

Wszechświat Cząstek Elementarnych dla Humanistów

Ewolucja Wszechświata

Aleksander Filip Żarnecki

Wykład ogólnouniwersytecki



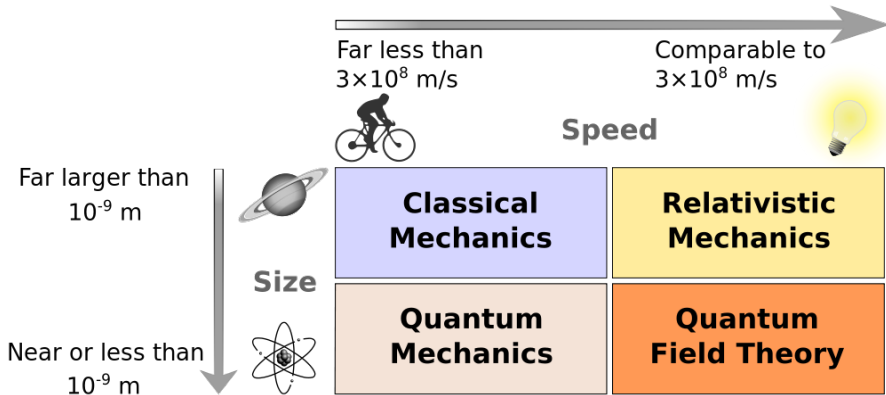
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

9 stycznia 2018

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

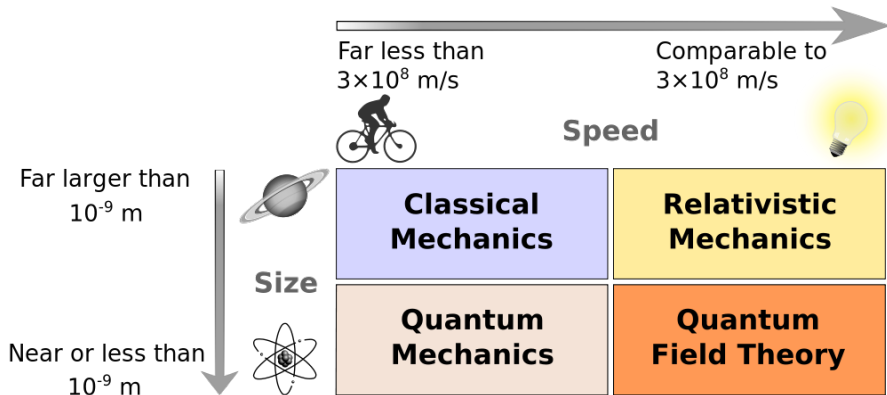
Granice stosowalności mechaniki klasycznej

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

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 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...

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):

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

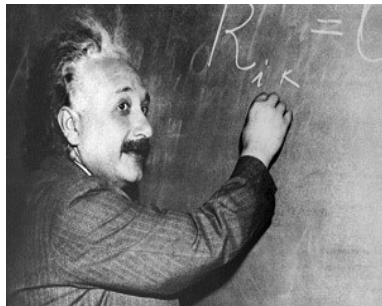
W wiek XX wchodziliśmy z prostym i eleganckim opisem praktycznie wszystkich znanych zjawisk...

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.

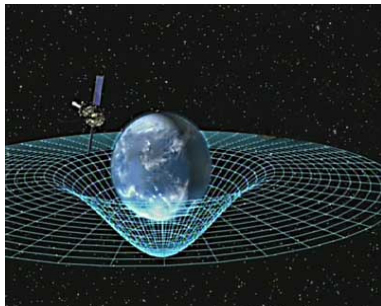
Grawitacja nie jest już opisywana jako siła, ale jako **odkształcenie czasoprzestrzeni!**



Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



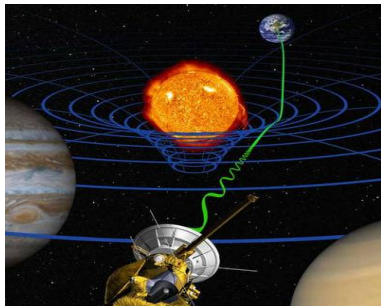
Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

