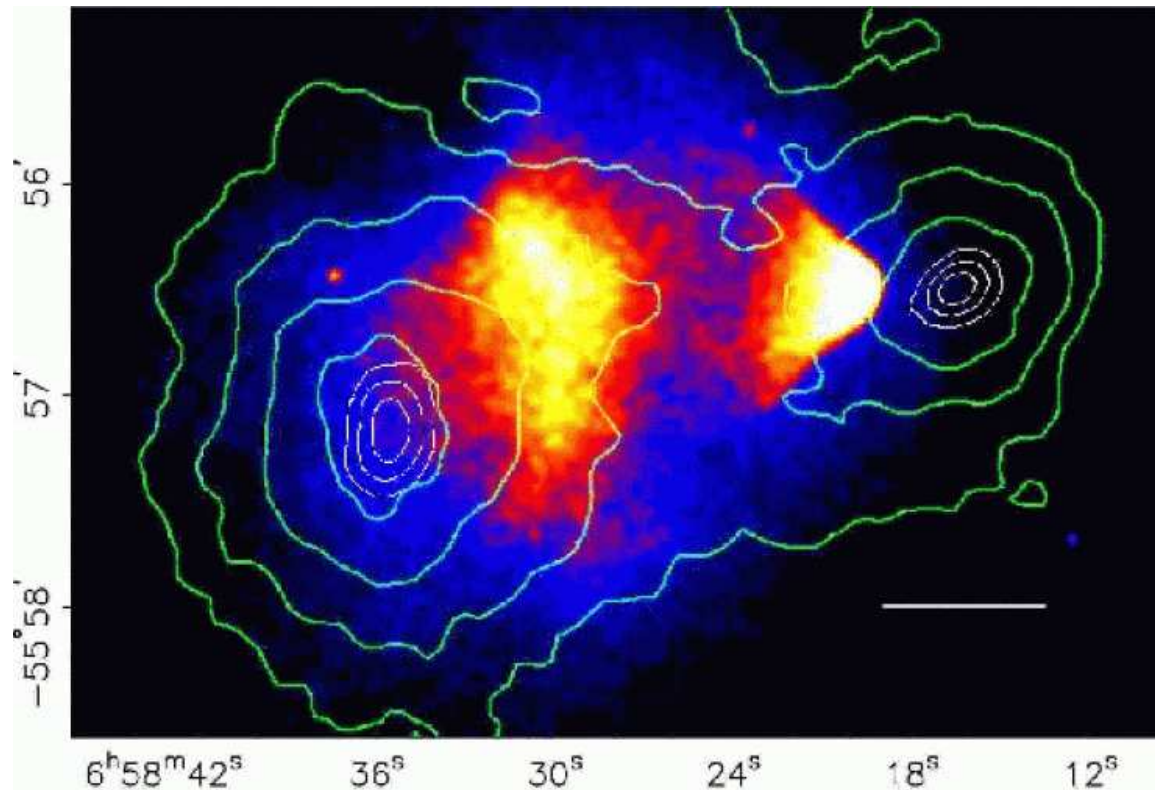


# Kosmiczna kolizja

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 materii międzygwiazdnej.

