

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Ciemna Strona Wszechświata

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

16 stycznia 2018

- 1 Gromada Pocisk
- 2 Poszukiwanie Ciemnej Materii
- 3 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 4 Misje WMAP i Planck
- 5 Ciemna energia

Gęstość materii we Wszechświecie

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**”

$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań **grawitacyjnych** (np. rotacja galaktyk)
 \Rightarrow materia “**grawitacyjna**” (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow \text{ciemna materia !?}$$

Podsumowanie

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.

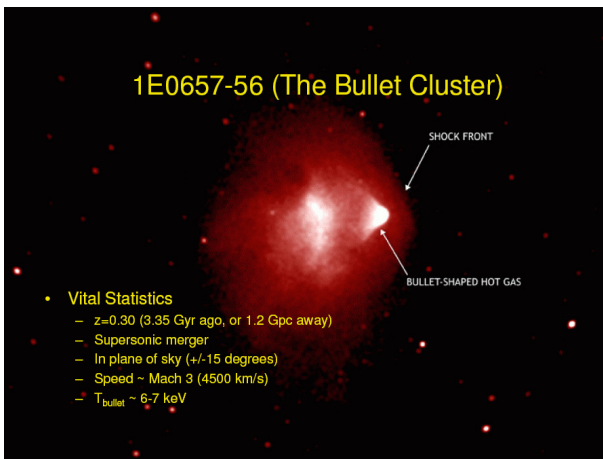
Najczęściej wymienianym kandydatem jest LSP - najlżejsza cząstka supersymetryczna. Mamy wciąż nadzieję, że LHC zdoła ją znaleźć...

- 1 Gromada Pocisk
- 2 Poszukiwanie Ciemnej Materii
- 3 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 4 Misje WMAP i Planck
- 5 Ciemna energia

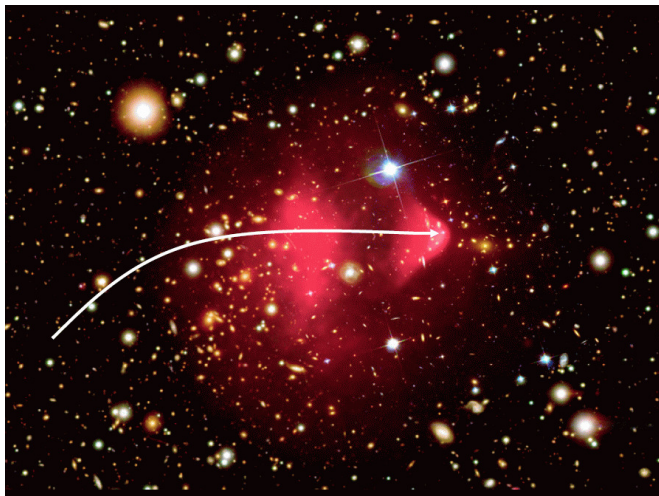
Gromada Pocisk (Bullet Cluster) widziana przez teleskop Hubble'a



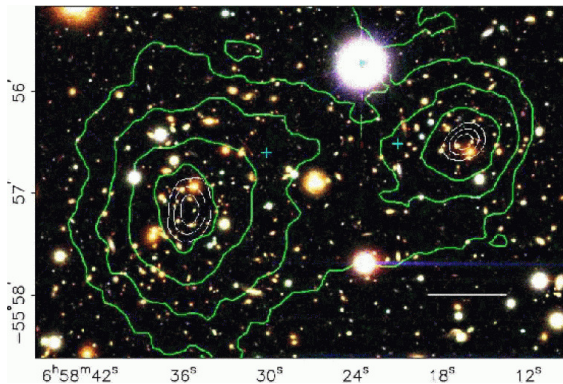
Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. Rozkład atomów w Gromadzie Pocisk zmierzony przez teleskop satelitarny **Chandra**.



