

Wszechświat cząstek elementarnych dla humanistów

Wykład 13: Ewolucja Wszechświata

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej

Ewolucja Wszechświata

- Wprowadzenie
 - Grawitacja
 - Ogólna Teoria Względności
 - Soczewkowanie grawitacyjne
- Efekt Dopplera i Prawo Hubble'a
- Ewolucja Wszechświata
 - założenia modelu
 - Wielki Wybuch
 - przyszłość Wszechświata
- Ile jest materii we Wszechświecie?

Wprowadzenie

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.

Wprowadzenie

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.

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

Wprowadzenie

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 ciążenia:

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

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

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



Wprowadzenie

Grawitacja

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

Wprowadzenie

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...

Wprowadzenie

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...

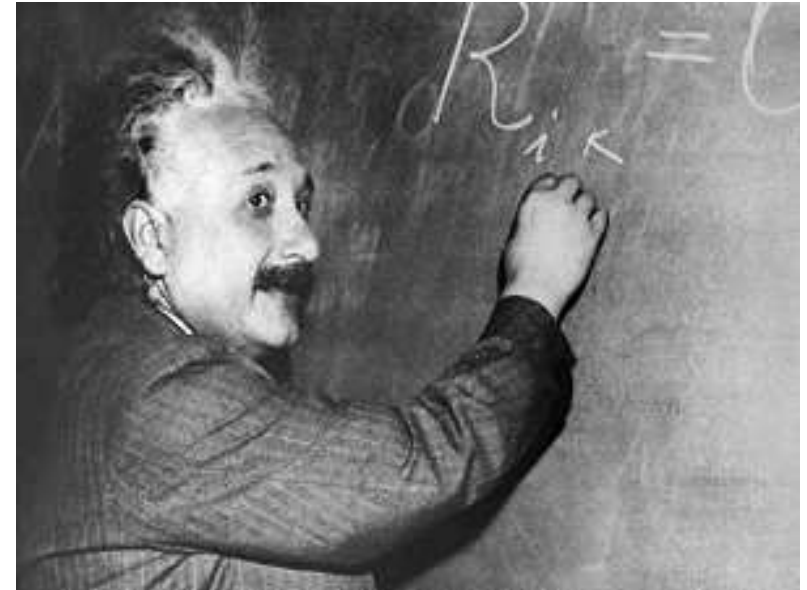
Jednak **Einstein** dostrzegł, że “**powszechność**” ciążenia stanowi problem w opisie grawitacji na **dużych skalach** - nie mamy “punktu odniesienia” względem którego moglibyśmy badać ruch ciał...

Wprowadzenie

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



Wprowadzenie

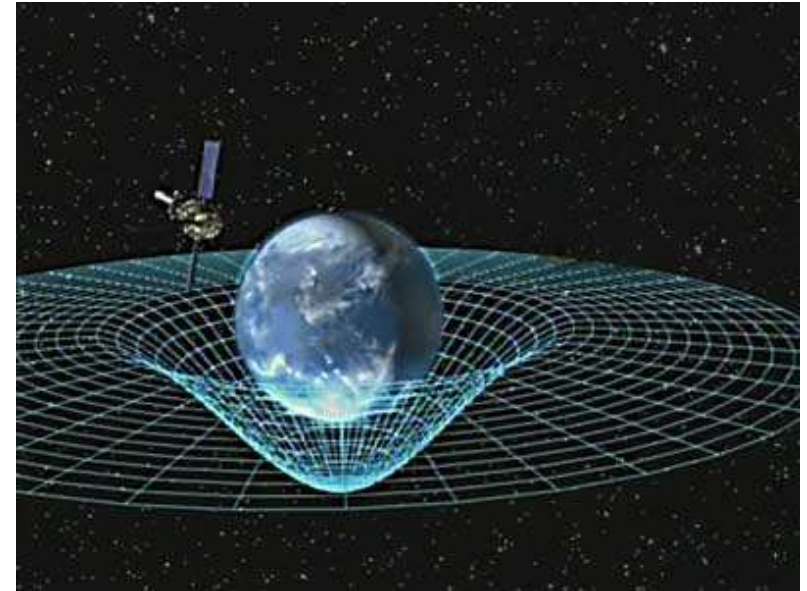
Ogólna Teoria Względności

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**

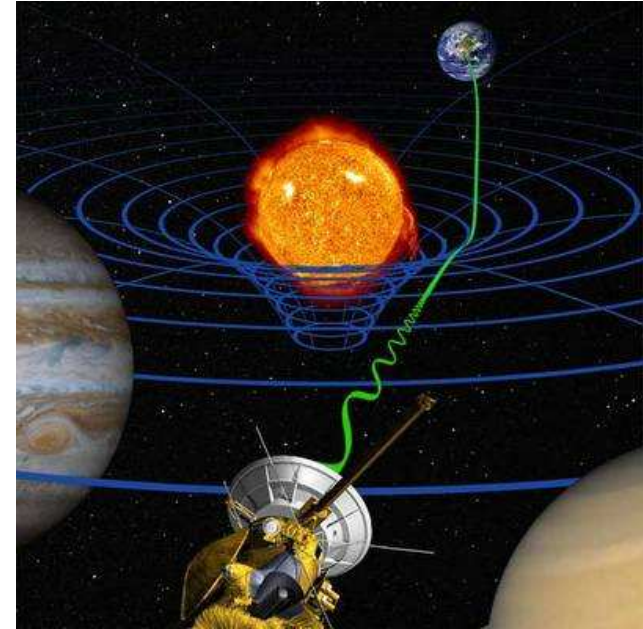


Wprowadzenie

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**.

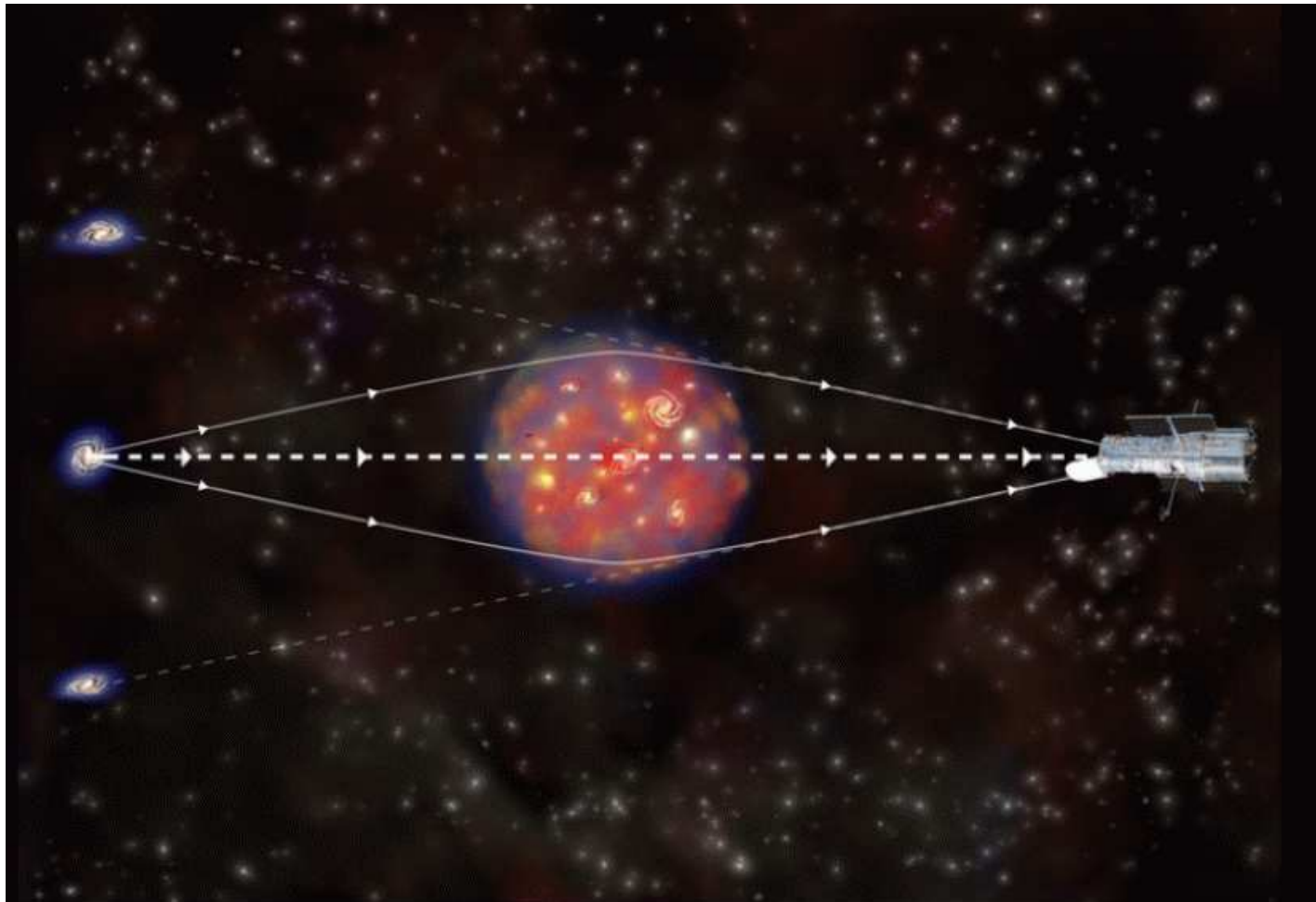
Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu “**swobodnej**” materii

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

W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie są to już linie proste!

Soczewkowanie grawitacyjne

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...



