

# Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

## Ciemna strona wszechświata

Aleksander Filip Żarnecki

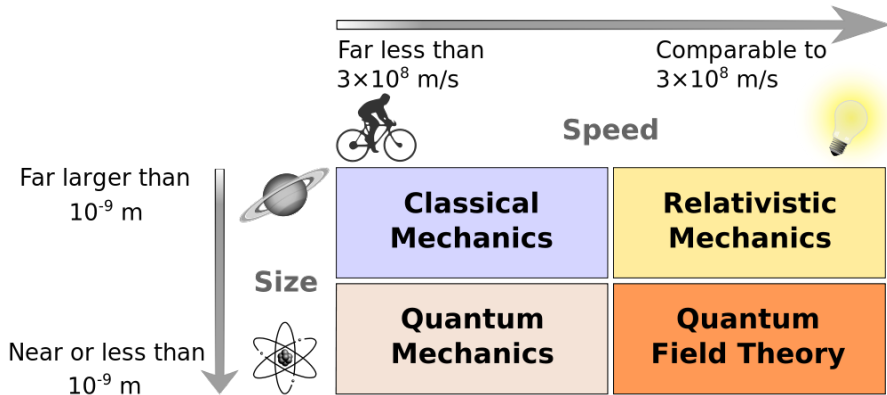
Wykład ogólnouniwersytecki



14 stycznia 2020

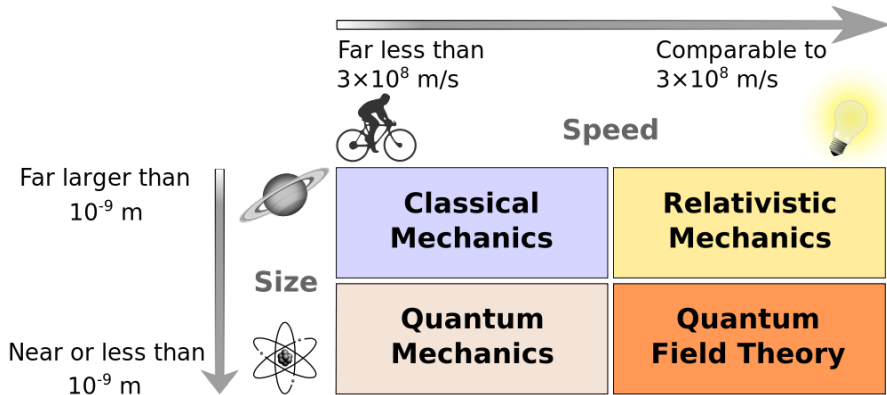
- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubble'a
- 3 Ewolucja Wszechświata
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie
- 5 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 6 Ciemna energia

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



Współczesna fizyka cząstek opisywana jest 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 opisywana jest w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową

Ale 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 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 6 Ciemna energia

## Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem.

Mimo to stosunkowo długo brak było spójnej teorii grawitacji.

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

## Grawitacja

Grawitacja jest najbardziej “widocznym” oddziaływaniem.

Mimo to stosunkowo długo 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.

Mimo to stosunkowo długo 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.

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

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 natury widoczna też w podobieństwie do prawa Coulomba (oddziaływanie ładunków elektrycznych):

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

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

## Grawitacja

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

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

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

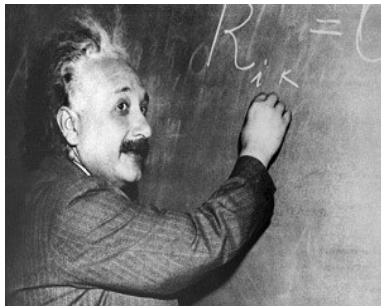
W wiek XX wchodziliśmy z prostym i eleganckim opisem praktycznie wszystkich znanych zjawisk...

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

## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

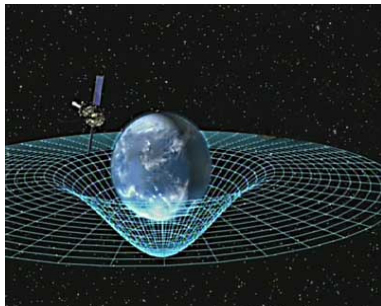
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



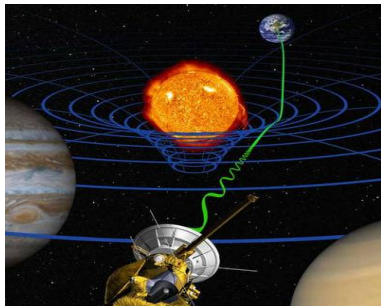
Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **“swobodnej” materii**

## Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



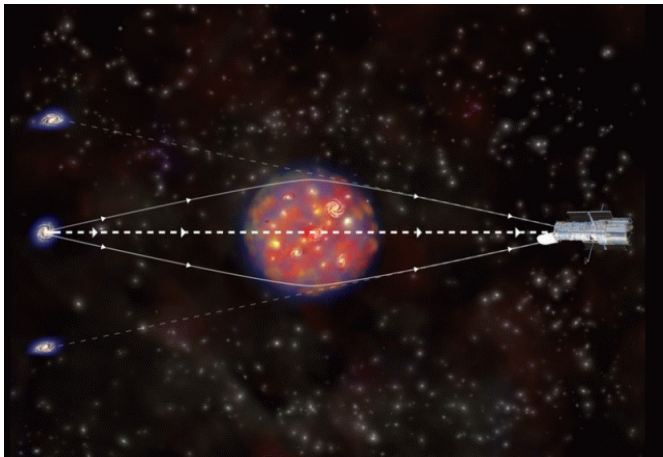
Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **“swobodnej” materii**

**Światło** porusza się po trajektoriiach odpowiadających **najmniejszej odległości** (najszybszej propagacji) między dwoma punktami.

