

# Wszechświat cząstek elementarnych

## *Wykład 14: Ewolucja Wszechświata*

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

# Ewolucja Wszechświata

- Wprowadzenie
  - Grawitacja
  - Ogólna Teoria Względności
- Efekt Dopplera i Prawo Hubblea
- 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 ciężenia:

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

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

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 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...

# Wprowadzenie

## **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...

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

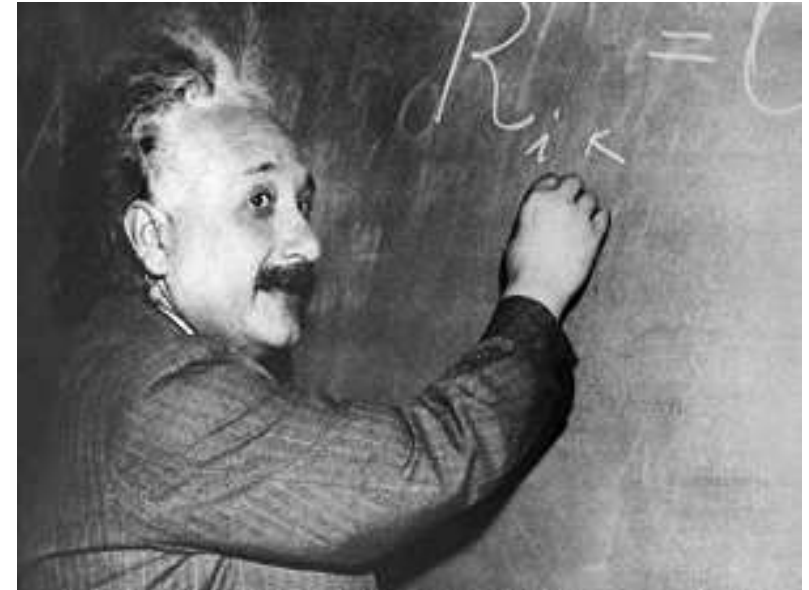


# Wprowadzenie

## *Ogólna Teoria Względności*

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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

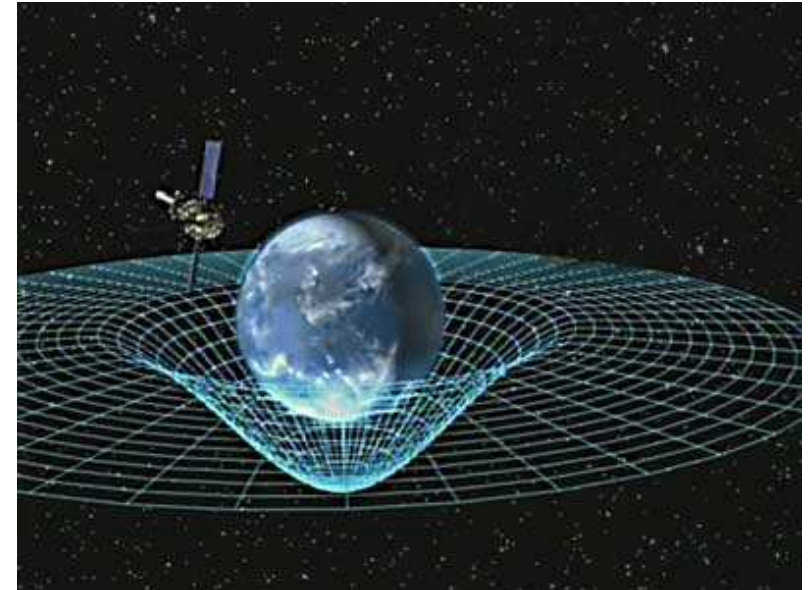


# Wprowadzenie

## *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**.

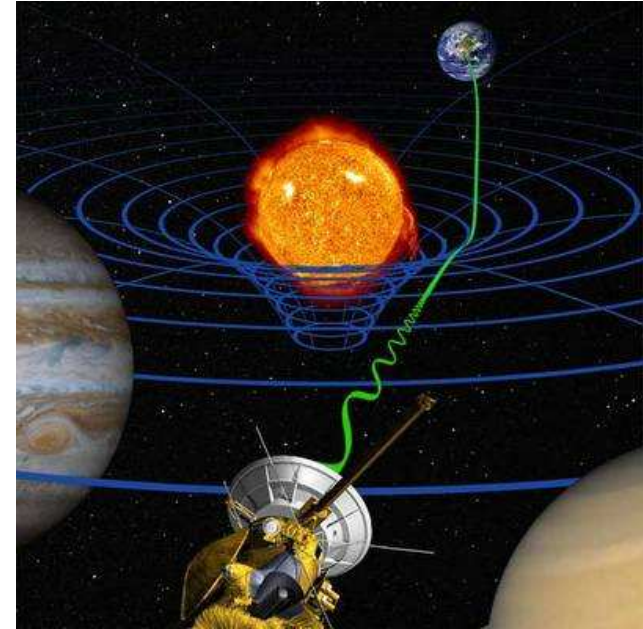
Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu **“swobodnej” materii**

# 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.

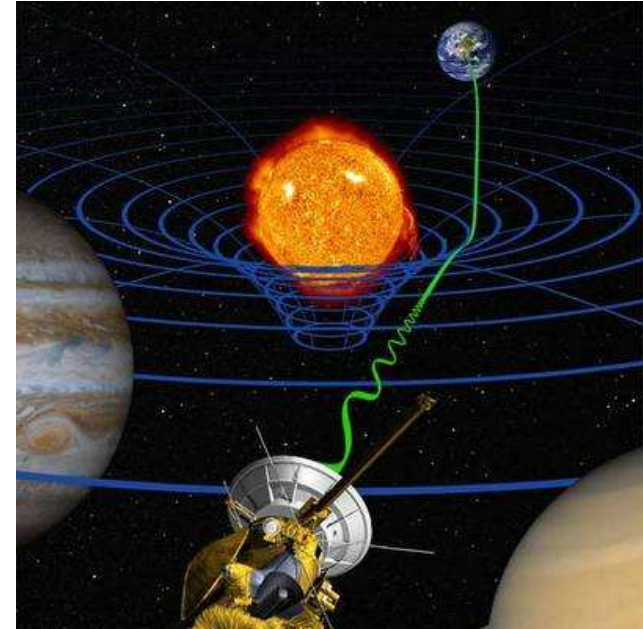
**W zakrzywionej czasoprzestrzeni nie są to już linie proste!**

# 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

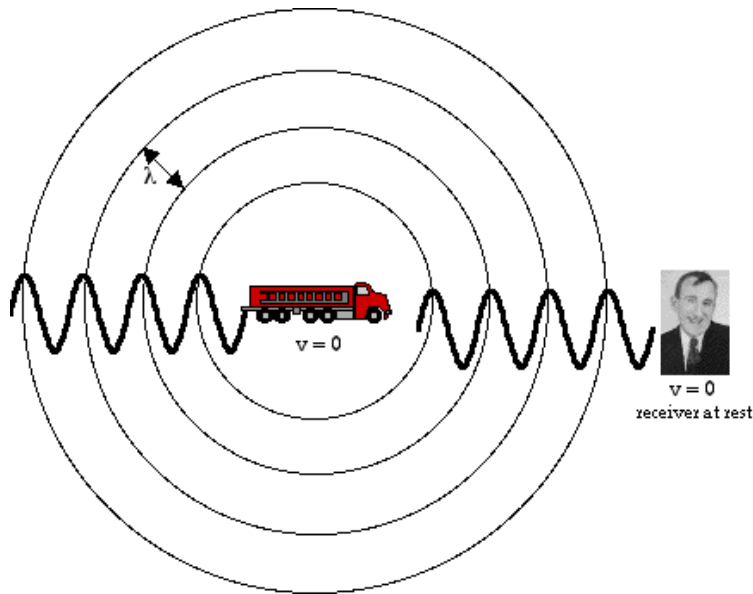
**Problem** teorii Einsteina: nie istniało statyczne rozwiązanie.

Aby **uratować statyczny Wszechświat** Einstein dołożył do swoich równań **stałą kosmologiczną** -  $\Lambda$

# Efekt Dopplera

W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

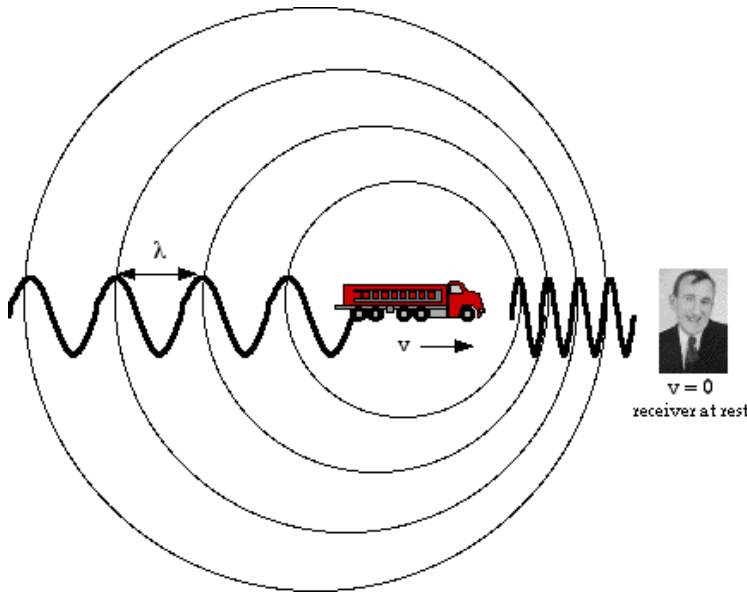
Jeśli źródło dźwięku jest **nieruchome** względem obserwatora, obserwator słyszy dźwięk o **niezmienionej częstotliwości**.