Soczewkowanie grawitacyjne

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

Kosmiczny Teleskop
Hubble'a



Soczewkowanie grawitacyjne

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

Zdjęcie z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a

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

⇒ bezpośredni dowód słuszności OTW



Soczewkowanie grawitacyjne

Silne soczewkowanie grawitacyjne

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

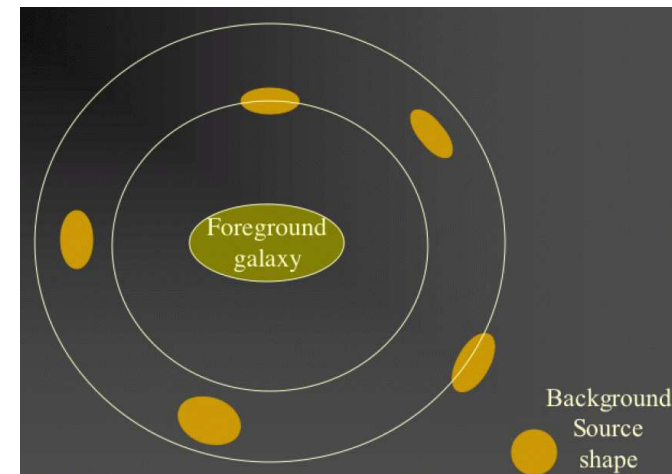
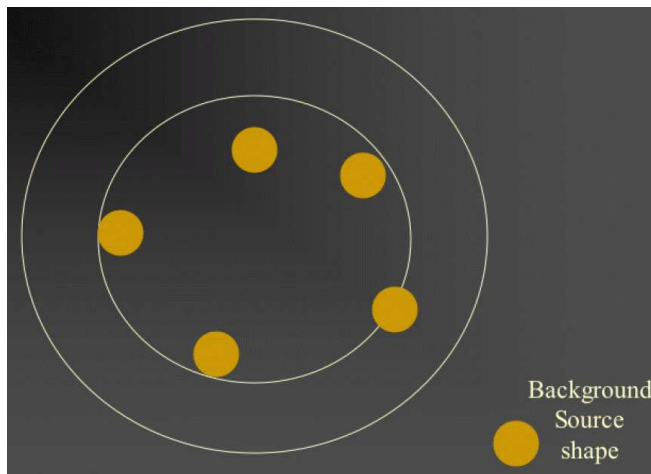
Soczewkowanie grawitacyjne

Silne soczewkowanie grawitacyjne

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

Słabe soczewkowanie grawitacyjne

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



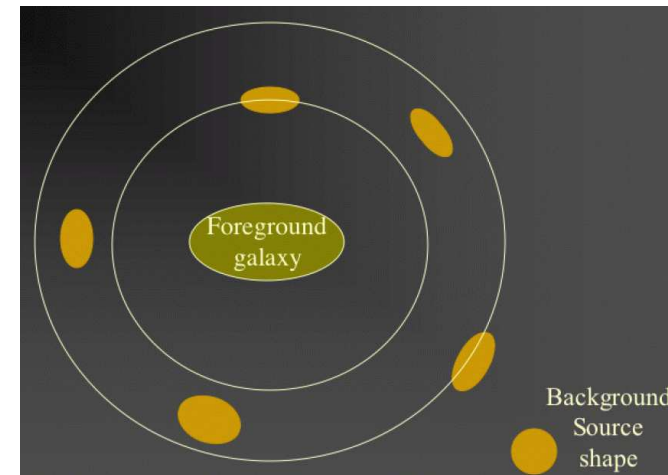
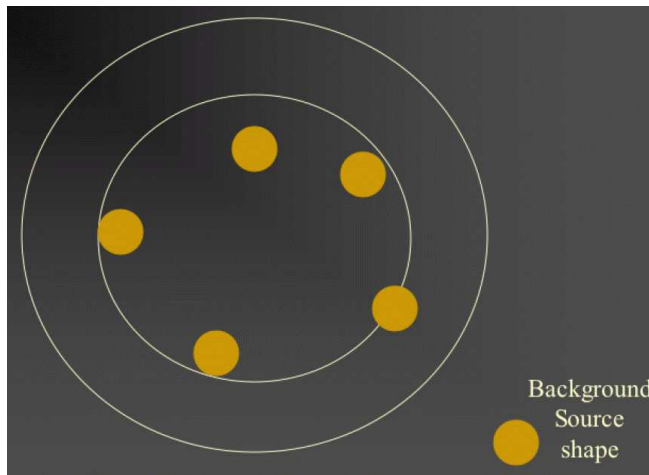
Soczewkowanie grawitacyjne

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**

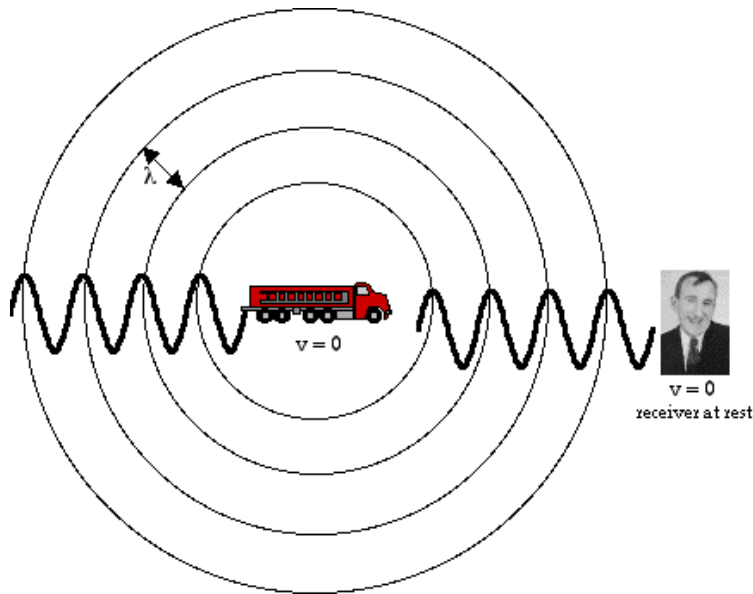


W obu przypadkach możemy wnioskować o **masie** obiektów znajdujących się na drodze promieni świetlnych.

Efekt Dopplera

W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

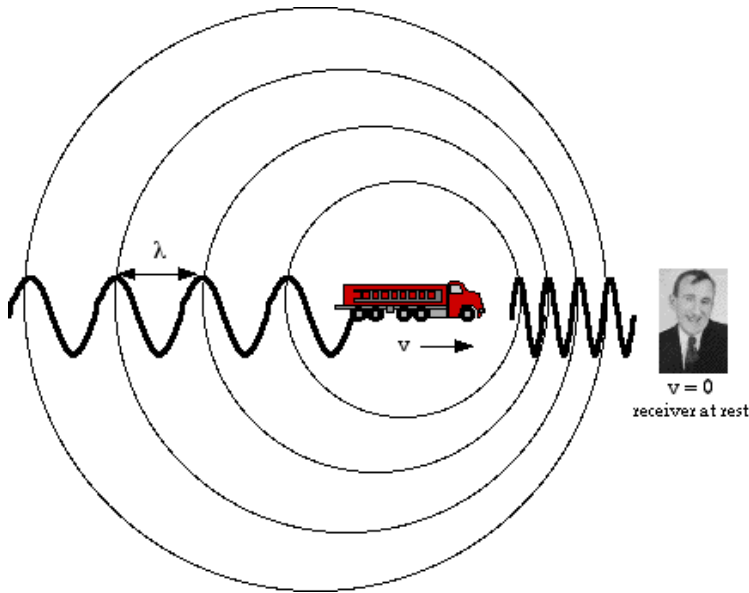
Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej częstotliwości**.



Efekt Dopplera

W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

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



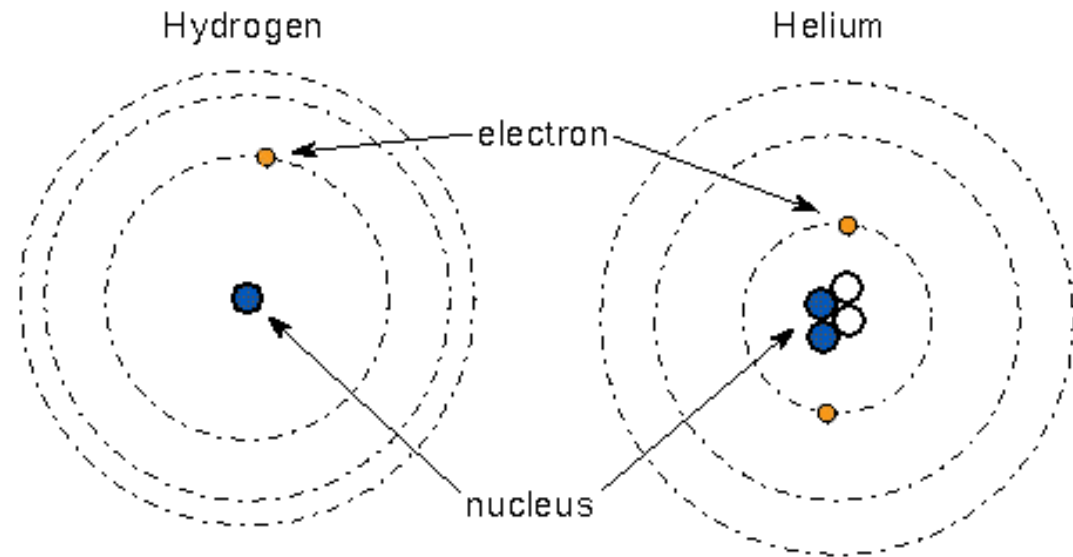
Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

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

Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



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

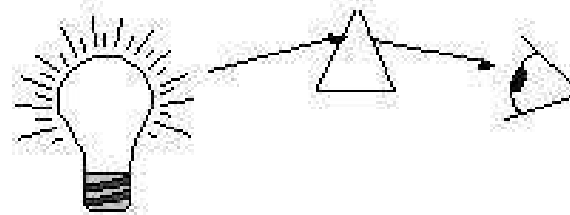
The structure of the atoms for the two most common elements in nature. Different elements have different number of **protons** and different layouts of their energy levels.



Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

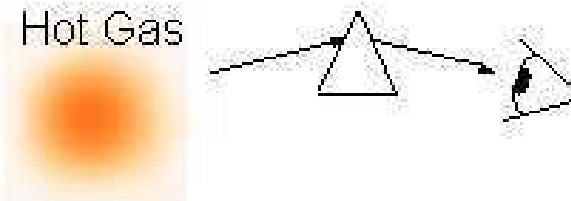


Continuum Spectrum

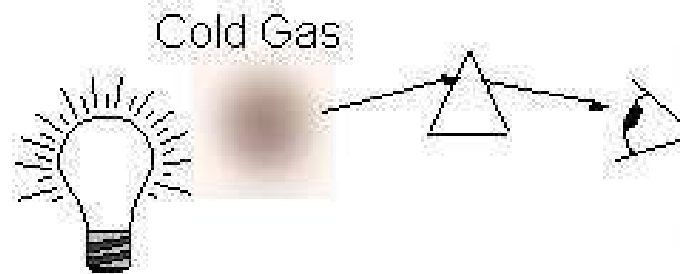
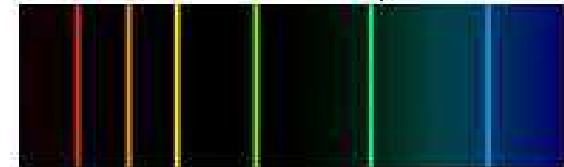


Linie absorpcyjne

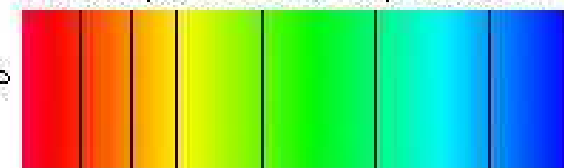
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



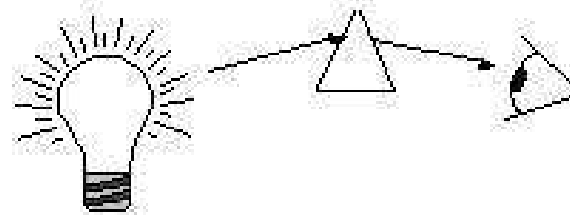
Absorption Line Spectrum



Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

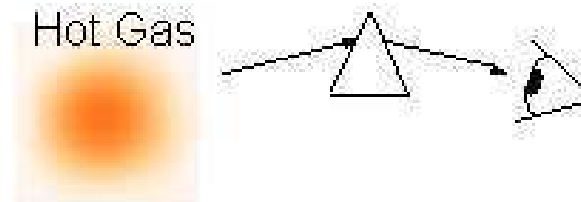


Continuum Spectrum

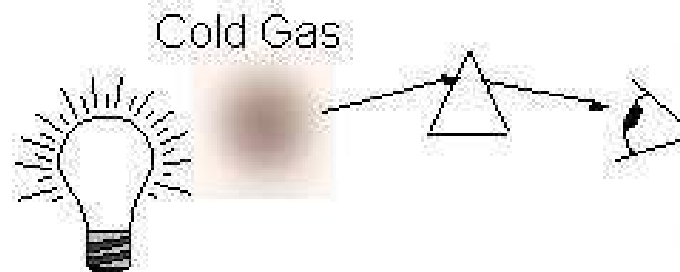
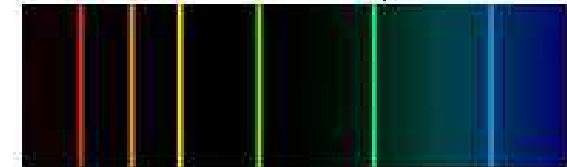


Linie absorpcyjne

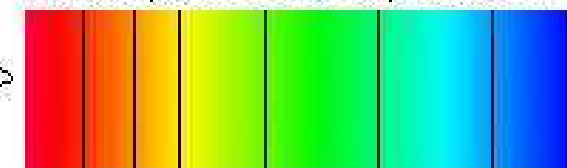
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