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

**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...

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

Kosmiczny Teleskop  
Hubble'a



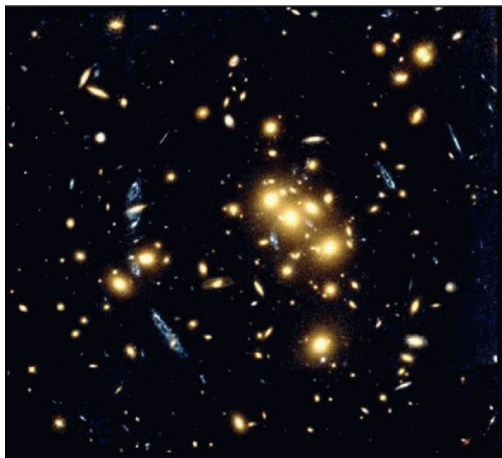


**Materia** powoduje **zakrzywienie** czasoprzestrzeni. Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii i biegu **promieni światła**.

Zdjęcie z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a

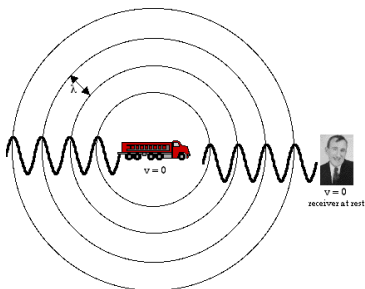
**Niebieskie łuki** - wielokrotny obraz odległej galaktyki położonej za masywną gromadą galaktyk.

⇒ bezpośredni dowód słuszności OTW



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

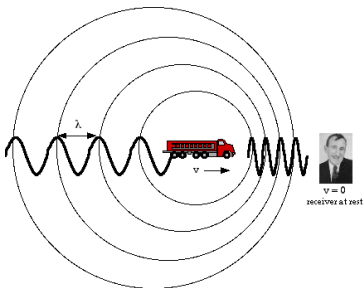
## Przypadek klasyczny



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...

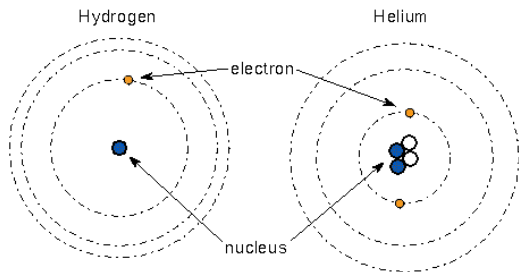
Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej częstotliwości**.




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

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

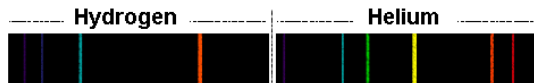
## Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



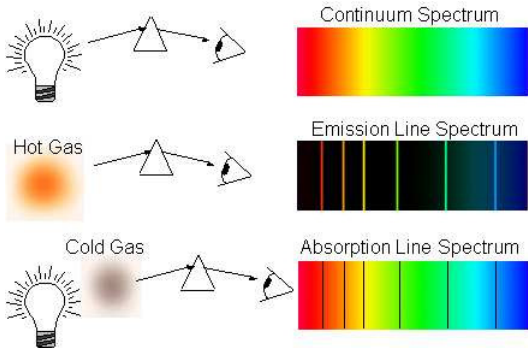
-  = proton (+ charge)
-  = neutron (no charge)
-  = electron (- charge)
- - - - = energy level

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.

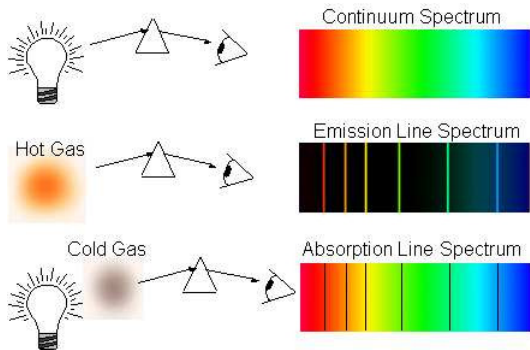


## Linie absorpcyjne

Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.

## Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

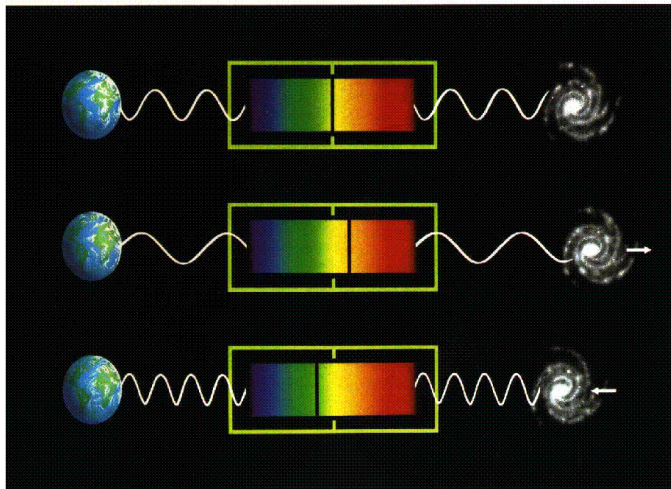


## Linie absorpcyjne

Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.

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

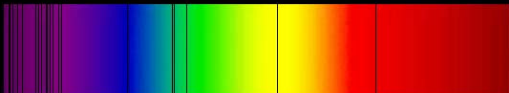
Mierząc linie absorpcyjne w widmie galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu





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

Absorption Lines from our Sun



Absorption Lines from a supercluster of galaxies, BAS11

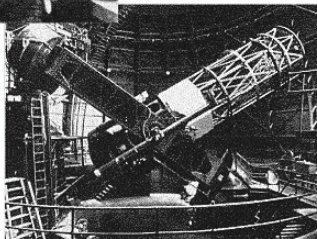
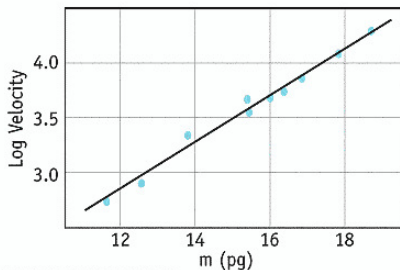
$v = 0.07c$ ,  $d = 1$  billion light years



## DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

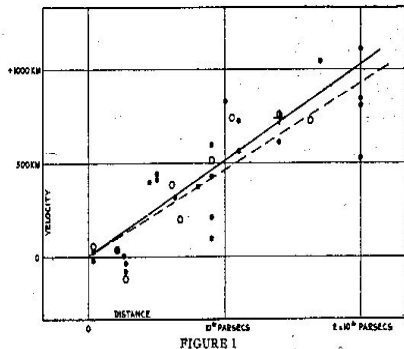
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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

$$v = H \cdot r$$

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

Originalne 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:

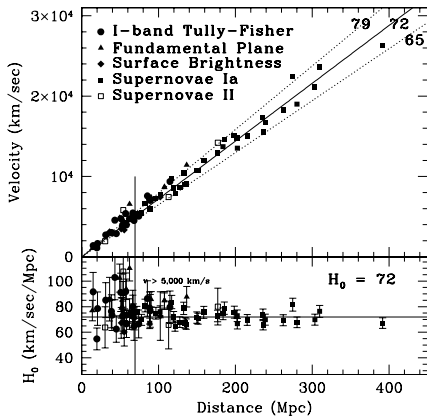
$$v = H \cdot r$$

$r$  - 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:



## Pomiar odległości

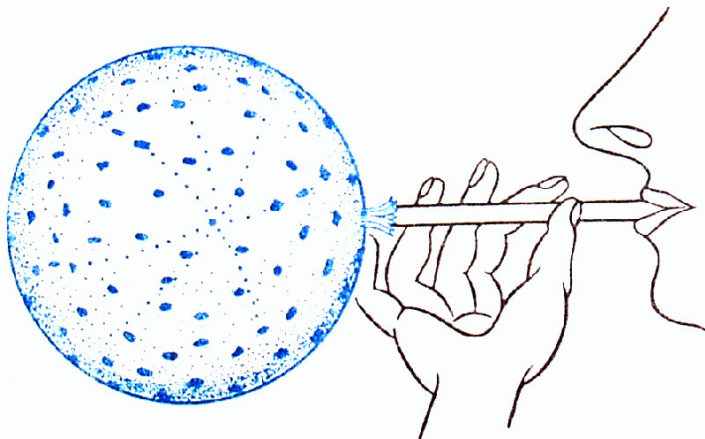
Wyznaczenie odległości jest znacznie trudniejsze od wyznaczenia "przesunięcia ku czerwieni".

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

Na największych odległościach są to **Supernowe typu 1A**.



Obserwacja Hubble'a, że **wszystkie** obiekty oddalają się, **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 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 6 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 "zawieszone" są poszczególne obiekty.

Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat ewoluował 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 "zawieszone" są poszczególne obiekty.

Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat ewoluował 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 "zawieszone" są poszczególne obiekty.

Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat ewoluował z **punktowego skupiska nieskończonej energii...**

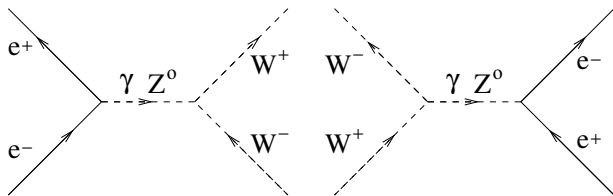
## Wielki Wybuch

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.

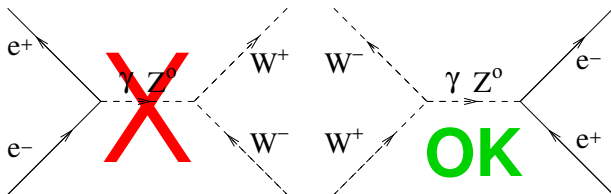
Nie istniały żadne obiekty złożone (**nukleony, jądra atomowe, atomy**), gdyż energie były znacznie większe od energii wiązania.

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



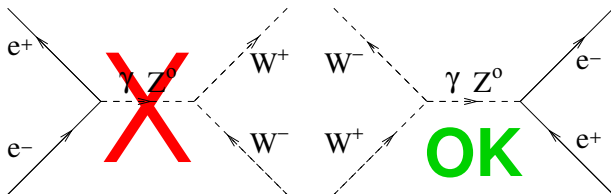
Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały**...

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



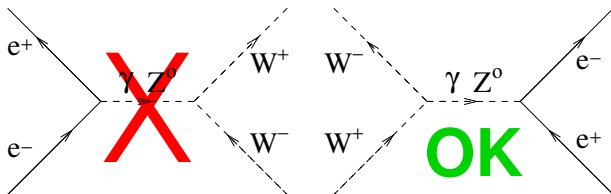
- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)

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



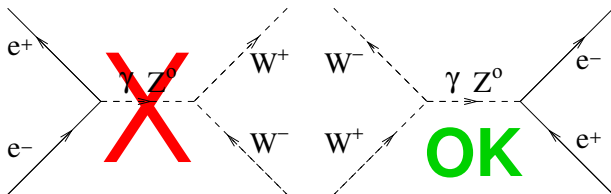
- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony ( $10^{-5}$  sekundy)

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



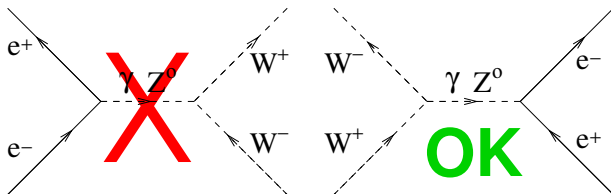
- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony ( $10^{-5}$  sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)