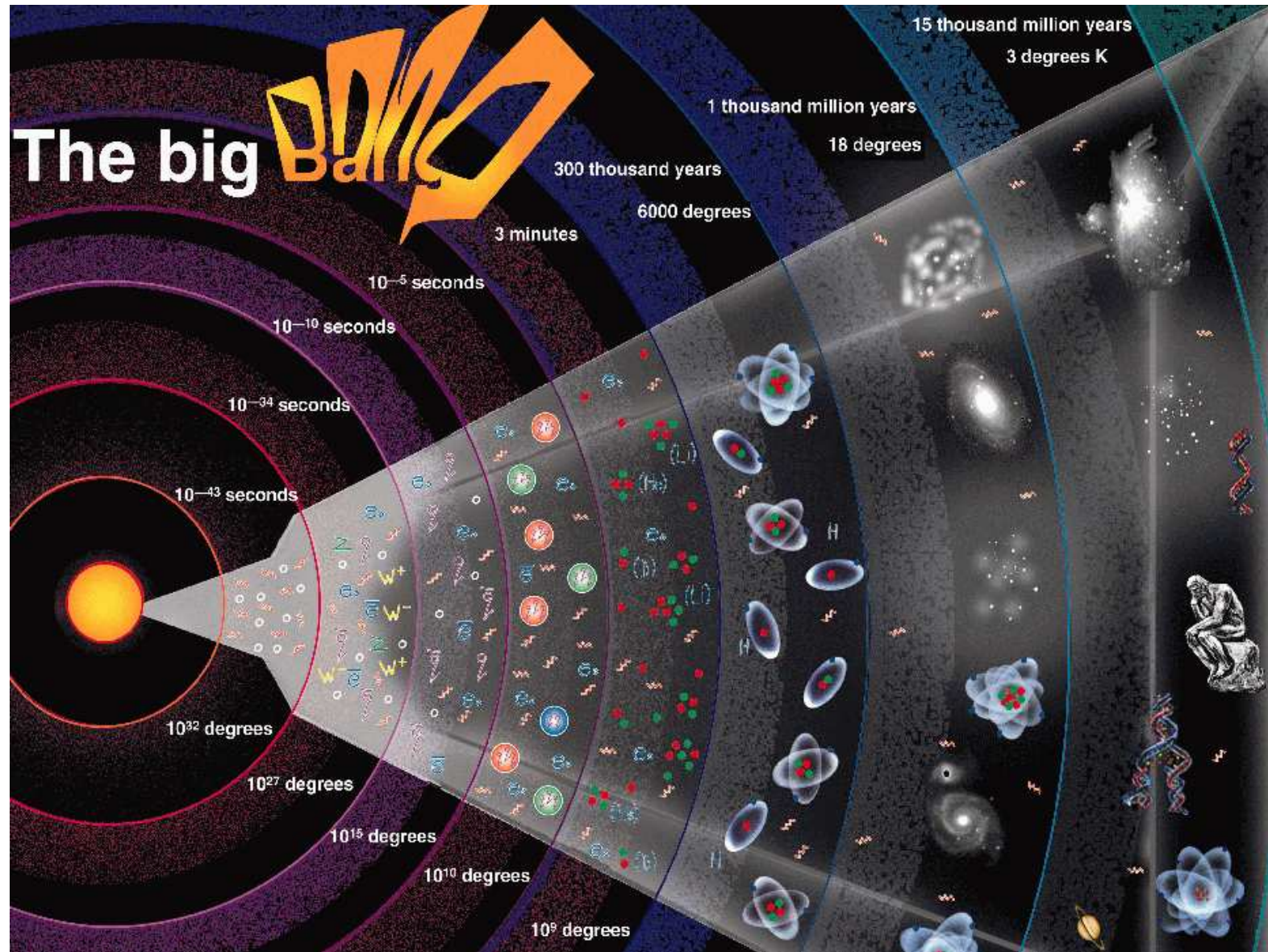




# Kosmiczna kolizja



# Ewolucja Wszechświata

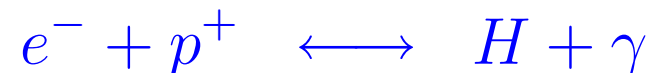


# Promieniowanie tła

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.