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



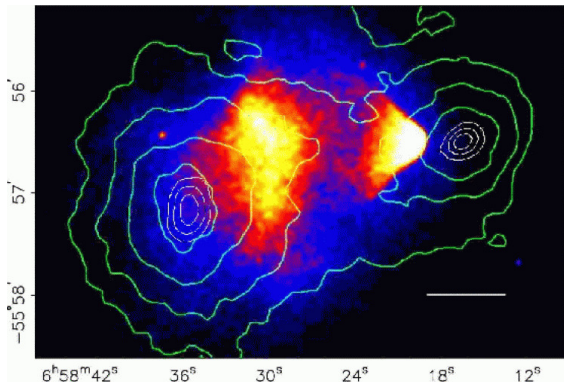
Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład **masy "grawitacyjnej"** w widocznym układzie. Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.



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**).



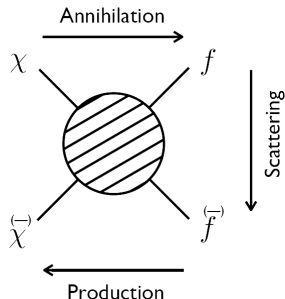
- 1 Gromada Pocisk
- 2 Poszukiwanie Ciemnej Materii
- 3 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 4 Misje WMAP i Planck
- 5 Ciemna energia

Poszukiwanie

Także na Ziemi możemy poszukiwać cząstek ciemnej materii (DM).

Robimy to na trzy sposoby:

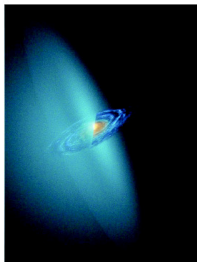
- **produkcja**
bezpośrednia **produkcja** cząstek ciemnej materii np. w LHC
- **detekcja bezpośrednia**
poszukiwanie sygnałów oddziaływania (**rozpraszania**) DM w detektorach
- **detekcja pośrednia**
poszukiwanie sygnałów oddziaływania (**anihilacji**) DM we Wszechświecie



Poszukiwanie



WIMP scattering on Earth



WIMP annihilation in the cosmos



WIMP production on Earth

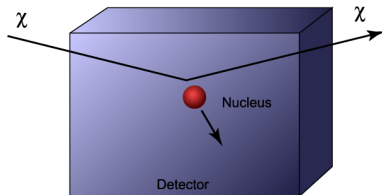
Pomiary bezpośrednie

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



Ciemna Materia

Pomiary bezpośrednie

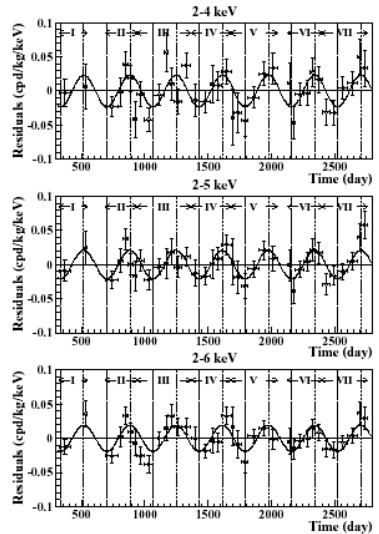
Wiele eksperymentów na Ziemi próbuje “złapać” otaczające nas cząstki ciemnej materii.