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



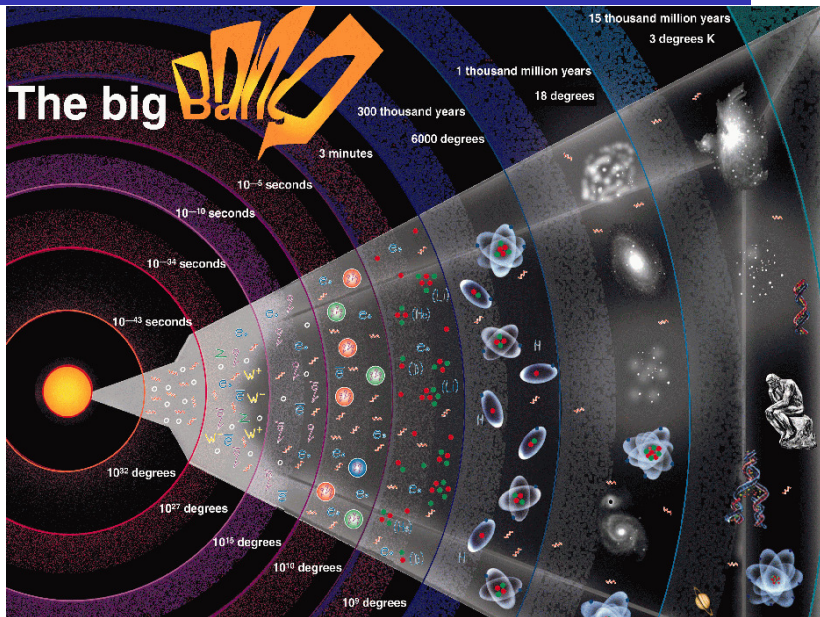
- znikają swobodne bozony  $W^{\pm}$  i  $Z^0$  ( $10^{-10}$  sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony ( $10^{-5}$  sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)

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** przestrzeni i zależy od **gęstości** materii  $\rho$ .

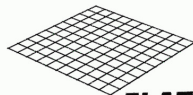
Gęstość krytyczna:  $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \sim 10 \text{ atomów H w m}^3$

$\rho = \rho_c$  asymptotycznie "zatrzyma" się

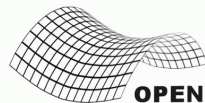
$\rho < \rho_c$  będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$  kiedyś zacznie się zapadać

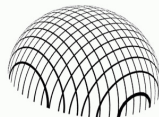
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



**FLAT**



**OPEN**

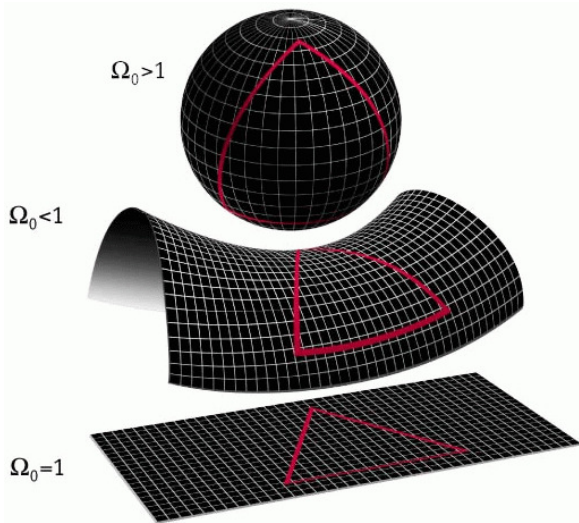


**CLOSED**

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 Mikrofalowe promieniowanie tła
- 6 Ciemna energia

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”**

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

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”**

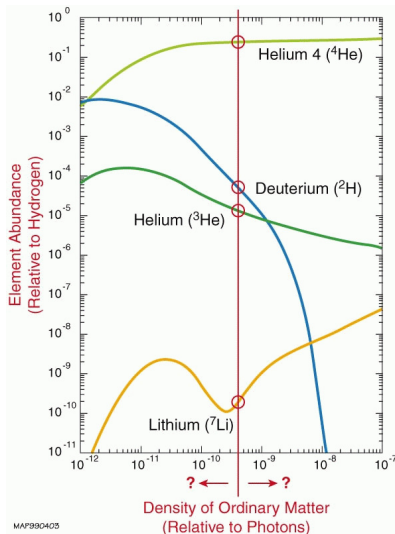
W zależności od stosunku gęstości materii do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

Składnikiem koniecznym do produkcji jąder cięższych od wodoru są neutrony

Pierwszy krok - produkcja deuteru:



(zależy od gęstości materii)



W zależności od stosunku gęstości materii do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

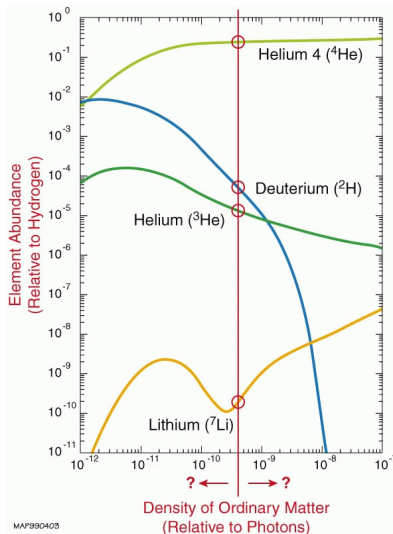
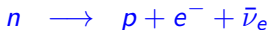
Składnikiem koniecznym do produkcji jąder cięższych od wodoru są neutrony

Pierwszy krok - produkcja deuteru:



(zależy od gęstości materii)

Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):





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”**

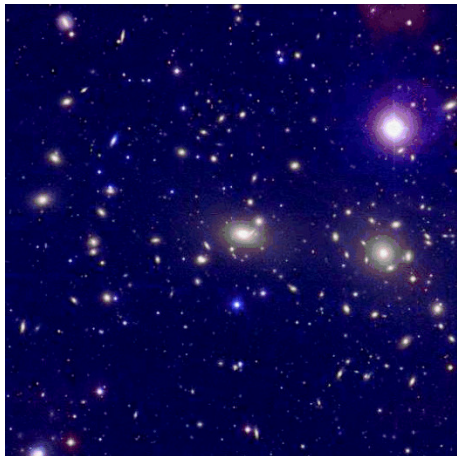
$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań **grawitacyjnych** (np. rotacja galaktyk)  
⇒ 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”.