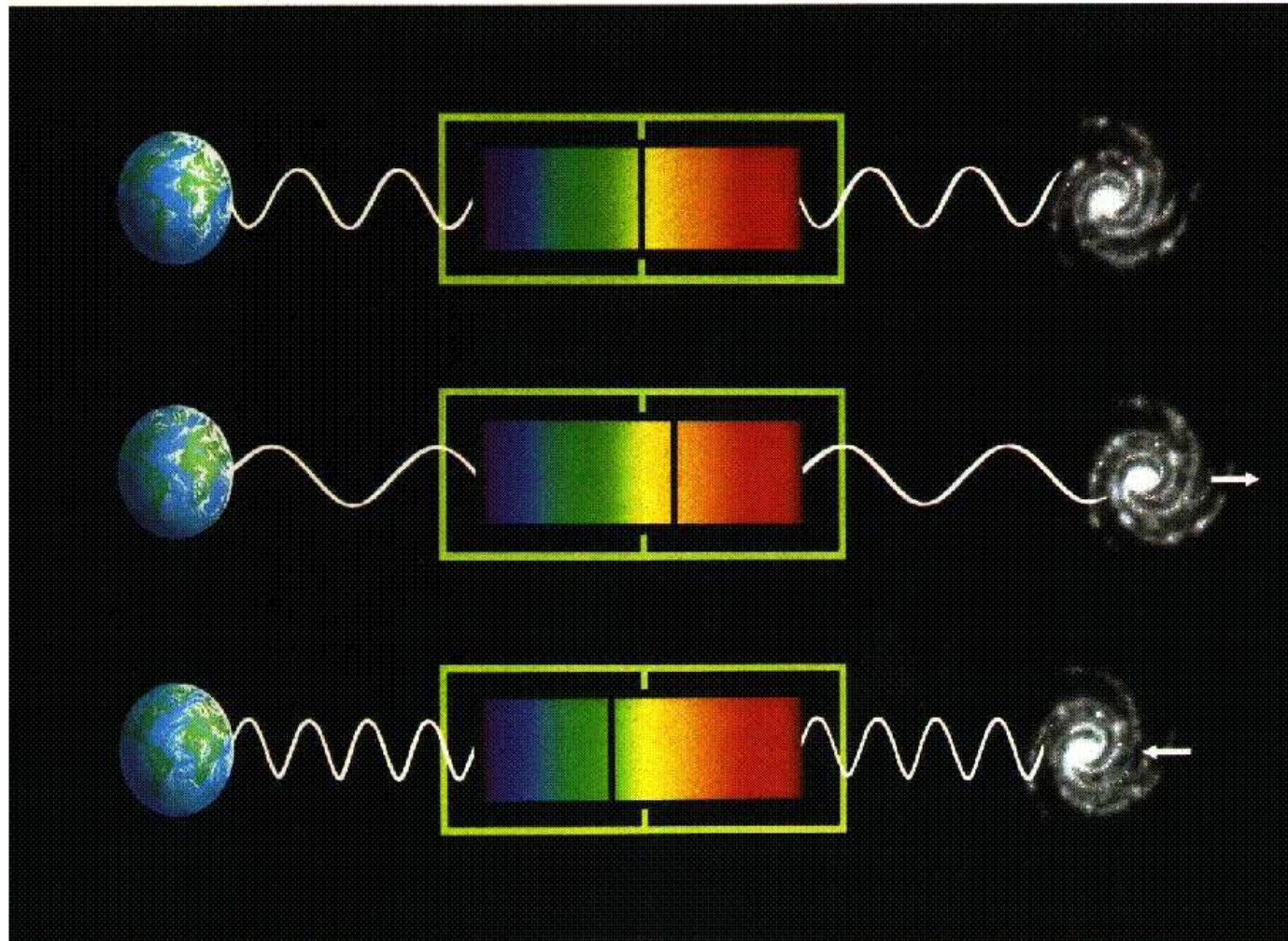
Absorption Line Spectrum



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

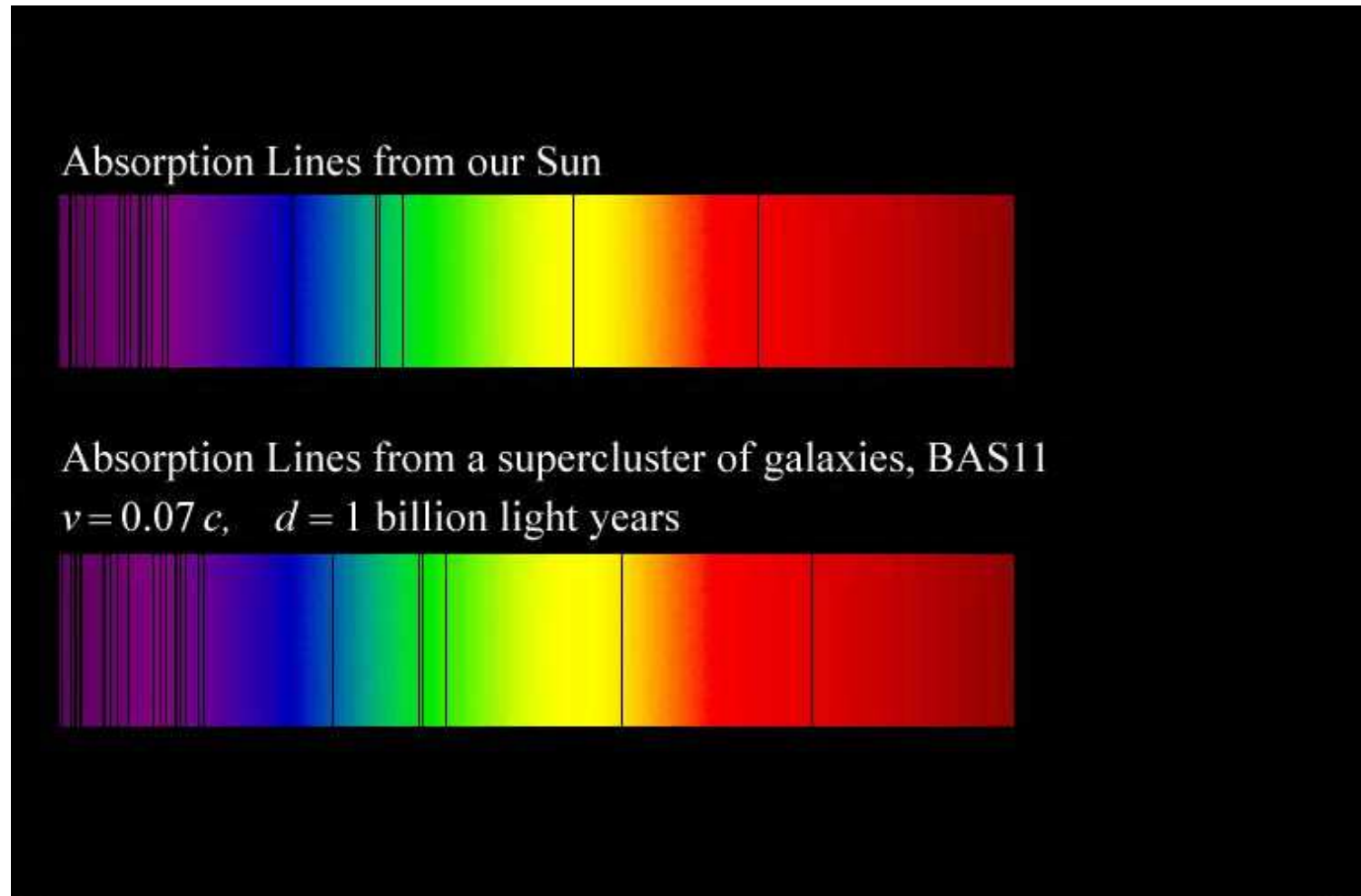
Efekt Dopplera dla światła

Mierząc linie absorpcyjne w widmie galaktyk możemy wnioskować o ich ruchu



Efekt Dopplera dla światła

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

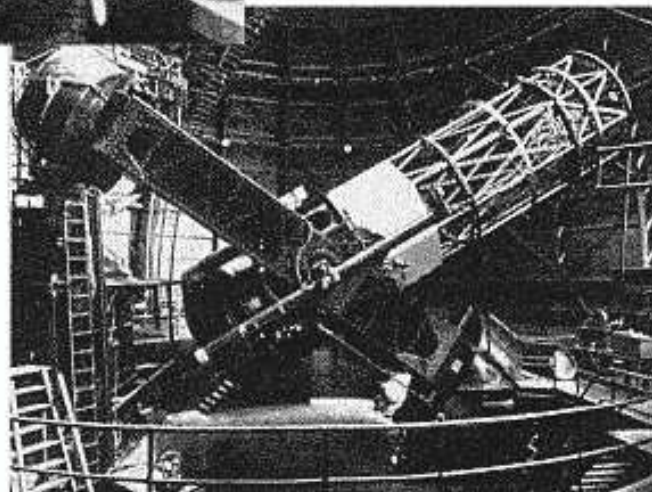
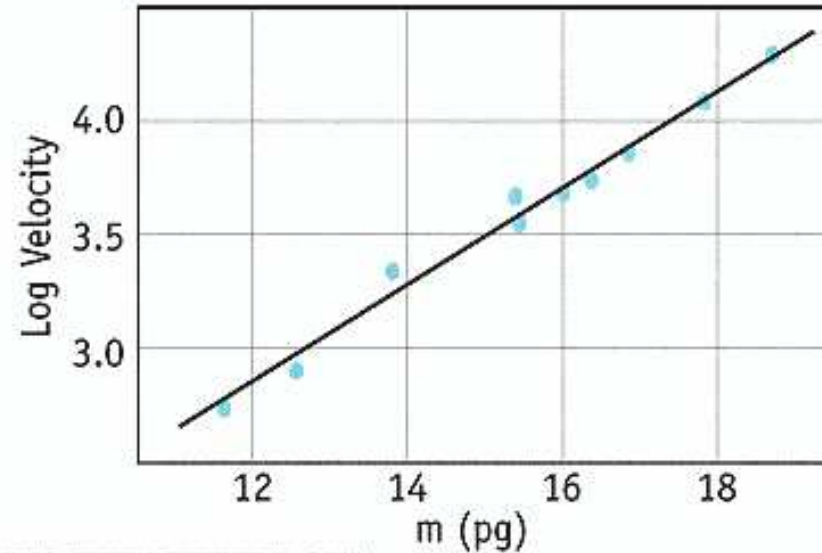


Prawo Hubble'a (1929)

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

Prawo Hubble'a (1929)

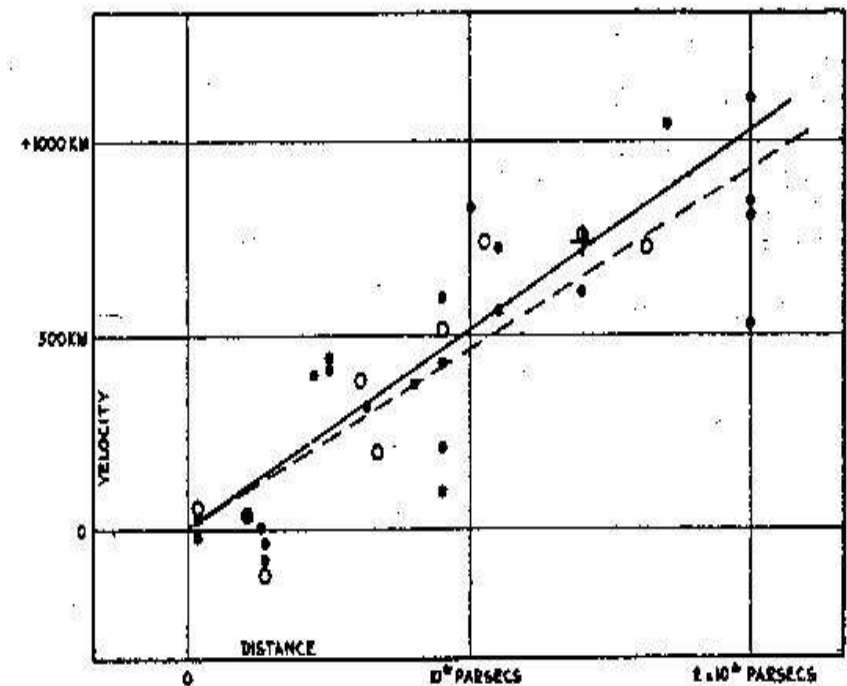
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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

$$v = H \cdot r$$

r - odległość, H - stała Hubble'a

Oryginalne wyniki Hubble'a:



Prawo Hubble'a (1929)

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

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

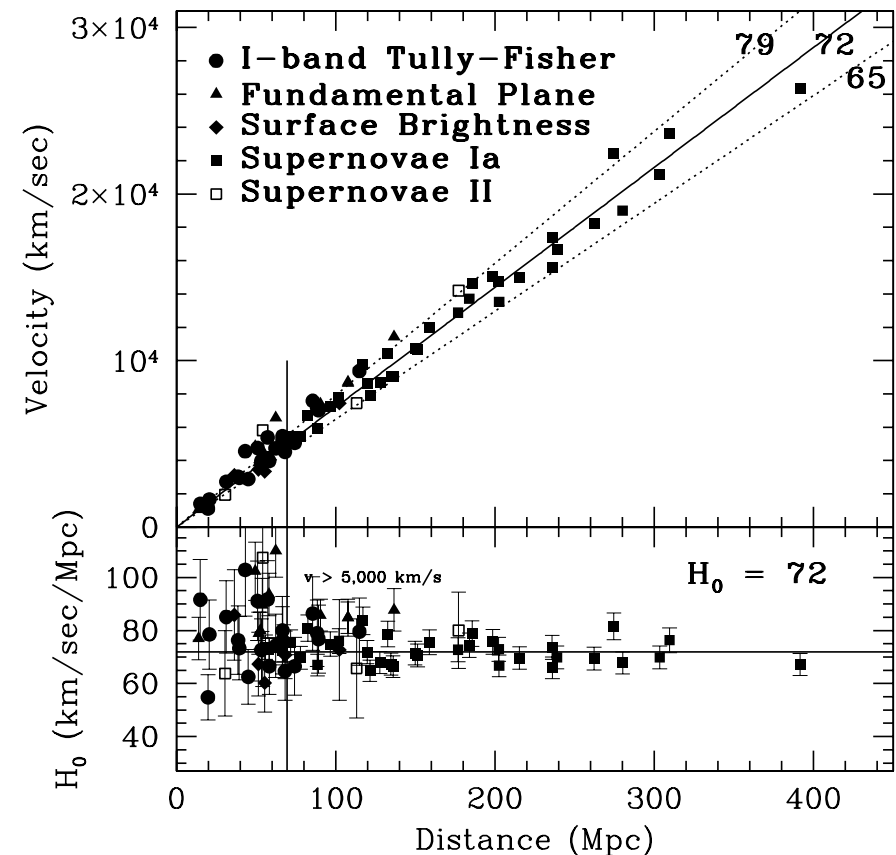
$$v = H \cdot r$$

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:



Prawo Hubble'a

Pomiar odległości

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

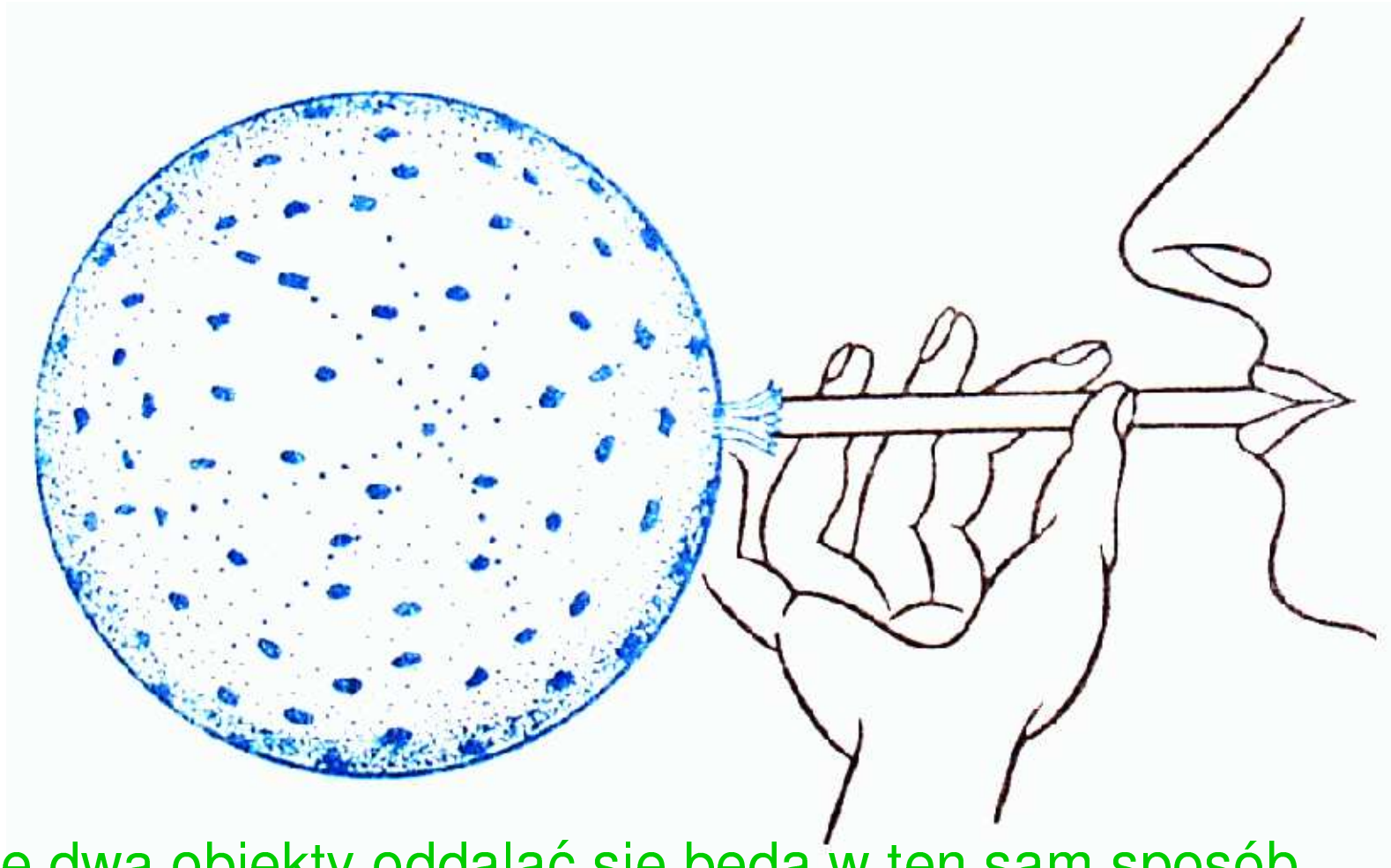
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

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



Prawo Hubblea

Obserwacja Hubblea, że **wszystkie obiekty oddalają się**, **nie wyróżnia** w żaden sposób **naszego układu** odniesienia.