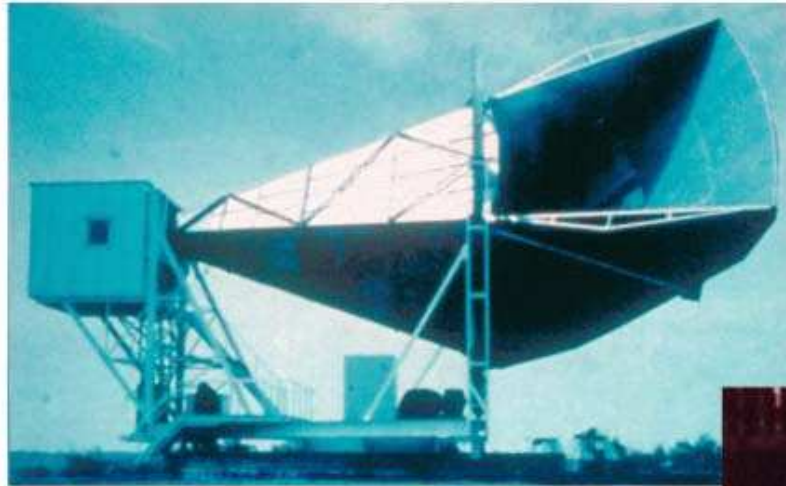
$$T \sim 5 K$$



# Promieniowanie tła

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

## DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

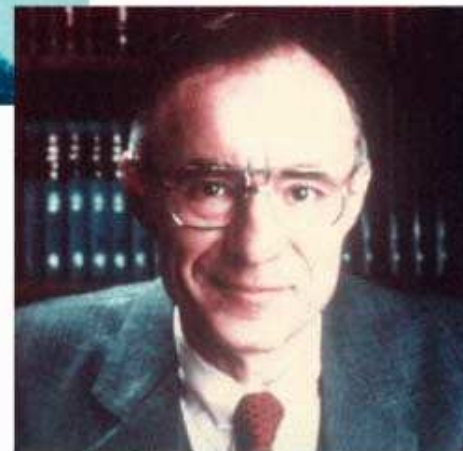


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

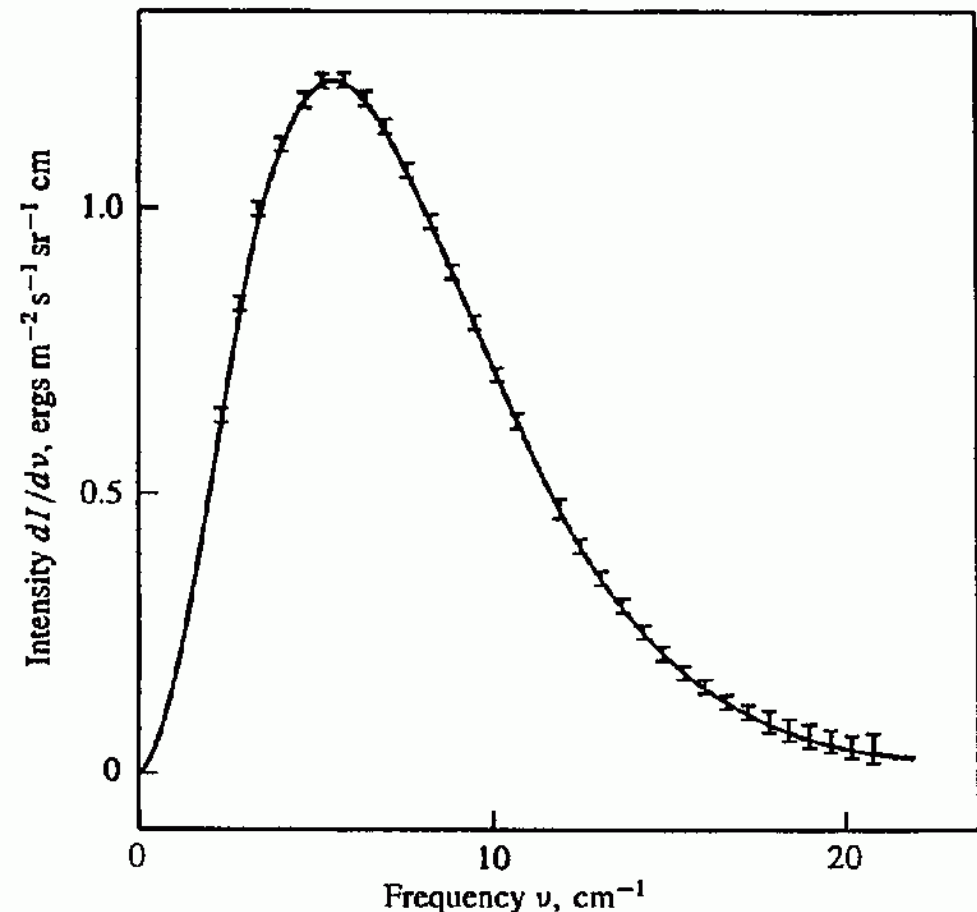
# Promieniowanie tła

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

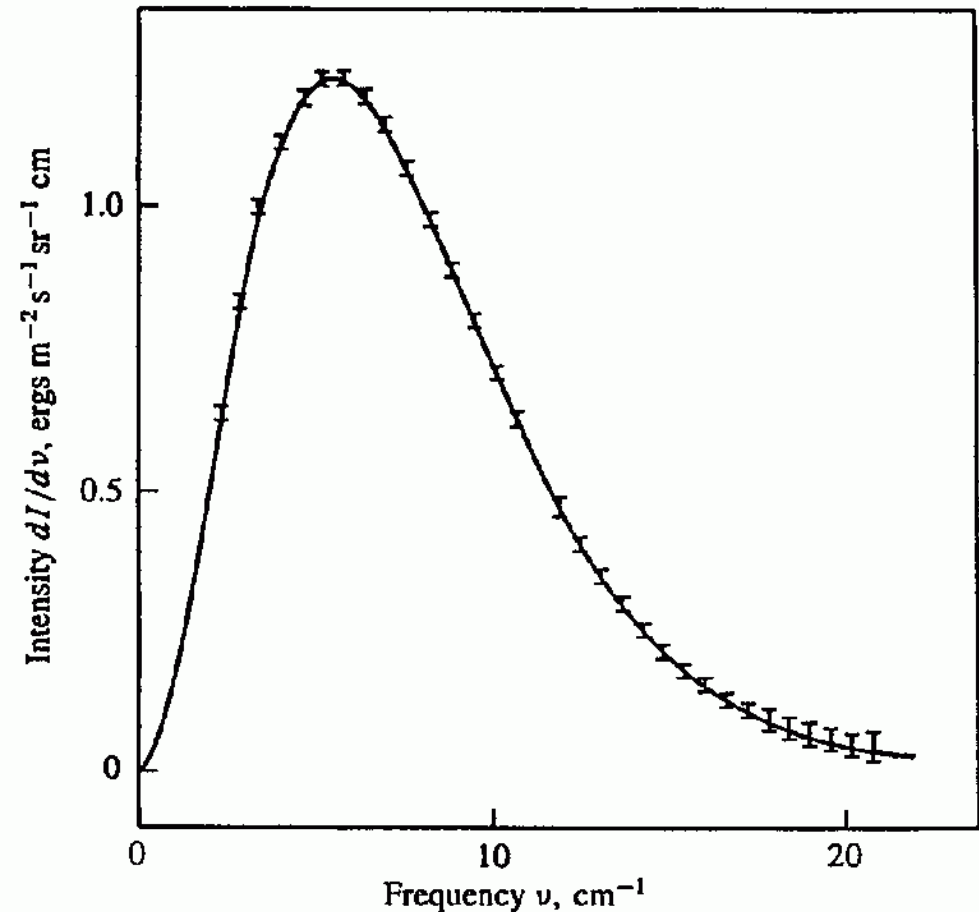
zostało odkryte w 1965 roku przez **A.A.Penzisa** i **R.W.Wilsona**.

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.

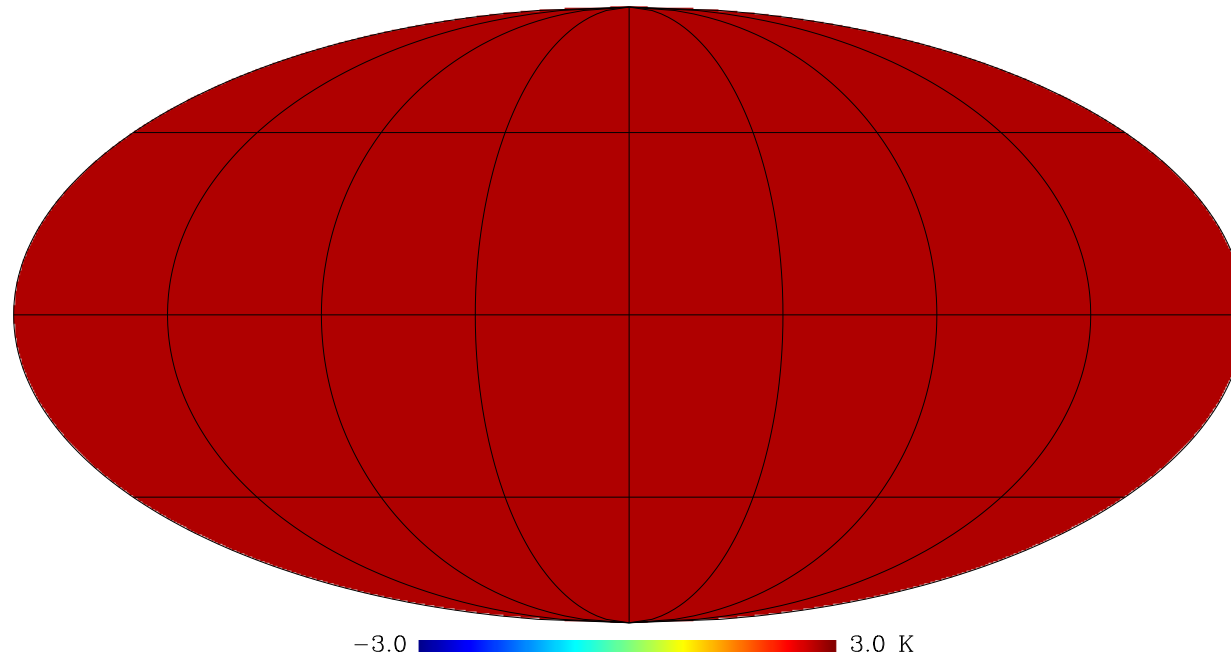
Wyniki z satelity **COBE**: (1999)