# Efekt Dopplera

W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

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



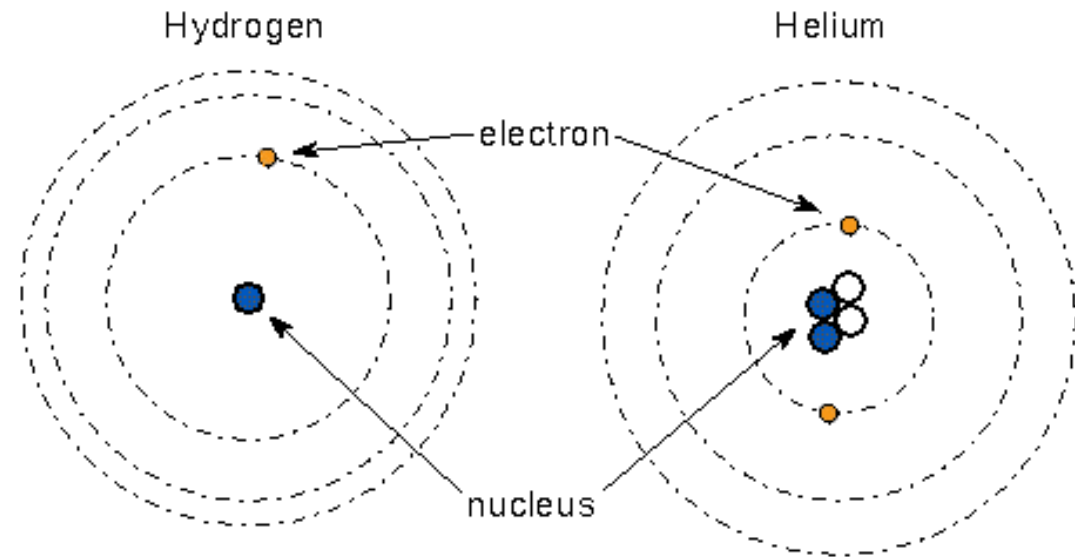
Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

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

# Linie widmowe

## *Linie emisyjne*

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



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

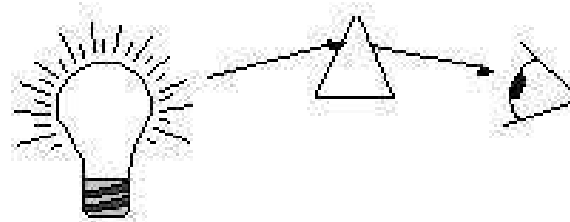
The structure of the atoms for the two most common elements in nature. Different elements have different number of **protons** and different layouts of their energy levels.



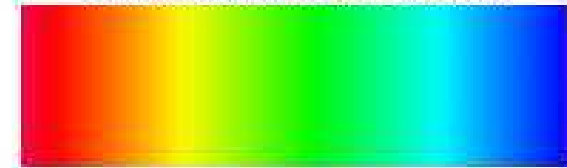
# Linie widmowe

## **Linie emisyjne**

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

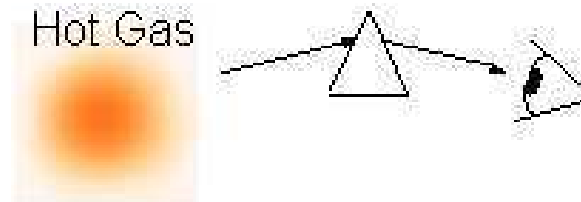


Continuum Spectrum

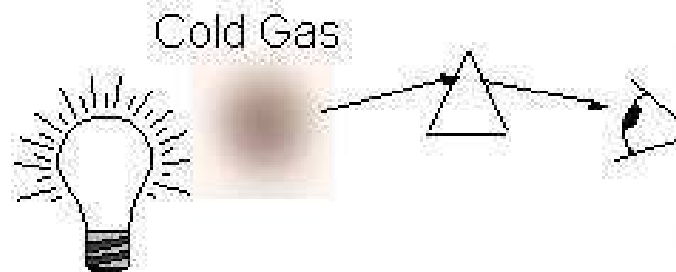


## **Linie absorpcyjne**

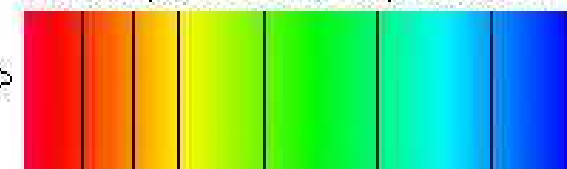
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



Absorption Line Spectrum

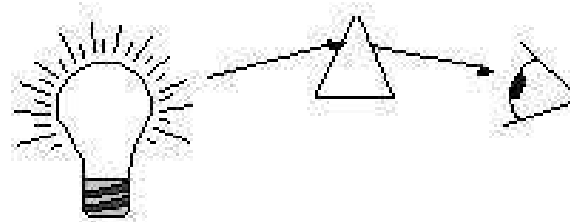




# Linie widmowe

## **Linie emisyjne**

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

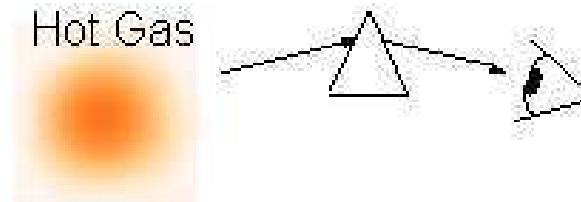


Continuum Spectrum

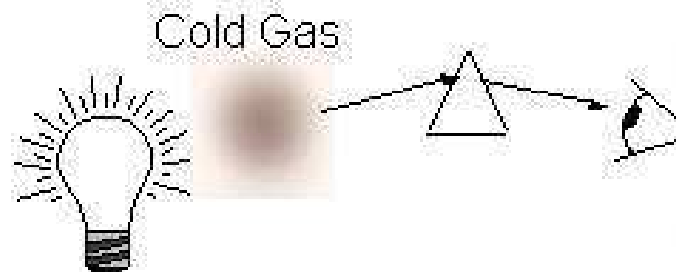
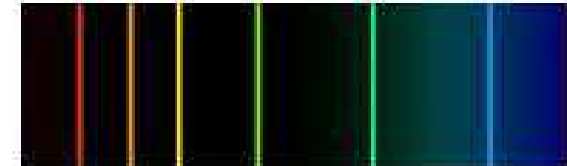


## **Linie absorpcyjne**

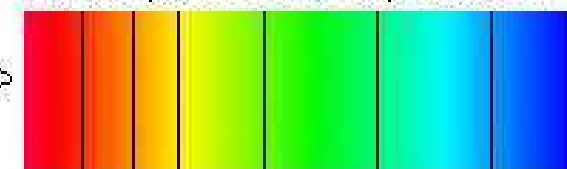
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