Dowolne dwa obiekty oddalać się będą w ten sam sposób.

Ewolucja Wszechświata

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 "zawieszony" są poszczególne obiekty.

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

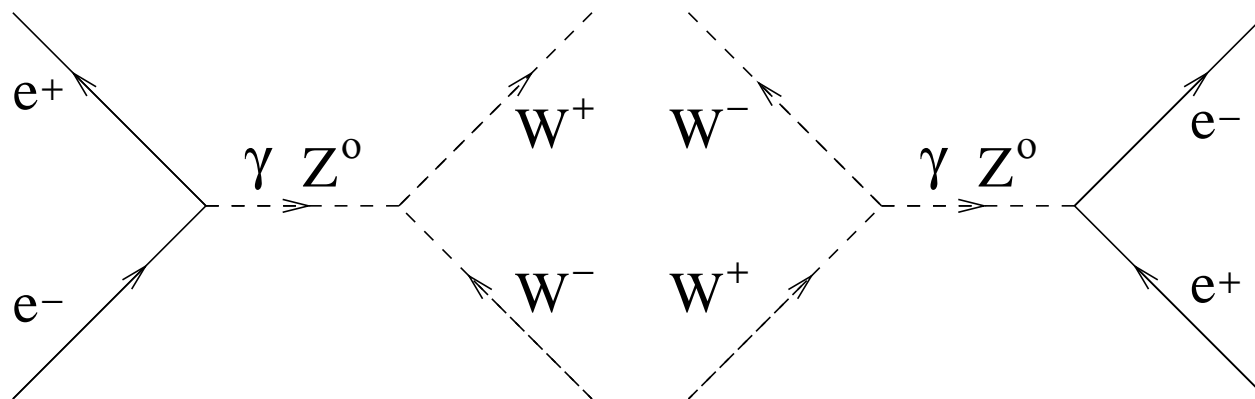
Ewolucja Wszechświata

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 kreacji**.

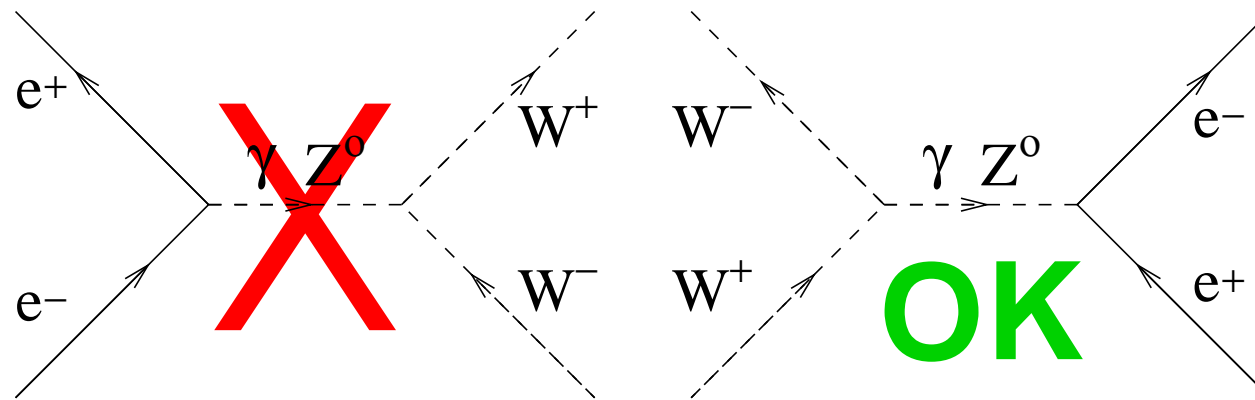


Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**



Ewolucja Wszechświata

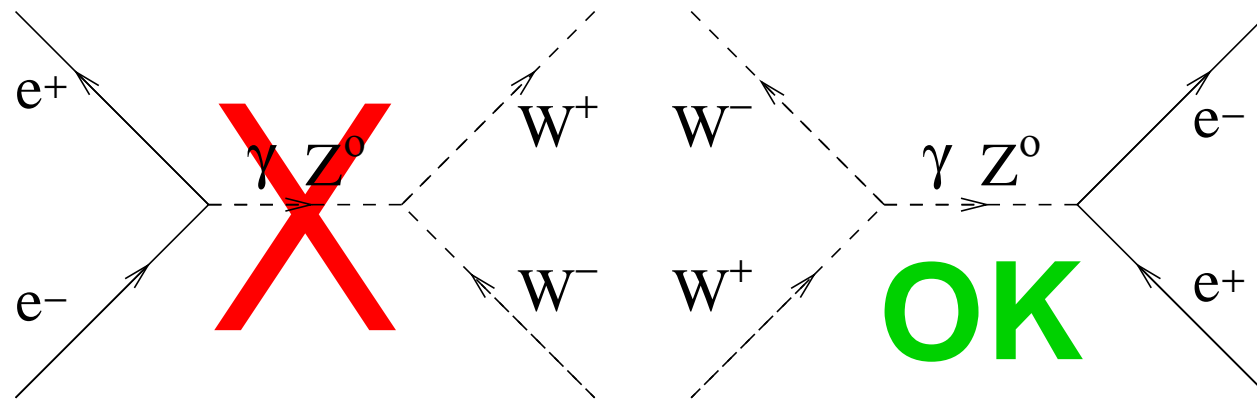
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

Ewolucja Wszechświata

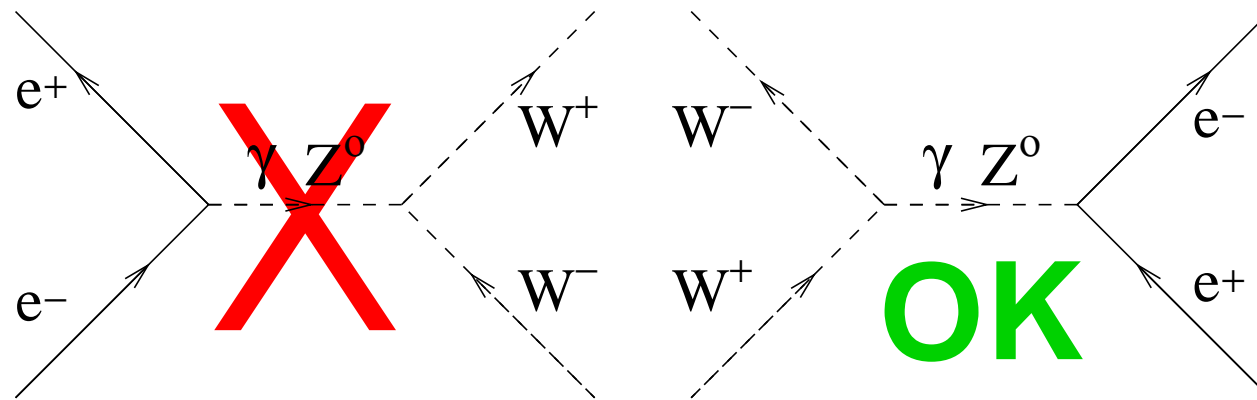
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

Ewolucja Wszechświata

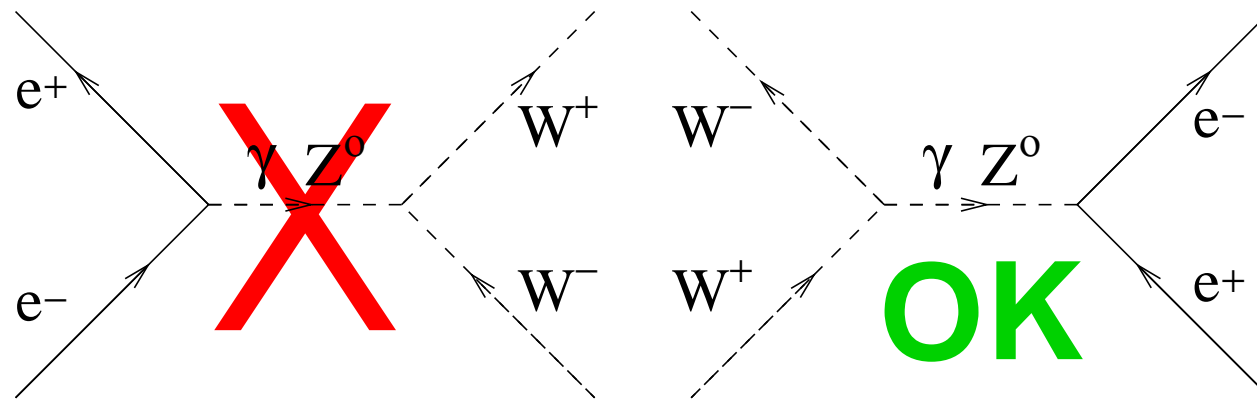
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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)

