

Wszechświat cząstek elementarnych

Wykład 14: 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 grawitacyjnych
⇒ 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:

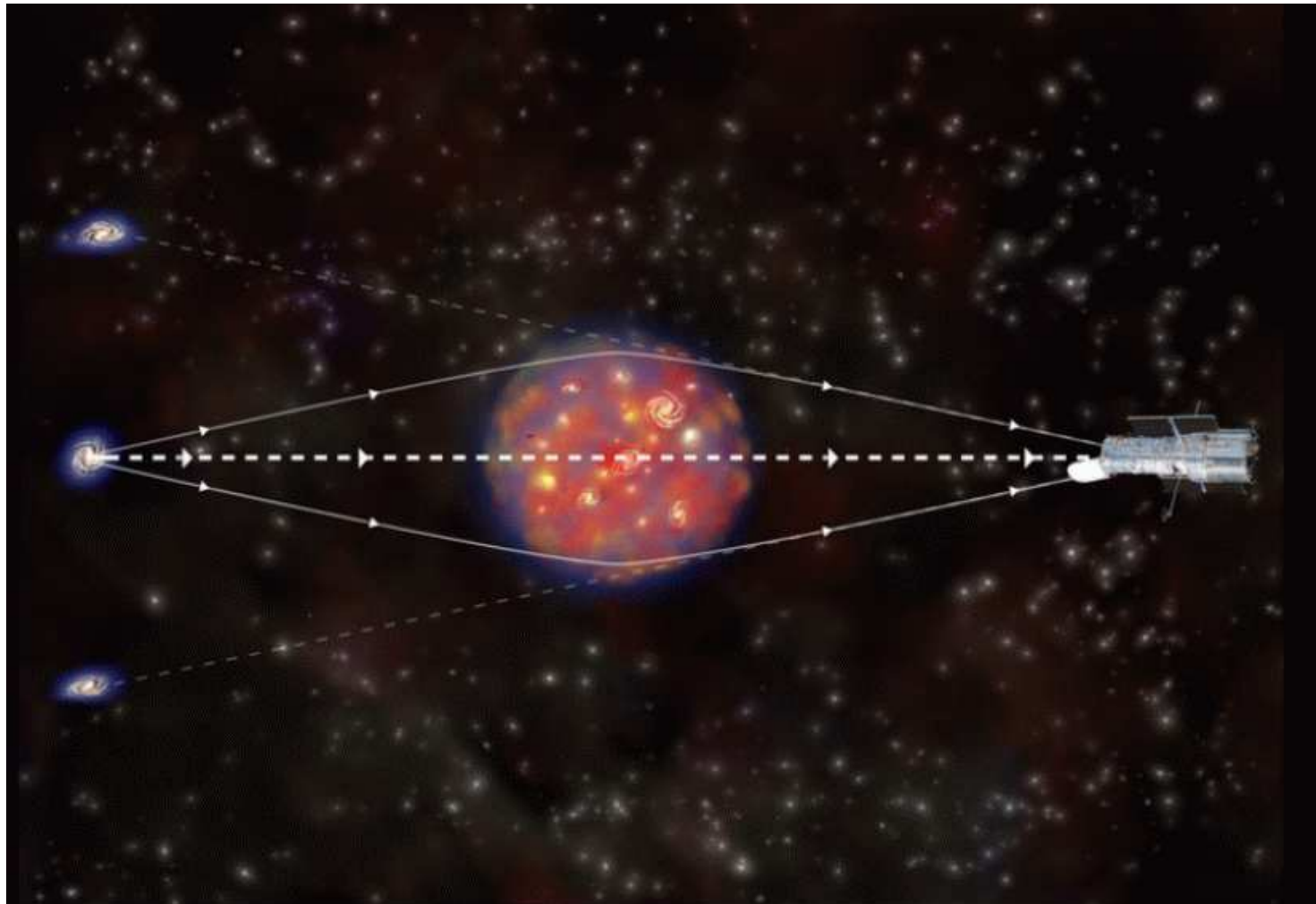
- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

Jednym z głównych kandydatów jest **LSP** - najlżejsza cząstka supersymetryczna, którą mamy nadzieję wkrótce 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 **silne zniekształcenia**, a nawet **wielokrotne obrazy** danego obiektu

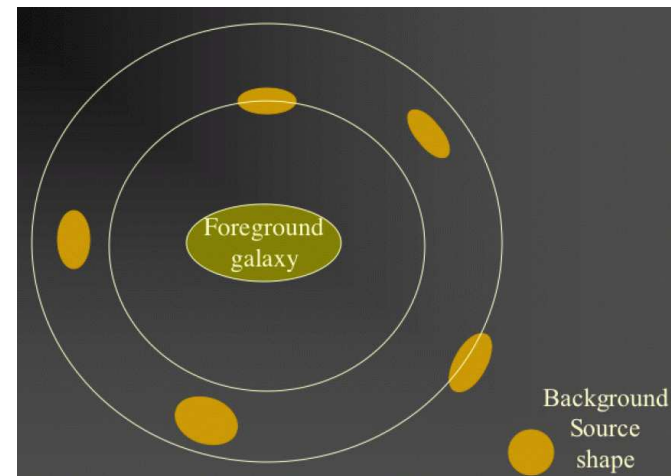
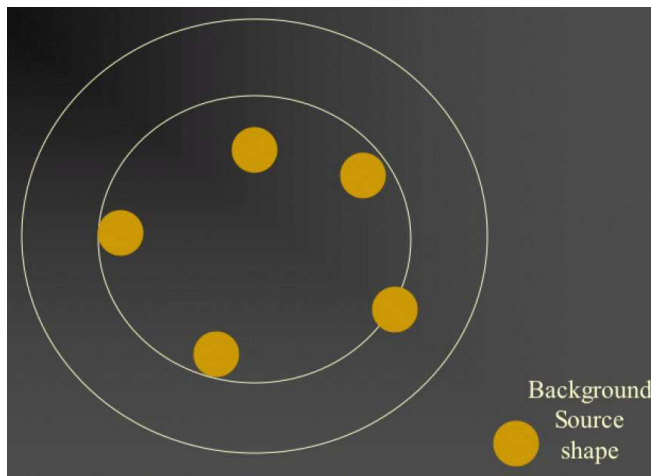
Soczewkowanie grawitacyjne

Silne soczewkowanie grawitacyjne

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **silne zniekształcenia**, a nawet **wielokrotne obrazy** danego obiektu

Słabe soczewkowanie grawitacyjne

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



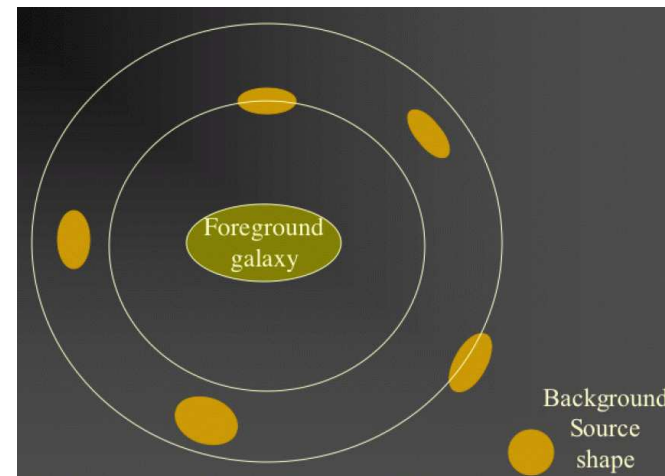
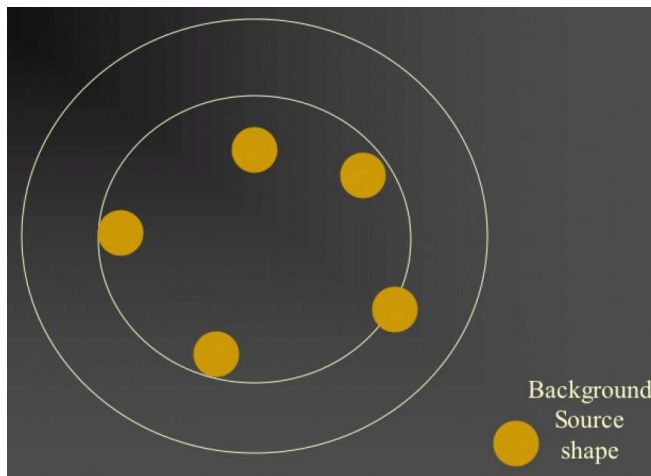
Soczewkowanie grawitacyjne

Silne soczewkowanie grawitacyjne

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **silne zniekształcenia**, a nawet **wielokrotne obrazy** danego obiektu

Słabe soczewkowanie grawitacyjne

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



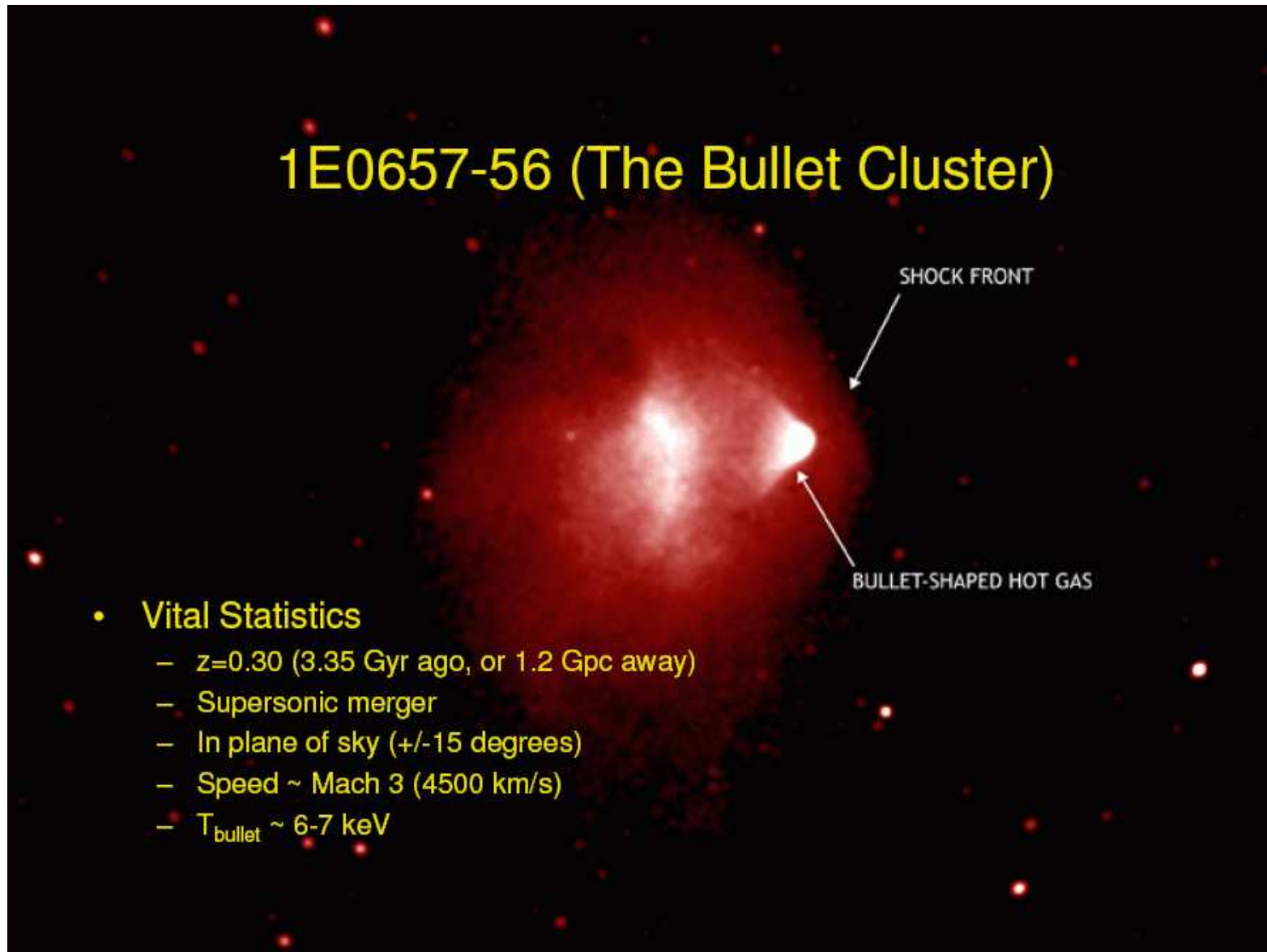
W obu przypadkach możemy wnioskować o **masie** obiektów znajdujących się na drodze promieni świetlnych.

