

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Ewolucja wszechświata

Aleksander Filip Żarnecki

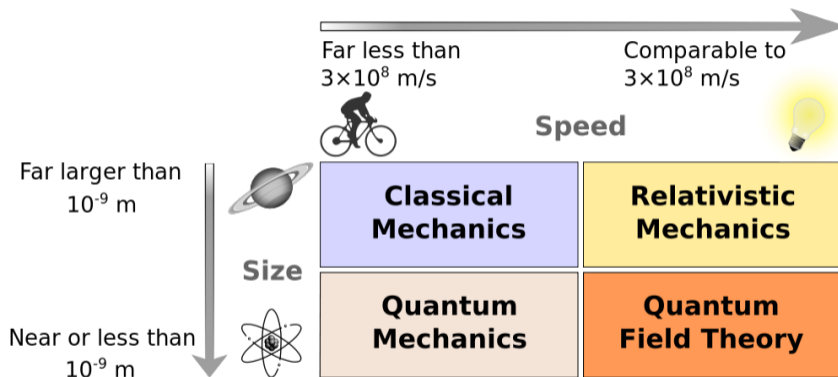
Wykład ogólnouniwersytecki



10 stycznia 2023

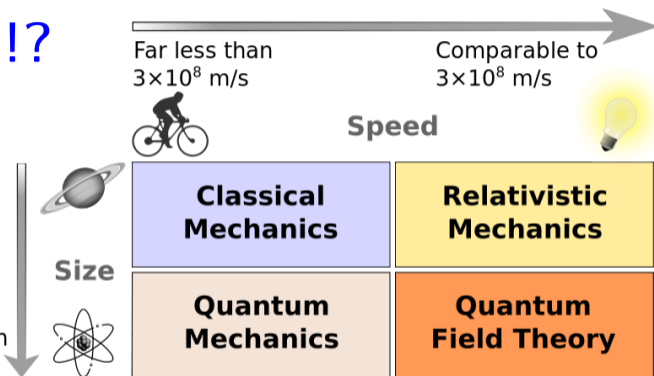
- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubble'a
- 3 Ewolucja Wszechświata
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie
- 5 Ciemna energia

Do tej pory mówiliśmy tylko o efektach **relatywistycznych** i **kwantowych**



Współczesna **fizyka cząstek** posługuje się opisem w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową.

Do tej pory mówiliśmy tylko o efektach **relatywistycznych** i **kwantowych**



Współczesna **fizyka cząstek** posługuje się opisem w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową.

**Ale okazuje się, że odstępstwa od fizyki klasycznej występują też dla dużych obiektów...**

- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubble'a
- 3 Ewolucja Wszechświata
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie
- 5 Ciemna energia

## Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem, doświadczamy jej na co dzień.

Mimo to stosunkowo długo pozostawała zagadką, brak było spójnej teorii grawitacji.

Bardzo długo nie dostrzegano związku między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

## Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem, doświadczamy jej na co dzień.

Mimo to stosunkowo długo pozostawała zagadką, brak było spójnej teorii grawitacji.

Bardzo długo nie dostrzegano związku między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

## Newton 1687

Prawo powszechnego ciężenia:

Każda cząstka we wszechświecie przyciąga każdą inną cząstkę siłą proporcjonalną do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi:

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

## Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem, doświadczamy jej na co dzień.

Mimo to stosunkowo długo pozostawała zagadką, brak było spójnej teorii grawitacji.

Bardzo długo nie dostrzegano związku między np. ruchem planet i lotem kuli armatniej.

## Newton 1687

Prawo powszechnego ciążenia:

Każda cząstka we wszechświecie przyciąga każdą inną cząstkę siłą proporcjonalną do iloczynu ich mas i odwrotnie proporcjonalną do kwadratu odległości między nimi:

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G_N \approx 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

Nie widzimy oddziaływania między dwoma jabłkami, bo grawitacja zbyt słaba...



## Grawitacja

Prawo powszechnego ciężenia Newtona było bardzo proste, a jednocześnie uniwersalne. Tłumaczyło wszystkie znane nam zjawiska związane z oddziaływaniami grawitacyjnymi.

## Grawitacja

Prawo powszechnego ciężenia Newtona było bardzo proste, a jednocześnie uniwersalne. Tłumaczyło wszystkie znane nam zjawiska związane z oddziaływaniami grawitacyjnymi.

Uniwersalność praw przyrody widoczna też w podobieństwie do prawa Coulomba (oddziaływanie ładunków elektrycznych):

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \Leftrightarrow \quad F_{el} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

W wiek XX wchodziliśmy z prostym i eleganckim opisem prawie wszystkich znanych zjawisk...

## Grawitacja

Prawo powszechnego ciężenia Newtona było bardzo proste, a jednocześnie uniwersalne. Tłumaczyło wszystkie znane nam zjawiska związane z oddziaływaniami grawitacyjnymi.

Uniwersalność praw przyrody widoczna też w podobieństwie do prawa Coulomba (oddziaływanie ładunków elektrycznych):

$$F_g = G_N \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \Leftrightarrow \quad F_{el} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

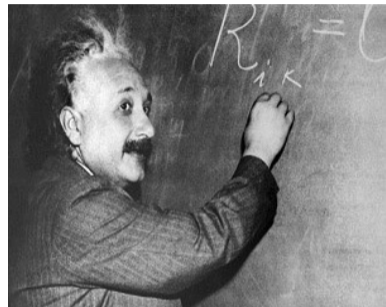
W wiek XX wchodziliśmy z prostym i eleganckim opisem prawie wszystkich znanych zjawisk...

Jednak Einstein dostrzegł, że “powszechność” ciężenia stanowi problem w opisie grawitacji na dużych skalach - nie mamy “punktu odniesienia” względem którego moglibyśmy badać ruch...

## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



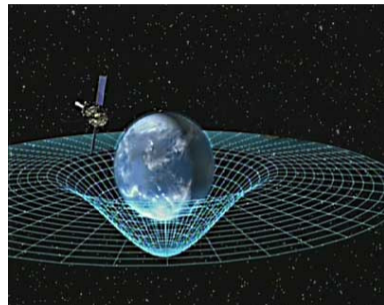
## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**

Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu "swobodnej" materii



## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu oddziaływań grawitacyjnych.

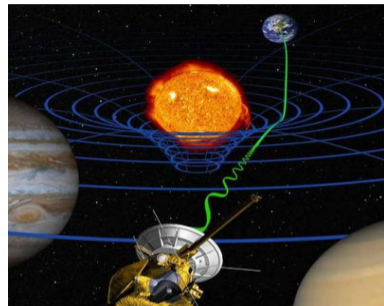
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**

Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu "swobodnej" materii

Najłatwiej to zrozumieć dla **światła**: porusza się ono po trajektoriach odpowiadających **najmniejszej odległości (najszybszej propagacji)** między dwoma zadanymi punktami.

**W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie są to już linie proste!**



## Ogólna Teoria Względności - model

Ruch pod wpływem siły: (klasyczny opis grawitacji)



## Ogólna Teoria Względności - model

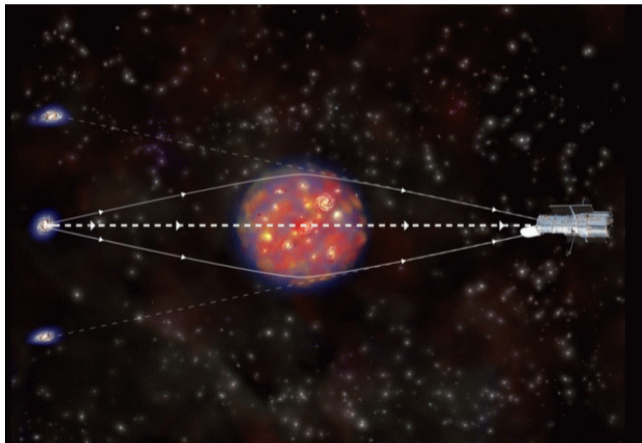
Ruch wynikający z zakrzywienia przestrzeni: (opis Einsteina)





Przewidywania OTW: **Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni.