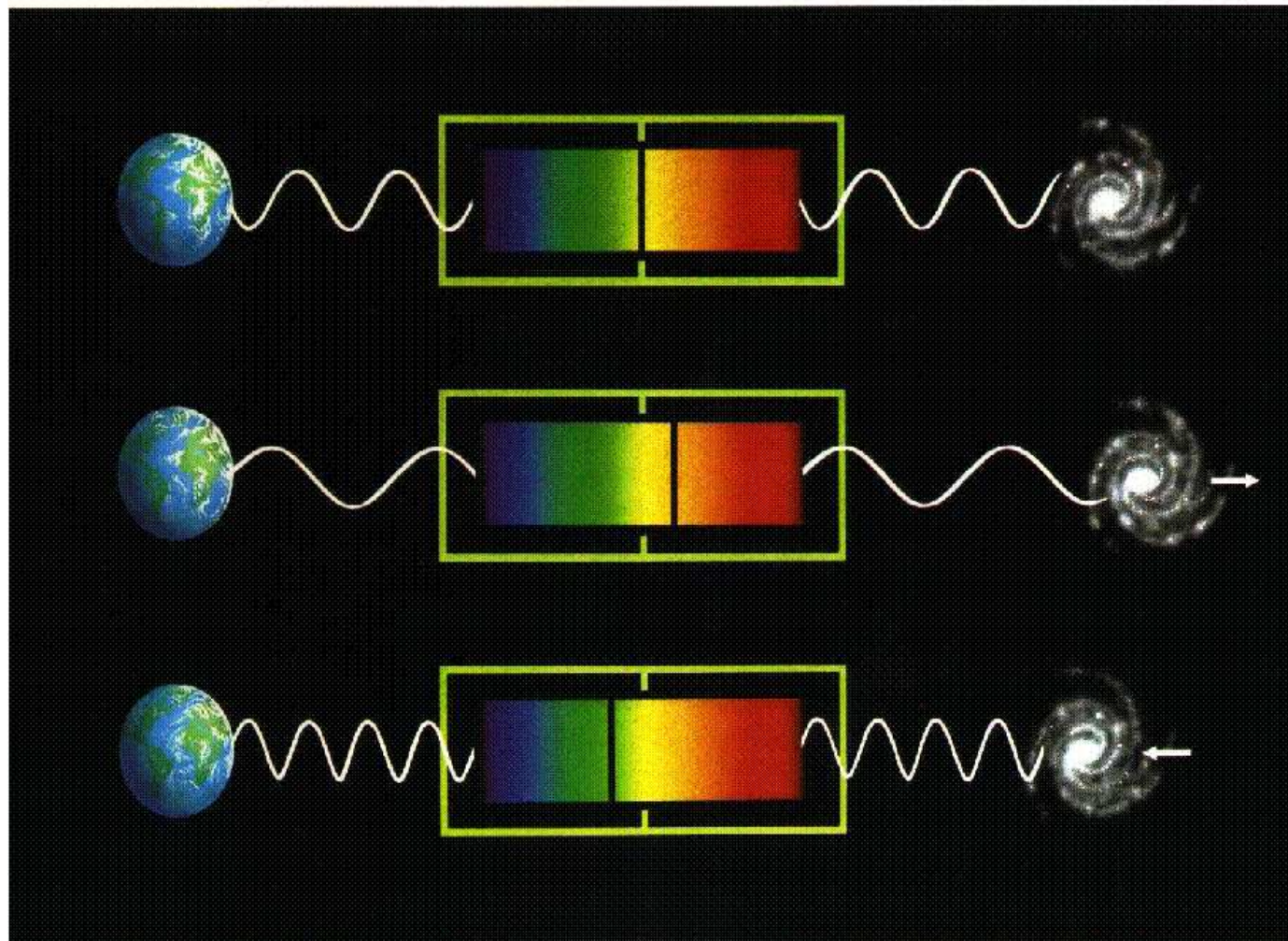
Absorption Line Spectrum



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

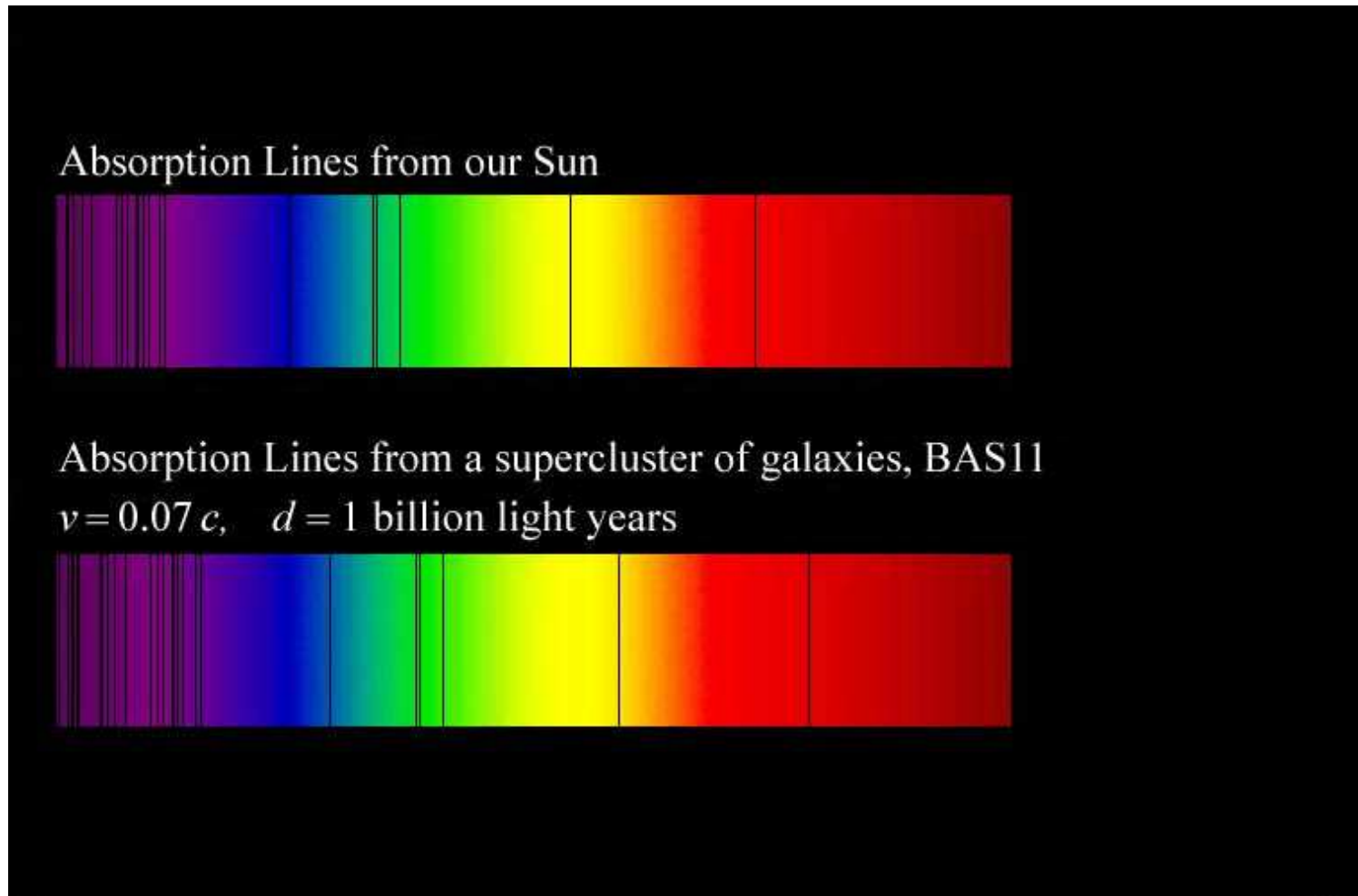
# Efekt Dopplera dla światła

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**

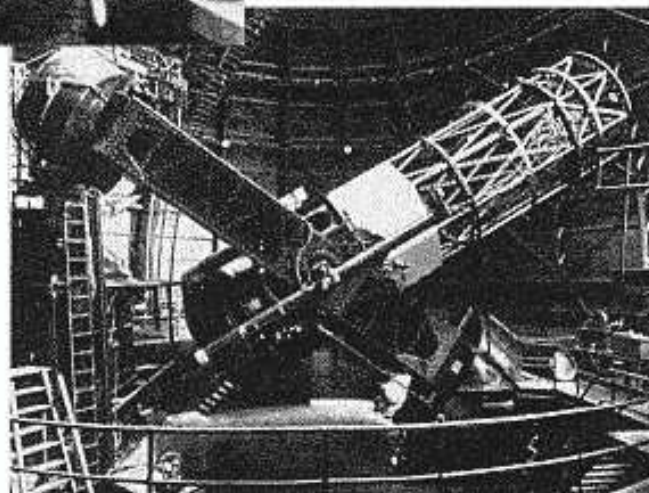
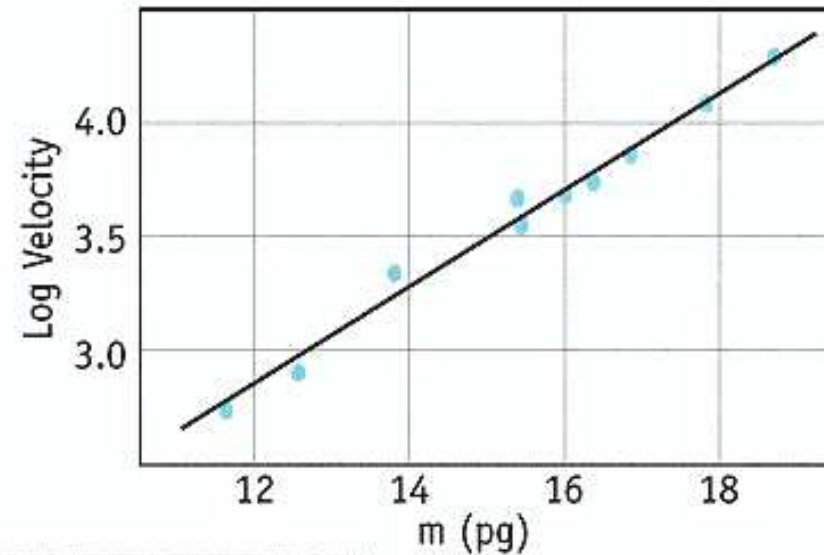