# Promieniowanie tła

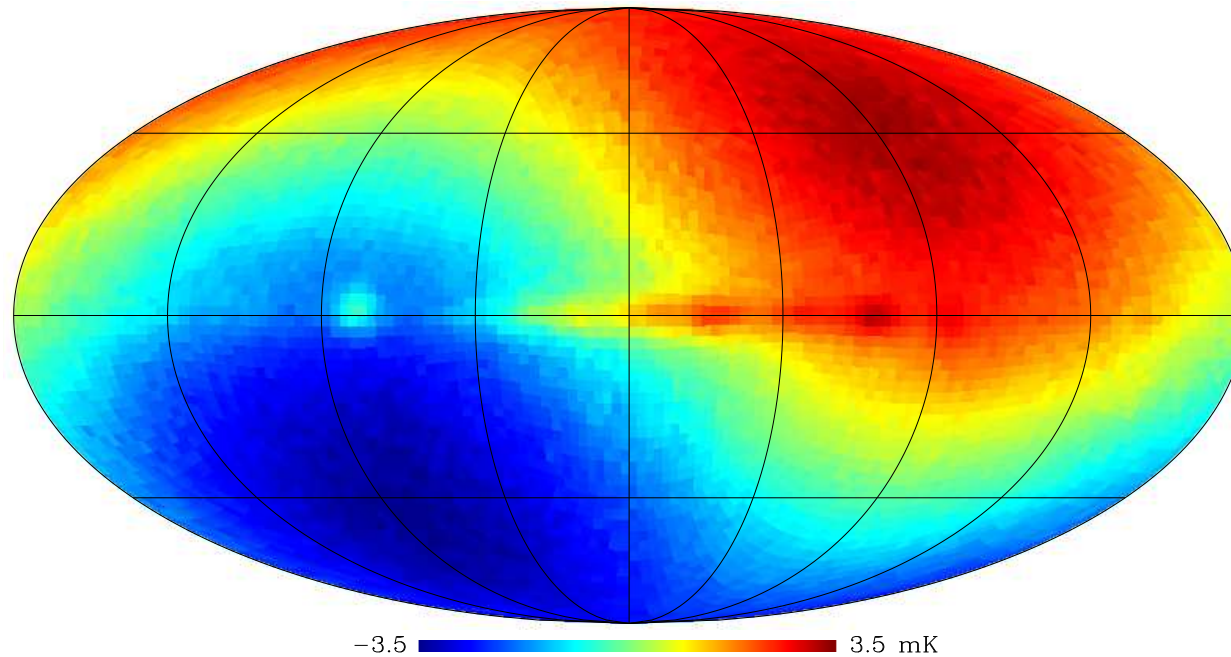
W pierwszym przybliżeniu  $(\Delta T \sim 1K)$



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

# Promieniowanie tła

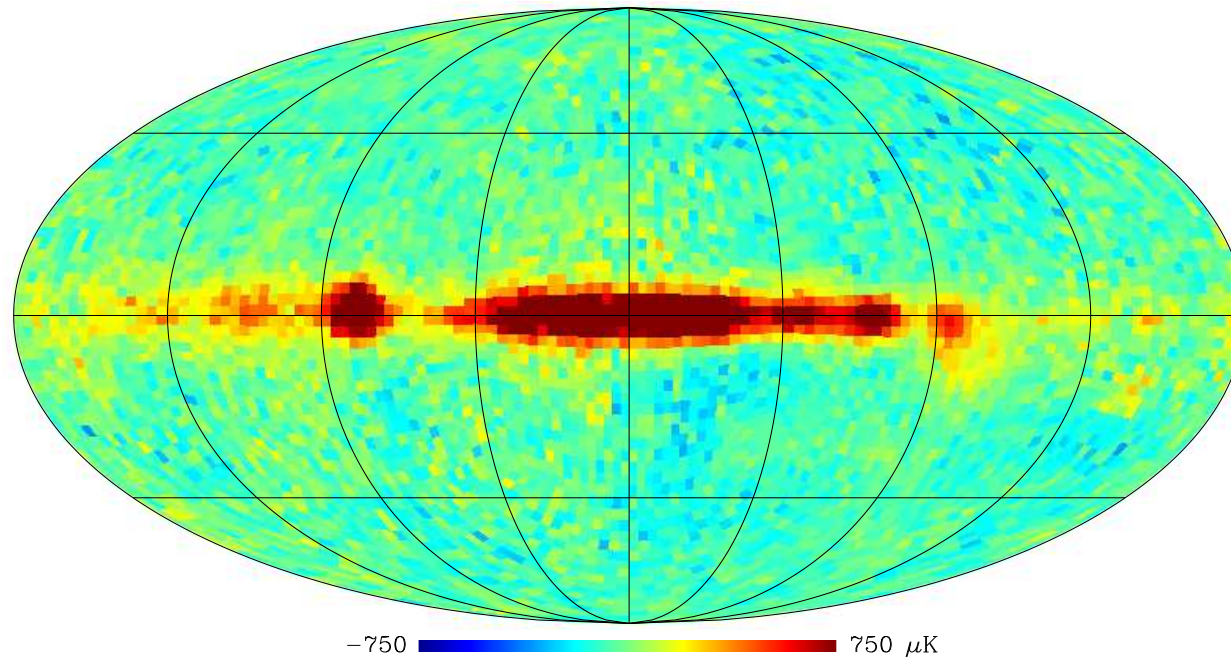
Jednak gdy przyjdziemy się bliżej ( $\Delta T \sim 1mK$ )