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



W obecności silnych pól grawitacyjnych może być więcej niż jedna droga...

Przewidywania OTW: **Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni.

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

Kosmiczny Teleskop Hubble'a

Na orbicie okołoziemskiej od  
1990 roku!



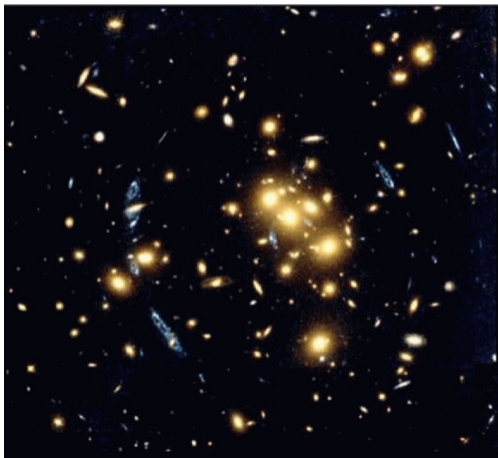
Przewidywania OTW: **Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni.

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

Zdjęcie z Kosmicznego  
Teleskopu Hubble'a

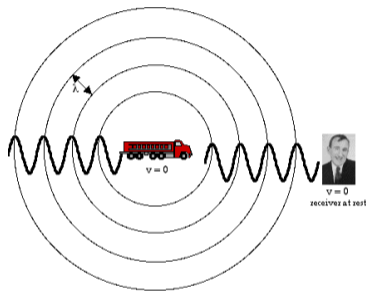
**Niebieskie łuki** - wielokrotny  
obraz odległej galaktyki położonej  
za masywną gromadą galaktyk.

⇒ bezpośredni dowód na  
zakrzywienie przestrzeni,  
poprawność przewidywań OTW



- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubblea**
- 3 Ewolucja Wszechświata
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie
- 5 Ciemna energia

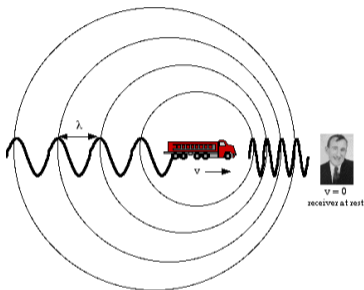
## Przypadek klasyczny



W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej** częstotliwości.

## Przypadek klasyczny



W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej** częstotliwości.

Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

$$f_{obs} = \frac{f}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

## Przykłady z życia codziennego



<https://www.youtube.com/watch?v=rqeh09yfwTA>

## Przykłady z życia codziennego

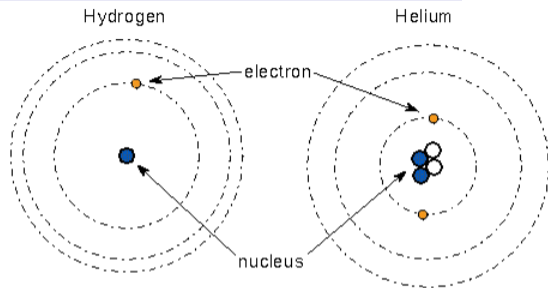


<https://www.youtube.com/watch?v=iOB6-hs-tME>



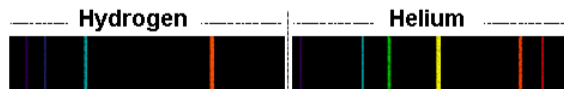
## Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



- = proton (+ charge)
- = neutron (no charge)
- = electron (- charge)
- = energy level

The structure of the atoms for the two most common elements in nature. Different elements have different number of **protons** and different layouts of their energy levels.

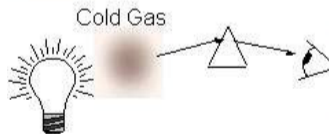
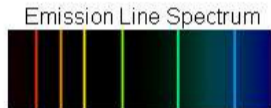
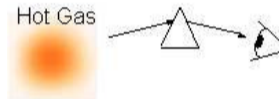
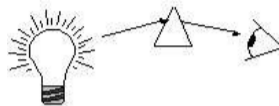


## Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

## Linie absorpcyjne

Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.

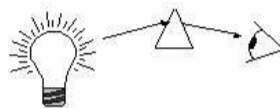


## Linie emisyjne

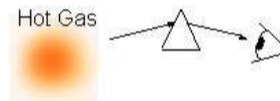
Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

## Linie absorpcyjne

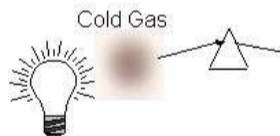
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Continuum Spectrum



Emission Line Spectrum

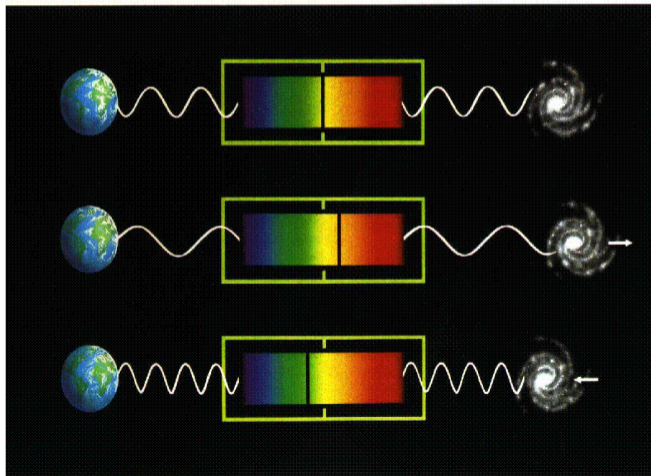


Absorption Line Spectrum

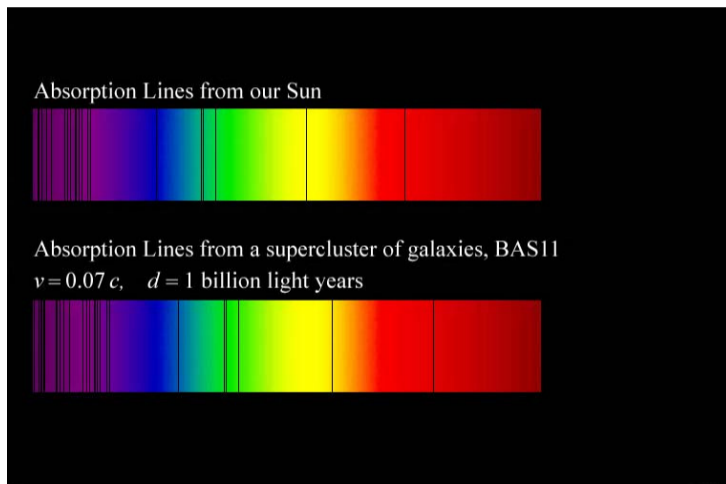


W obu przypadkach pozycja linii jest ściśle określona (charakterystyczna dla danego atomu)

Mierząc linie absorpcyjne w widmie odległych galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu,