# Prawo Hubble (1929)

## DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

# Prawo Hubble'a (1929)

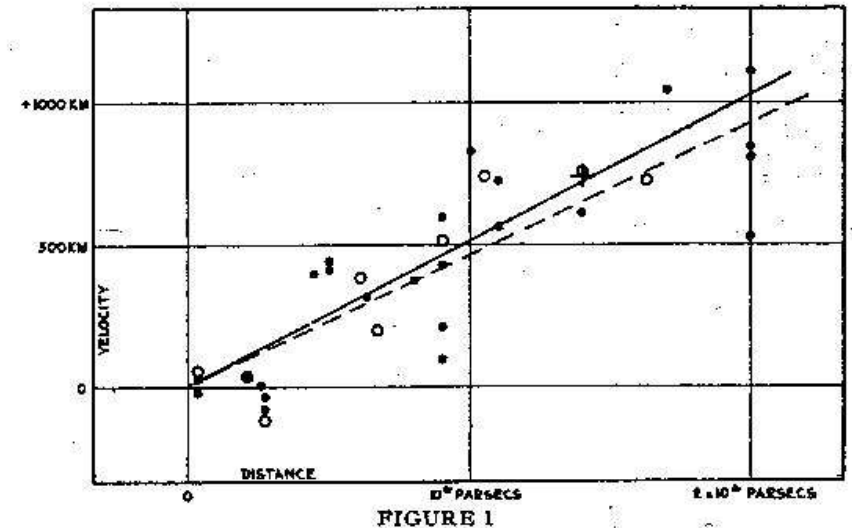
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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:

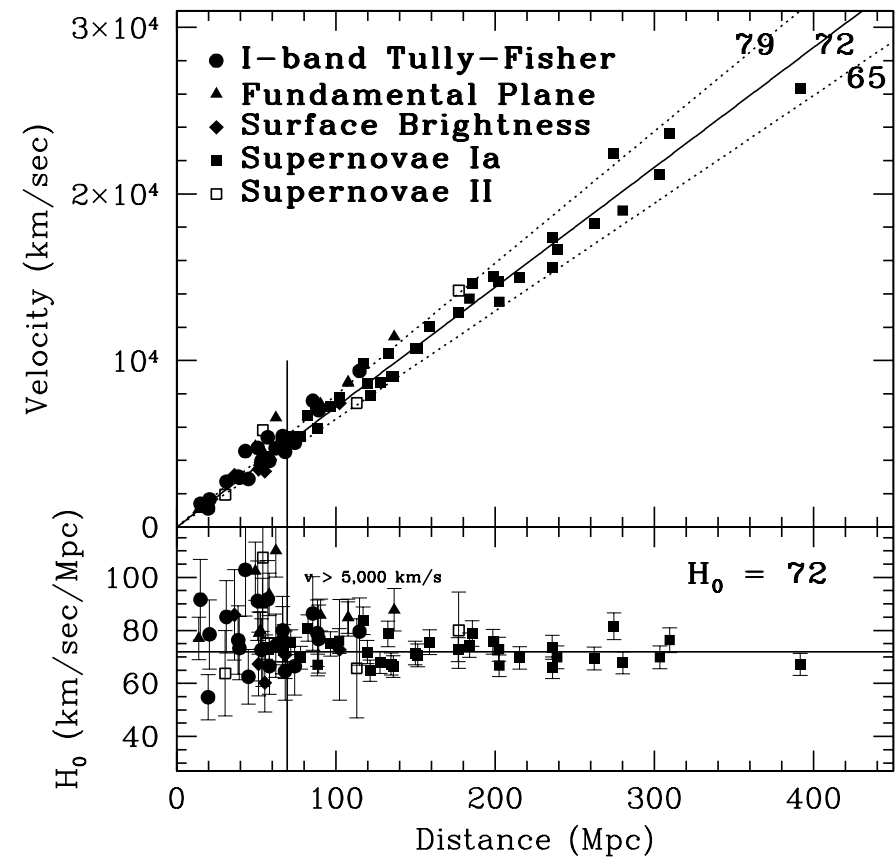
$$v = H \cdot r$$

$r$  - 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".

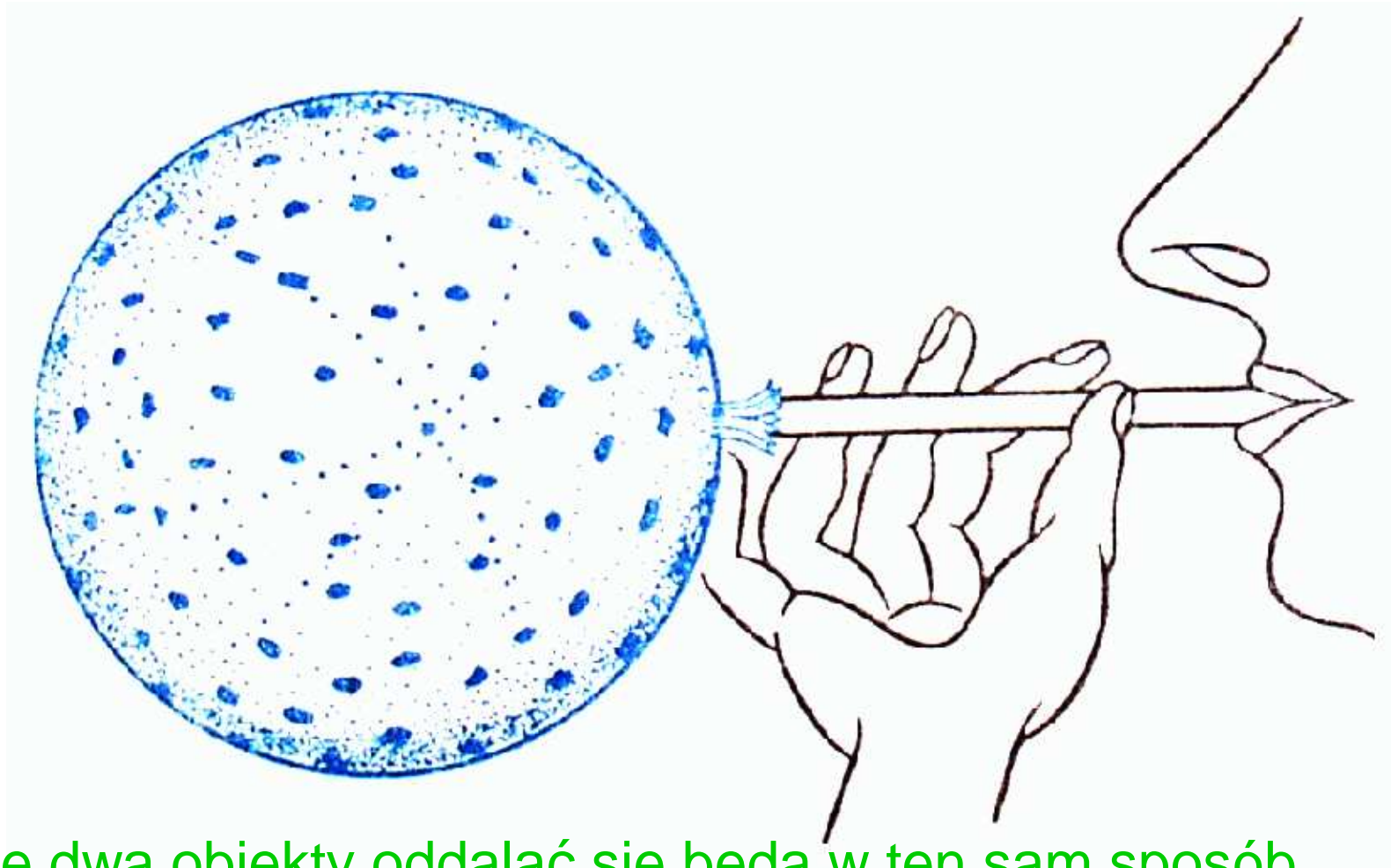
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

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



# Prawo Hubble'a

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.**



# 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 punktowego skupiska nieskończonej energii...

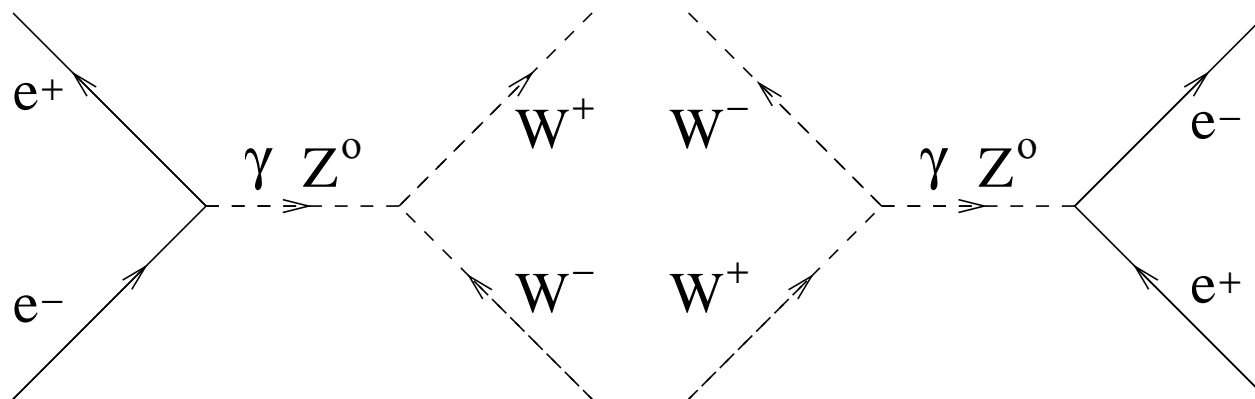
# Ewolucja Wszechświata

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**.