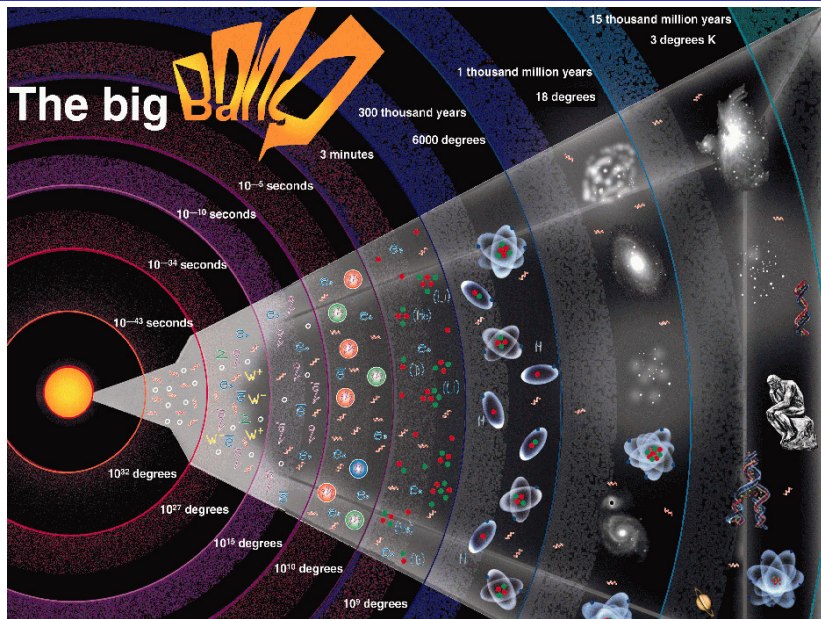
Jest to jednak bardzo trudne bo oddziałują one niezwykle słabo...

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...**





- 1 Gromada Pocisk
- 2 Poszukiwanie Ciemnej Materii
- 3 Mikrofalowe promieniowanie tła**
- 4 Misje WMAP i Planck
- 5 Ciemna energia

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

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.



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

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**.

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.

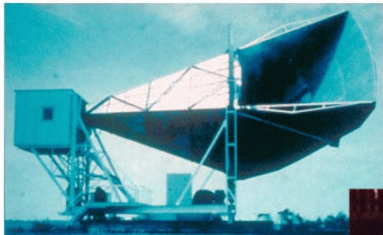
Jest to tzw. **promieniowanie reliktowe** inaczej nazywane też **mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB)**

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

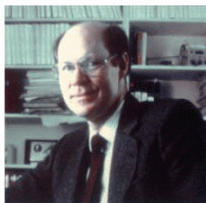
$$T \sim 5 K$$

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

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

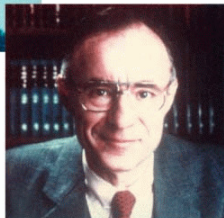


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

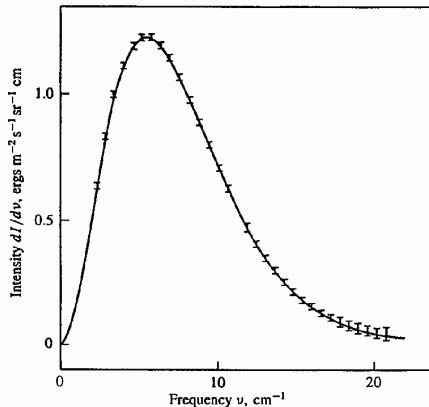
Promieniowanie tła

zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzasa 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

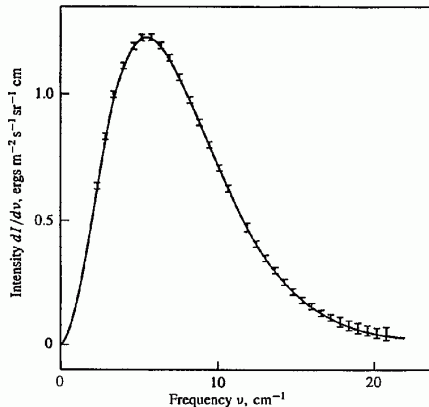
zostało odkryte w 1965 roku przez **A.A.Penzisa** i **R.W.Wilsona**.