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

# Promieniowanie tła

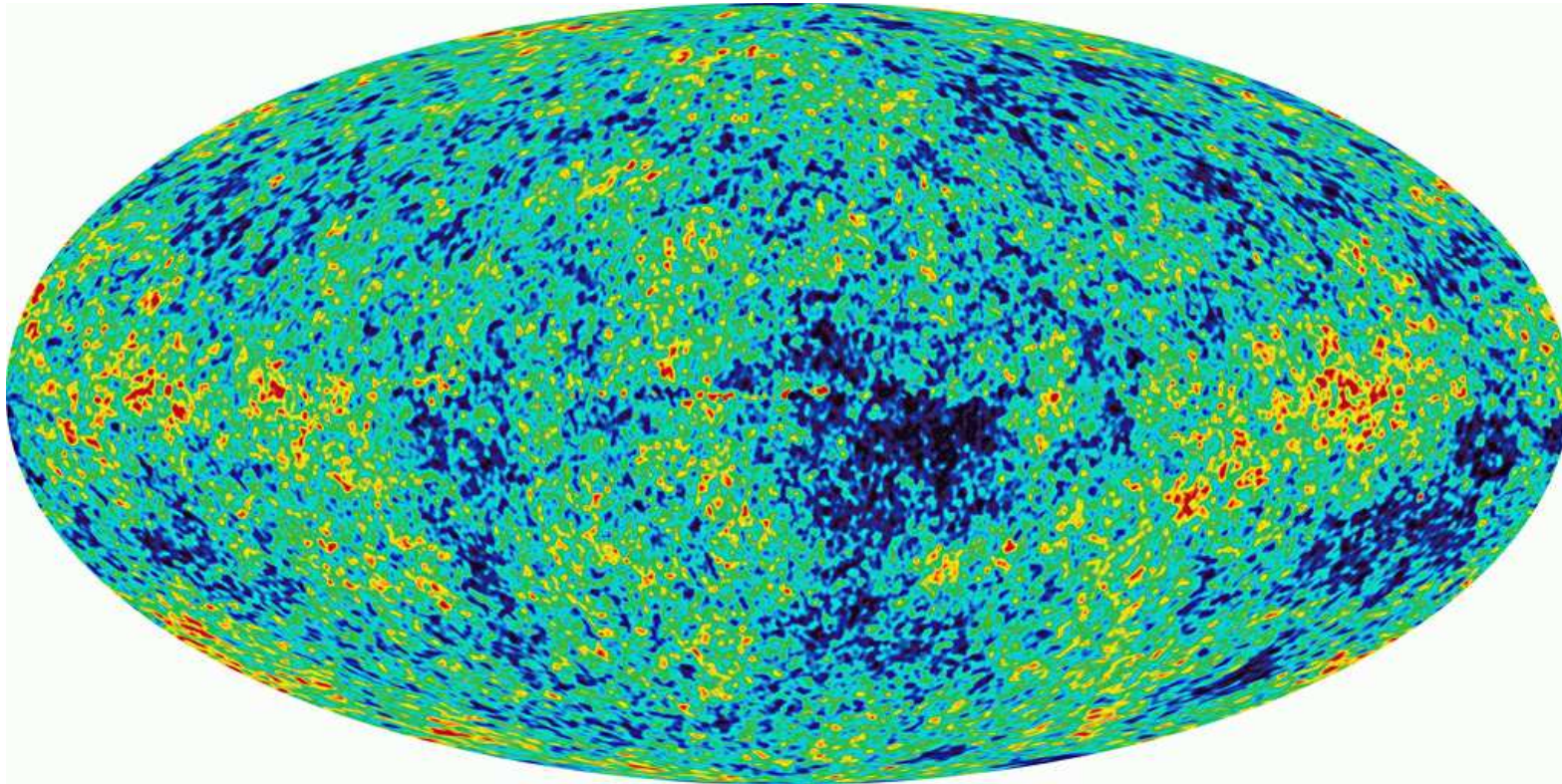
Odejmując wpływ efektu Dopplera ( $\Delta T \sim 200 \mu K$ )