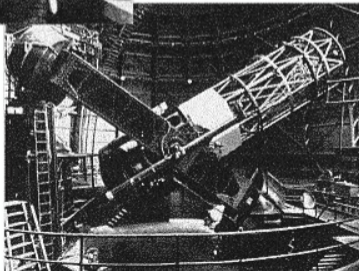
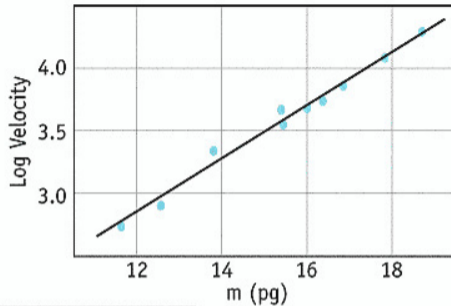


Mierząc linie absorpcyjne w widmie odległych galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu, **wyznaczyć ich prędkość względem nas**





Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

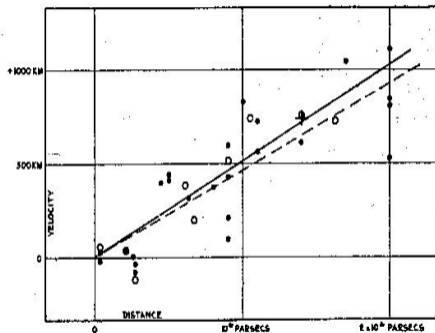
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

Zauważył on, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością** od Ziemi:

$$v = H \cdot r$$

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

Oryginalne wyniki Hubble'a:



Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

Zauważył on, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością** od Ziemi:

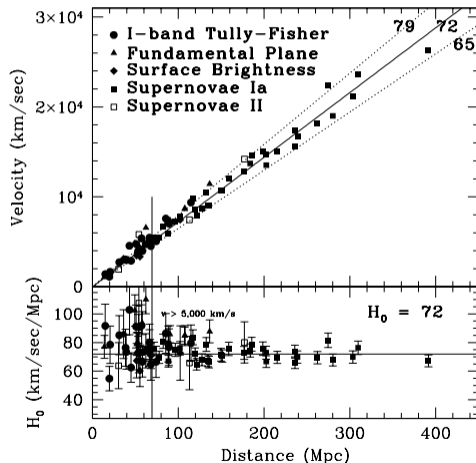
$$v = H \cdot r$$

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

Obecne pomiary:  $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

$$1 \text{ Mpc} \approx 3 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

## Współczesne pomiary:





Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

Zauważył on, że **prędkość** 'ucieczki' **rośnie z odległością** od Ziemi:

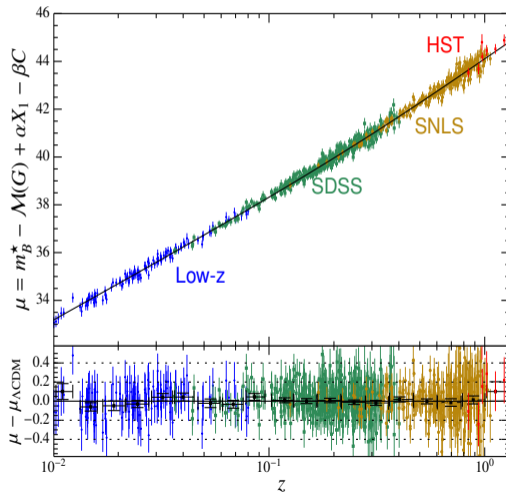
$$v = H \cdot r$$

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

Obecne pomiary:  $H \sim 70 \text{ km/s/Mpc}$

$$1 \text{ Mpc} \approx 3 \cdot 10^{22} \text{ m}$$

Współczesne pomiary:



## Pomiar odległości

Wyznaczenie odległości jest znacznie trudniejsze od wyznaczenia "przesunięcia ku czerwieni".

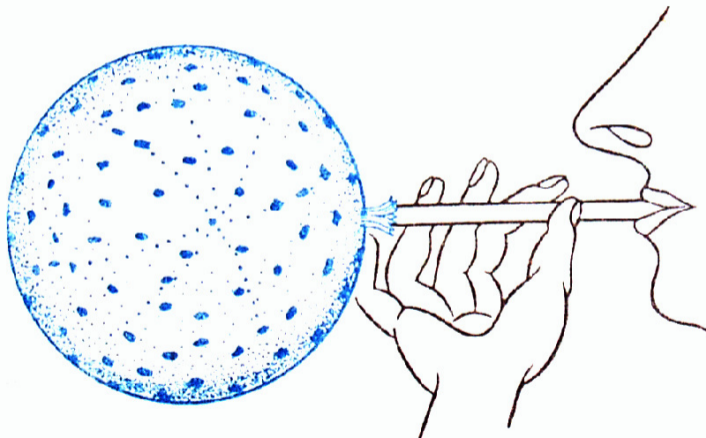
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

Na największych odległościach są to Supernowe typu 1A.

Potrzebujemy bardzo jasnych obiektów, dlatego patrzymy na "wybuchy" w odległych galaktykach...



Obserwacja Hubble'a, że Wszechświat się rozszerza, **wszystkie** obiekty oddalają się od nas, **nie wyróżnia** w żaden sposób **naszego układu** odniesienia.



Dowolne dwa obiekty oddalać się będą w ten sam sposób.

- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubble'a
- 3 Ewolucja Wszechświata**
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie
- 5 Ciemna energia

## Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur  $\Rightarrow$  "skala kosmologiczna"

**Zasada kosmologiczna:** w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy**  $\Rightarrow$  **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszono" są poszczególne obiekty.

Przyjmując te założenia, z równań Einsteina wynika, że nasz obecny Wszechświat powstał dawno temu z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

## Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur  $\Rightarrow$  "skala kosmologiczna"

**Zasada kosmologiczna:** w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy**  $\Rightarrow$  **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszono" są poszczególne obiekty.

Przyjmując te założenia, z równań Einsteina wynika, że nasz obecny Wszechświat powstał dawno temu z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

Big Bang

## Kosmologia

Kosmologia zajmuje się opisem Wszechświata na odległościach większych od rozmiarów wszystkich znanych nam struktur  $\Rightarrow$  "skala kosmologiczna"

**Zasada kosmologiczna:** w skalach kosmologicznych Wszechświat traktujemy jako **jednorodny** i **izotropowy**  $\Rightarrow$  **materia** jest rozłożona **równomiernie**

Obserwowany ruch względny na tych odległościach opisujemy jako **rozszerzanie się całego Wszechświata**, w którym "zawieszono" są poszczególne obiekty.

Przyjmując te założenia, z równań Einsteina wynika, że nasz obecny Wszechświat powstał dawno temu z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

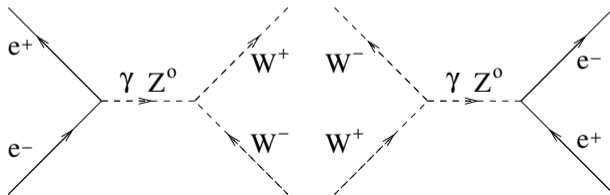
## Wielki Wybuch

Na samym początku **gęstość energii** była bardzo duża.

Na poziomie cząstek oznacza to, że cząstki miały bardzo duże **energie kinetyczne**, znacznie większe od ich mas.

Nie istniały żadne obiekty złożone (**nukleony, jądra atomowe, atomy**), gdyż energie były znacznie większe od energii wiązania.