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!**



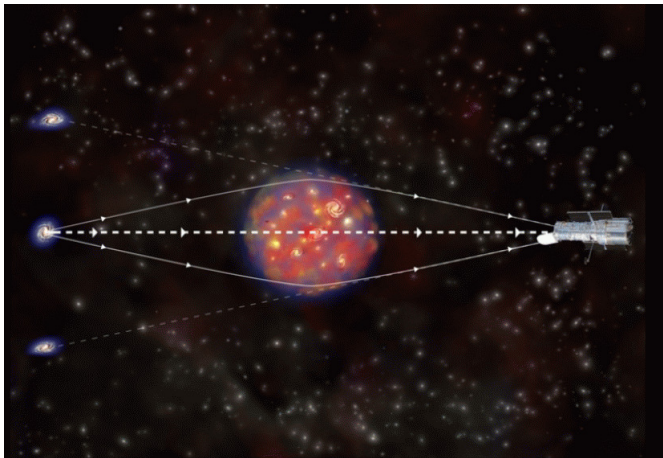
Materia powoduje **zakrzywienie czasoprzestrzeni**.

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

Światło porusza się po trajektoriach 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



Silne soczewkowanie grawitacyjne

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

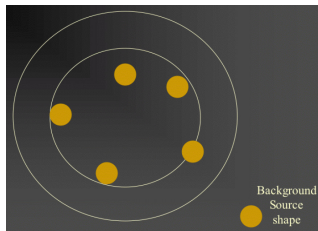
Soczewkowanie grawitacyjne

Silne soczewkowanie grawitacyjne

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

Słabe soczewkowanie grawitacyjne

W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **niewielkie zniekształcenie obrazu** \Rightarrow **analiza statystyczna**

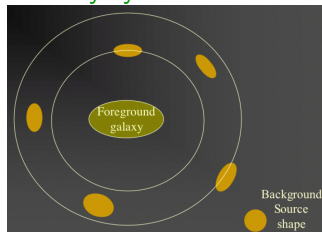
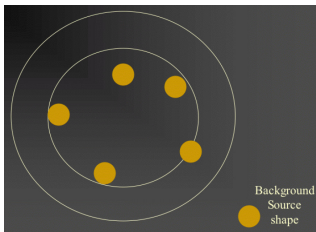


Silne soczewkowanie grawitacyjne

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

Słabe soczewkowanie grawitacyjne

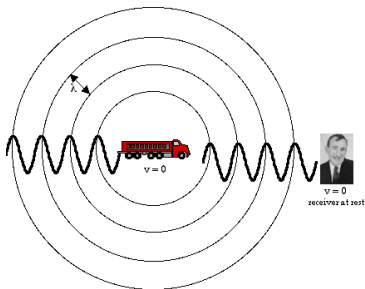
W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **niewielkie zniekształcenie obrazu** \Rightarrow **analiza statystyczna**



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

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

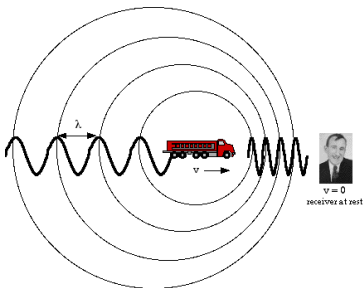
Przypadek klasyczny



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...

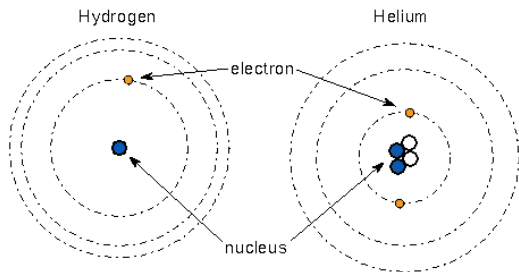
Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej częstotliwości**.