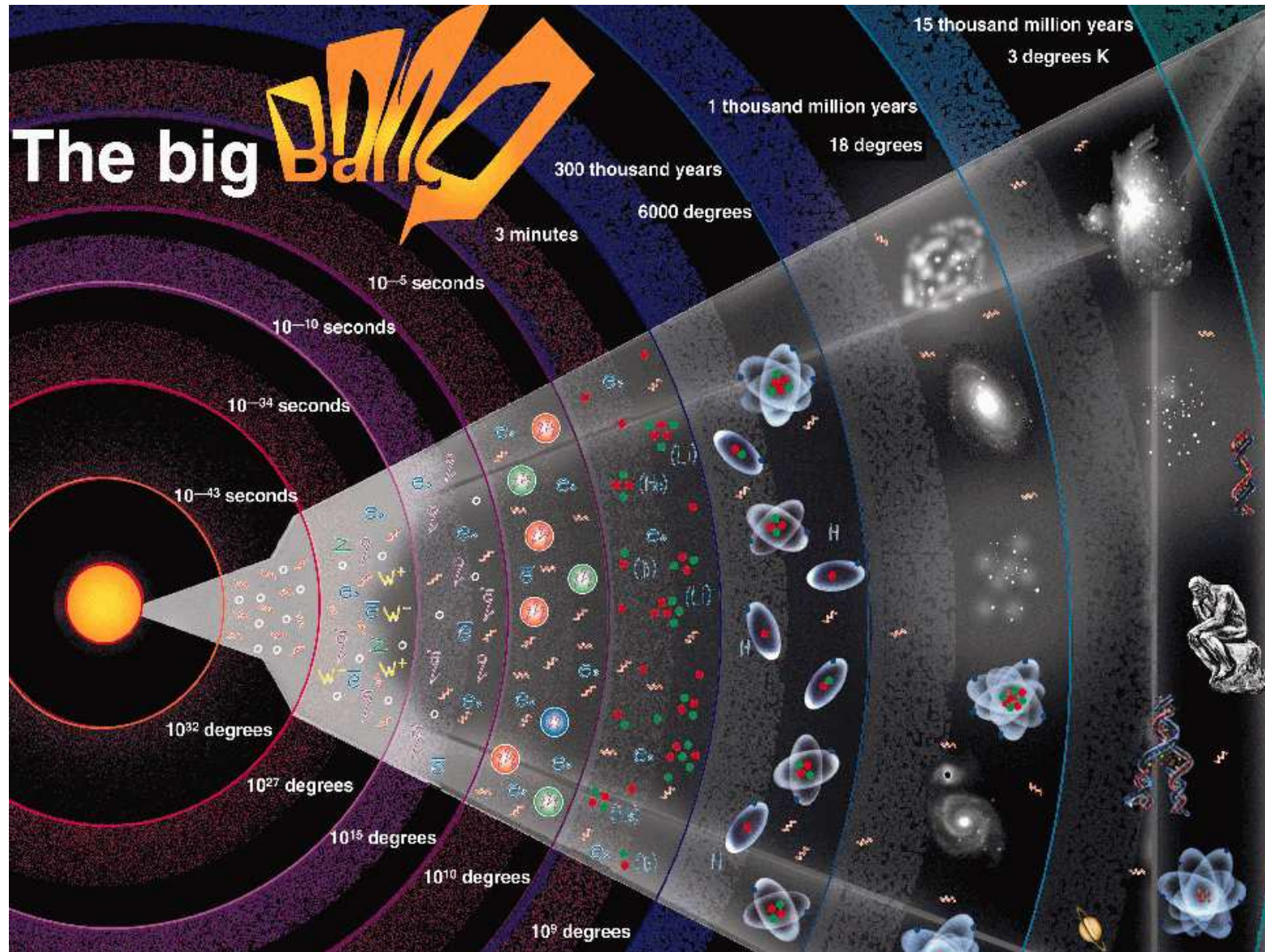
Ewolucja Wszechświata

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



Ewolucja Wszechświata

Czy Wszechświat będzie się rozszerzał w nieskończoność ?

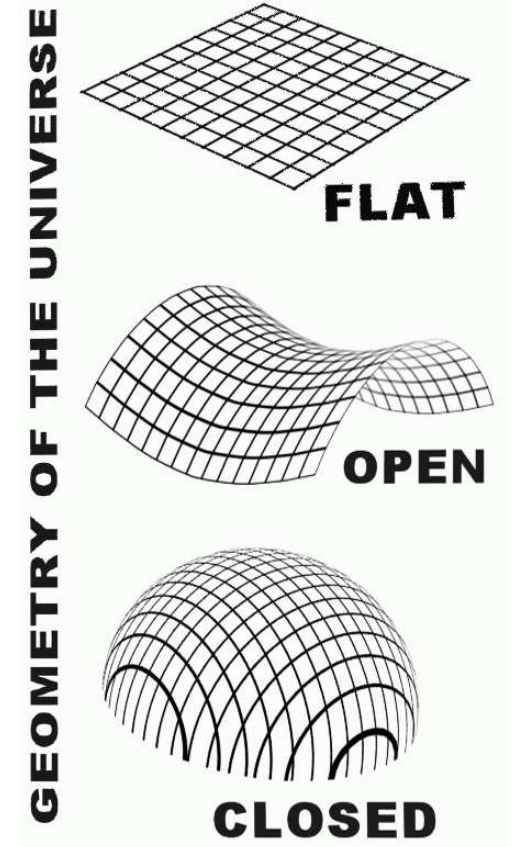
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** zależy od **gęstości** materii ρ .

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

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

$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

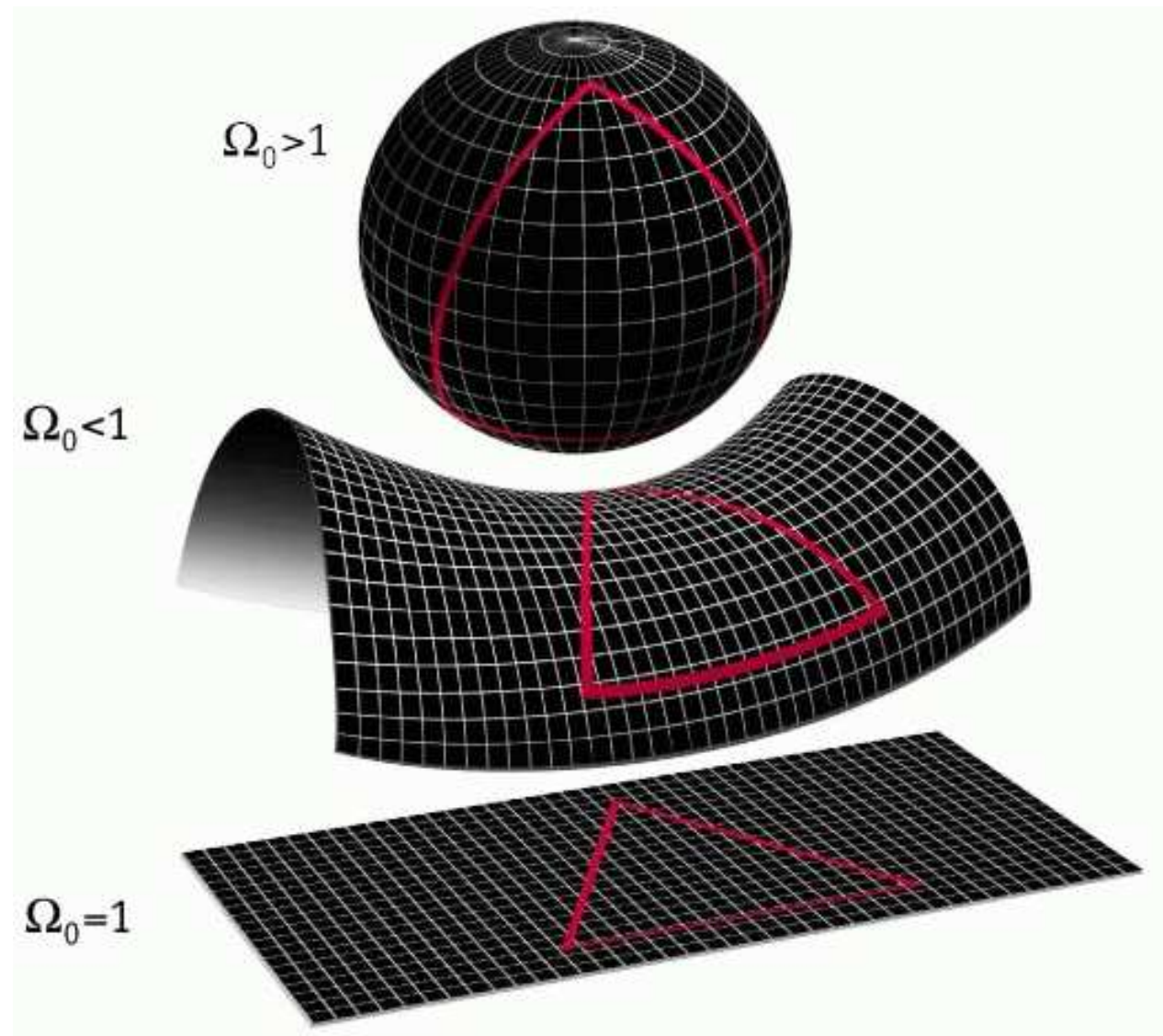


Krzywizna przestrzeni

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...



Gęstość materii we Wszechświecie

Charakter ewolucji Wszechświata zależą od gęstości materii.

Można spróbować ją zmierzyc na różne sposoby:

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

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

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

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”

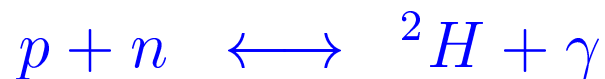
$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