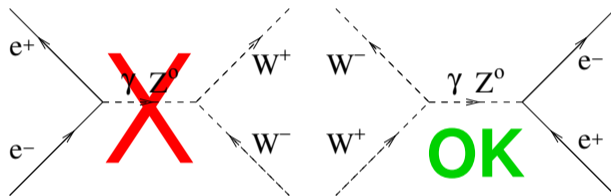
Wszystkie cząstki elementarne znajdowały się w **stanie równowagi**, gdyż nieustannie zachodziły procesy **anihilacji i kreacji**.



Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**

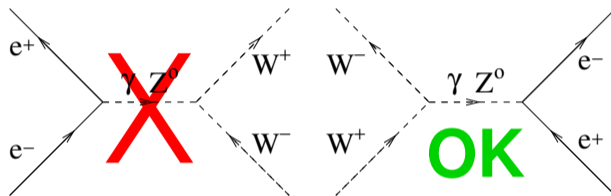


W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.  
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,  
a zaczynają powstawać **stany związane**:



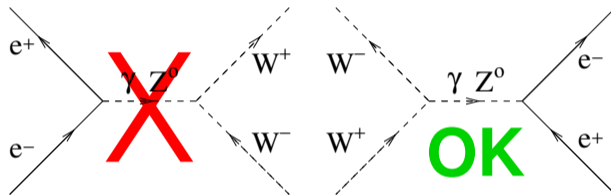
- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.  
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,  
a zaczynają powstawać **stany związane**:



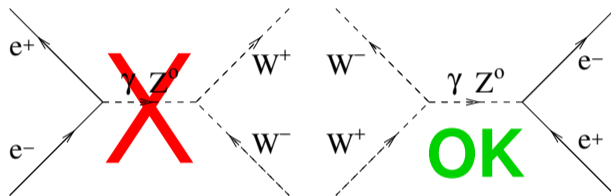
- znikają swobodne bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony ( $10^{-5}$  sekundy)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.  
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,  
a zaczynają powstawać **stany związane**:



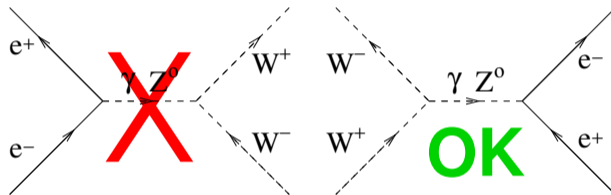
- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony ( $10^{-5}$  sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.  
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,  
a zaczynają powstawać **stany związane**:

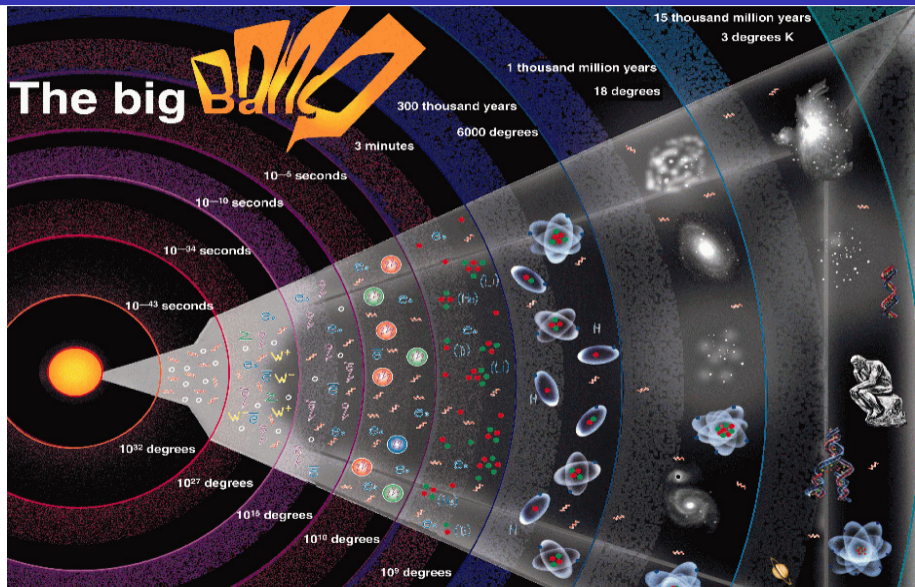


- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony ( $10^{-5}$  sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.  
Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**,  
a zaczynają powstawać **stany związane**:



- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony ( $10^{-5}$  sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)
- formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach (1 Gy)



## Czy Wszechświat będzie się rozszerzał w nieskończoność ?

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

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

$$\rho = \rho_c$$

asymptotycznie “zatrzyma” się

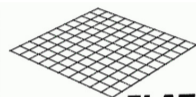
$$\rho < \rho_c$$

będzie zawsze rozszerzał się

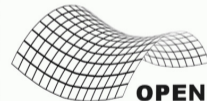
$$\rho > \rho_c$$

kiedyś zacznie się zapadać

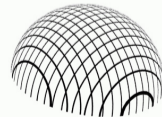
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



**FLAT**



**OPEN**

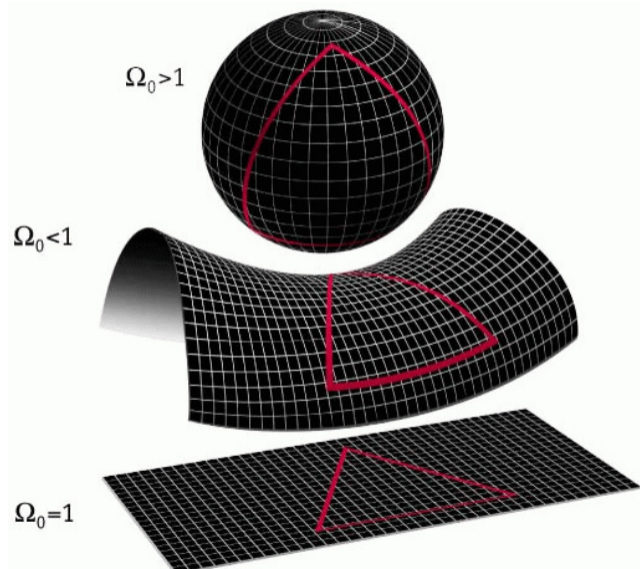


**CLOSED**

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...





- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubble'a
- 3 Ewolucja Wszechświata
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie**
- 5 Ciemna energia

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyć na różne sposoby:

- z pomiaru promieniowania gwiazd i materii międzygwiazdnej  
⇒ materia “światlista”

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

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

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”

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

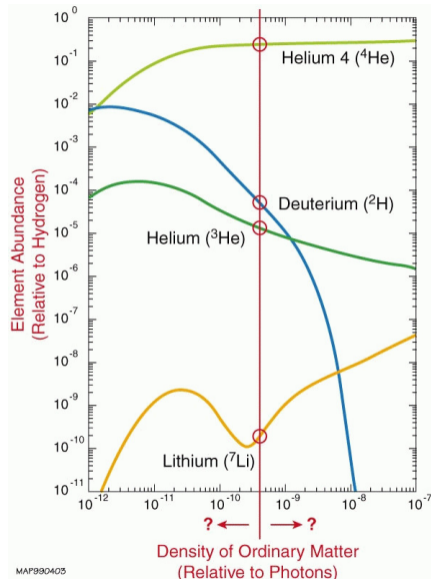
- z pomiaru zawartości lekkich pierwiastków + model nukleosyntezy (Wielki Wybuch)  
⇒ materia “barionowa”

W zależności od stosunku gęstości materii (pozostającej po anihilacji materii i antymaterii) do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