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

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

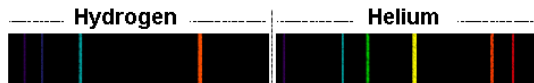
Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



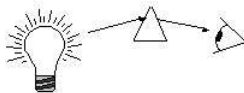
- = proton (+ charge)
- = neutron (no charge)
- = electron (- charge)
- - - - = energy level

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

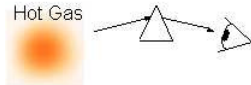
Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



Continuum Spectrum



Hot Gas

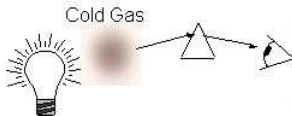


Emission Line Spectrum



Linie absorpcyjne

Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



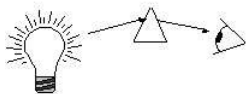
Cold Gas

Absorption Line Spectrum

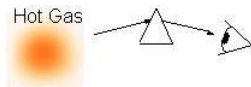


Linie emisyjne

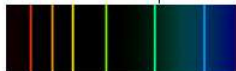
Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



Continuum Spectrum

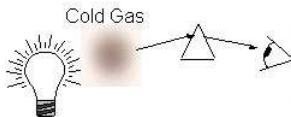


Emission Line Spectrum



Linie absorpcyjne

Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.

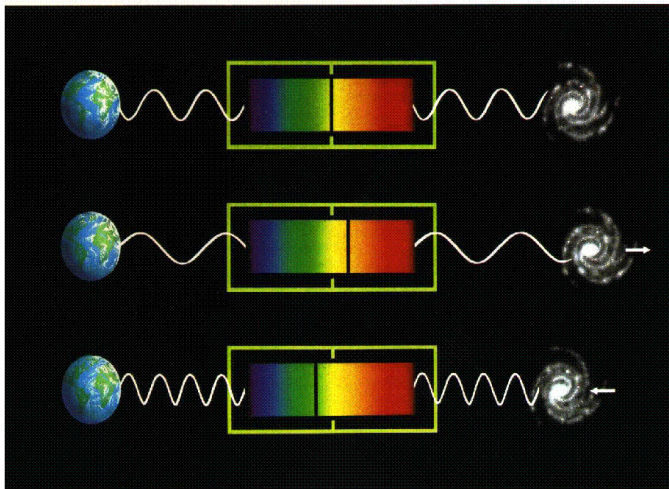


Absorption Line Spectrum



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

Mierząc linie absorpcyjne w widmie galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu



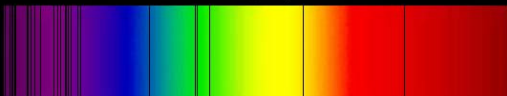
Mierząc linie absorpcyjne w widmie galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu i **wyznaczyć ich prędkość względem nas**

Absorption Lines from our Sun



Absorption Lines from a supercluster of galaxies, BAS11

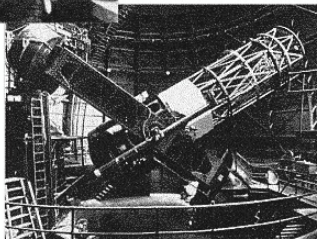
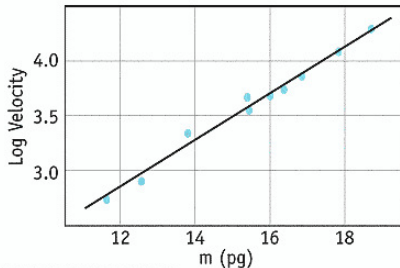
$v = 0.07 c$, $d = 1$ billion light years



DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

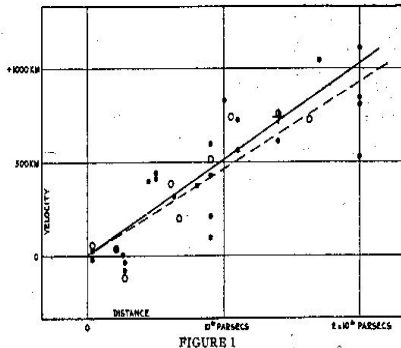
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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:

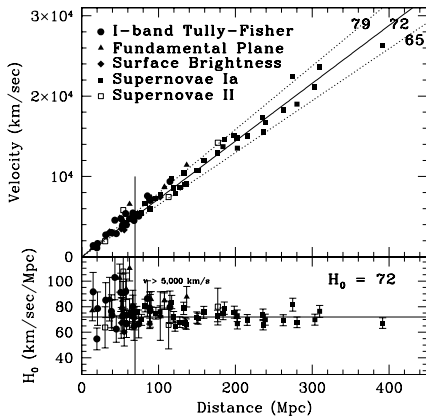
$$v = H \cdot r$$

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

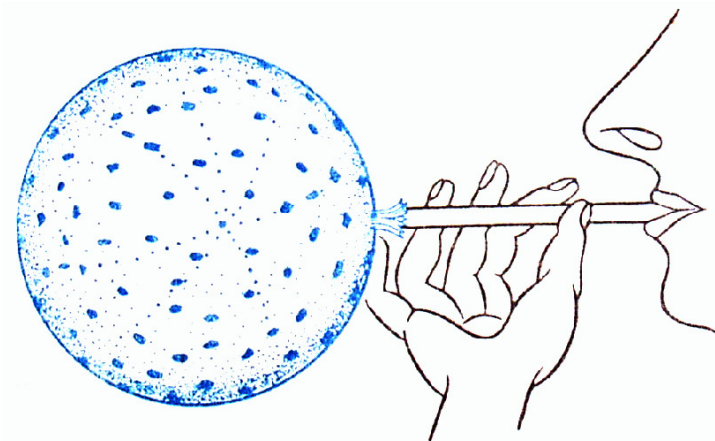
Wyznaczenie odległości jest znacznie trudniejsze od wyznaczenia "przesunięcia ku czerwieni".

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

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

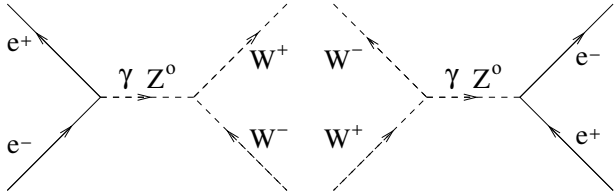
Ewolucja Wszechświata

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.

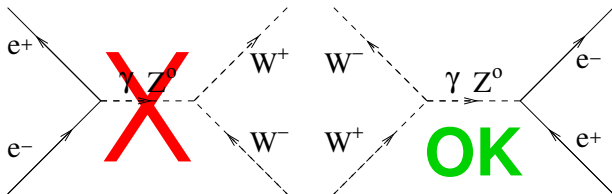
Nie istniały żadne obiekty złożone (**nukleony, jądra atomowe, atomy**), gdyż energie były znacznie większe od energii wiązania.

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



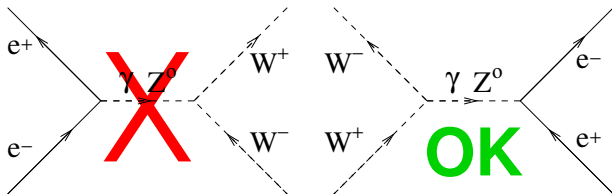
Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**

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



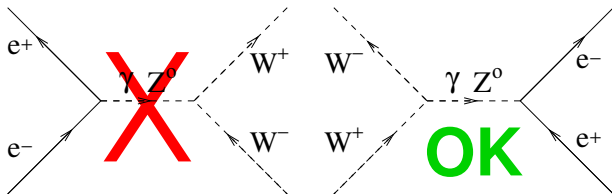
- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)

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)

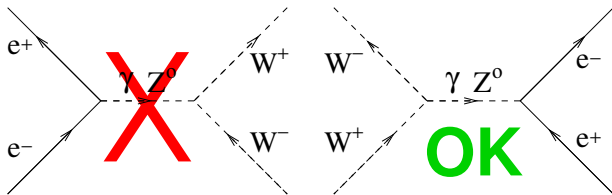
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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)