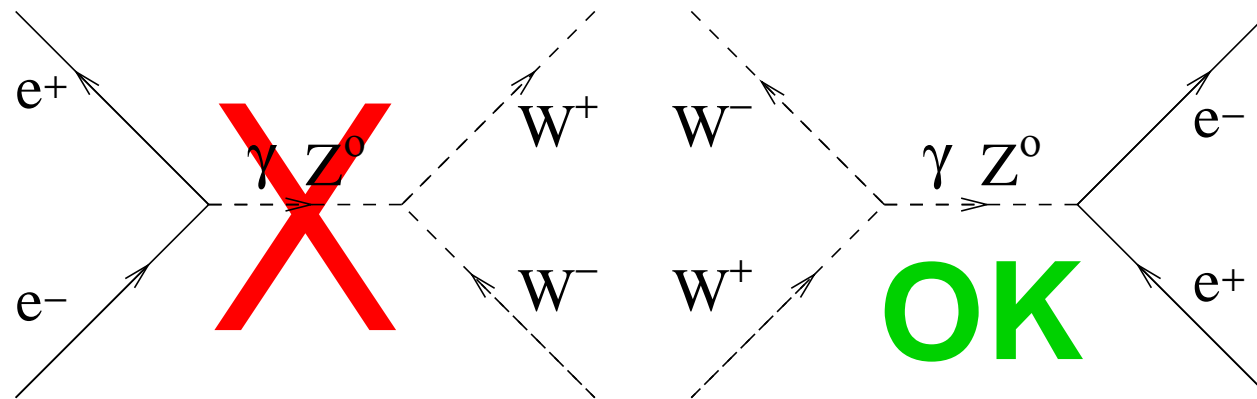


Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**



# Ewolucja Wszechświata

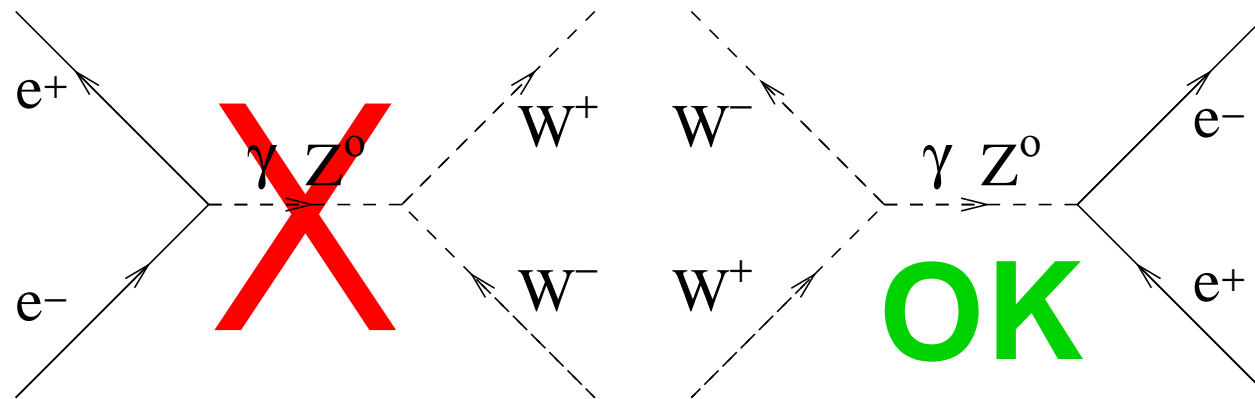
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

# Ewolucja Wszechświata

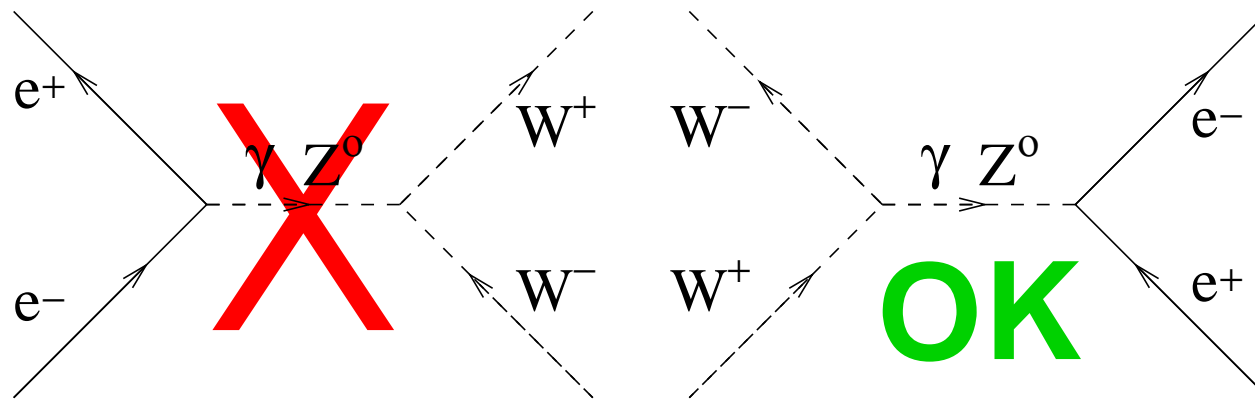
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

# Ewolucja Wszechświata

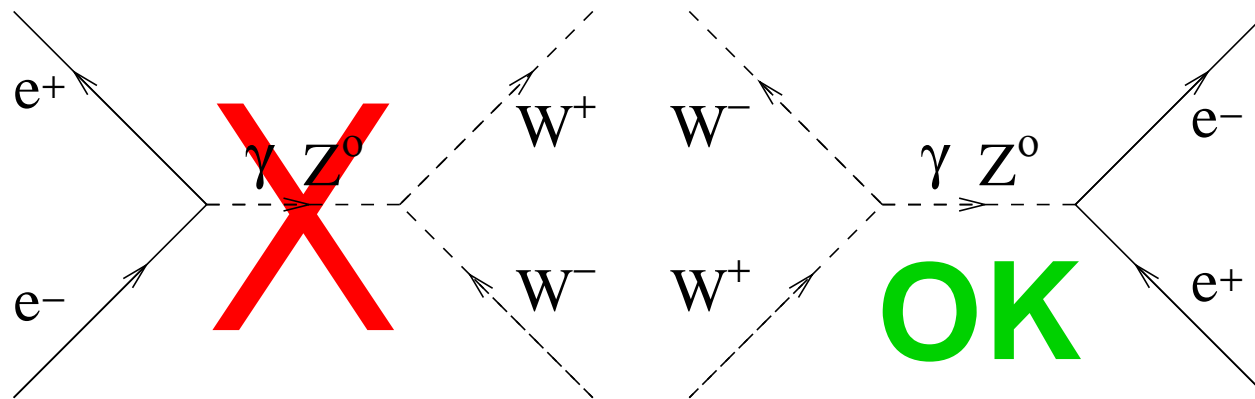
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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)