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

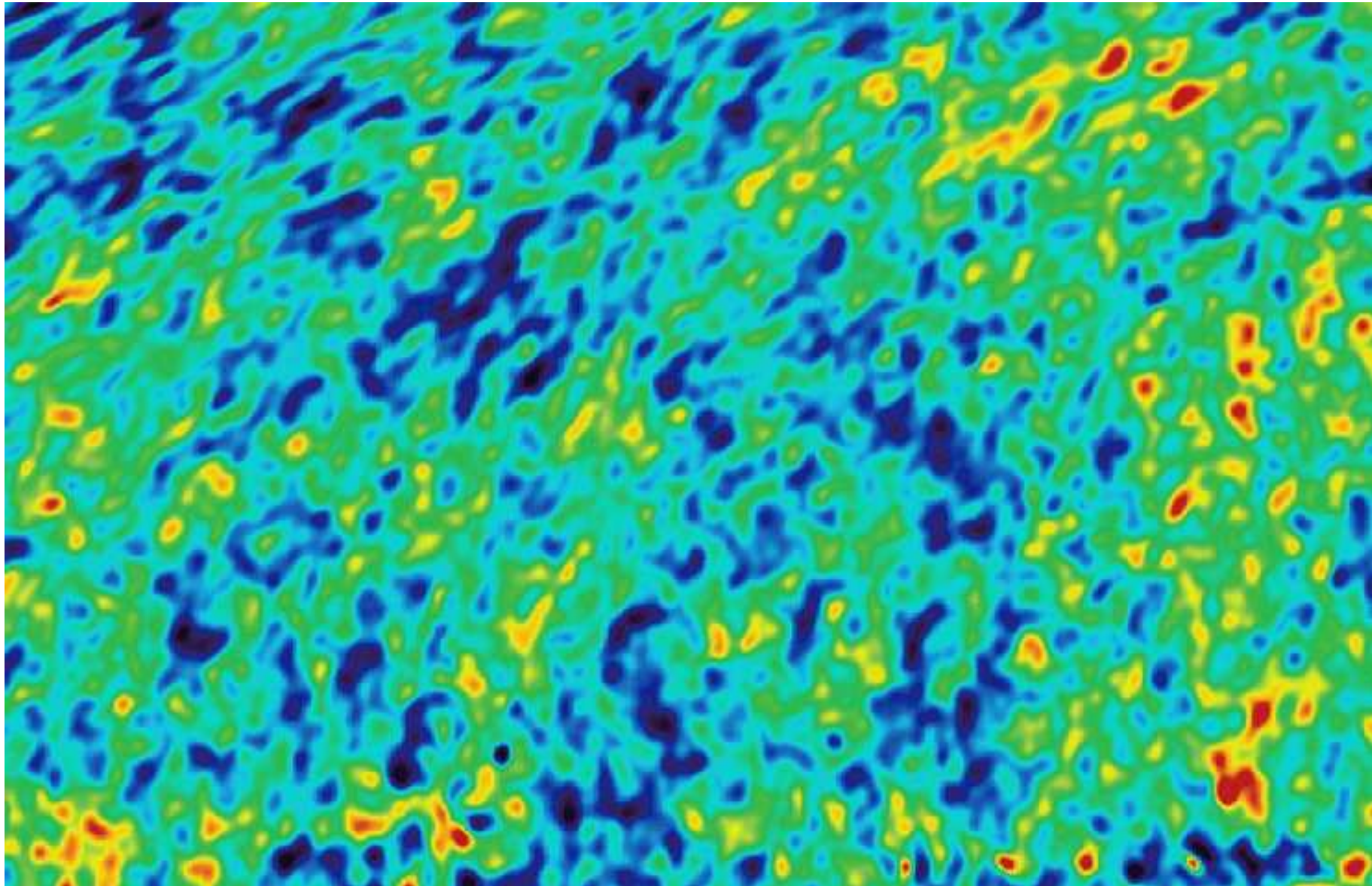
# Promieniowanie tła

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?