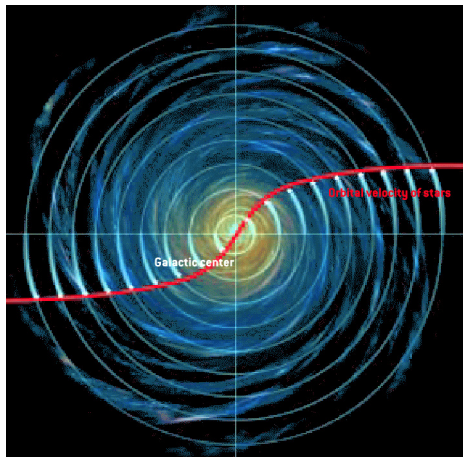
Gromada powinna się rozlecieć...

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

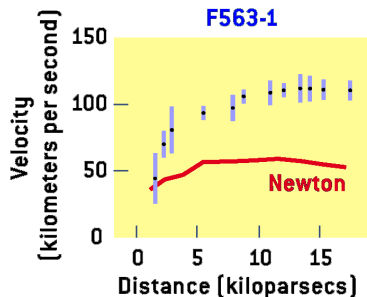
⇒ część tej materii musi być “ciemna”...



## Ciemna materia?



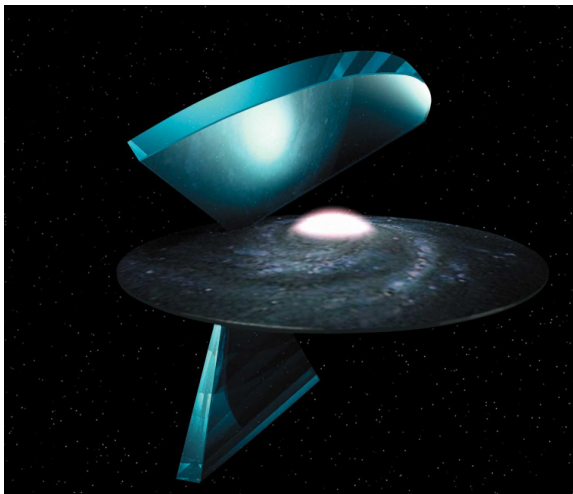
Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.



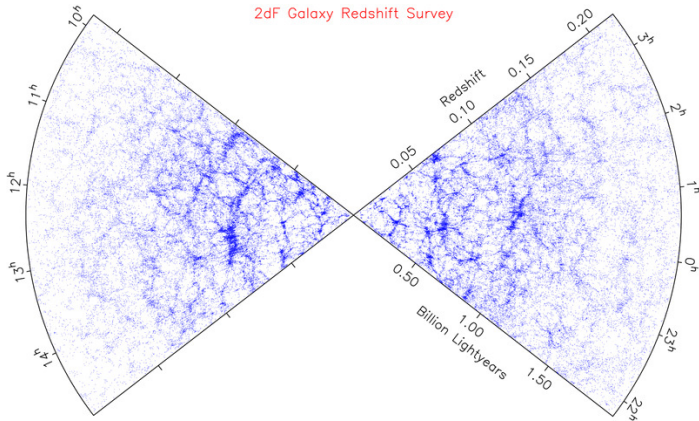
Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

## Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey

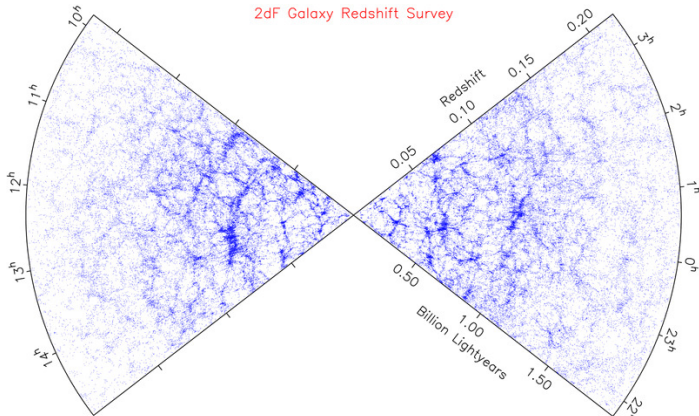
Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



Otrzymujemy **trójwymiarową mapę** Wszechświata. Rozkład galaktyk, nawet na największych skalach nie jest jednorodny. Widzimy **wyraźne struktury**...



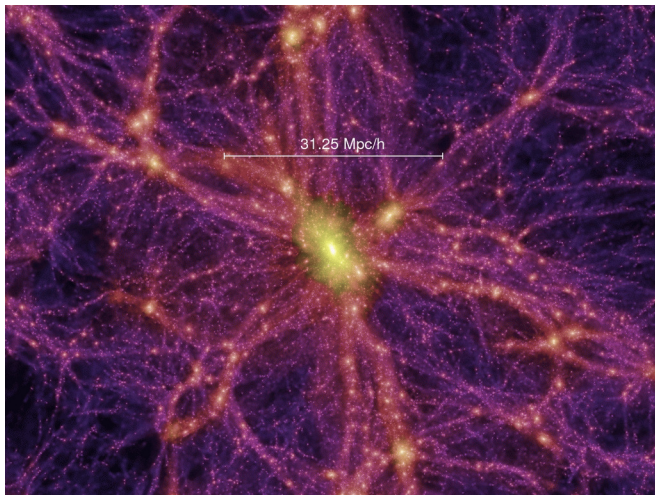
Otrzymujemy **trójwymiarową mapę** Wszechświata. Rozkład galaktyk, nawet na największych skalach nie jest jednorodny. Widzimy **wyraźne struktury**...