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

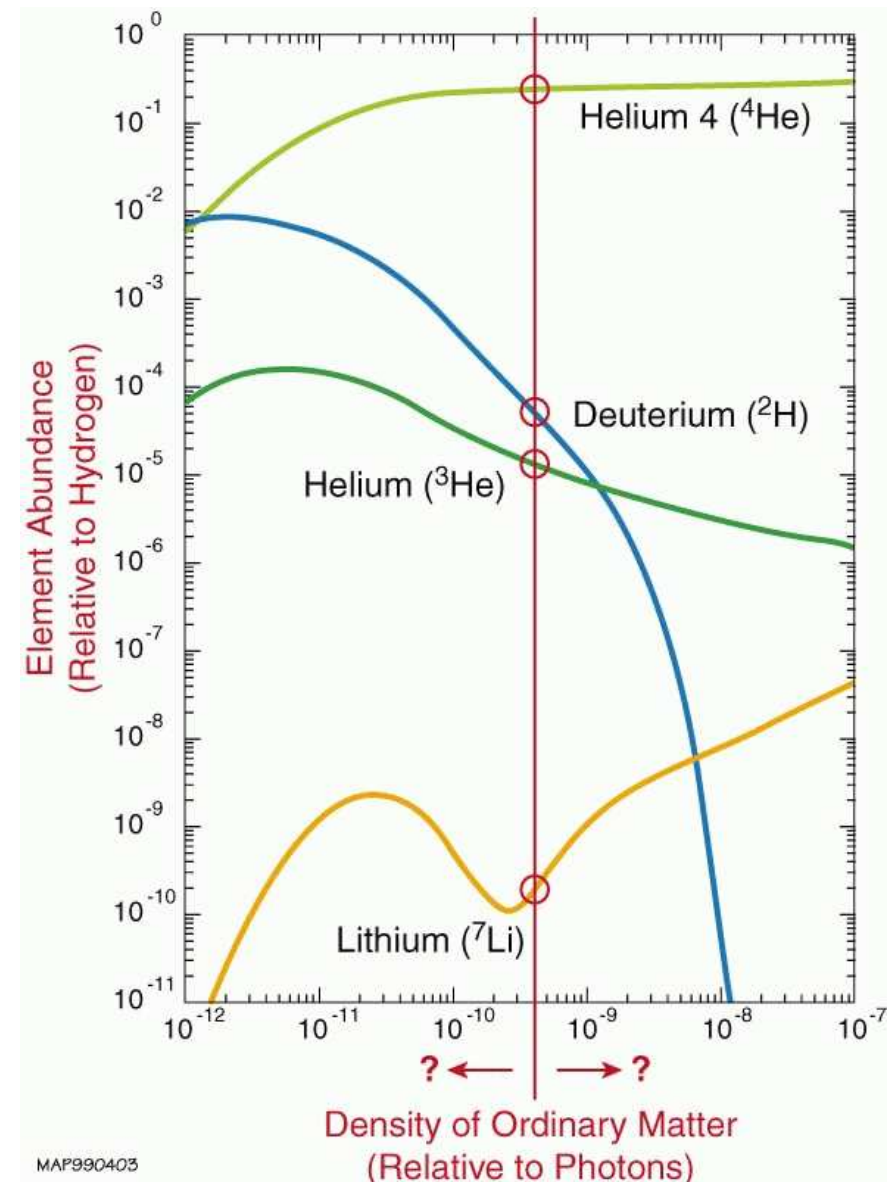
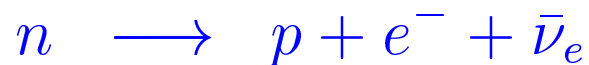
Pierwotna nukleosynteza

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

Produkcja deuteru:



Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):



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”

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

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

$$\Omega_b \sim 0.05$$

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”

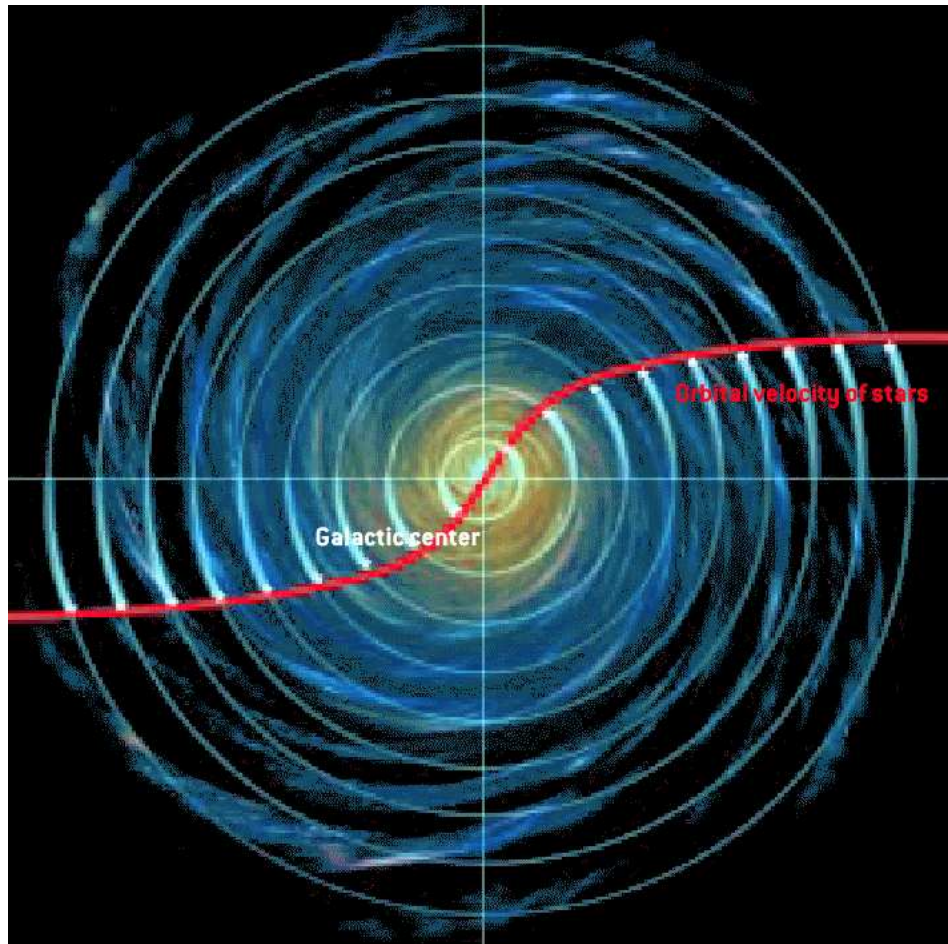
$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

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

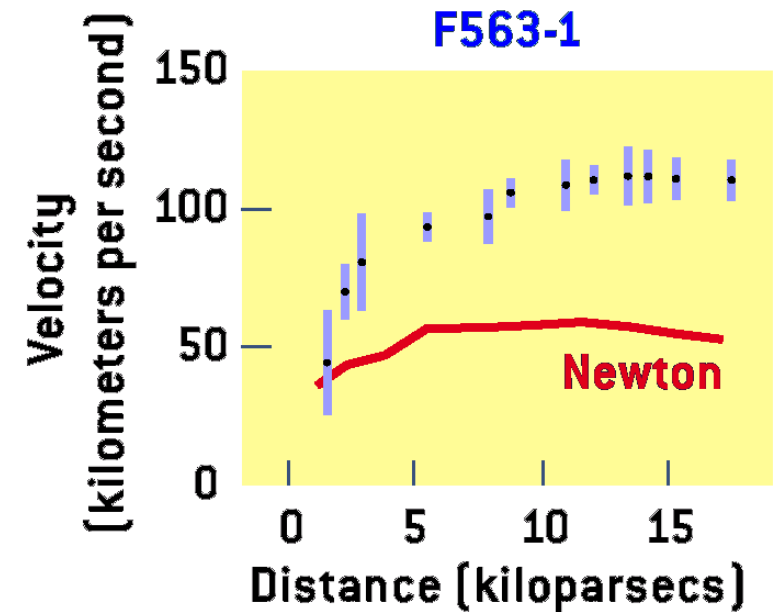
$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych
⇒ materia “grawitacyjna” (całkowita ?)

Ciemna materia?



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.