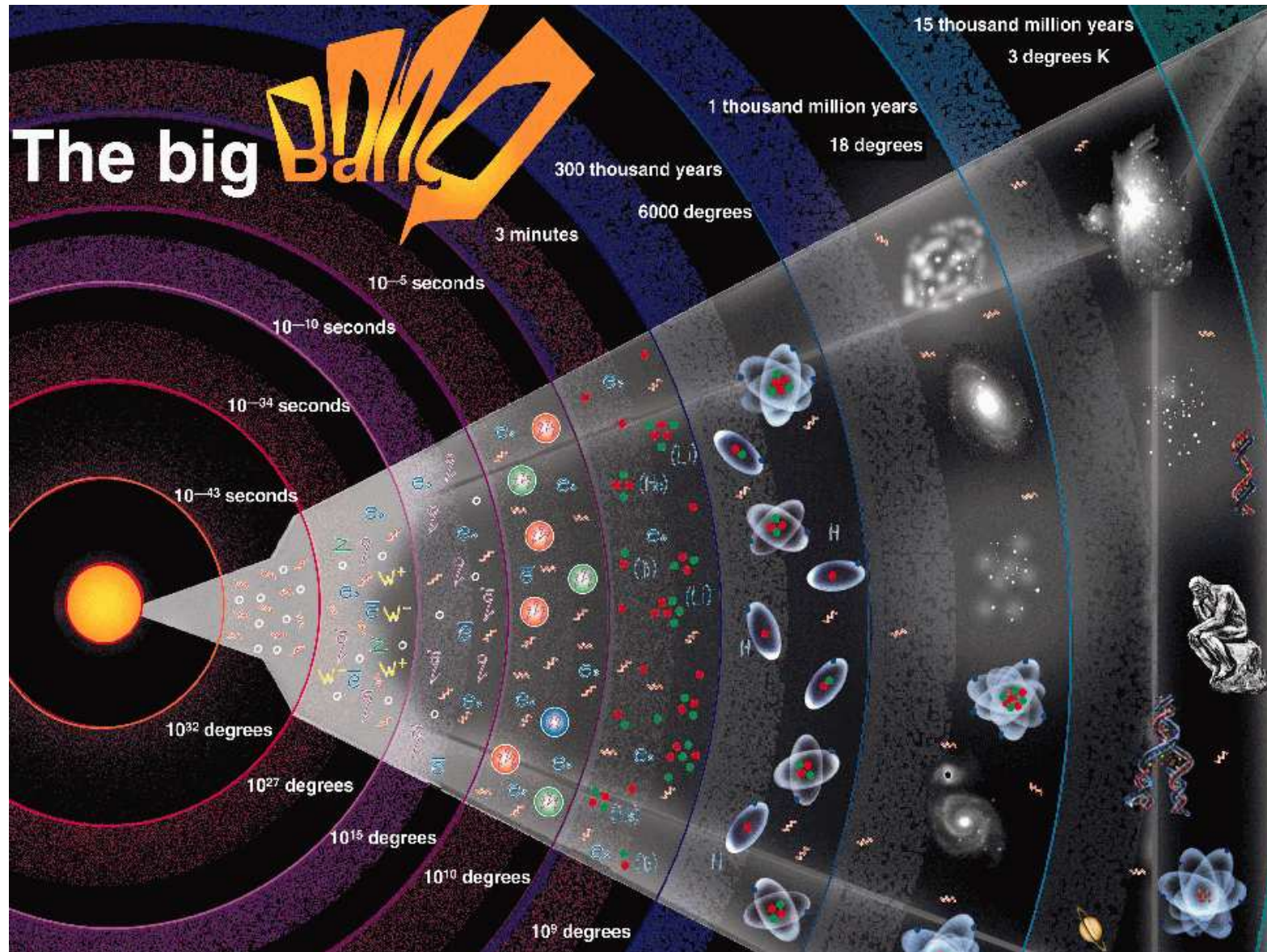
# Ewolucja Wszechświata

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 ?

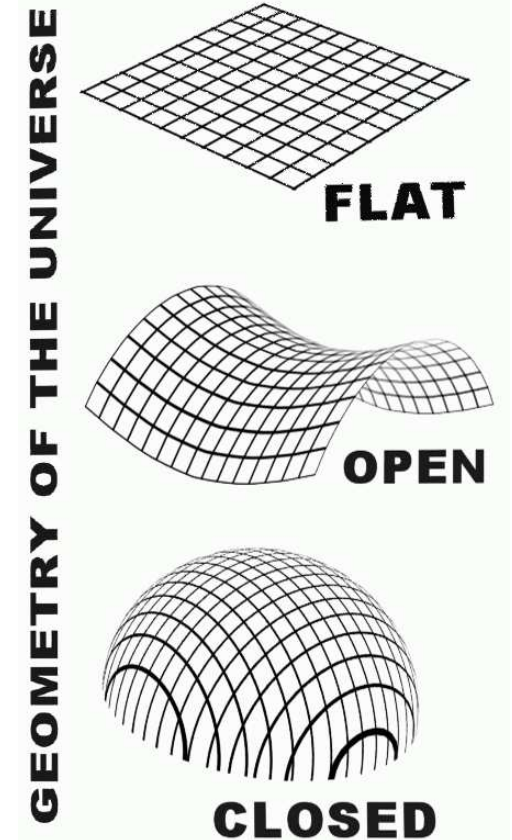
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** zależy od **gęstości** materii  $\rho$ .

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



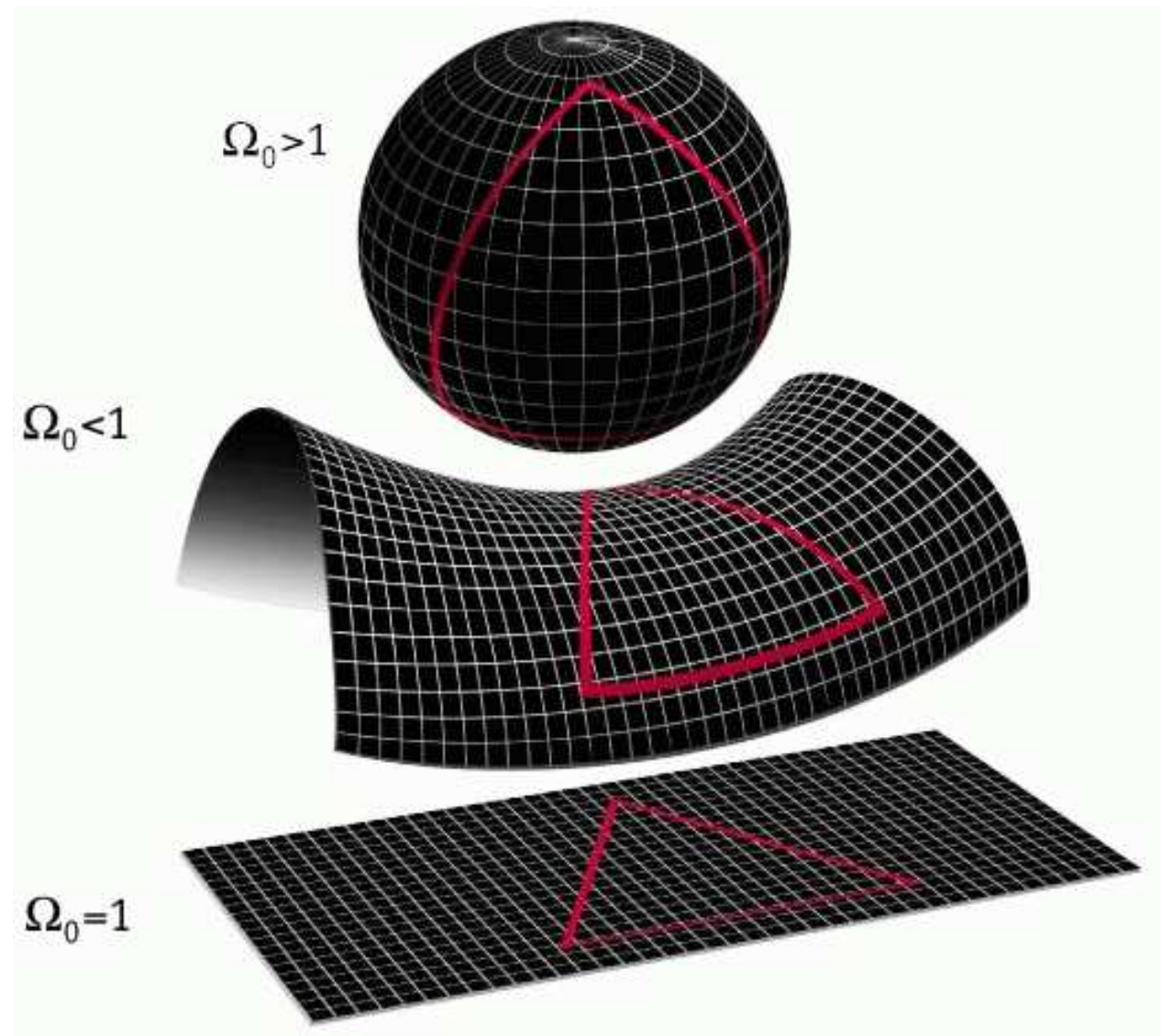


# Krzywizna przestrzeni

Całkowita gęstość materii/energii we Wszechświecie decyduje też o geometrii przestrzeni na skalach kosmologicznych!

Lokalnie wiemy, że przestrzeń jest płaska (suma kątów trójkąta wynosi  $180^\circ$ ).

Ale na dużych odległościach trudno to sprawdzić...