Składnikiem koniecznym do produkcji jąder cięższych od wodoru są neutrony. Pierwszy krok - produkcja deuteru:



częstość reakcji zależy od gęstości materii



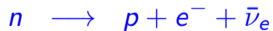
W zależności od stosunku gęstości materii (pozostałej po anihilacji materii i antymaterii) do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

Składnikiem koniecznym do produkcji jąder cięższych od wodoru są neutrony. Pierwszy krok - produkcja deuteru:

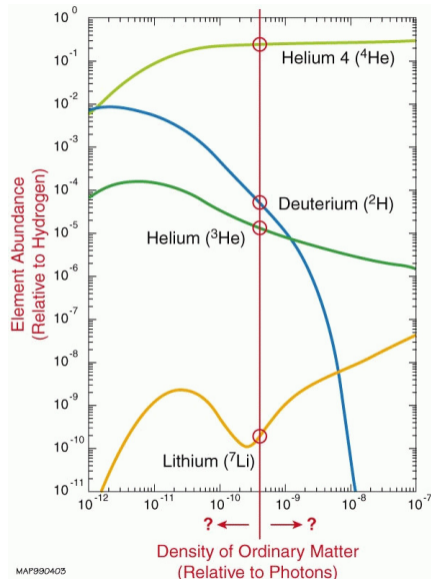


częstość reakcji zależy od gęstości materii

Konkurencyjny jest rozpad neutronu



który zachodzi niezależnie od gęstości materii



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”

$$\Omega_b \sim 0.05$$

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”

$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych (np. rotacja galaktyk, ewolucja struktur)  
⇒ materia “grawitacyjna” (całkowita ?)

## Ciemna materia?

W roku 1933 **Fritz Zwicky** zauważył, badając obiekty w Gromadzie Warkocza Bereniki (**Coma Cluster**), że poruszają się one ze zbyt dużymi prędkościami, większymi niż szacowana “prędkość ucieczki”.

Gromada powinna się rozlecieć...





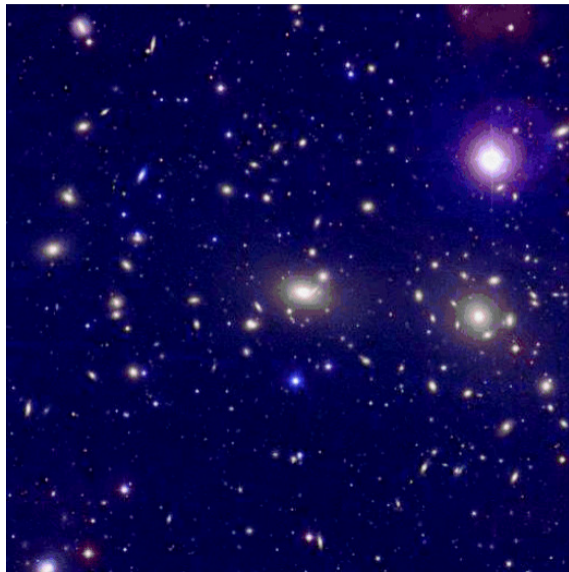
## Ciemna materia?

W roku 1933 **Fritz Zwicky** zauważył, badając obiekty w Gromadzie Warkocza Bereniki (**Coma Cluster**), że poruszają się one ze zbyt dużymi prędkościami, większymi niż szacowana “prędkość ucieczki”.

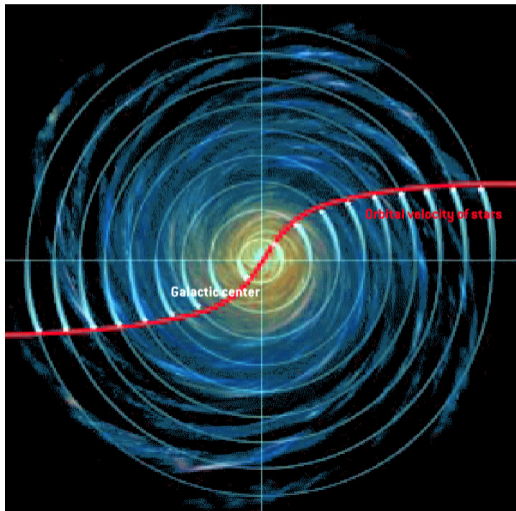
Gromada powinna się rozlecieć...

Wyznaczona na podstawie rozkładu prędkości masa “grawitacyjna” gromady była **około 400 razy większa** niż oczekiwano z obserwacji!

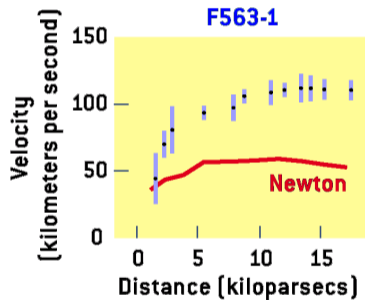
⇒ część tej materii musi być “ciemna”...



## Ciemna materia?

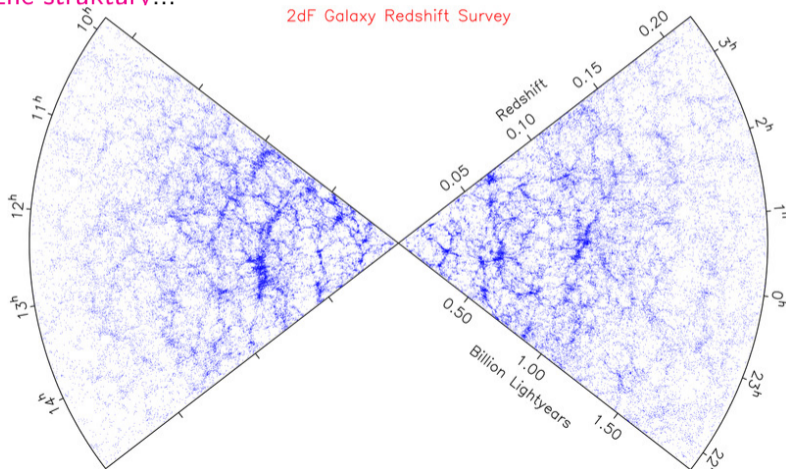


Znane nam rozkład “zwykłej” materii nie tłumaczy krzywych rotacji galaktyk.

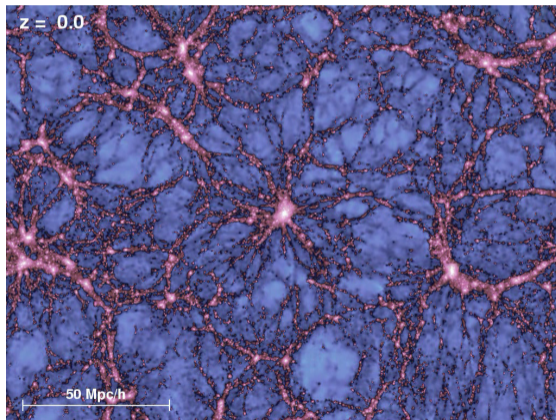


Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z przyjętych praw grawitacji i dynamiki

Mierząc przesunięcia ku czerwieni dla około setek tysięcy galaktyk otrzymaliśmy **trójwymiarową mapę** Wszechświata. Rozkład galaktyk, nawet na największych skalach nie jest jednorodny. Widzimy **wyraźne struktury**...