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

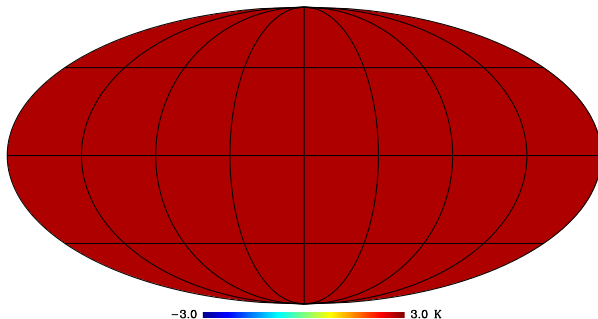
$$T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

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

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

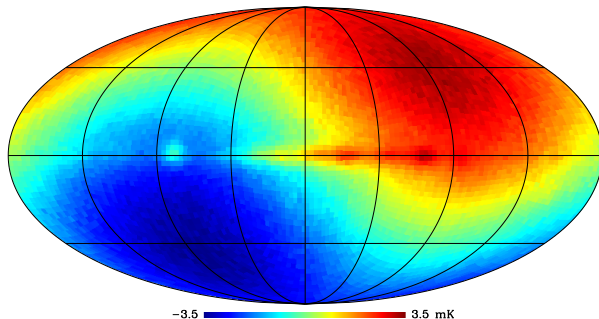


W pierwszym przybliżeniu $(\Delta T \sim 1K)$



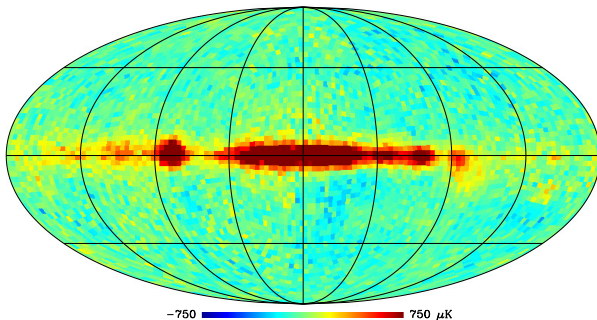
promieniowanie tła jest **izotropowe**, wypełnia jednolicie całe niebo.

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



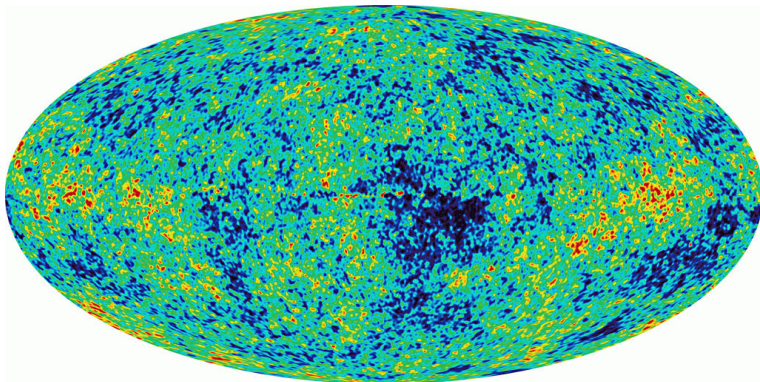
widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem 'globalnego' układu.
"Zwykły" efekt Dopplera...