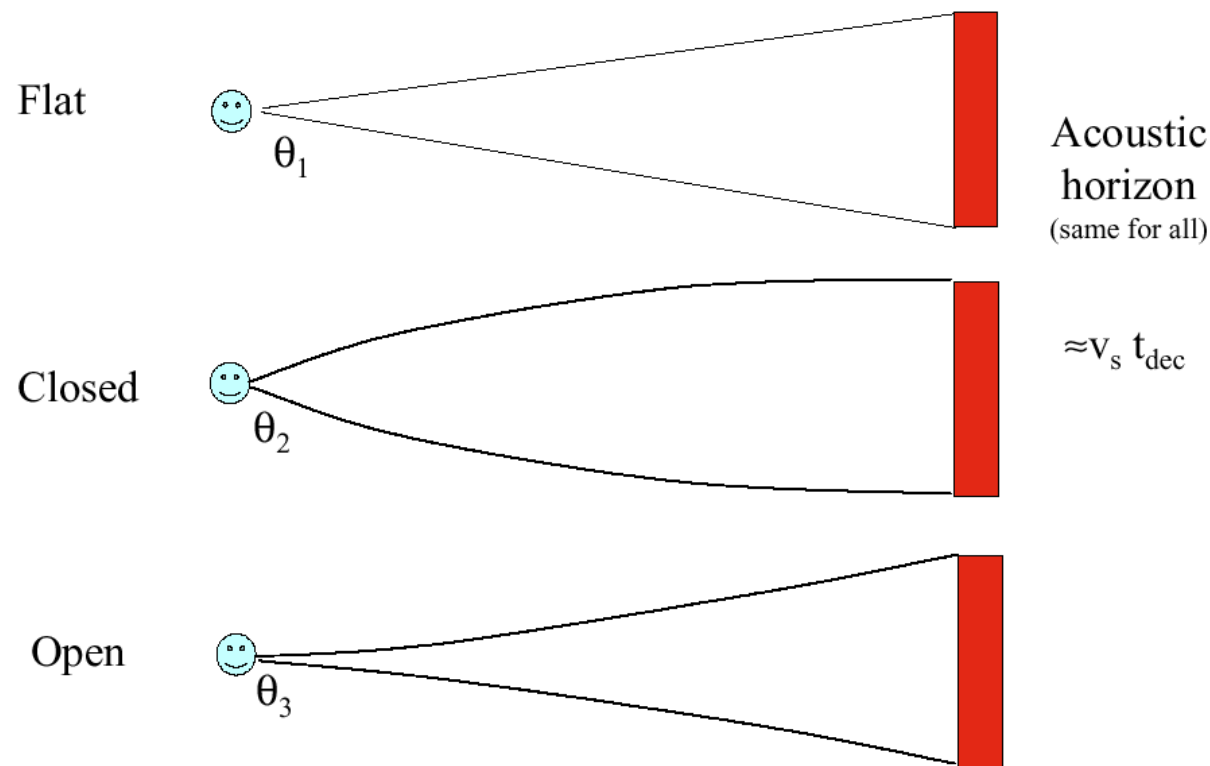
# Promieniowanie tła



# Promieniowanie tła

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

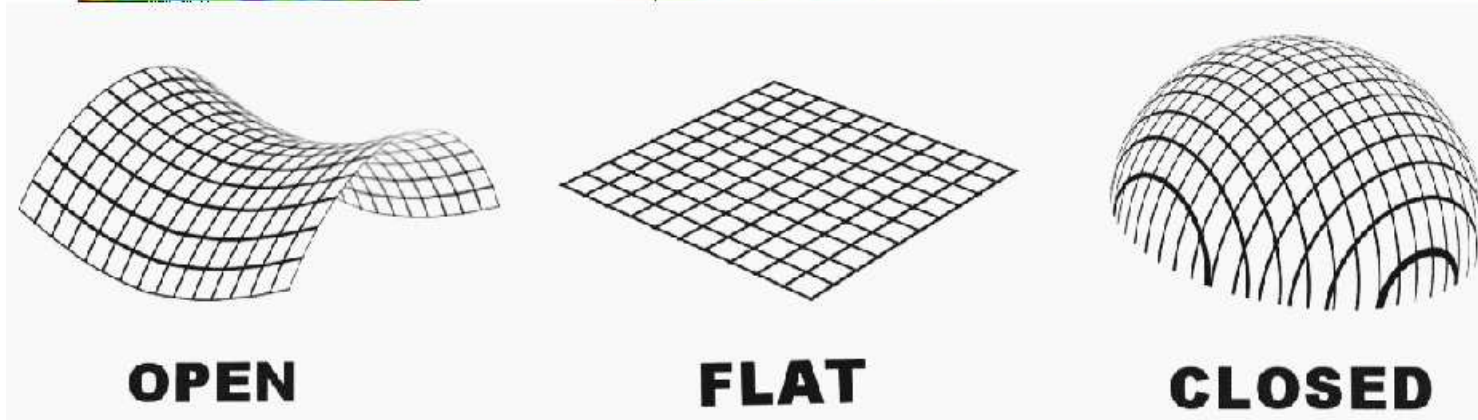
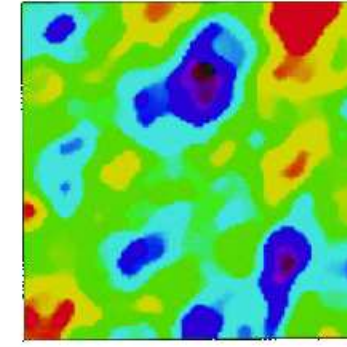
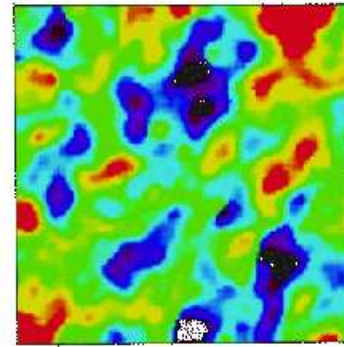
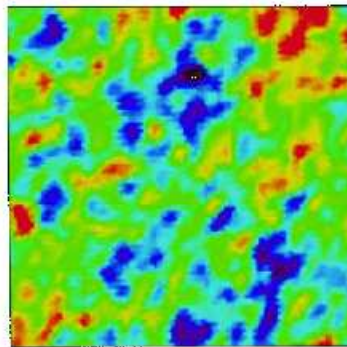
Rozmiary jakie **obecnie** obserwujemy zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