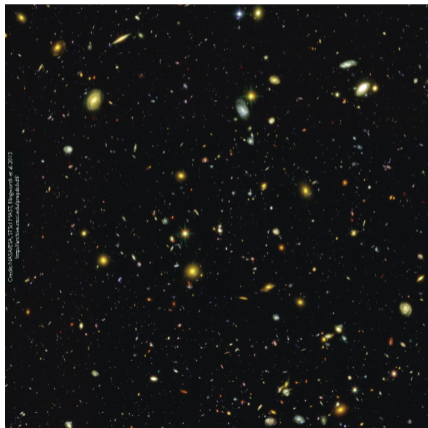
Od momentu powstania atomów to **oddziaływania grawitacyjne** rządzą **ewolucją wszechświata**.  
Potrafimy to dokładnie modelować.



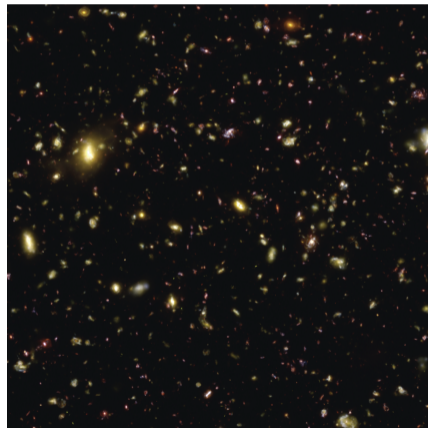
Millennium Simulation: [https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/data\\_vis/index.shtml](https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/data_vis/index.shtml)

Okazuje się, że sama **materia barionowa nie pozwala** opisać **obecnych struktur** Wszechświata, powstawałyby zbyt wolno... Żeby je odtworzyć trzeba dodać wkład **ciemnej materii**:

Obserwacje teleskopu Hubble'a



Wynik symulacji

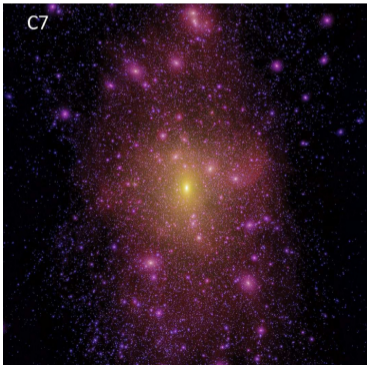


Illustris project: <https://www.illustris-project.org/media/>

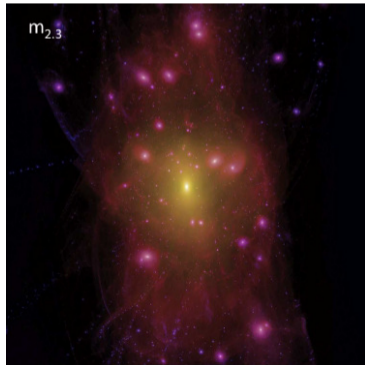
Aby opisać proces **tworzenia się struktur** we Wszechświecie musimy uwzględnić wkład od **“ciemnej materii”**! Co więcej, ciemna materia musi być **“zimna”** (wolna, nierelatywistyczna). Inaczej drobne struktury byłyby rozmywane...

⇒ musi składać się z **masywnych cząstek**

Ciężkie cząstki (“zimna” CM)



Lekkie cząstki (“ciepła” CM)



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"

$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych (np. rotacja galaktyk, ewolucja struktur)  
⇒ materia "grawitacyjna" (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

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"

$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych (np. rotacja galaktyk, ewolucja struktur)  
⇒ materia "grawitacyjna" (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$\Omega_m \gg \Omega_b \Rightarrow$  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)

## 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?

## 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.

Wciąż często wymienianym kandydatem jest LSP - najlżejsza cząstka supersymetryczna.

## 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.

Wciąż często wymienianym kandydatem jest LSP - najlżejsza cząstka supersymetryczna.

Mamy też wciąż nadzieję, że LHC zdoła ją jeszcze znaleźć...

- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubble'a
- 3 Ewolucja Wszechświata
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie
- 5 Ciemna energia**

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

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

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



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

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

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



Dopiero około **300'000 lat po Wielkim Wybuchu** fotony nie miały już dość energii, żeby jonizować atomy. Elektrony mogły połączyć się z jądrami tworząc **obojętne atomy**.

We Wszechświecie pozostały tylko obojętne atomy i **fotony**.

Fotony praktycznie nie oddziałują w rozszerzającym się dalej Wszechświecie (jest dla nich przezroczysty). Jedyne 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 byliśmy w stanie ich obserwować - jest to tzw. promieniowanie reliktowe inaczej nazywane też mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB)



Fotony praktycznie nie oddziałują w rozszerzającym się dalej Wszechświecie (jest dla nich przezroczysty). Jedyne ich energia wciąż maleje (długość fali rośnie)...

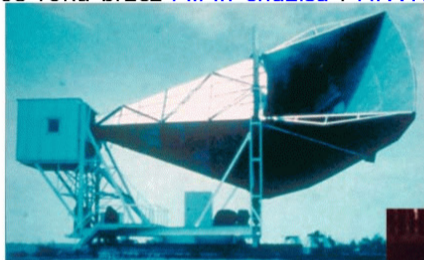
W 1948 George Gamow, Ralph Alpher i Robert Herman doszli do wniosku, że fotony powstałe 300'000 lat po Wielkim Wybuchu muszą wciąż wypełniać Wszechświat.

Tylko ich energia jest tak mała, że nie byliśmy w stanie ich obserwować - jest to tzw. promieniowanie reliktowe inaczej nazywane też mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB)

Pierwsze przewidywania wskazywały, że rozkład widmowy promieniowania relikтового powinien odpowiadać rozkładowi promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze

$$T \sim 5 K$$

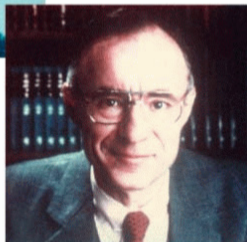
zostało odkryte w 1965 roku przez [A.A.Penzisa](#) i [R.W.Wilsona](#).



Microwave Receiver



Robert Wilson



Arno Penzias

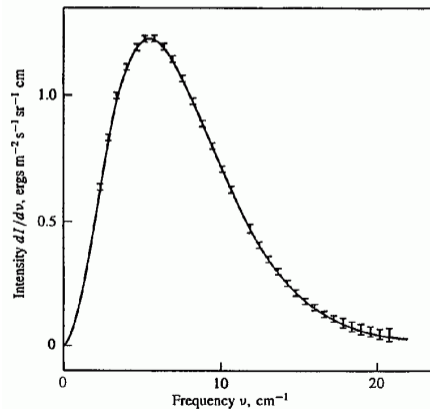
MAP990045

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

Rozkład widmowy promieniowania zgadzał się z oczekiwanym widmem [promieniowania ciała doskonale czarnego](#)

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

Wyniki z satelity COBE: (1999)



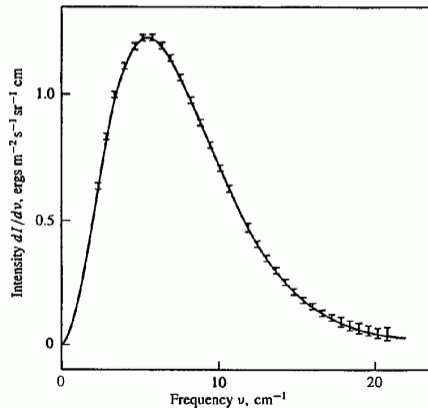
zostało odkryte w 1965 roku przez [A.A.Penazisa](#) i [R.W.Wilsona](#).