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

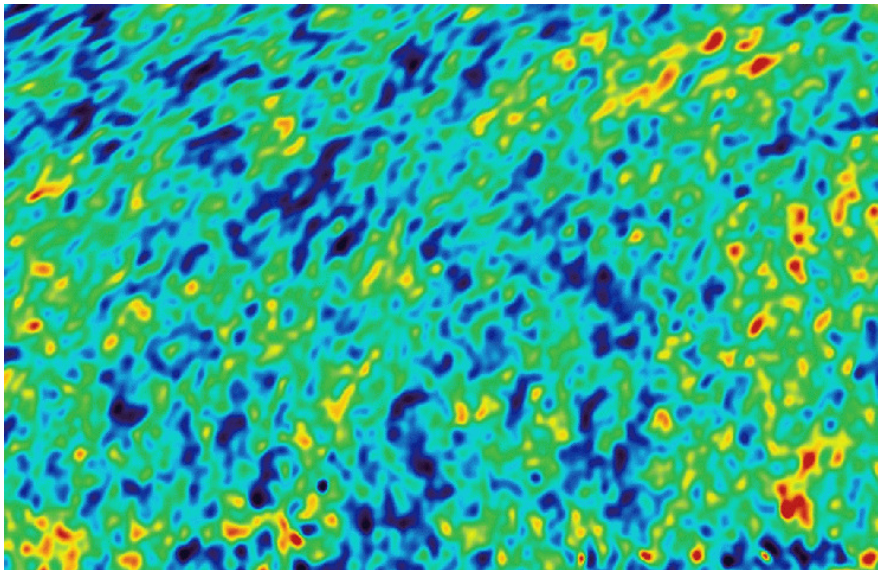


⇒ widzimy promieniowanie naszej galaktyki (Drogi Mlecznej)...

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

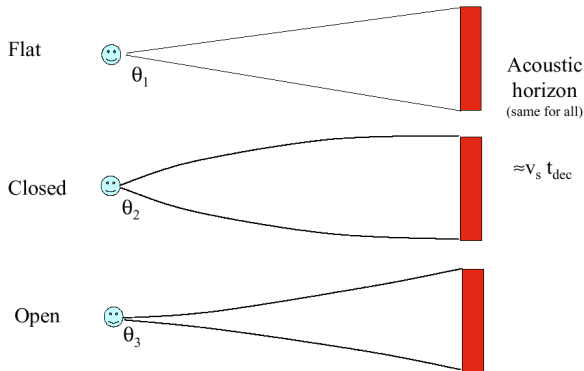


widzimy przypadkowe fluktuacje w rozkładzie energii promieniowania
 \Rightarrow czy w tym chaosie tkwi jakaś informacja?



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

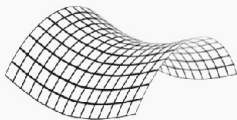
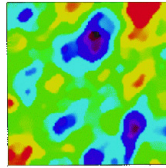
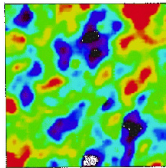
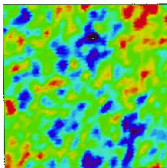
Rozmiary jakie obecnie **obserwujemy** zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



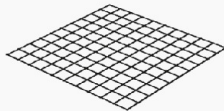
Promieniowanie tła

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

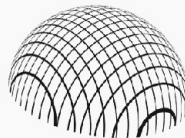
Rozmiary jakie obecnie **obserwujemy** zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



OPEN



FLAT



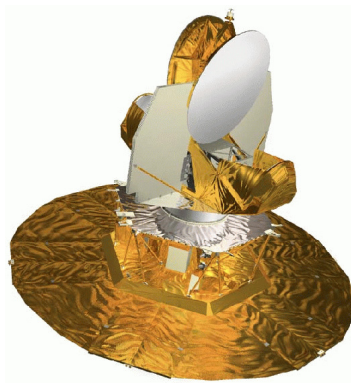
CLOSED

- 1 Gromada Pocisk
- 2 Poszukiwanie Ciemnej Materii
- 3 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 4 Misje WMAP i Planck**
- 5 Ciemna energia

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

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

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

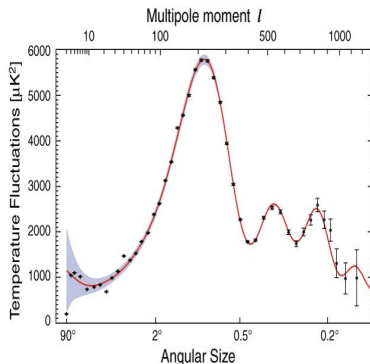


Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

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

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

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu 0.8°



Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

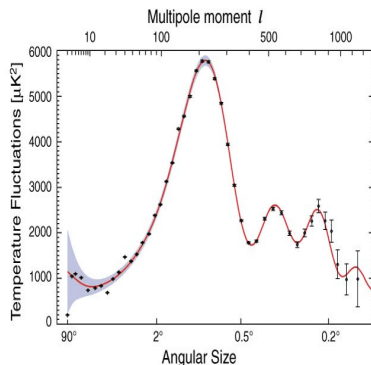
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.
 Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