# 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”

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

# 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”

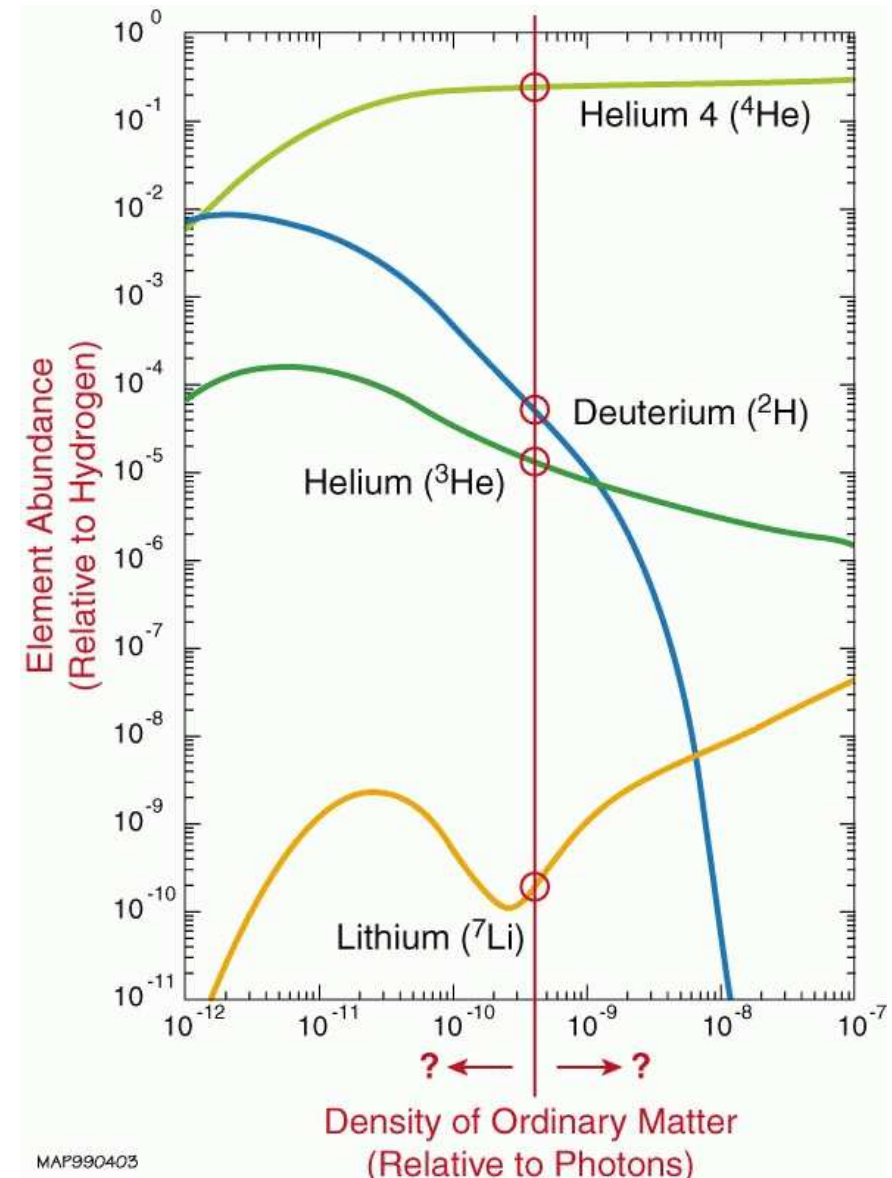
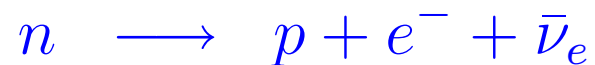
# Pierwotna nukleosynteza

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”

$$\Omega_b \sim 0.04$$

# 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”

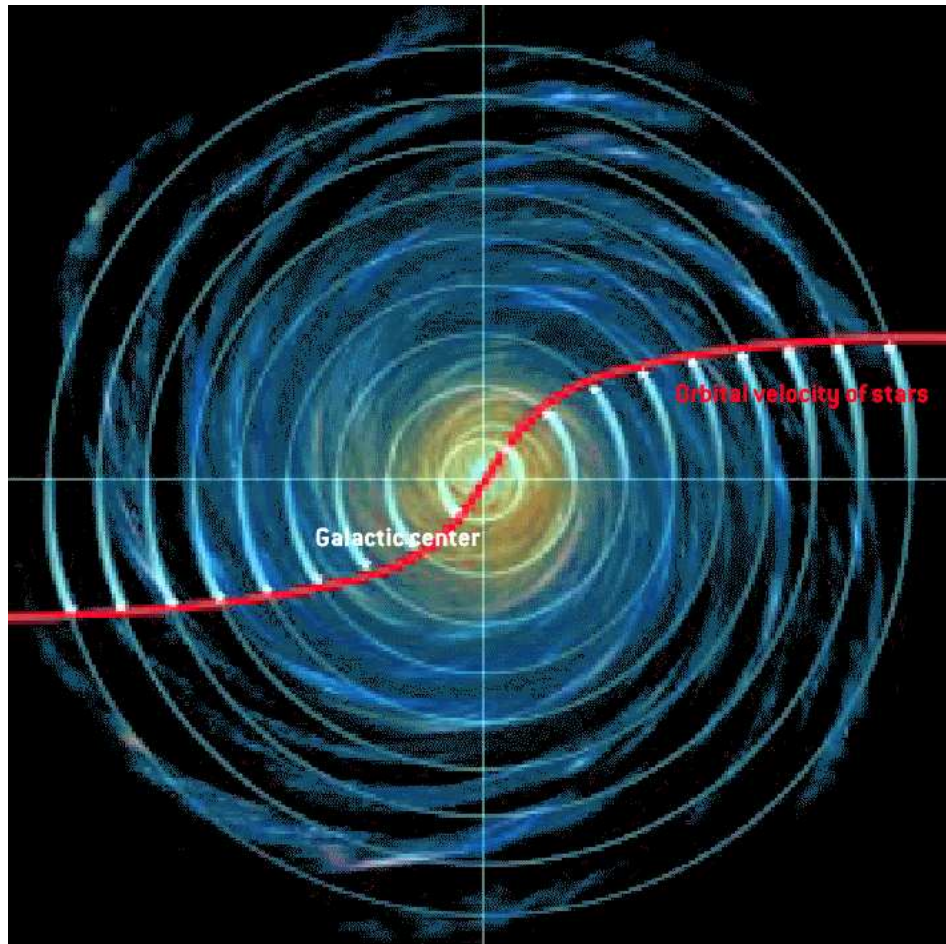
$$\Omega_{lumi} \sim 0.006$$

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

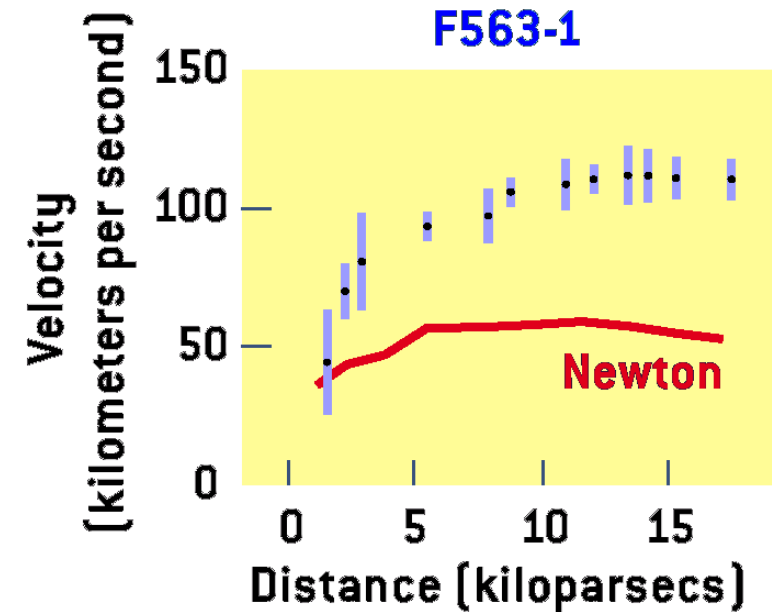
$$\Omega_b \sim 0.04$$

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

# Ciemna materia?



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.