Ewolucja Wszechświata

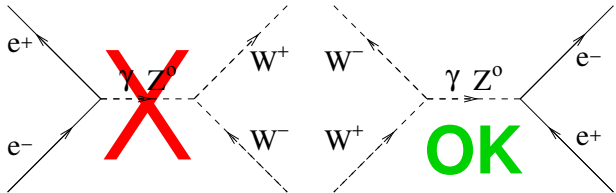
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



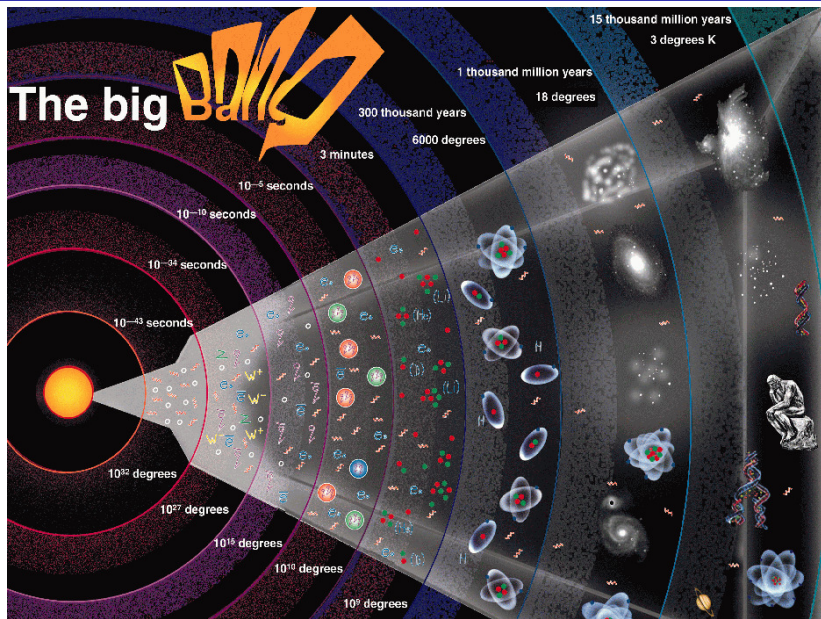
- znikają swobodne bozony W^{\pm} i Z^0 (10^{-10} sekundy)
- kwarki formują neutrony i protony (10^{-5} sekundy)
- protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków (3 minuty)
- elektrony i jądra tworzą atomy (300 000 lat)

Ewolucja Wszechświata

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 ρ .

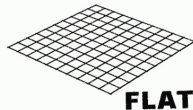
Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3 \sim 10 \text{ atomów H w m}^3$

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

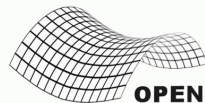
$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

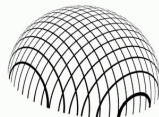
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



FLAT



OPEN

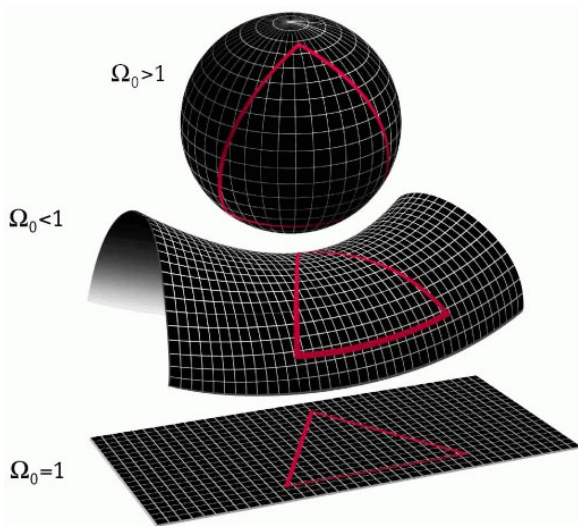


CLOSED

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°).