Kosmiczna kolizja

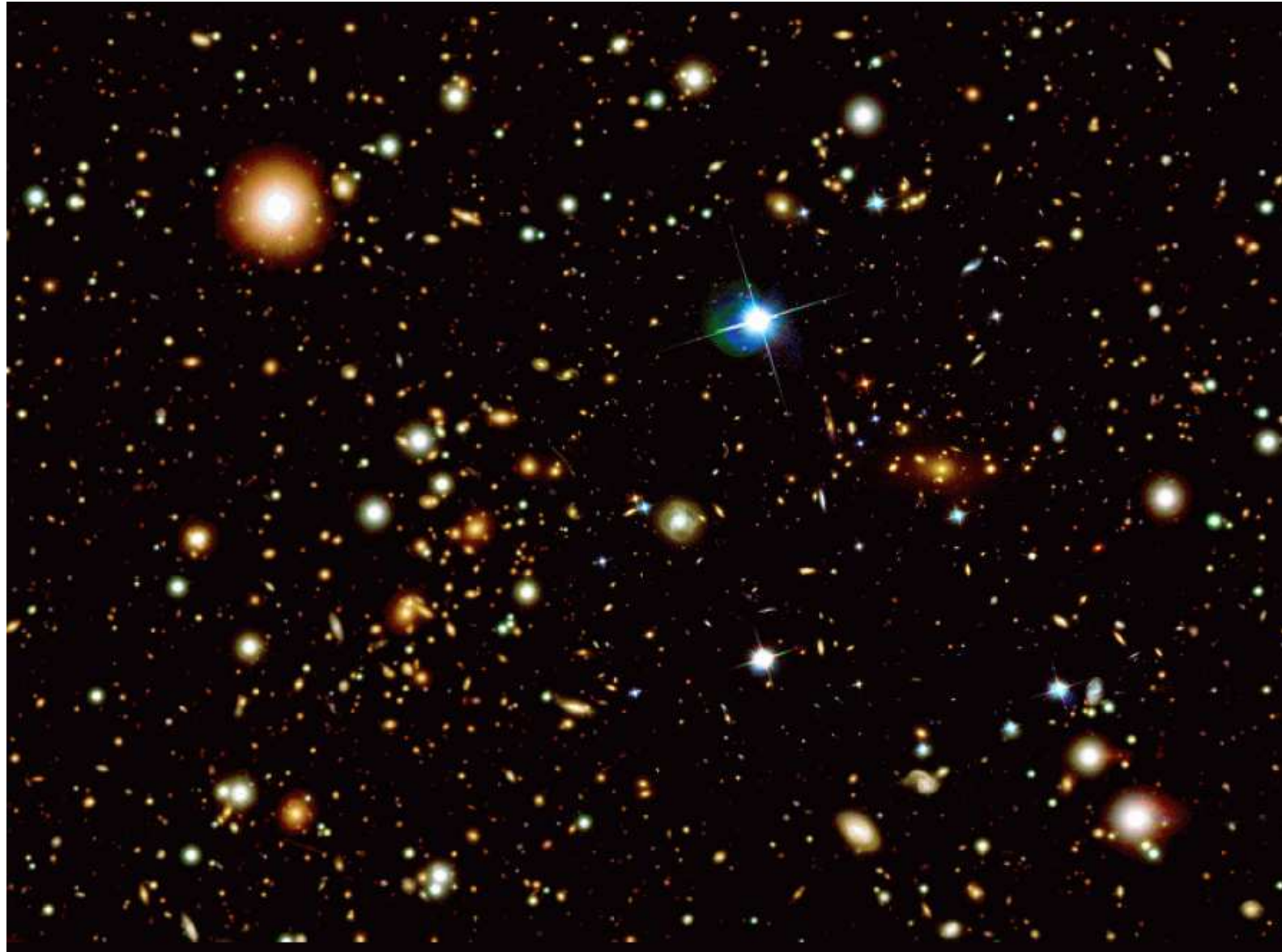
Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. W ostatnich latach bardzo dokładne pomiary tego promieniowania stały się możliwe dzięki wystrzeleniu teleskopu kosmicznego **Chandra**.