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

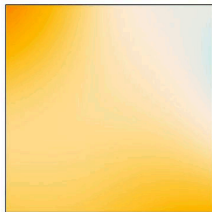
⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu 0.8°

⇒ Wszechświat jest płaski !

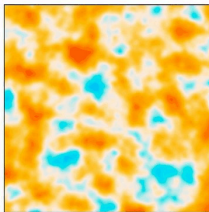
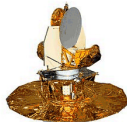
⇒ całkowita gęstość materii/energii: $\rho_{tot} = 1.02(\pm 0.02) \rho_c$
 (w granicach błędów zgodna z gęstością krytyczną)



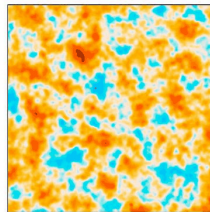
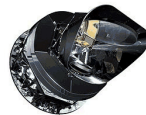
W roku 2009 wystrzelono satelitę Planck, pierwsze uzyskane z jego obserwacji wyniki zaprezentowano w roku 2013



COBE



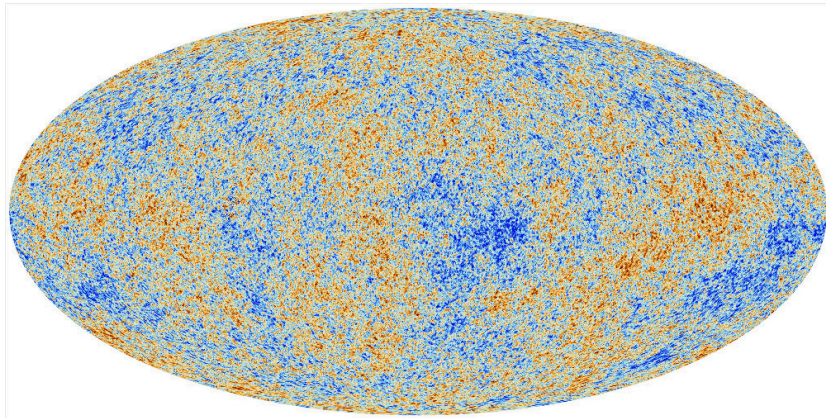
WMAP



Planck

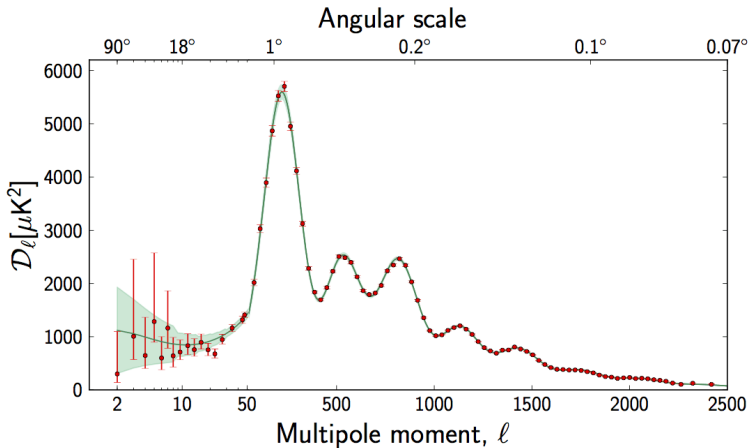
Jakościowy wzrost precyzji pomiarów

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



Znacznie dokładniejsze pomiary wciąż dobrze opisane przez teorię...