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

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”**

Pierwotna nukleosynteza

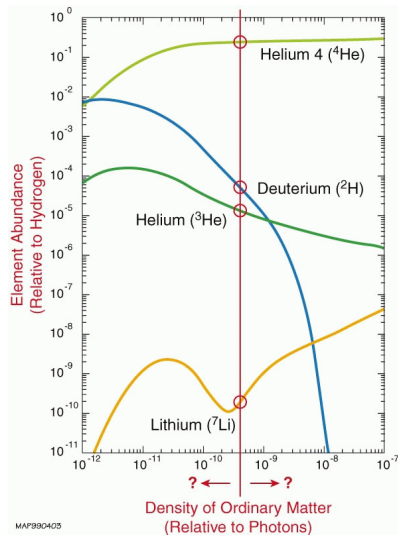
W zależności od stosunku gęstości materii do promieniowania, różne pierwiastki produkują się w różnej ilości.

Składnikiem koniecznym do produkcji jąder cięższych od wodoru są neutrony

Pierwszy krok - produkcja deuteru:



(zależy od gęstości materii)



Pierwotna nukleosynteza

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

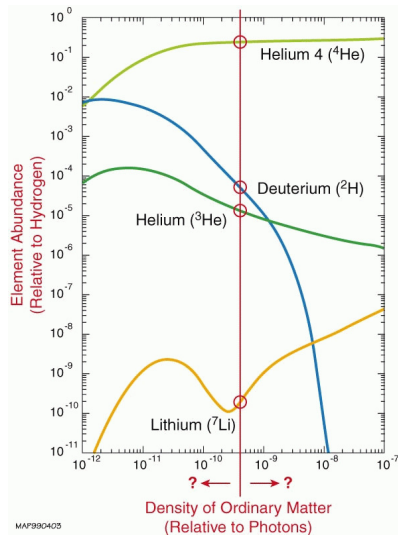
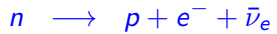
Składnikiem koniecznym do produkcji jąder cięższych od wodoru są neutrony

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”**

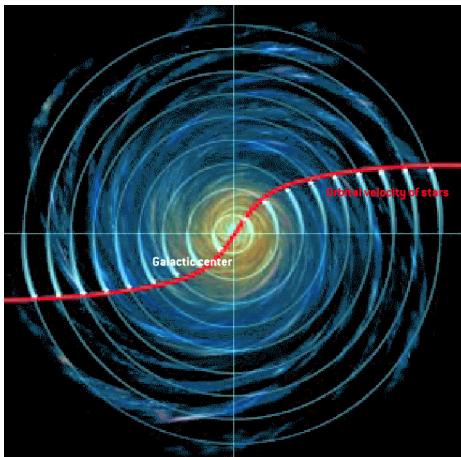
$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

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

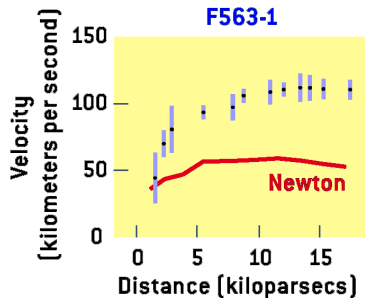
$$\Omega_b \sim 0.05$$

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

Ciemna materia?



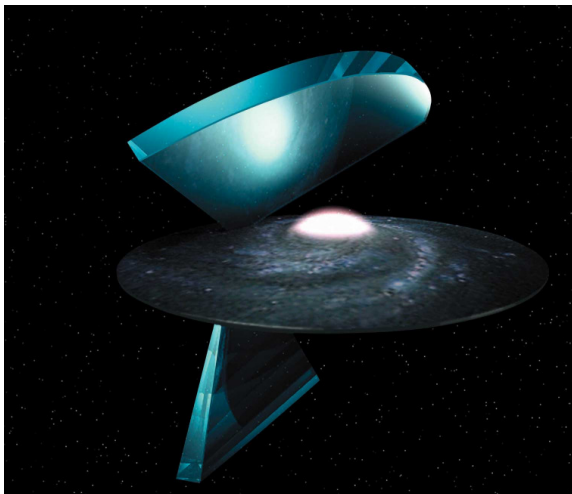
Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.