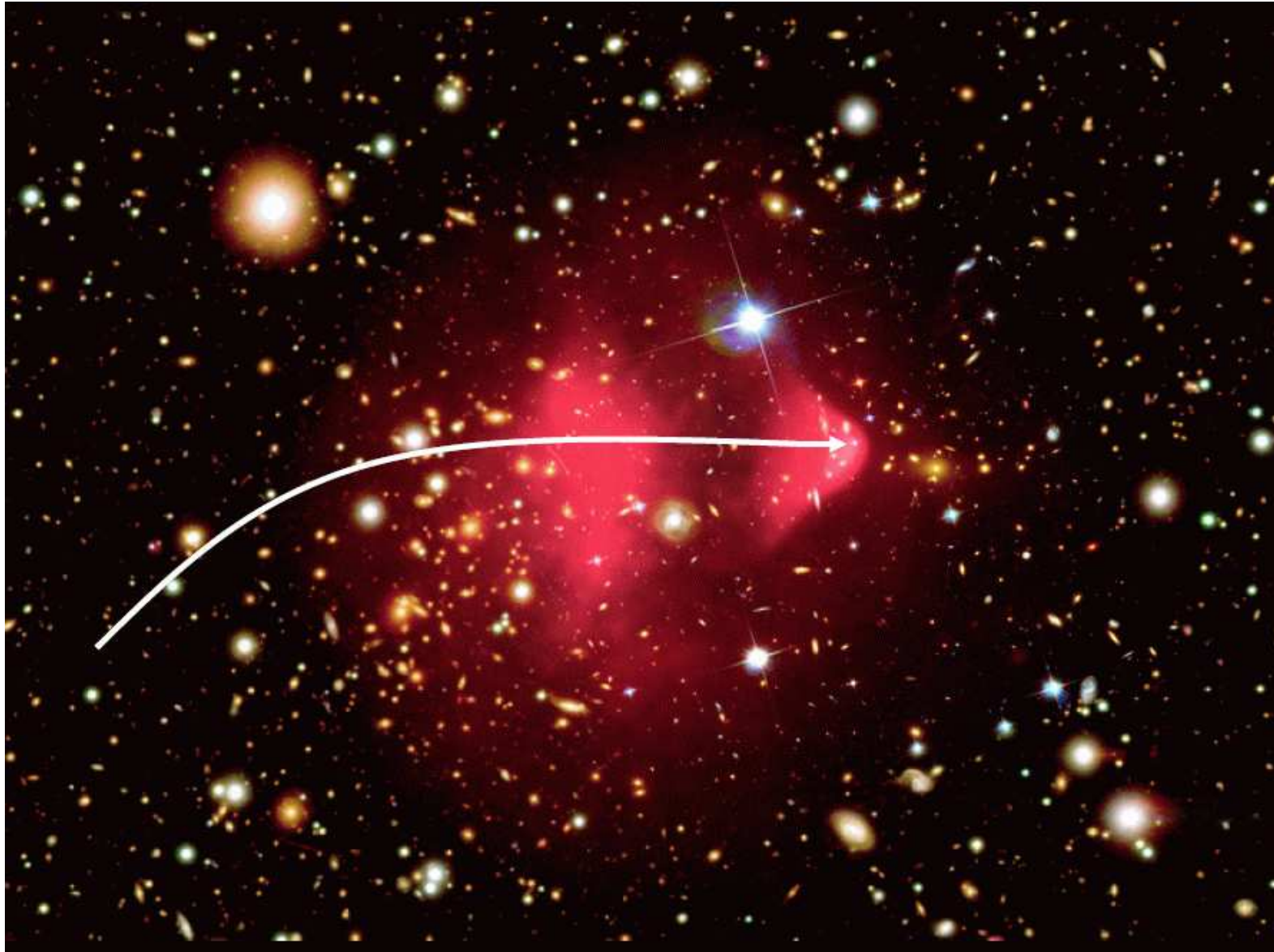
Kosmiczna kolizja



Kosmiczna kolizja

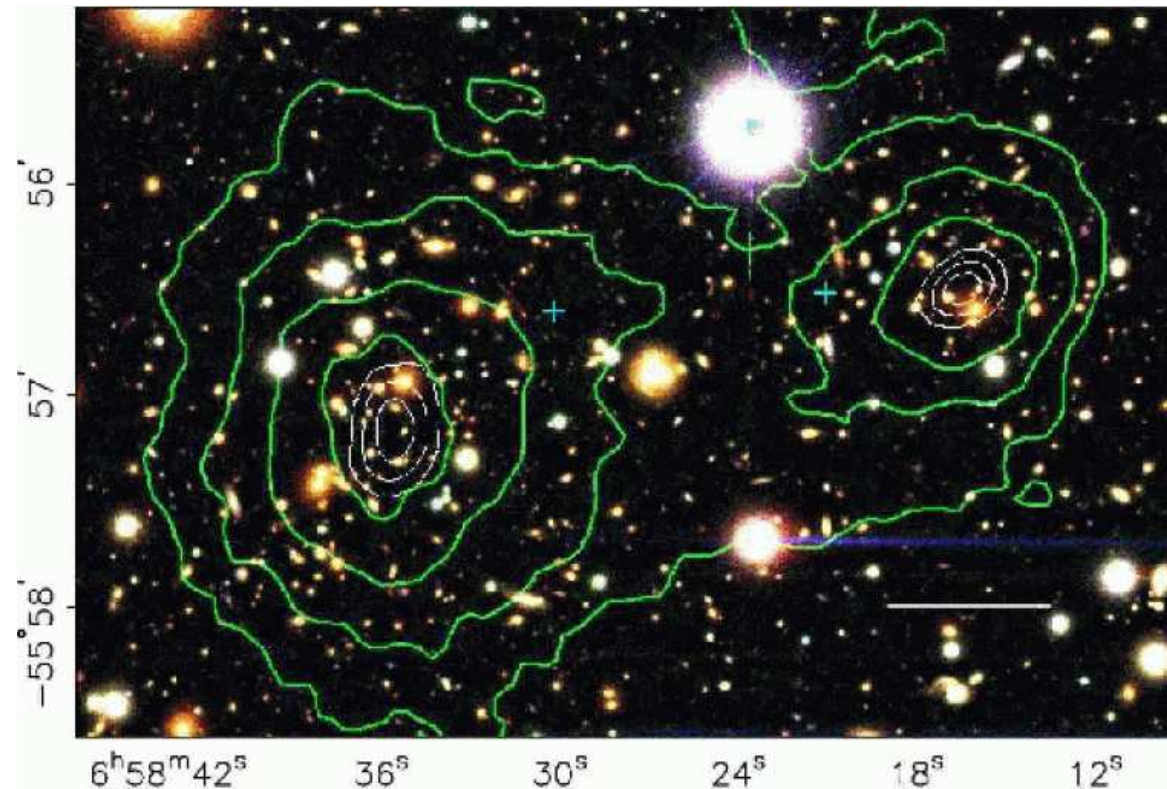


Kosmiczna kolizja



Kosmiczna kolizja

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

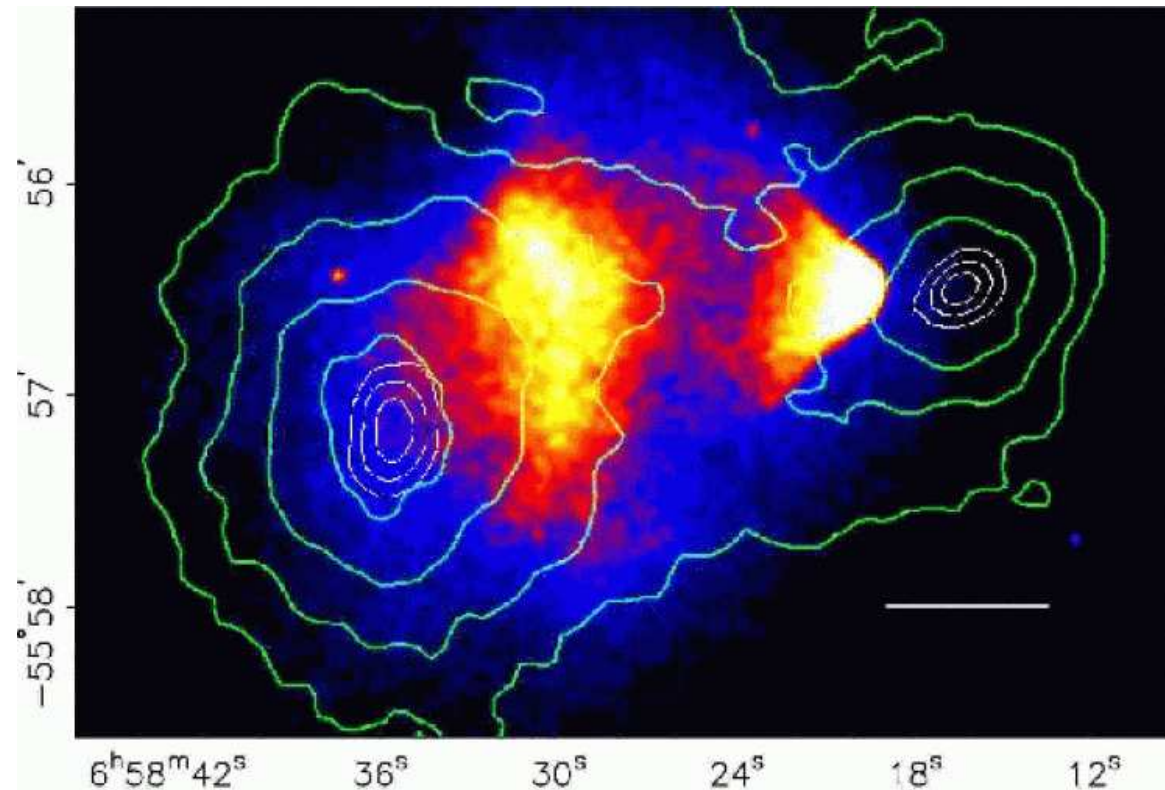


Kosmiczna kolizja

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 materii międzygwiazdnej.



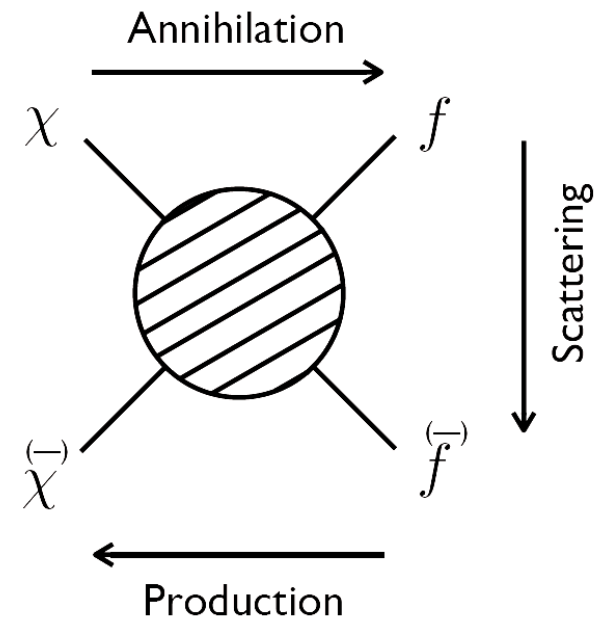
Kosmiczna kolizja



Poszukiwanie Ciemnej Materii

Niezależnie od modelu, możemy poszukiwać cząstek ciemnej materii (DM) 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



Poszukiwanie Ciemnej Materii



WIMP scattering on Earth



WIMP production on Earth



WIMP annihilation in the cosmos

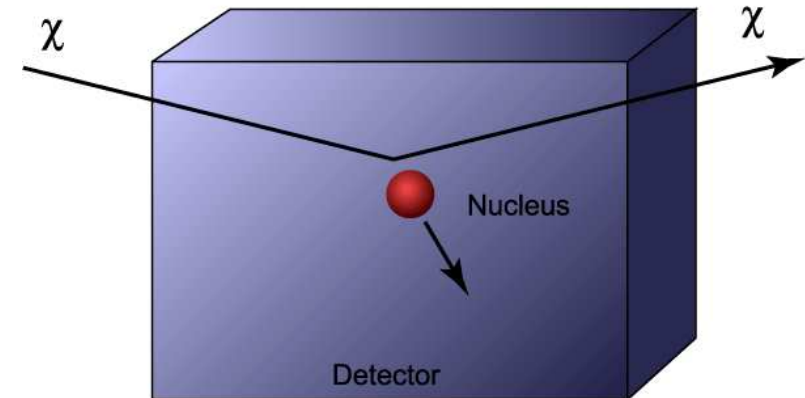
Pomiary bezpośrednie

Wiele eksperymentów na Ziemi próbuje “złapać” otaczające nas cząstki ciemnej materii.

Jest to jednak bardzo trudne bo oddziałują one niezwykle słabo...

Ruch Ziemi dookoła Słońca moduluje naszą prędkość względem ciemnej materii wypełniającej Galaktykę
 ⇒ powinien wpływać na częstość rejestrowanych przypadków

Eksperyment **DAMA** zarejestrował tego typu oscylacje. **Nie potwierdzone przez inne eksperymenty...**



Pomiary bezpośrednie

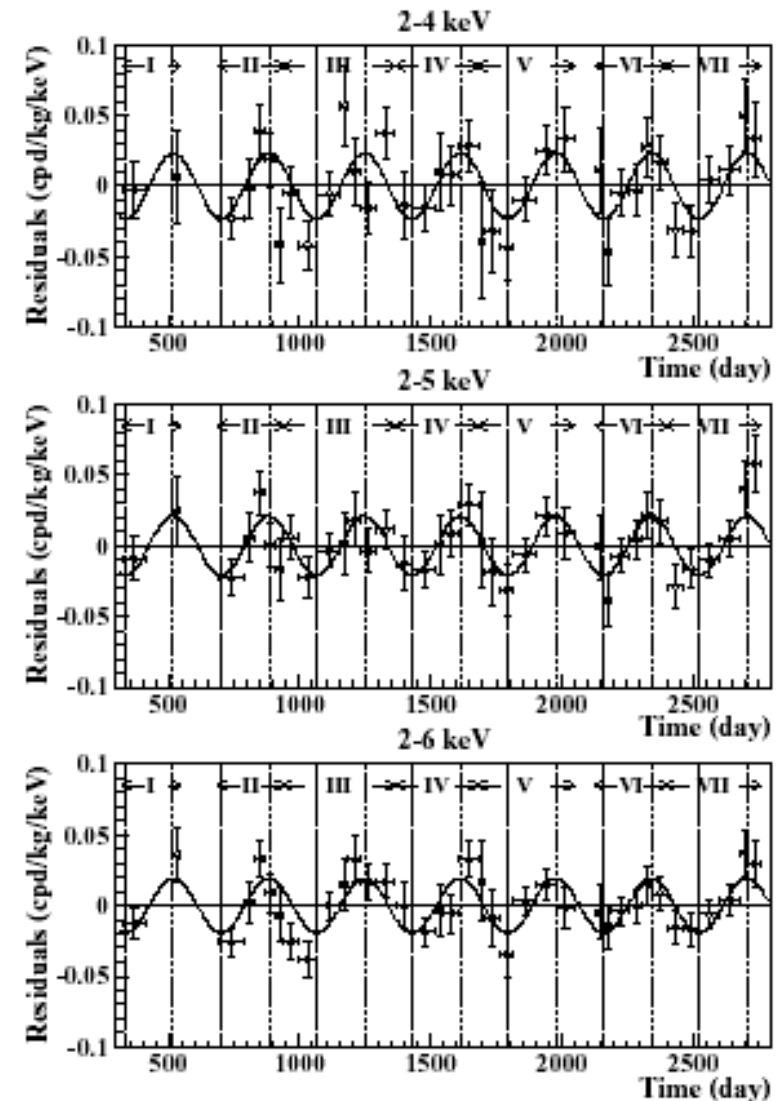
Wiele eksperymentów na Ziemi próbuje “złapać” otaczające nas cząstki ciemnej materii.

Jest to jednak bardzo trudne bo oddziałują one niezwykle słabo...

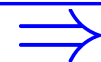
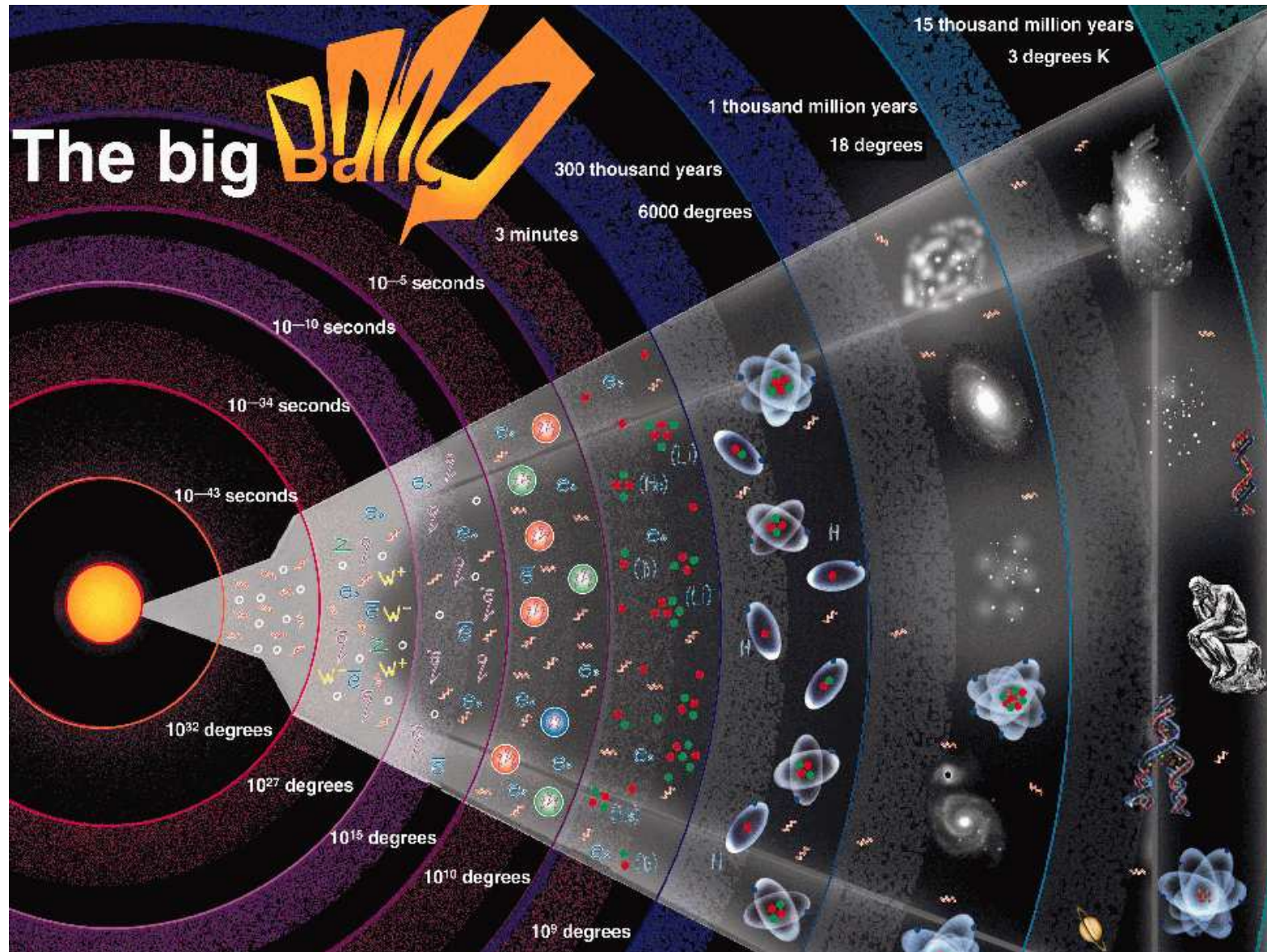
Ruch Ziemi dookoła Słońca moduluje naszą prędkość względem ciemnej materii wypełniającej Galaktykę