Znana nam **materia barionowa** nie wystarcza do opisu **oddziaływań grawitacyjnych** na skalach międzygalaktycznych.



Znana nam **materia barionowa nie tłumaczy** też **tworzenia się struktur** we Wszechświecie.

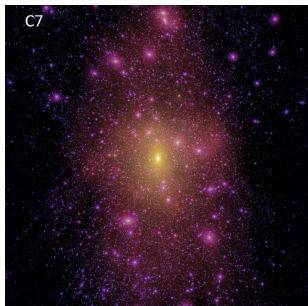


Aby opisać **tworzenia się struktur** we Wszechświecie musimy uwzględnić wkład od **ciemnej materii!**

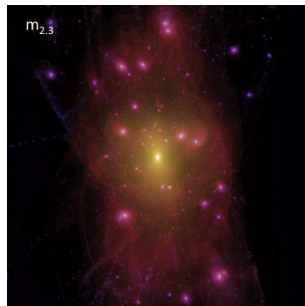
Co więcej, ciemna materia musi być **“zimna”** (wolna, nierelatywistyczna). Inaczej drobne struktury byłyby rozmywane...

⇒ 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)  
⇒ 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)  
⇒ 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)

## 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.

Najczęściej 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.

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



- 1 Ogólna Teoria Względności
- 2 Efekt Dopplera i prawo Hubble'a
- 3 Ewolucja Wszechświata
- 4 Gęstość materii we Wszechświecie
- 5 Mikrofalowe promieniowanie tła**
- 6 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 **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 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 **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.

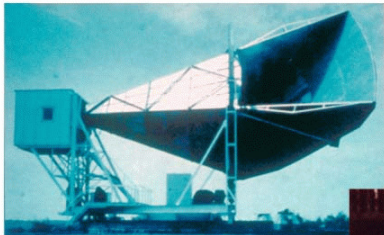
Jest to tzw. **promieniowanie reliktowe** inaczej nazywane też **mikrofalowym promieniowaniem tła (CMB)**

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

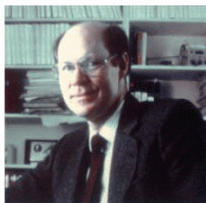
$$T \sim 5 K$$

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

## DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

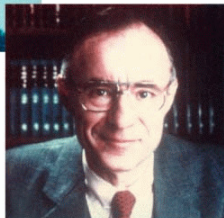


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



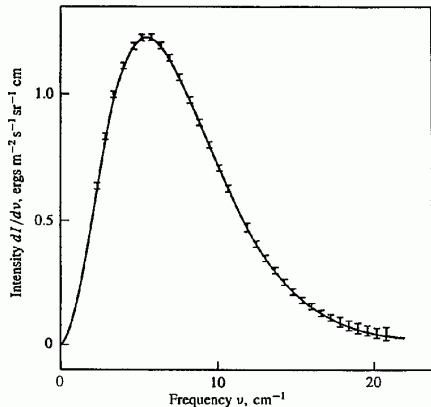
Arno Penzias

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 (1990)



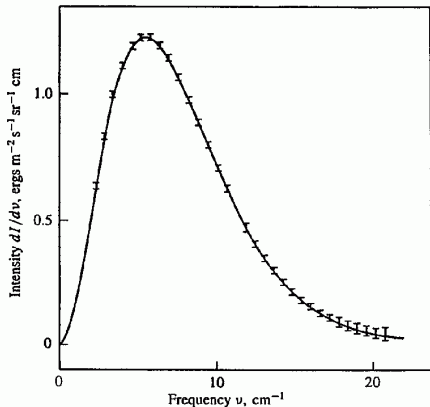
zostało odkryte w 1965 roku przez A.A.Penzisa i R.W.Wilsona.

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

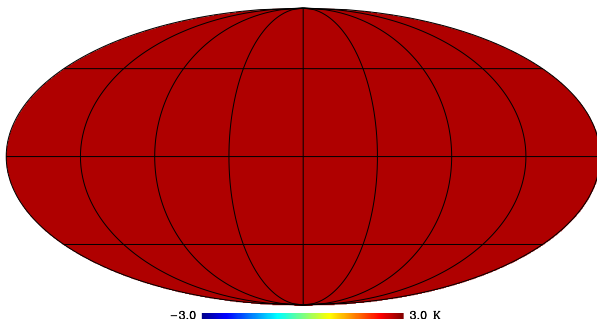
$$T = 2.725 \pm 0.002 \text{ K}$$

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

Wyniki z satelity COBE (1990)



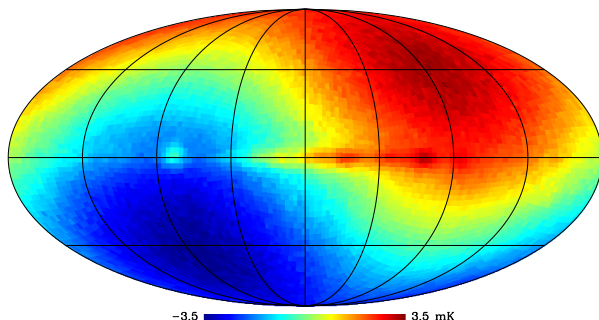
W pierwszym przybliżeniu  $(\Delta T \sim 1K)$



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

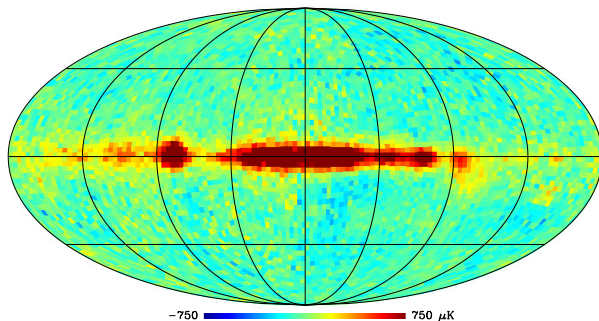


Jednak gdy przyjrzymy się bliżej ( $\Delta T \sim 1\text{mK}$ )