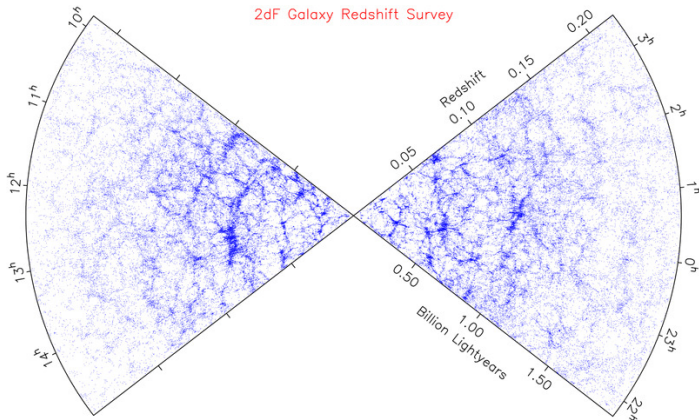
Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey

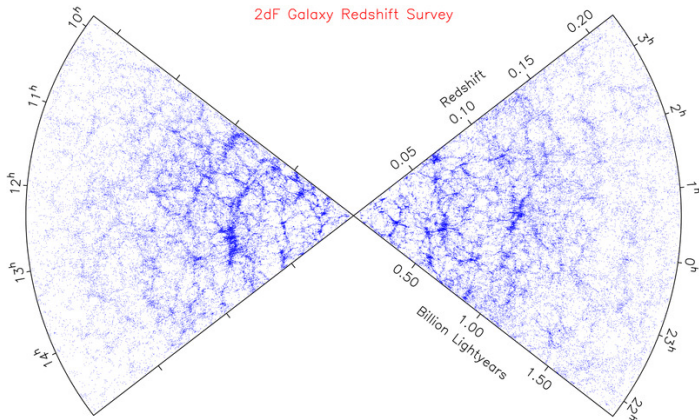
Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



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

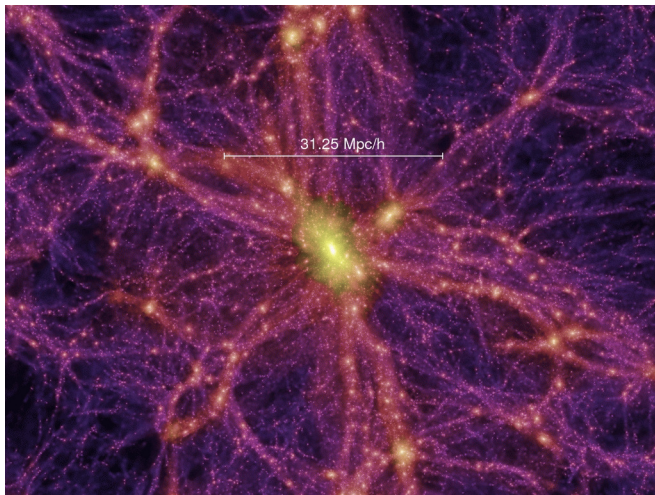


Otrzymujemy **trójwymiarową mapę** Wszechświata. Rozkład galaktyk, nawet na największych skalach nie jest jednorodny. Widzimy **wyraźne struktury**...



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.



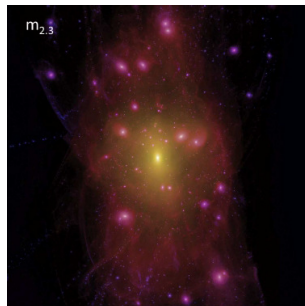
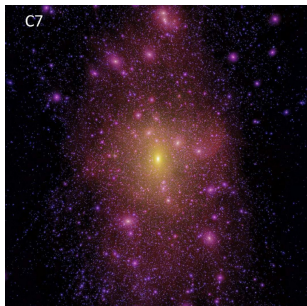
Aby opisać **tworzenia się struktur** we Wszechświecie musimy uwzględnić wkład od **ciemnej materii**!

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...