⇒ powinien wpływać na częstość rejestrowanych przypadków

Eksperyment **DAMA** zarejestrował tego typu oscylacje. **Nie potwierdzone przez inne eksperymenty...**



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)**

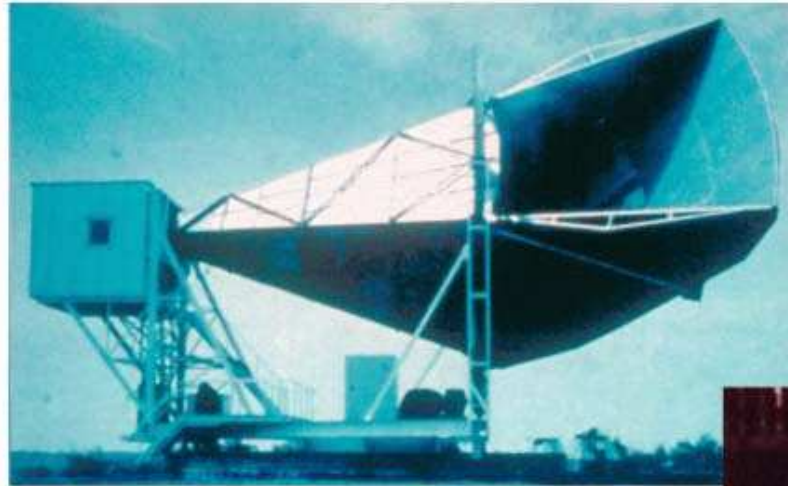
Rozkład widmowy promieniowania powinien odpowiadać rozkładowi **promieniowania ciała doskonale czarnego**.

$$T \sim 5 K$$

Promieniowanie tła

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

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

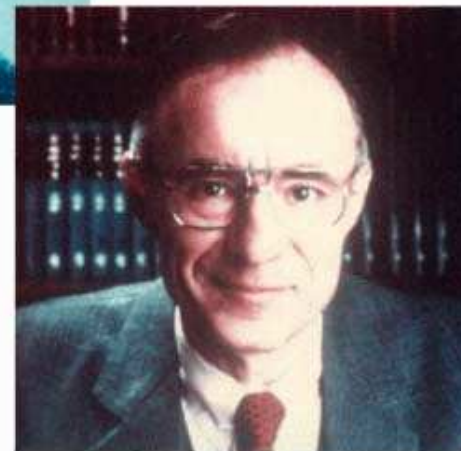


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

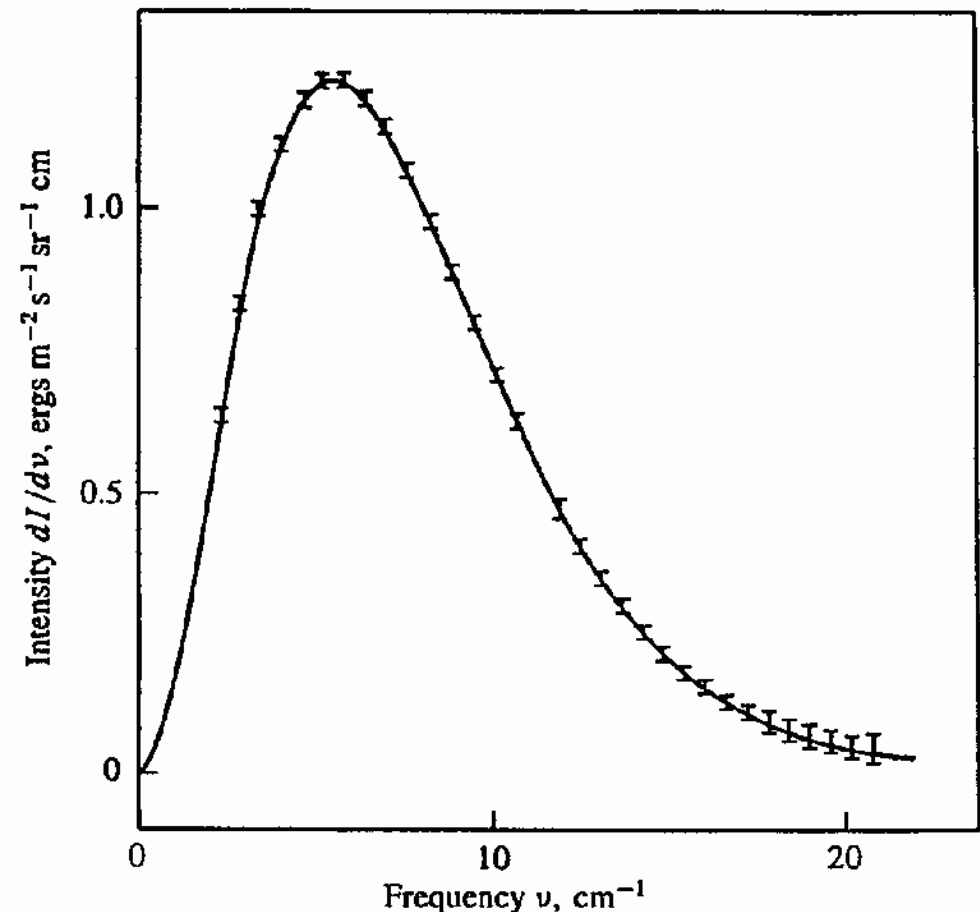
Promieniowanie tła

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

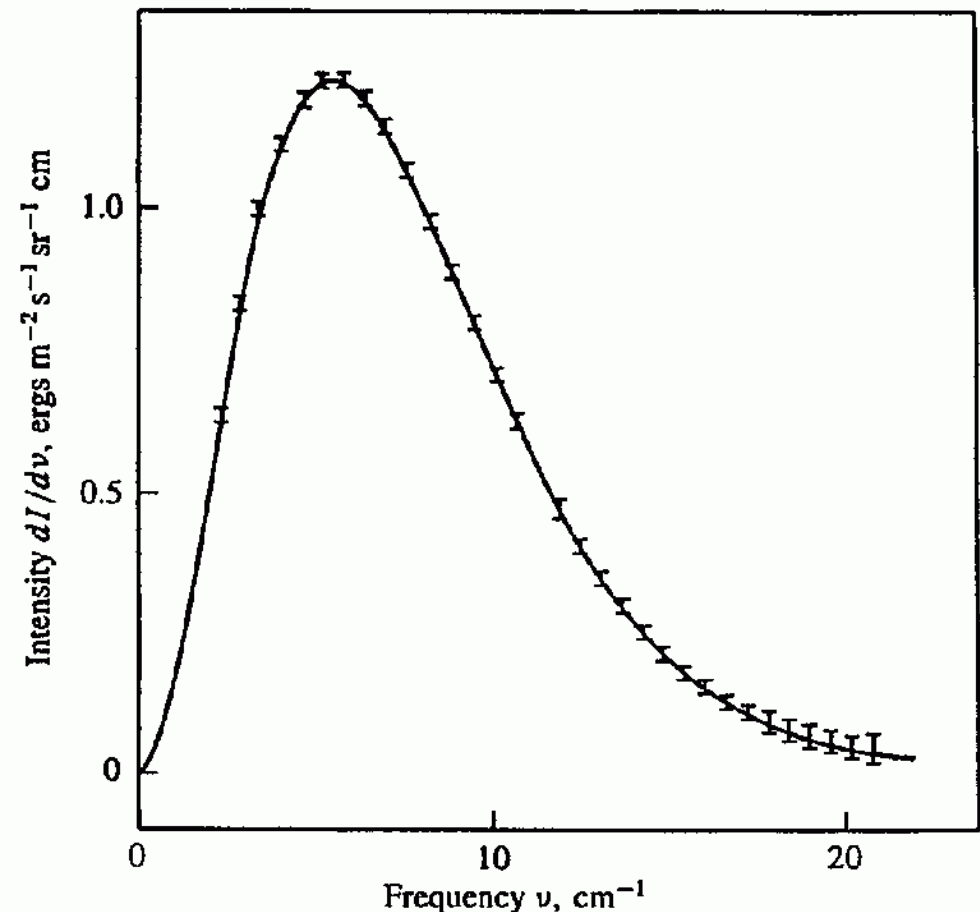
zostało odkryte w 1965 roku przez **A.A.Penzisa** i **R.W.Wilsona**.

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

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

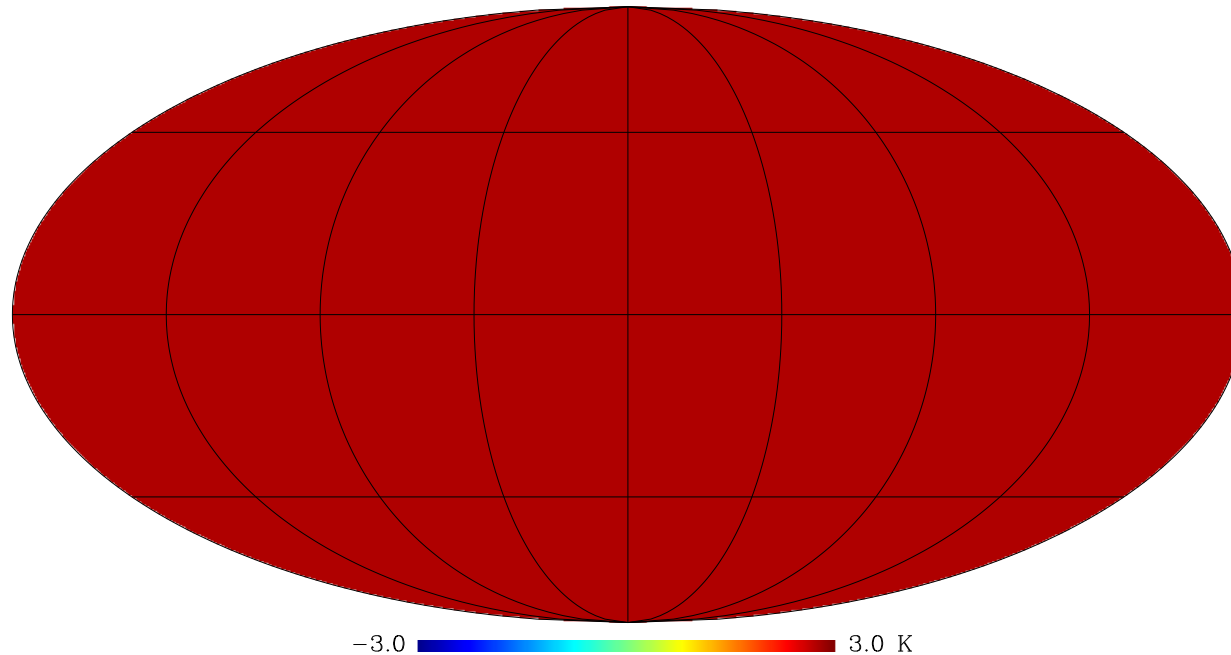
Obserwacja **CMB** była rozstrzygającym dowodem **Wielkiego Wybuchu** i "pogrzebała" model statycznego Wszechświata.