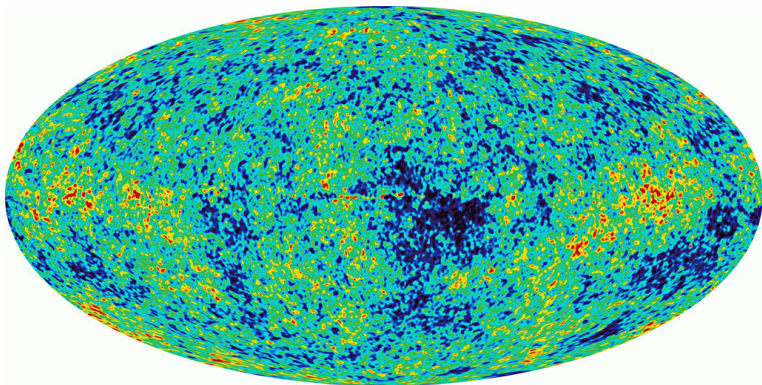
widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem 'globalnego' układu.  
"Zwykły" efekt Dopplera...

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

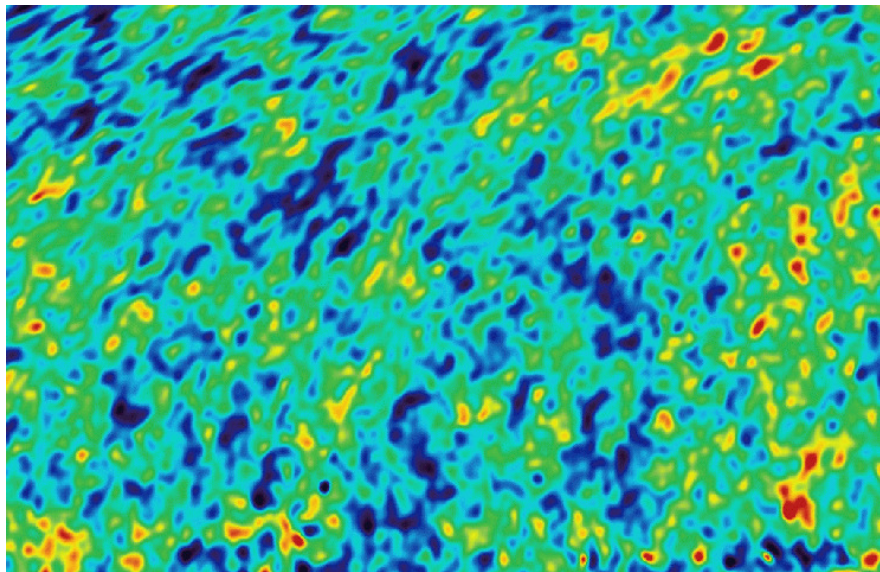


⇒ widzimy promieniowanie naszej galaktyki (Drogi Mlecznej)...

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

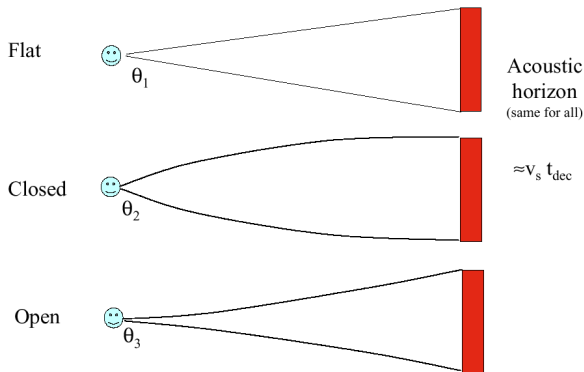


widzimy przypadkowe fluktuacje w rozkładzie energii promieniowania  
 $\Rightarrow$  czy w tym chaosie tkwi jakaś informacja?



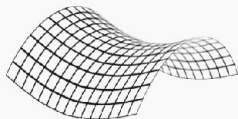
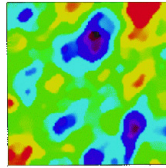
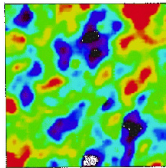
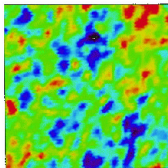
Model **Wielkiego Wybuchu przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła.

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

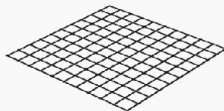


Model **Wielkiego Wybuchu przewiduje** jakie były rozmiary **fluktuacji gęstości** materii w chwili powstania promieniowania tła.

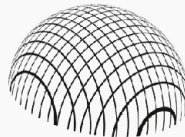
Rozmiary jakie obecnie **obserwujemy** zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



**OPEN**

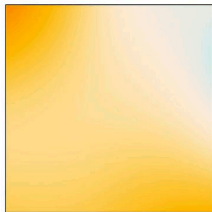


**FLAT**

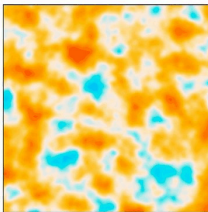
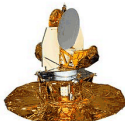


**CLOSED**

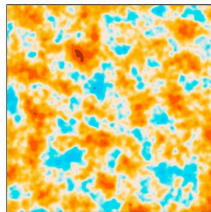
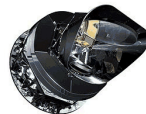
W roku 2009 wystrzelono satelitę Planck, pierwsze uzyskane wyniki zaprezentowano w roku 2013, ostateczne w 2018