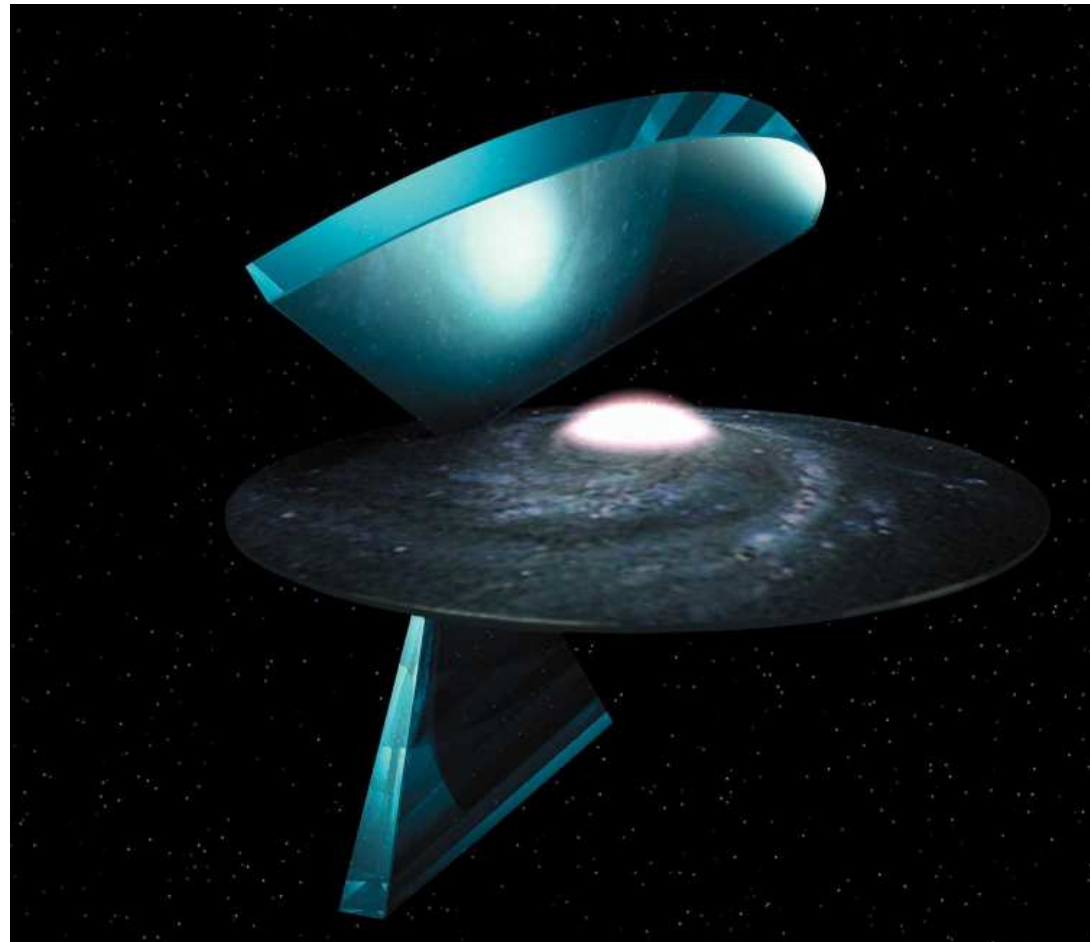


Ramiona wirują szybciej niż oczekiwaliśmy z praw grawitacji i dynamiki

# Oddziaływania grawitacyjne

## *Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey*

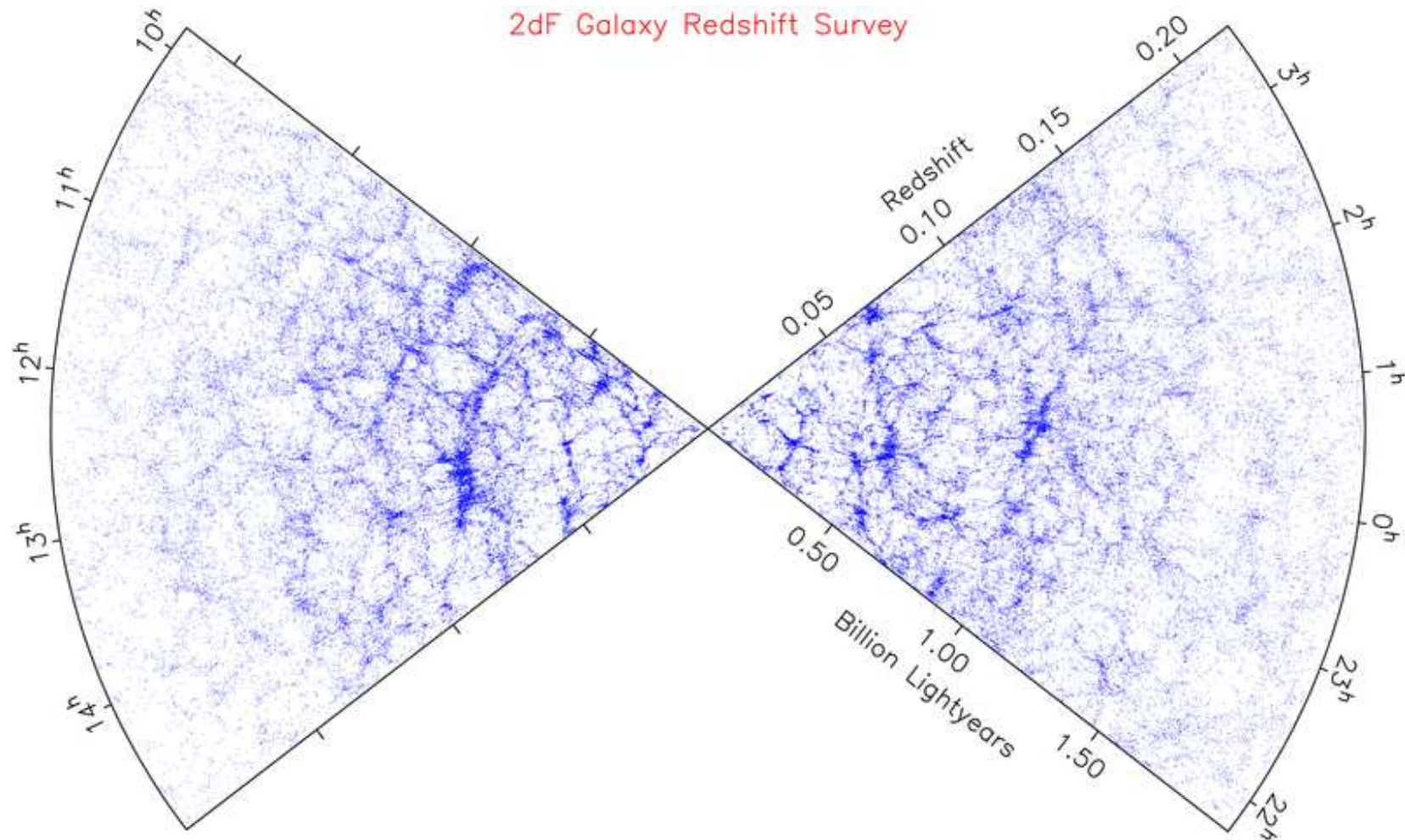
Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk





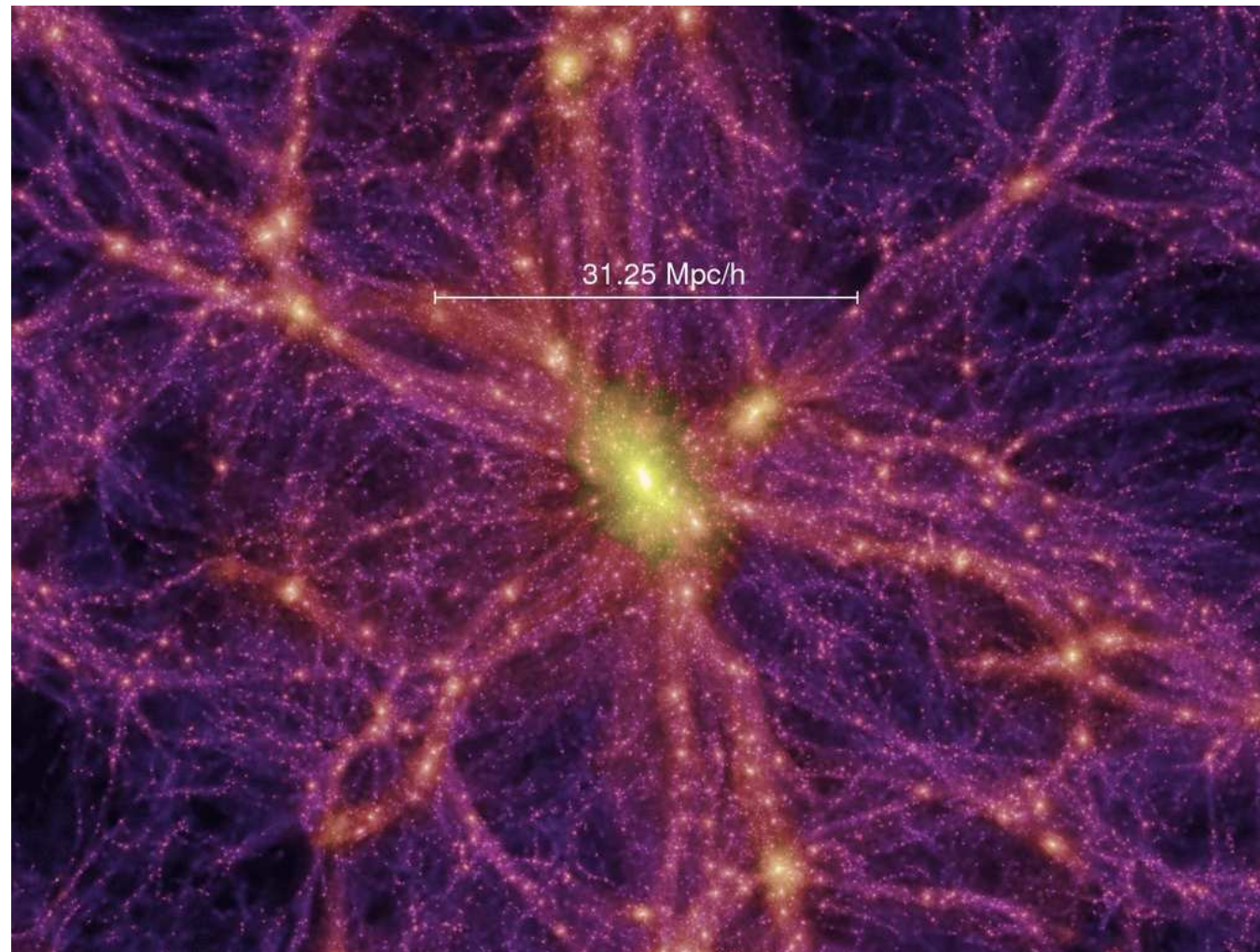
# Oddziaływania grawitacyjne

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.



# 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”

$$\Omega_b \sim 0.04$$

- 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?

Jednym z głównych kandydatów jest najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP), którą wciąż mamy nadzieję odkryć w LHC.