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



Promieniowanie tła

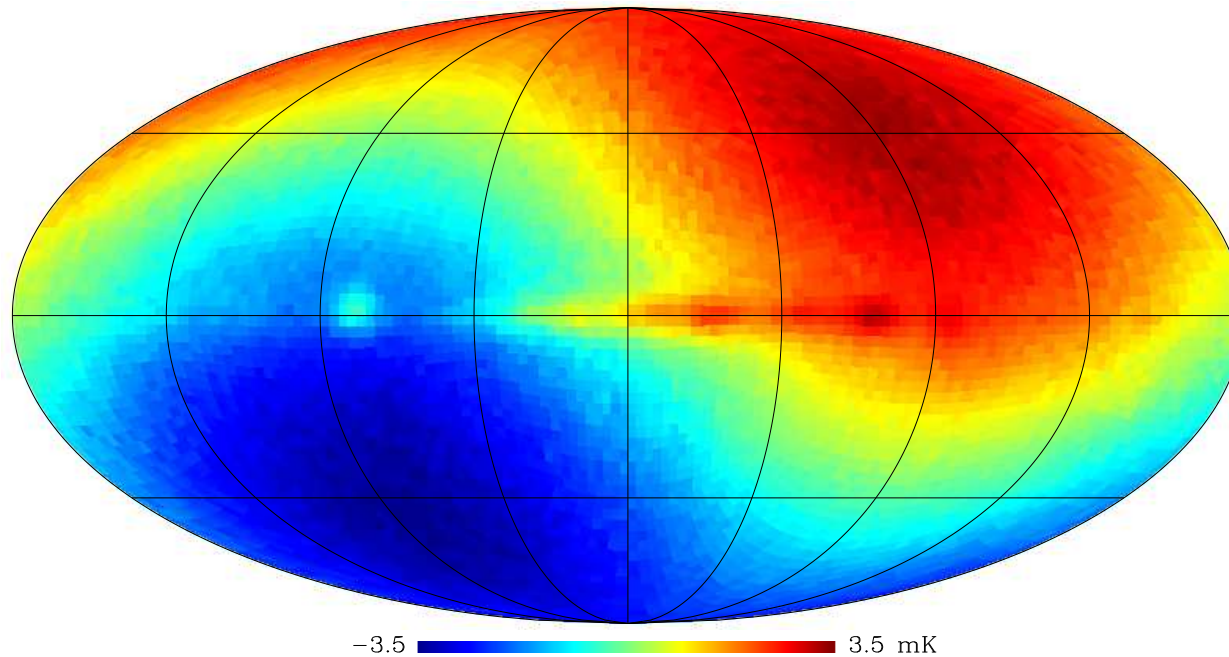
W pierwszym przybliżeniu $(\Delta T \sim 1K)$



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

Promieniowanie tła

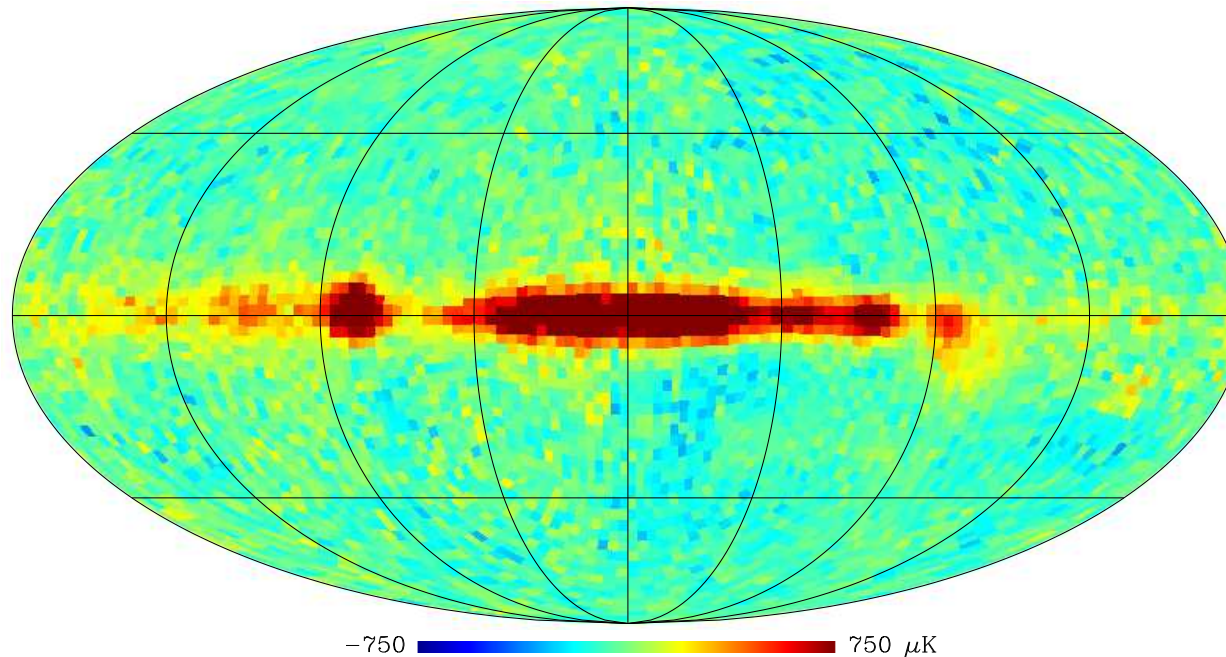
Jednak gdy przyjżemy się bliżej $(\Delta T \sim 1mK)$



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

Promieniowanie tła

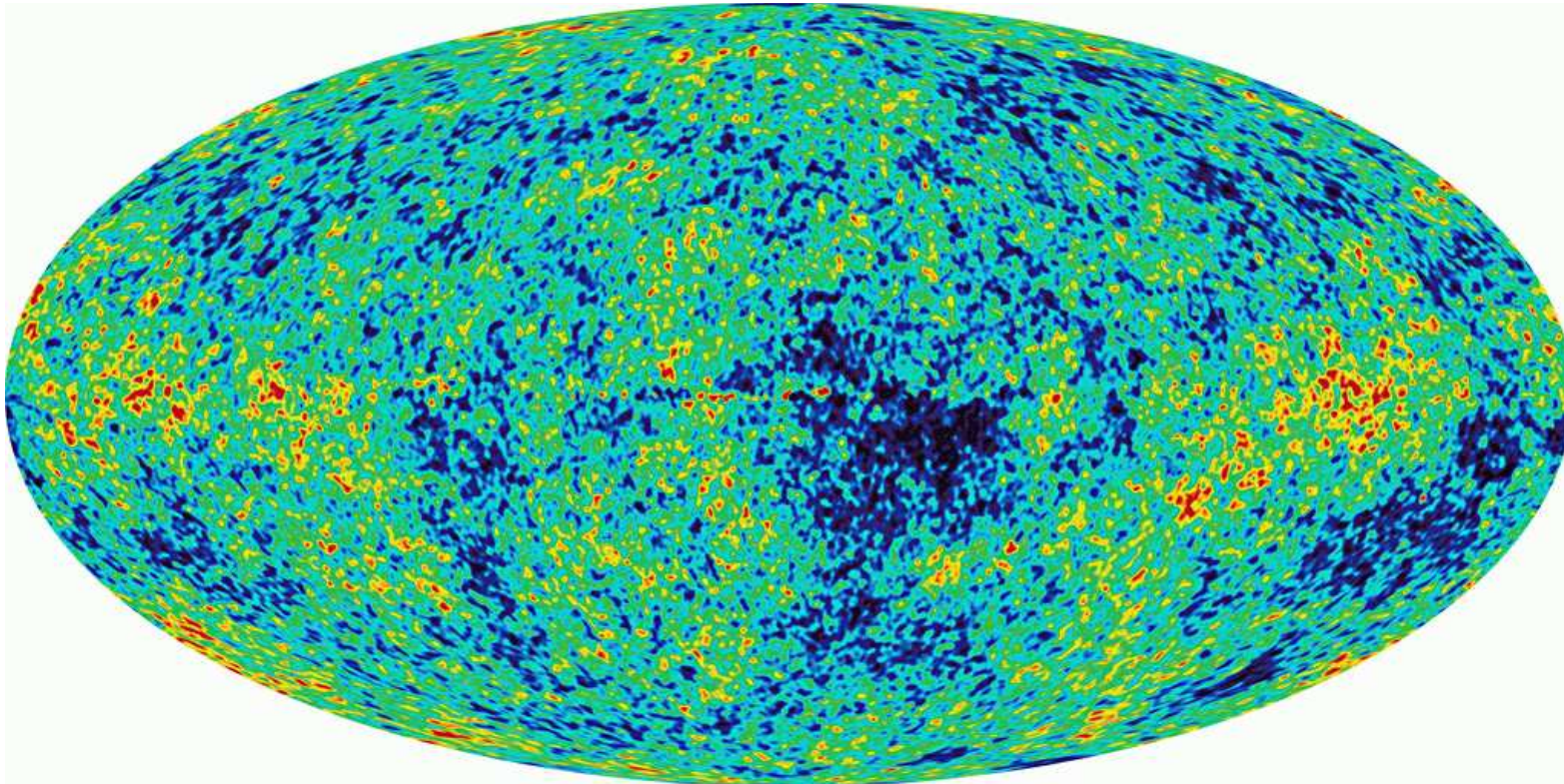
Odejmując wpływ efektu Dopplera ($\Delta T \sim 200 \mu K$)