COBE



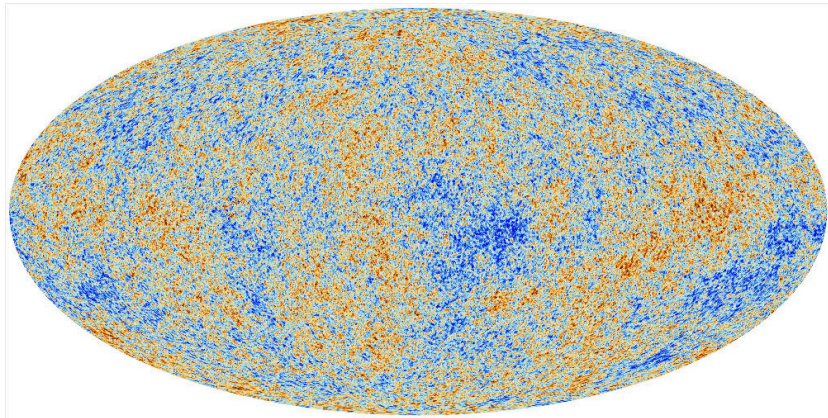
WMAP



Planck

Jakościowy wzrost precyzji pomiarów w porównaniu z wcześniejszymi misjami

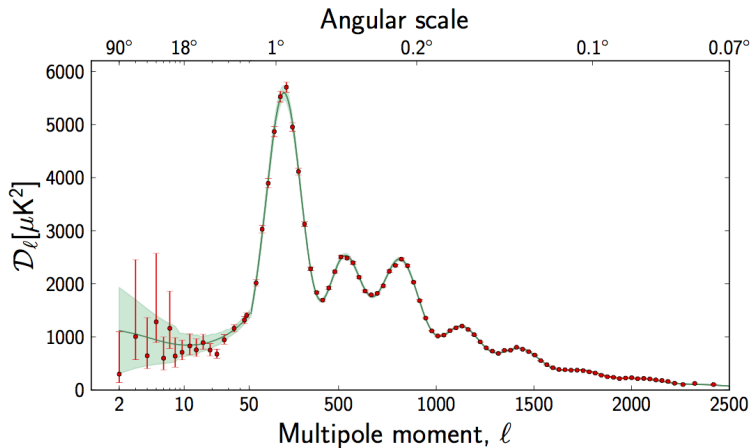
W roku 2009 wystrzelono satelitę Planck, pierwsze uzyskane wyniki zaprezentowano w roku 2013, ostateczne w 2018



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  $\rho$ .

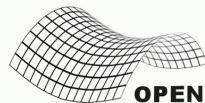
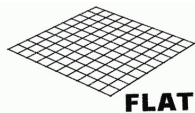
Gęstość krytyczna:  $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

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

$\rho < \rho_c$       będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$       kiedyś zacznie się zapadać

GEOMETRY OF THE UNIVERSE



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

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

## Stała kosmologiczna

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

$$\rho_m \approx 0.3 \rho_c$$

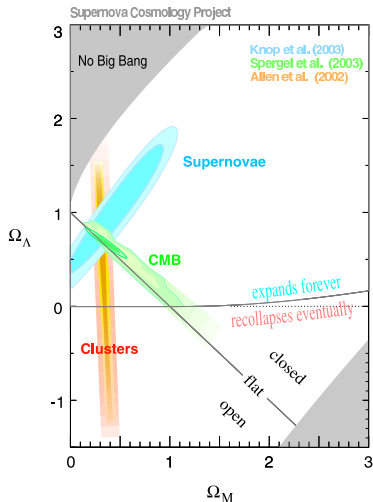
Gęstość oczekiwana na podstawie wyznaczone krzywizny Wszechświata:

$$\rho \approx \rho_c$$

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

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

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



## Dopasowanie modelu

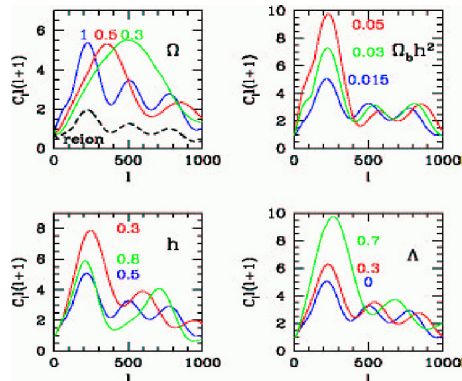
Widmo promieniowania mikrofalowego zależy nie tylko od gęstości całkowitej, ale też od udziału poszczególnych składników.

Model wykorzystany do opisu danych Planck uwzględnia wkład od

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

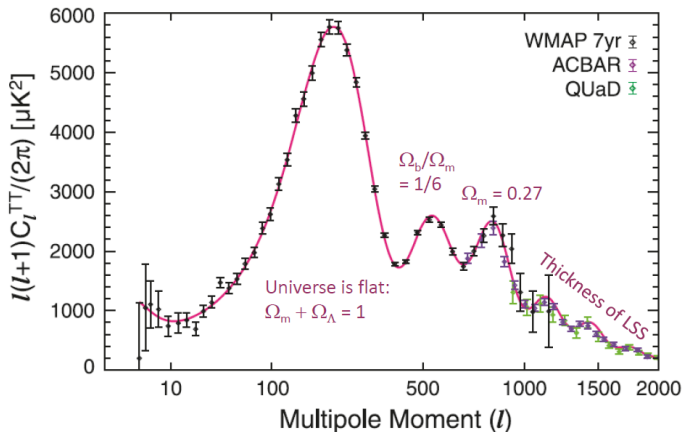
$\Rightarrow$  Ewolucję Wszechświata opisujemy poprzez 6 niezależnych parametrów

Wyniki symulacji:



## Dopasowanie modelu

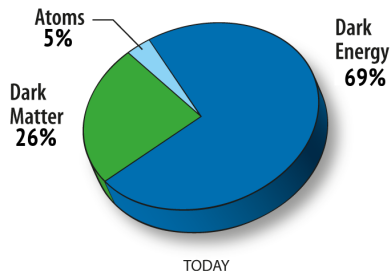
Analiza pełnego widma CMB pozwala na dopasowanie wszystkich parametrów (choć uwzględnienie innych danych pomaga)



## Model $\Lambda$ 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 stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )



**Wszechświat** zdominowany 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** 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  $\gamma$ , ...

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