Dopasowanie modelu do widma fluktuacji promieniowania tła:



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

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

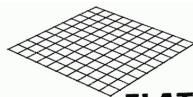
Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

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

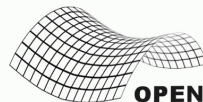
$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

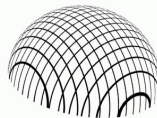
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



FLAT



OPEN



CLOSED

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

- 1 Gromada Pocisk
- 2 Poszukiwanie Ciemnej Materii
- 3 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 4 Misje WMAP i Planck
- 5 Ciemna energia**

Stała kosmologiczna

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

$$\rho_m \approx 0.3 \rho_c$$

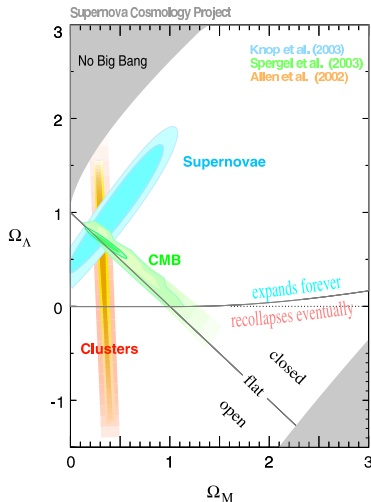
Gęstość oczekiwana na podstawie wyznaczone krzywizny Wszechświata:

$$\rho \approx \rho_c$$

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

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

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



Dopasowanie modelu

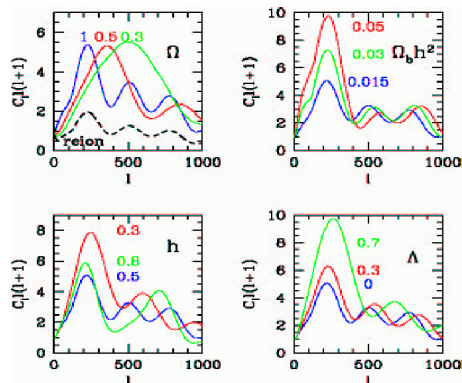
Widmo promieniowania mikrofalowego zależy nie tylko od gęstości całkowitej, ale też od udziału poszczególnych składników.

Model wykorzystany do opisu danych Planck uwzględnia wkład od

- fotonów (\Rightarrow CMB)
- barionów
- neutrin
- zimnej ciemnej materii (CDM)
- stałej kosmologicznej (Λ)

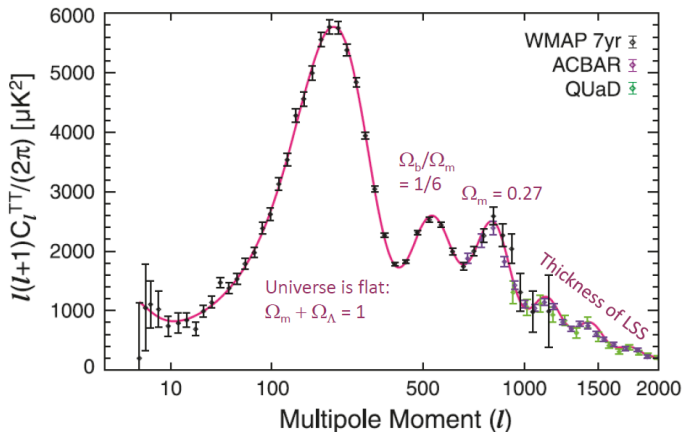
\Rightarrow Ewolucję Wszechświata opisujemy poprzez 6 niezależnych parametrów

Wyniki symulacji:



Dopasowanie modelu

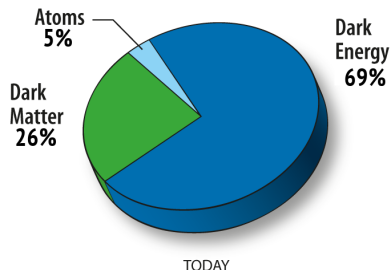
Analiza pełnego widma CMB pozwala na dopasowanie wszystkich parametrów (choć uwzględnienie innych danych pomaga)



Model Λ CDM

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia**... (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną (Λ)



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

Wiek Wszechświata: $T = 13.799 \pm 0.038$ Gyr

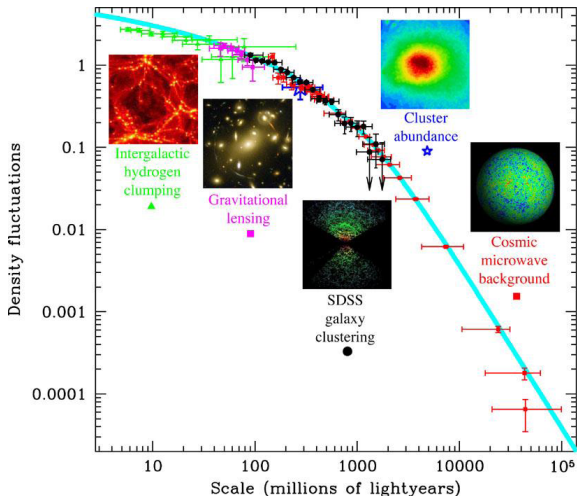
Model Λ CDM

Model kosmologiczny uwzględniający:

stałą kosmologiczną (Λ) i
Zimną Ciemną Materię
(Cold Dark Matter - CDM)

bardzo dobrze opisuje
fluktuacje gęstości

Wszechświata na różnych
skalach odległości.



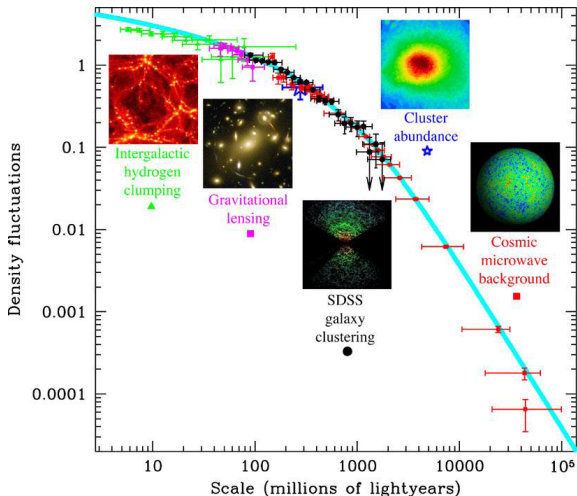
Model Λ CDM

Model kosmologiczny uwzględniający:

stałą kosmologiczną (Λ) i
Zimną Ciemną Materię
(Cold Dark Matter - CDM)

bardzo dobrze opisuje
fluktuacje gęstości
Wszechświata na różnych
skalach odległości.

Bez tych dwóch składników
Wszechświat wyglądałby
zupełnie inaczej!



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**)

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...

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...

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:

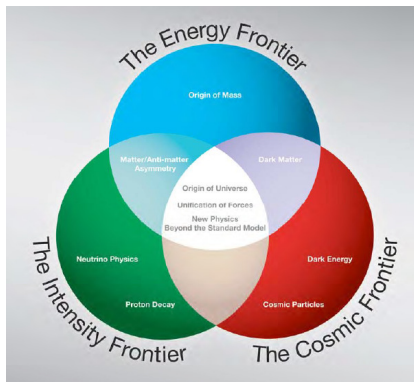
- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie
 \Rightarrow jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?
Wymaga złamania symetrii CP, znacznie silniejszego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

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 γ , ...
- kwantowy **opis grawitacji** (włączenie jej do Modelu Standardowego).
Na razie nie ma dla niej miejsca...

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.