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

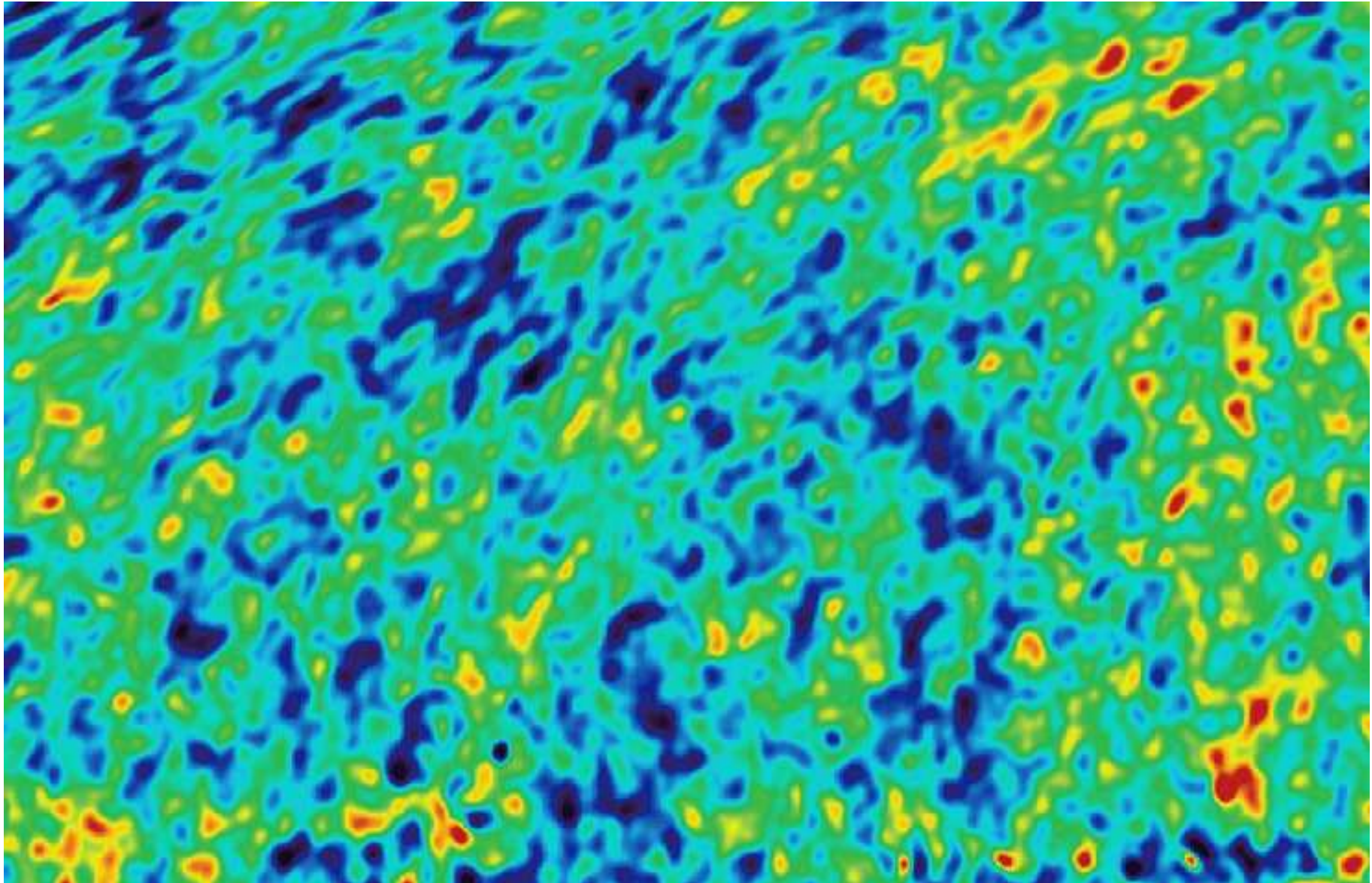
Promieniowanie tła

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?

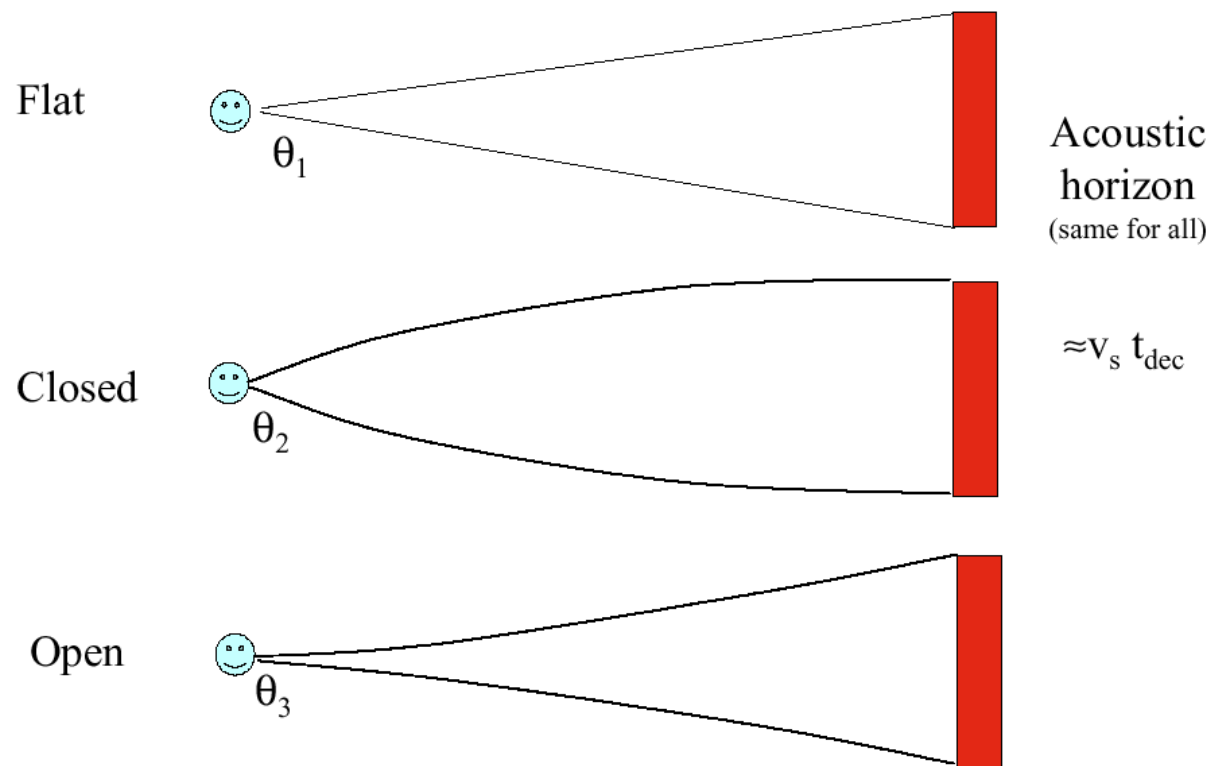
Promieniowanie tła



Promieniowanie tła

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

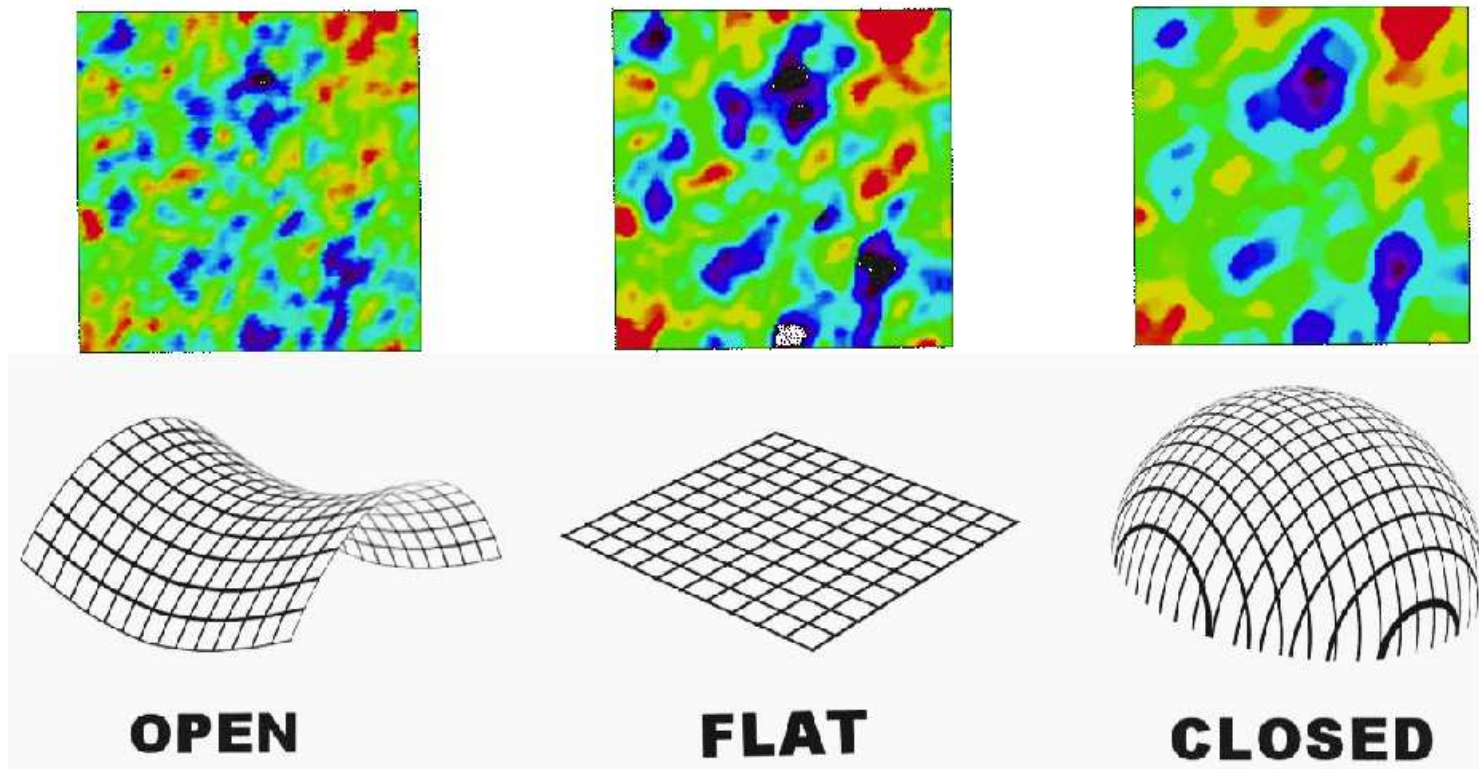
Rozmiary jakie obecnie **obserwujemy** zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



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!**

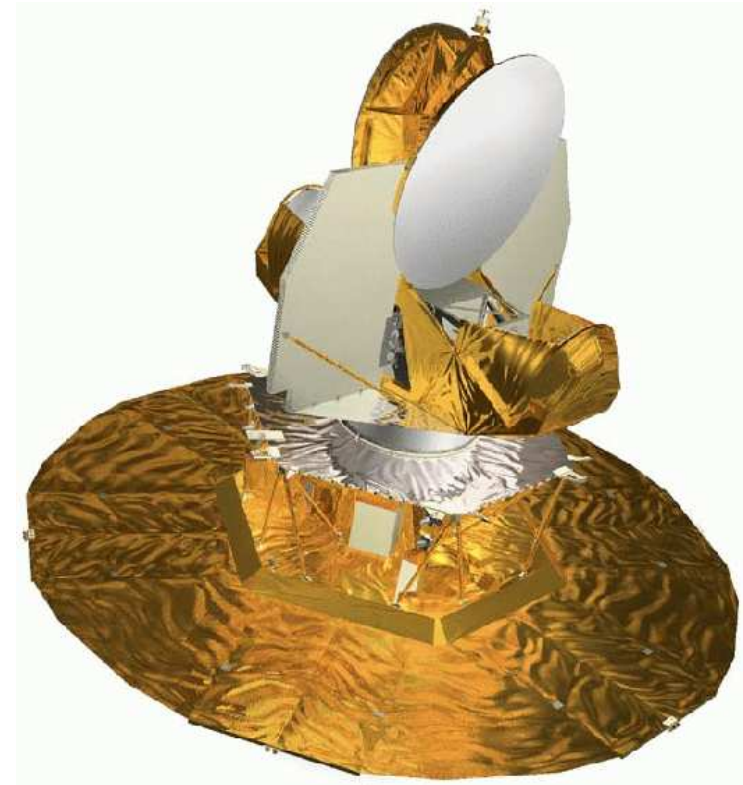


WMAP

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.