Rozkład widmowy promieniowania zgadzał się z oczekiwanym widmem [promieniowania ciała doskonale czarnego](#)

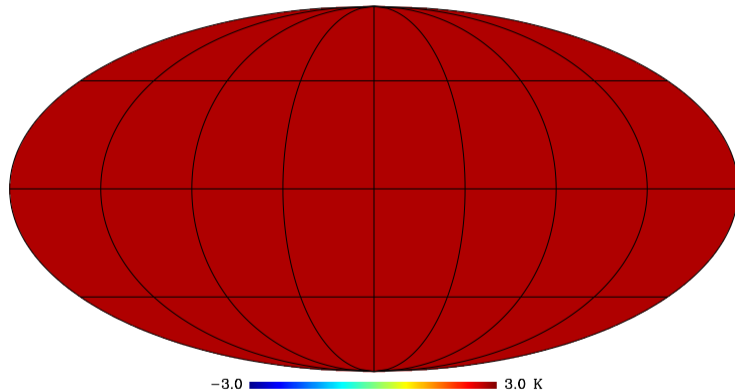
$$T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

Obserwacja [CMB](#) była rozstrzygającym dowodem [Wielkiego Wybuchu](#) i ostatecznie "pogrzebała" model statycznego Wszechświata...

Wyniki z satelity [COBE](#): (1999)

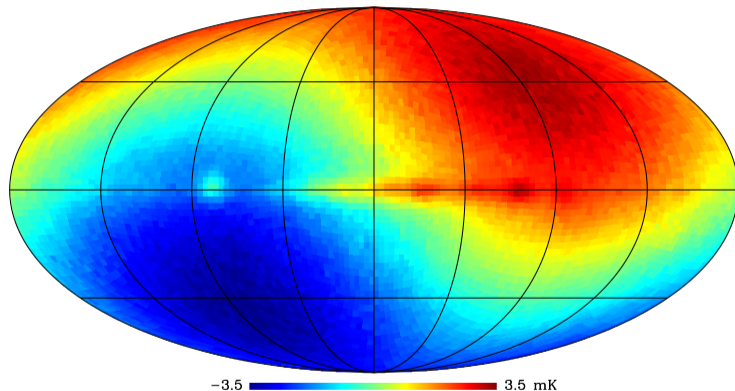


W pierwszym przybliżeniu (dokładność pomiaru widma,  $\Delta T \sim 1K$ )



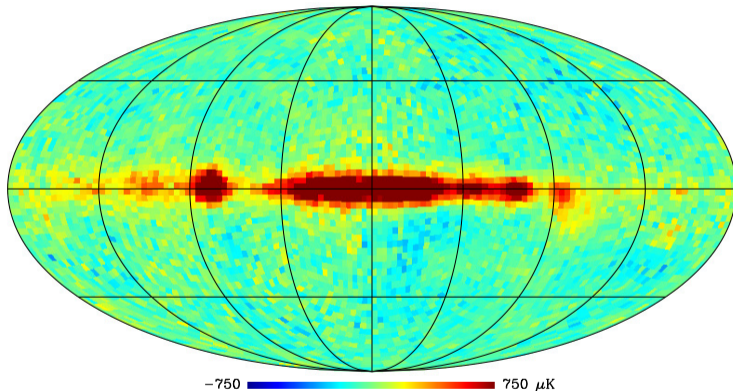
promieniowanie tła jest **izotropowe**, wypełnia jednolicie całe niebo.

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



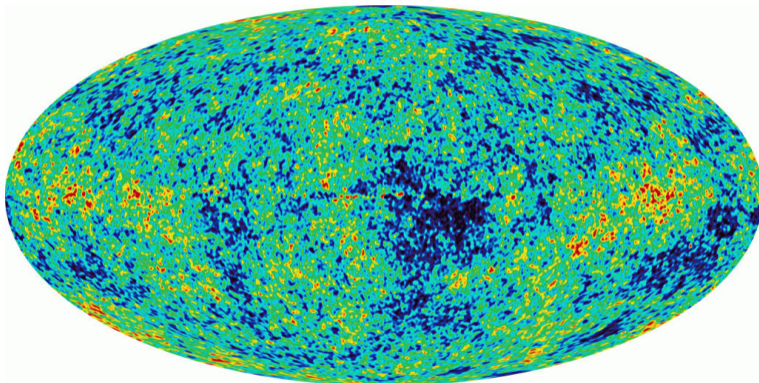
widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem 'globalnego' układu. "Zwykły" efekt Dopplera...

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



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

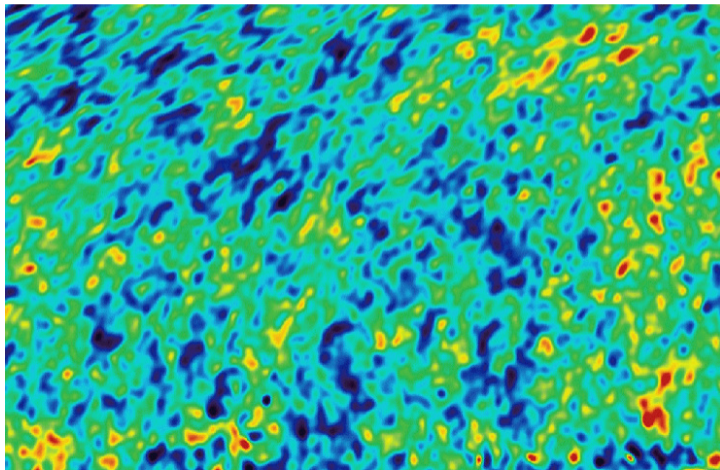
Odejmując promieniowanie Galaktyki i innych znanych źródeł ( $\Delta T \sim 100\mu K$ )



widzimy przypadkowe fluktuacje w rozkładzie temperatury (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.



Model **Wielkiego Wybuchu** **przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła. **Ale krzywizna Wszechświata wpływa na to jak je dziś widzimy...**

Sytuacja analogiczna do zdjęć robionych z określonej odległości:  
rozmiary szczegółów na zdjęciu zależą od **ogniskowej obiektywu!**



$$f = 22 \text{ mm}$$

Model **Wielkiego Wybuchu** **przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła. **Ale krzywizna Wszechświata wpływa na to jak je dziś widzimy...**

Sytuacja analogiczna do zdjęć robionych z określonej odległości:  
rozmiary szczegółów na zdjęciu zależą od **ogniskowej obiektywu!**



$$f = 50 \text{ mm}$$

Model **Wielkiego Wybuchu** **przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła. **Ale krzywizna Wszechświata wpływa na to jak je dziś widzimy...**

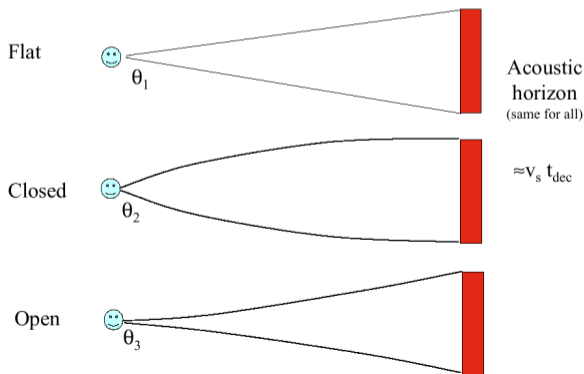
Sytuacja analogiczna do zdjęć robionych z określonej odległości:  
rozmiary szczegółów na zdjęciu zależą od **ogniskowej obiektywu!**