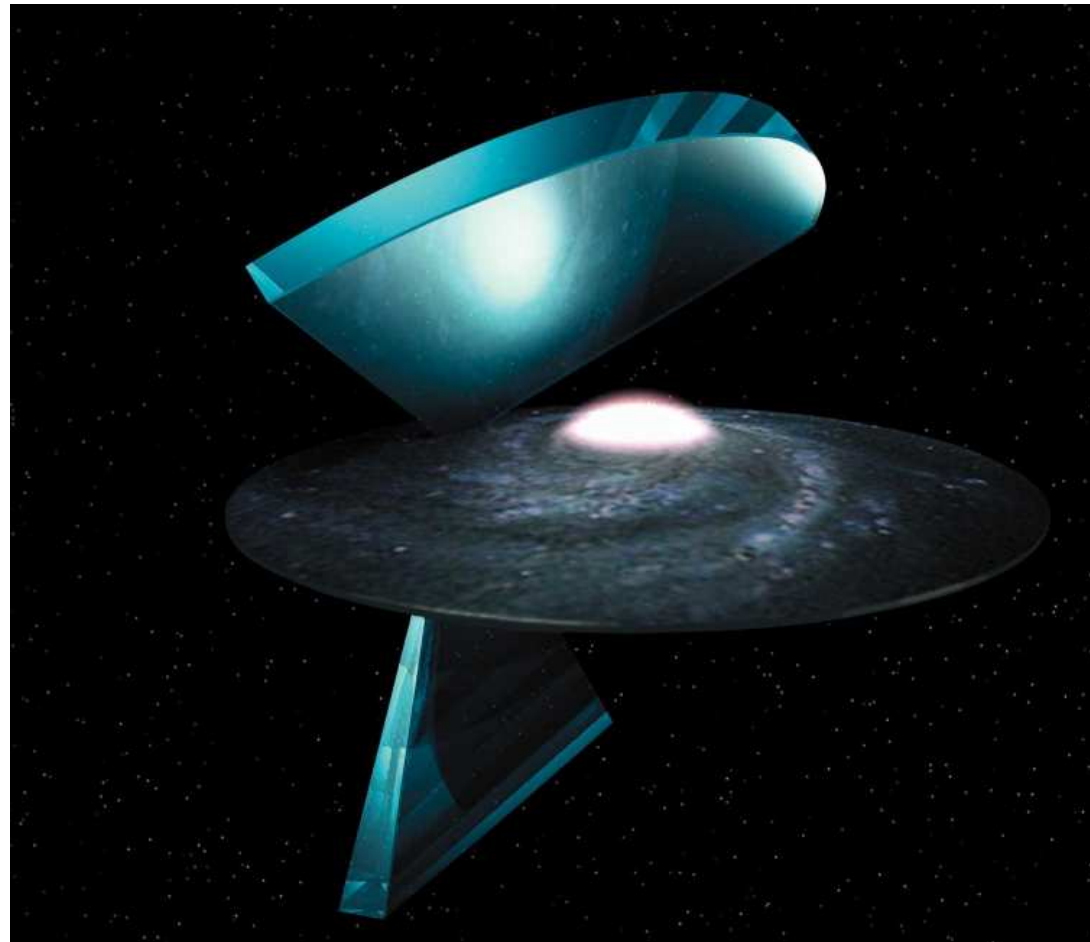


Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

Oddziaływania grawitacyjne

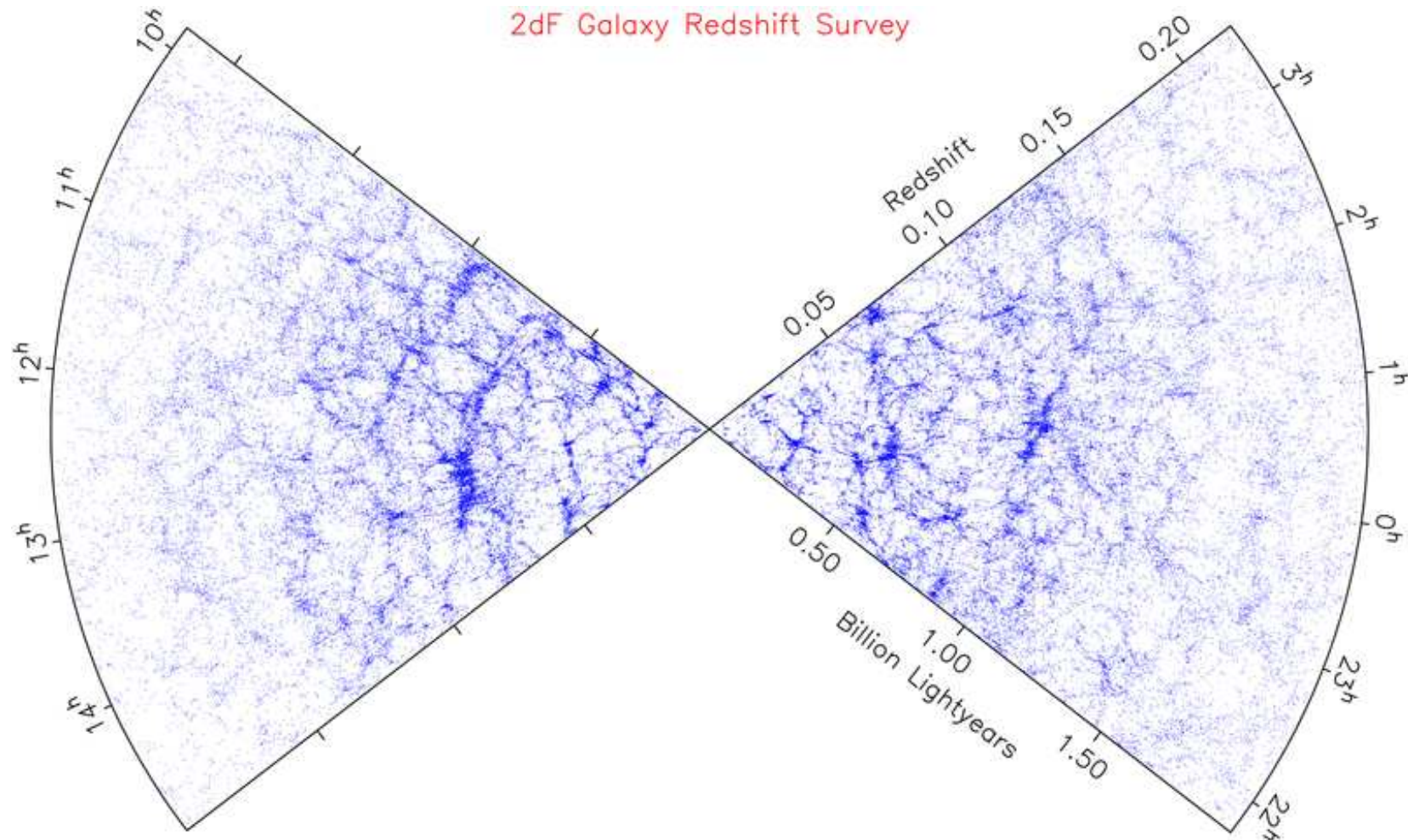
Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey

Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



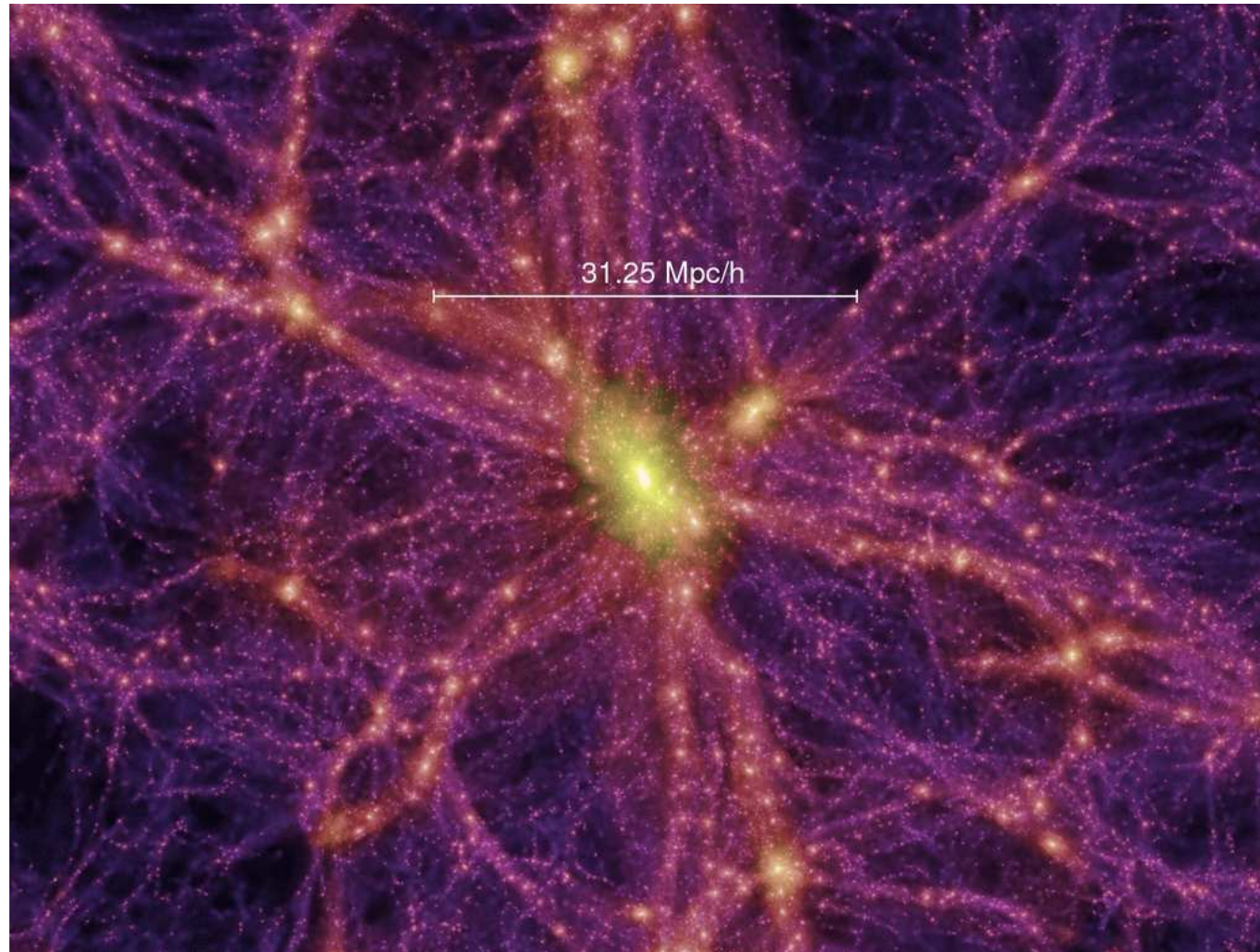
Oddziaływania grawitacyjne

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



Oddziaływania grawitacyjne

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



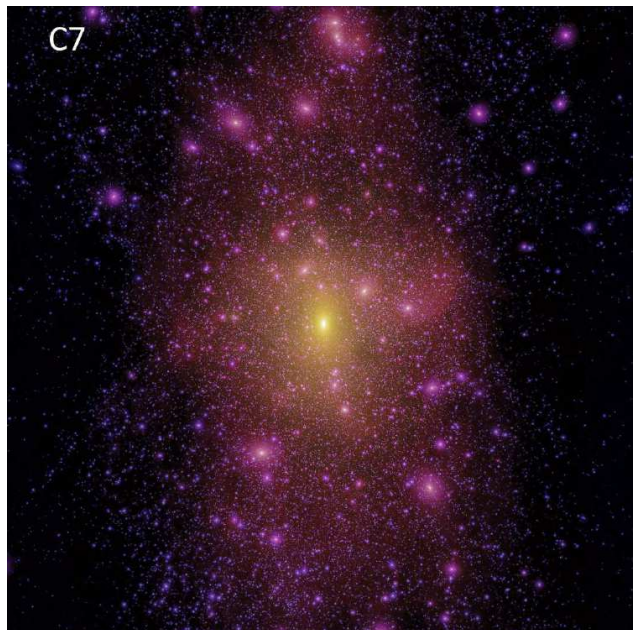
Oddziaływania grawitacyjne

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

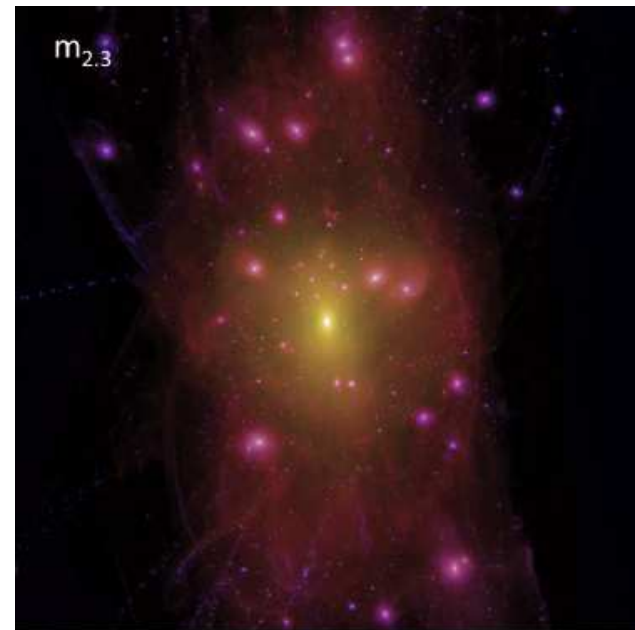
Co więcej, ciemna materia musi być **“zimna” (nierelatywistyczna)**. Inaczej drobne struktury byłyby rozmywane...

⇒ musi składać się z **masywnych cząstek**

Ciężkie cząstki (**“zimna” CM**)



Lekkie cząstki (**“ciepła” CM**)



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”

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

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

$$\Omega_b \sim 0.05$$

- z pomiaru oddziaływań grawitacyjnych
⇒ materia “grawitacyjna” (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

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



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)

Ciemna materia - podsumowanie

Wiemy że ciemna materia:

- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5 \times$ materia barionowa)

Nie wiemy:

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

Ciemna materia - podsumowanie

Wiemy że ciemna materia:

- jest “zimna” (nierelatywistyczna)
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)
- daje wkład ok. $1/4$ gęstości krytycznej ($5 \times$ materia barionowa)

Nie wiemy:

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

Wiele teorii “nowej fizyki” przewiduje istnienie tego typu cząstek.

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