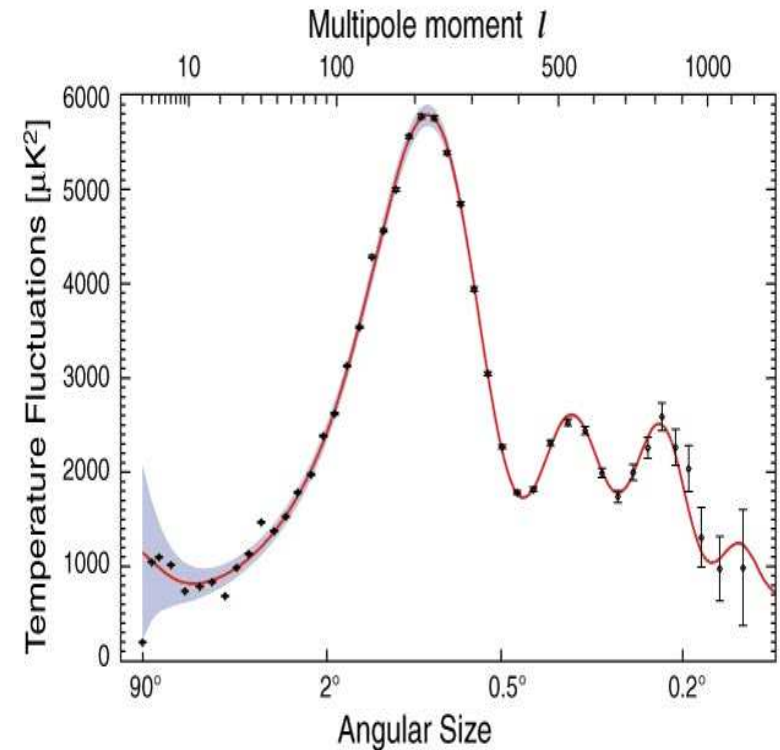
WMAP

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°



WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

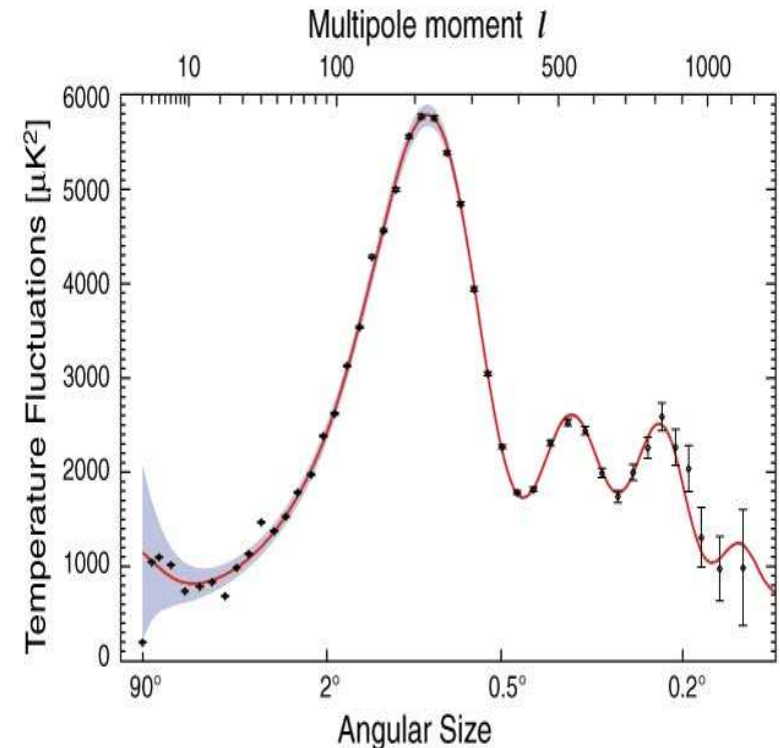
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

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

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu 0.8°

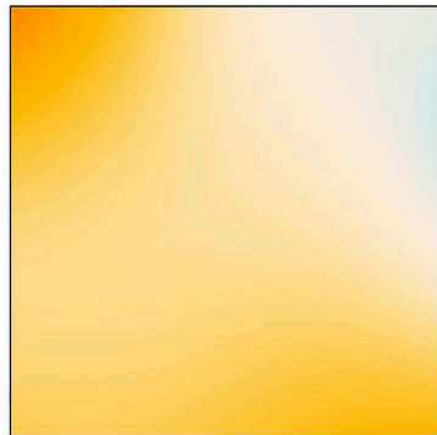
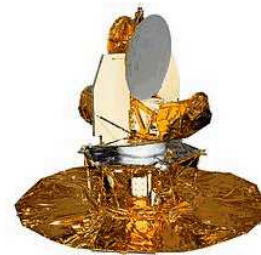
⇒ Wszechświat jest płaski !

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

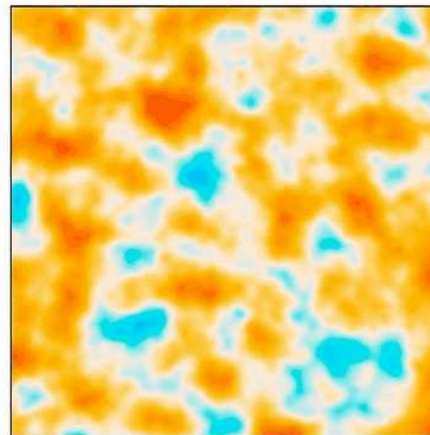


Planck

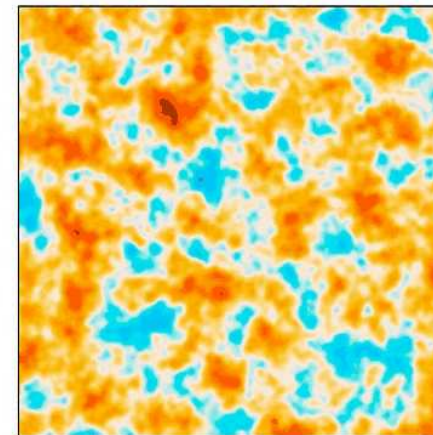
W roku 2009 wystrzelono satelitę Planck, pierwsze uzyskane z jego obserwacji wyniki zaprezentowano w roku 2013



COBE



WMAP

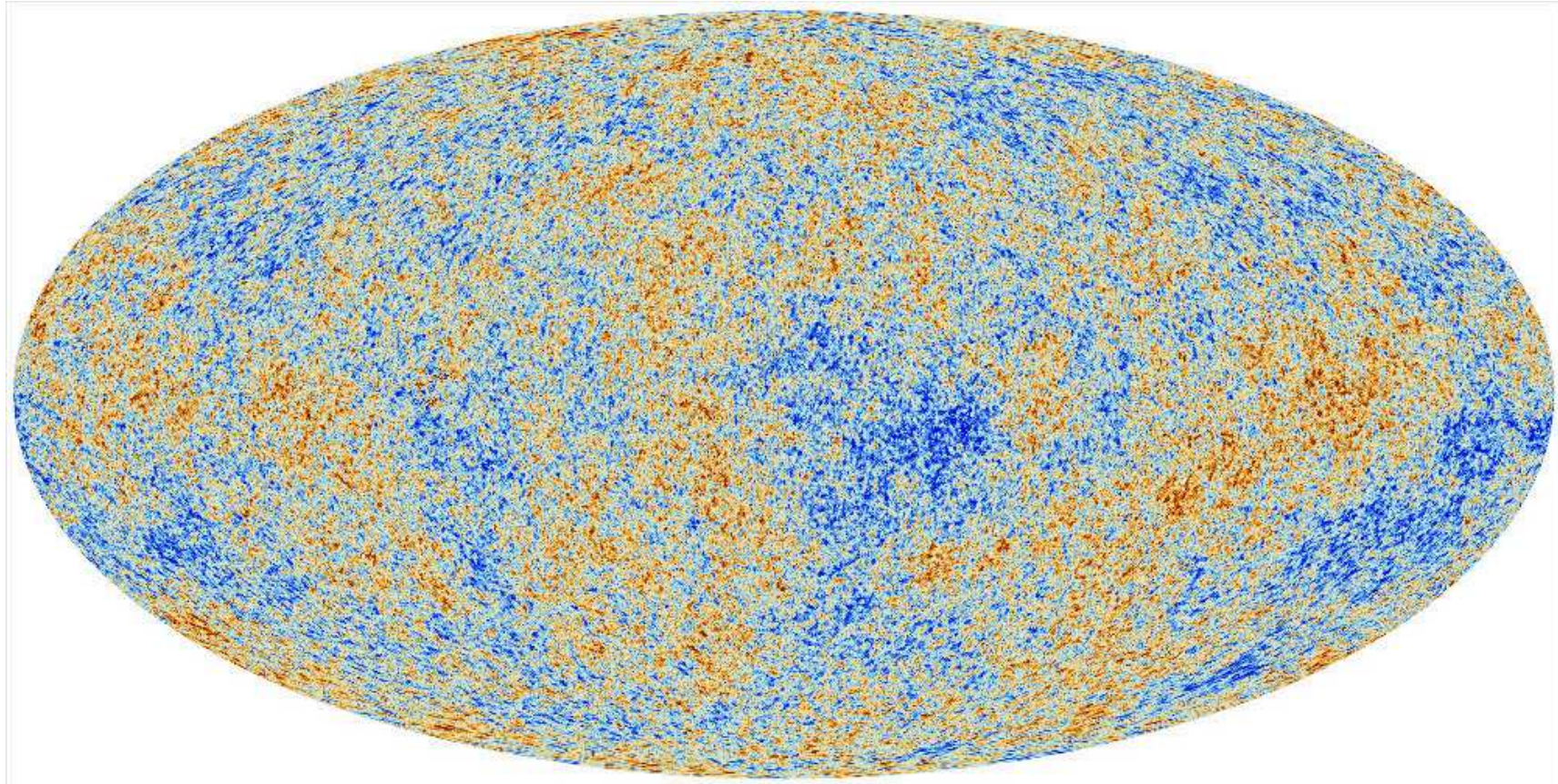


Planck

Jakościowy wzrost precyzji pomiarów

Planck

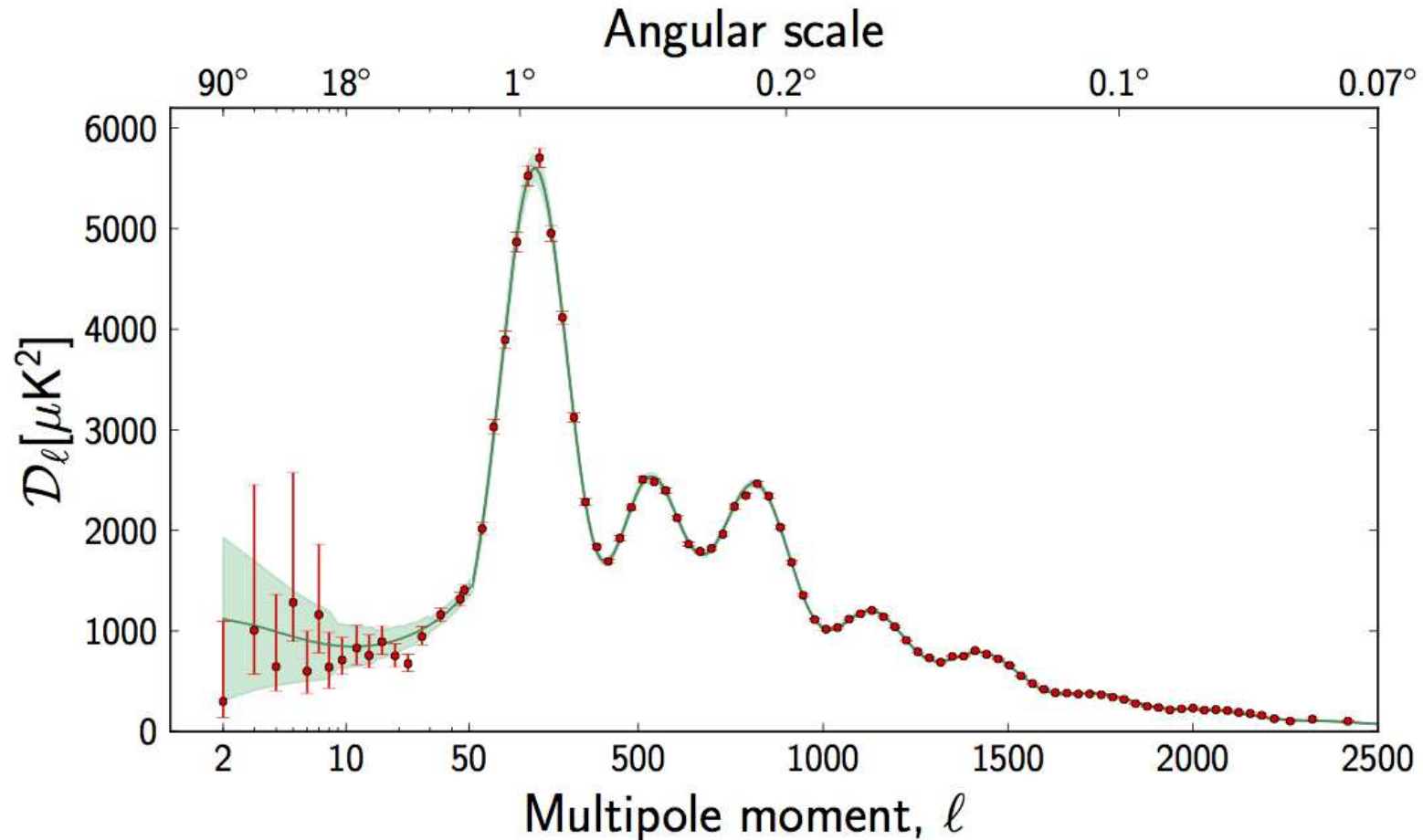
W roku 2009 wystrzelono satelitę Planck, pierwsze uzyskane z jego obserwacji wyniki zaprezentowano w roku 2013



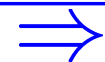
Znacznie dokładniejsze pomiary wciąż dobrze opisane przez teorię...