$f = 135 \text{ mm}$

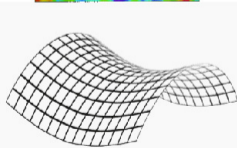
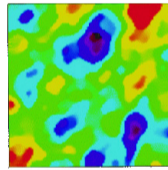
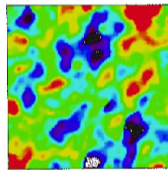
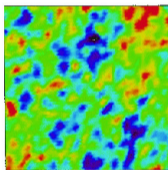
Model **Wielkiego Wybuchu przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła. **Ale krzywizna Wszechświata wpływa na to jak je dziś widzimy...**

Rozmiary fluktuacji jakie obecnie **obserwujemy** są zdeterminowane przez wielkoskalową **krzywiznę Wszechświata!** odpowiednik “ogniskowej”

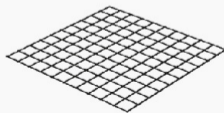


Model **Wielkiego Wybuchu** **przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła. **Ale krzywizna Wszechświata wpływa na to jak je dziś widzimy...**

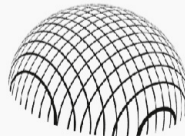
Rozmiary fluktuacji jakie obecnie **obserwujemy** są zdeterminowane przez wielkoskalową **krzywiznę Wszechświata!** odpowiednik "ogniskowej"



**OPEN**

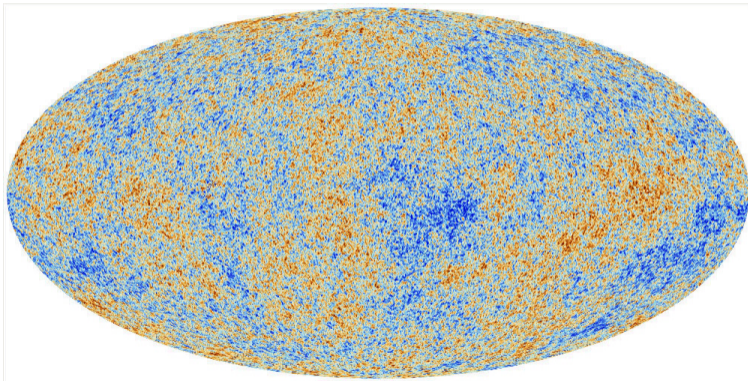


**FLAT**



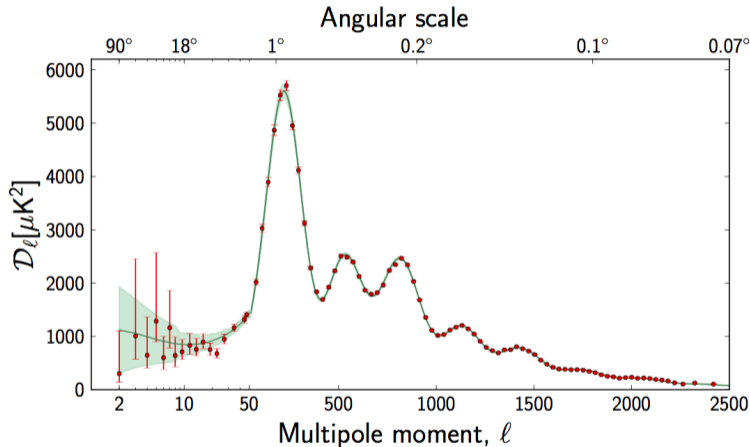
**CLOSED**

Wystrzelony w 2009 roku satelita Planck pozwolił na bardzo dokładny pomiar niejednorodności CMB. Ostateczne wyniki przedstawiono w 2018:



Promieniowanie przemierzało Wszechświat przez ponad 13 mld. lat  
Mimo to nie widzimy żadnych “zniekształceń”  $\Rightarrow$  **Wszechświat jest płaski!**

Dopasowanie modelu do rozkładu rozmiarów fluktuacji promieniowania tła:



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

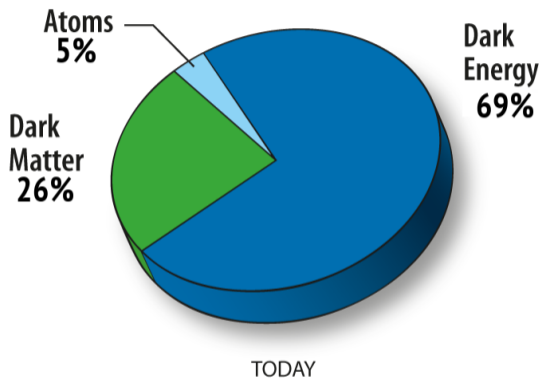
Poza materią i ciemną materią ( $\Omega_m$ ) musi być jeszcze dodatkowy wkład ( $\Omega_\Lambda$ )...



## Model $\Lambda$ CDM

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

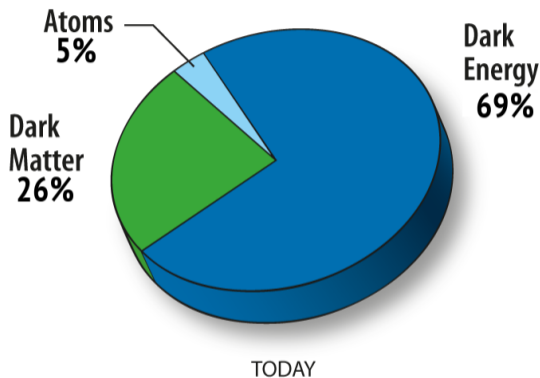
- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **5%** Wszechświata.
- **26%** stanowi **ciemna materia...** (Cold Dark Matter - CDM)
- **69%** to tzw. "**ciemna energia**", którą możemy opisać poprzez tzw. **stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )**



## Model $\Lambda$ 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 tzw. **stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )**



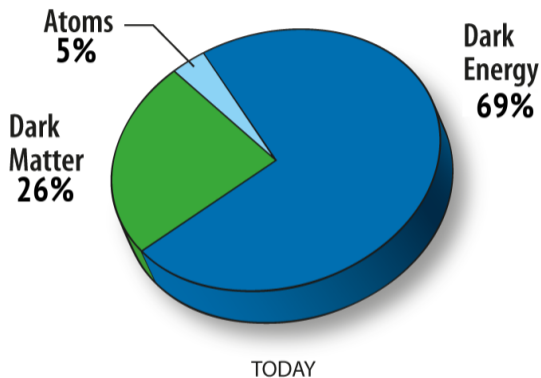
Einstein dodał stałą kosmologiczną do równań OTW, żeby "uratować" **statyczny Wszechświat...**

Potem uważał, że to była jego największa pomyłka...

## Model $\Lambda$ 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 tzw. **stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )**



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

Wiek Wszechświata:  $T = 13.787 \pm 0.020$  Gyr

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      Co to jest!?! 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**      Co to jest!?! 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** Co to jest!?! Mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie: jak łamana jest 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** Co to jest!?! Mamy szereg propozycji (np. cząstki supersymetryczne)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie: jak łamana jest symetria **materia-antymateria**?  
Wymaga złamania **symetrii CP**, znacznie silniejszego niż w SM...
- cząstki o bardzo wysokich energiach w **promieniowaniu kosmicznym**, błyski  $\gamma$ , ...

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** Co to jest!?! Mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie: jak łamana jest 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** **Na razie nie ma dla niej miejsca w Modelu Standardowym...**

**Każda odpowiedź przynosi kolejne pytania, wiele jeszcze pracy przed nami...**