# 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!**

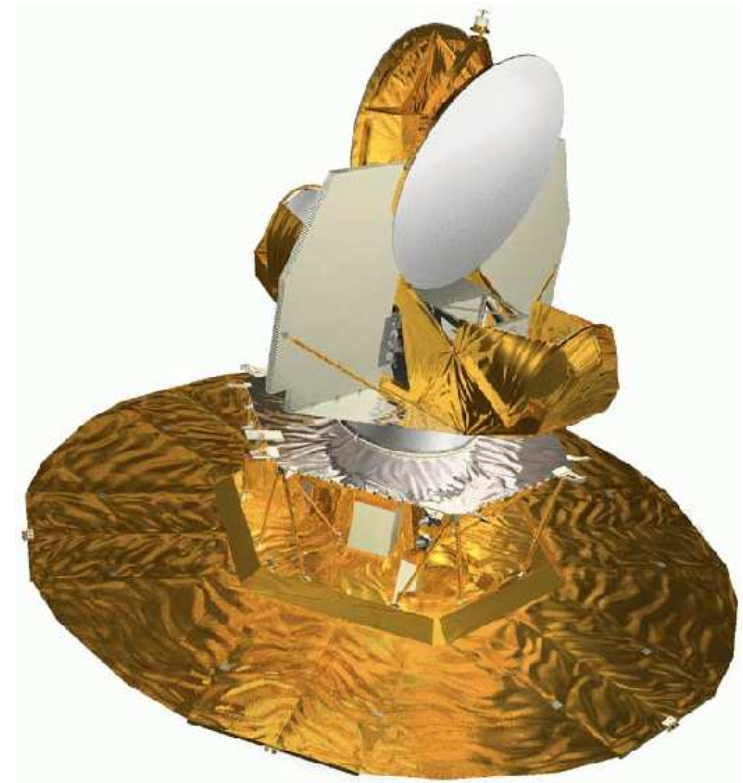


# WMAP

## 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.





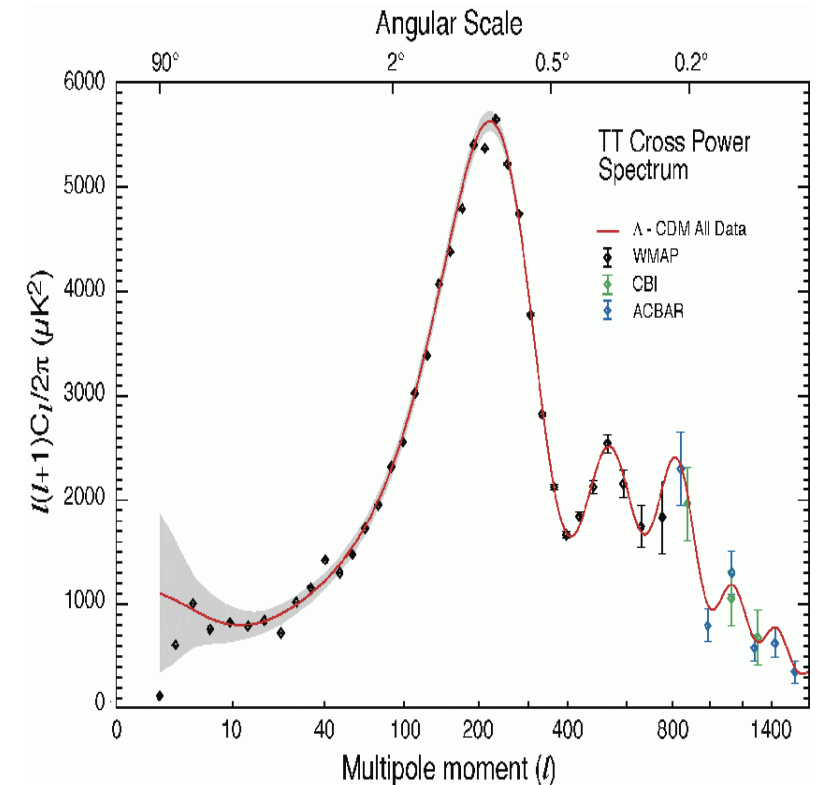
# WMAP

## 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

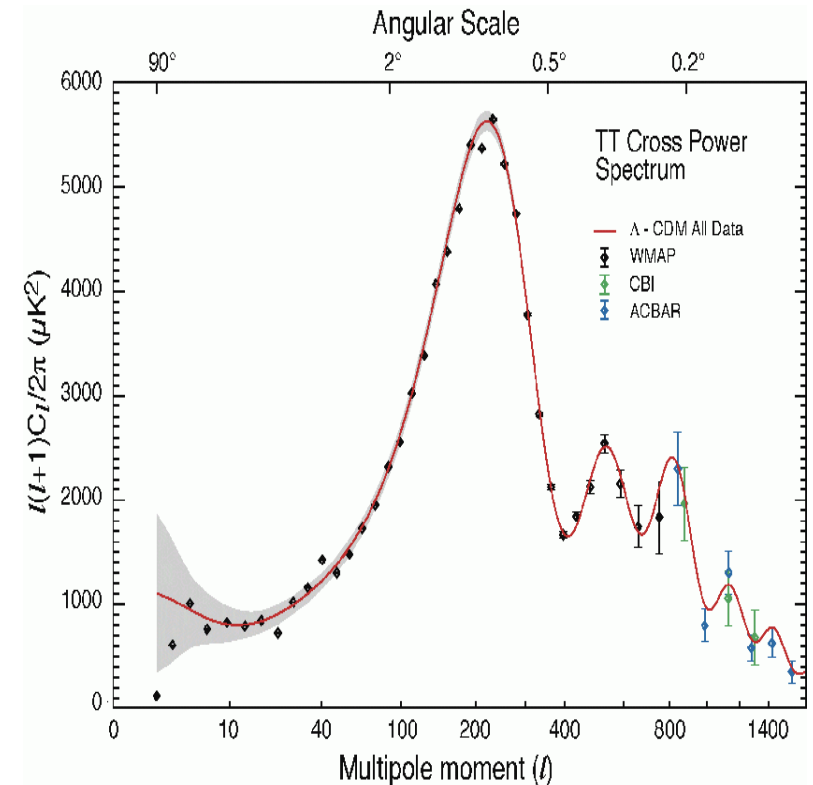
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.  
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

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 błędu zgodna z gęstością krytyczną)



# Ewolucja Wszechświata

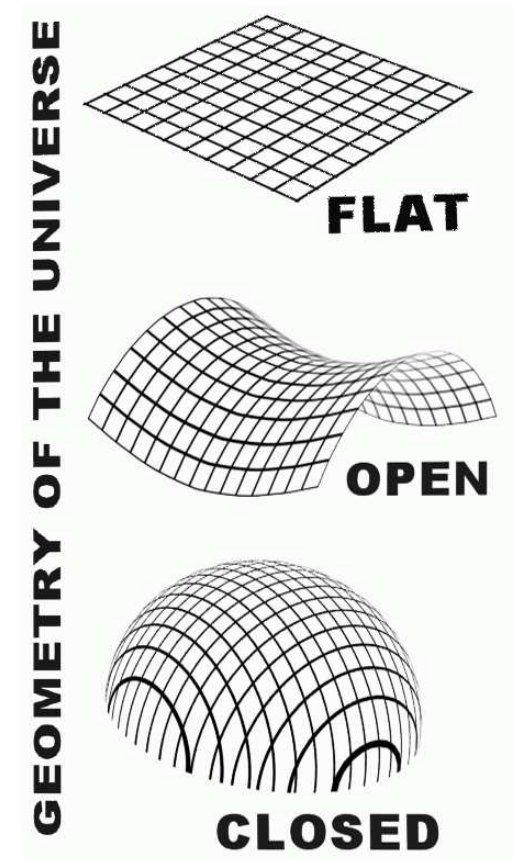
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** wiąże się ściśle z **krzywizną** przestrzeni i zależy od **gęstości** materii  $\rho$ .

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

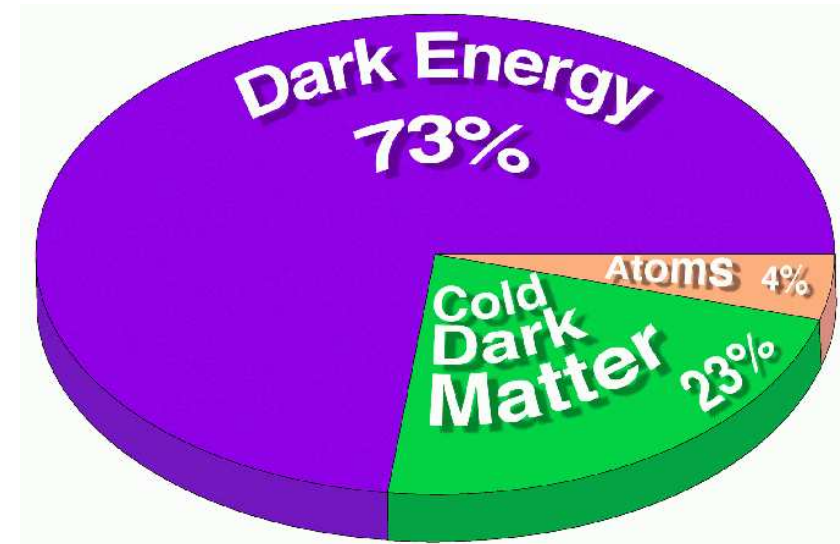


Pomijając wkład od stałej kosmologicznej!

# Wyniki

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **4%** Wszechświata.
- **23%** stanowi **ciemna materia**...
- **73%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )



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

Wiek Wszechświata:  $T = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr}$

# 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  
Wszechświat zbudowany jest z **materii**  
 $\Rightarrow$  jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?  
**Wiemy już, że wymagało to złamania symetrii CP, znacznie silniejszego niż w Modelu Standardowym...**

# 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  
Wszechświat zbudowany jest z **materii**  
 $\Rightarrow$  jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?  
**Wiemy już, że wymagało to złamania symetrii CP, znacznie silniejszego niż w Modelu Standardowym...**
- cząstki o bardzo wysokich energiach w **promieniowaniu kosmicznym**, błyski  $\gamma$ , ...