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

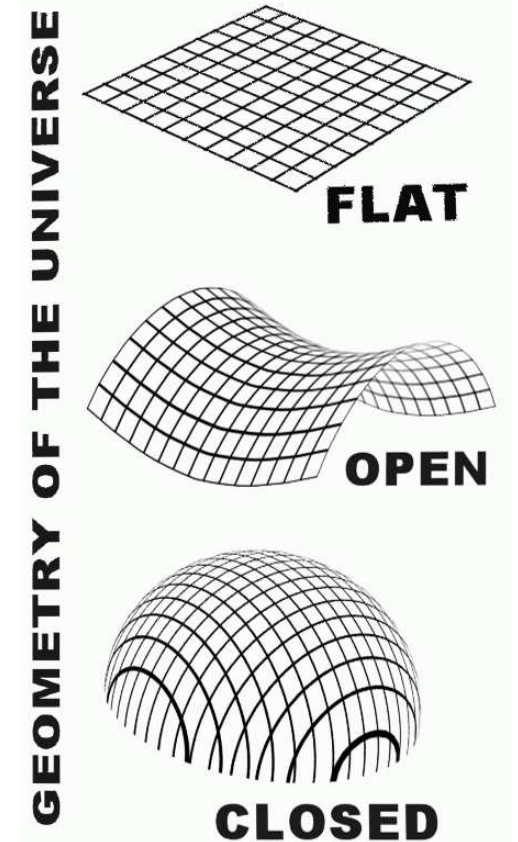
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** wiąże się ściśle z **krzywizną** przestrzeni i zależy od **gęstości** materii ρ .

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:

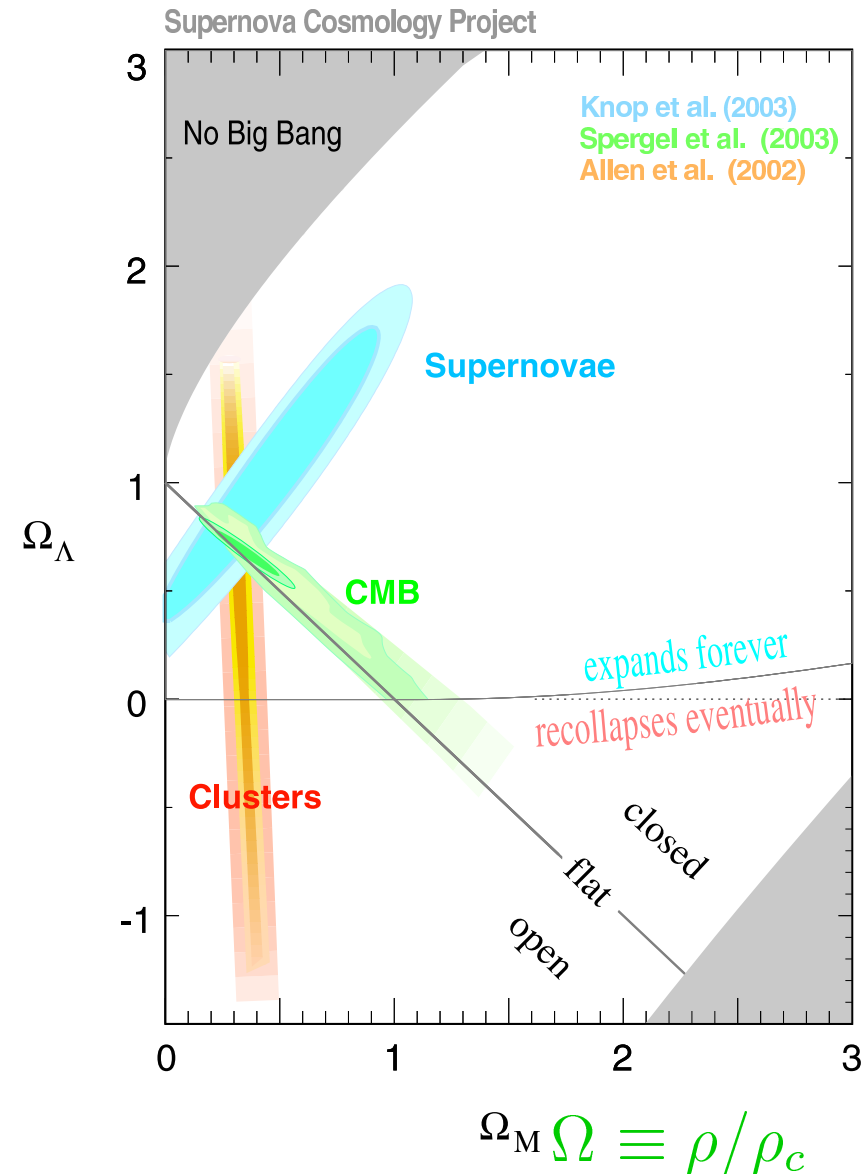
$$\rho_m \approx 0.3 \rho_c$$

Gęstość oczekiwana na podstawie wyznaczone krzywizny Wszechświata:

$$\rho \approx \rho_c$$

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

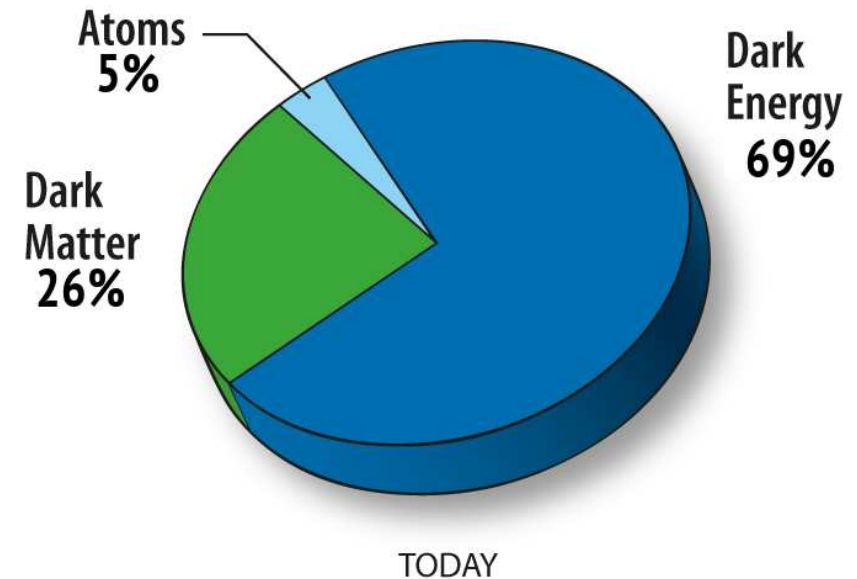
$$\rho = \rho_m + \rho_\Lambda$$



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 (Λ)



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

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

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...

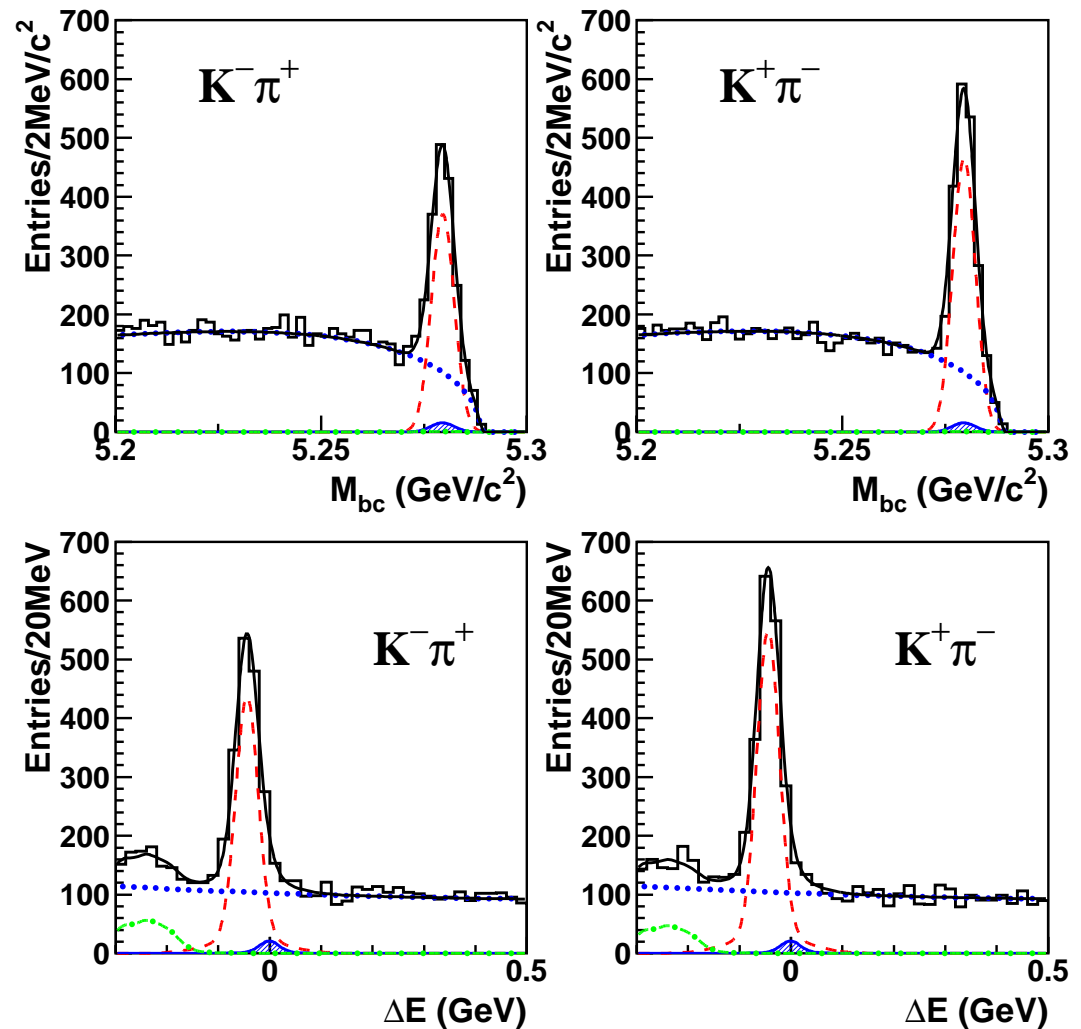
Asymetria barionowa

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
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 γ , ...