

# Wszechświat cząstek elementarnych

## *Wykłady 14: Ewolucja Wszechświata*

prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

# Ewolucja Wszechświata

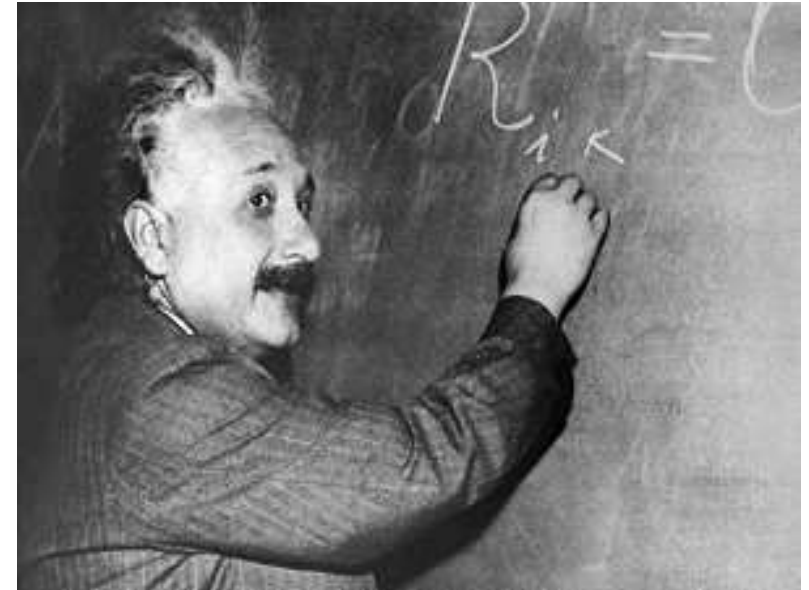
- Wprowadzenie
  - Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Efekt Dopplera i Prawo Hubblea
- Ewolucja Wszechświata
  - założenia modelu
  - Wielki Wybuch
  - przyszłość Wszechświata
- Ile jest materii we Wszechświecie?

# Wprowadzenie

## *Ogólna Teoria Względności*

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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

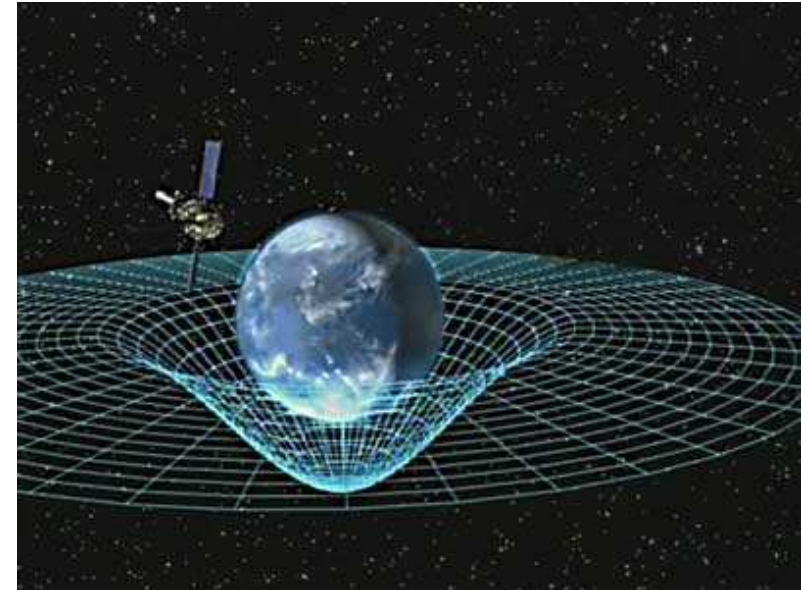


# Wprowadzenie

## *Ogólna Teoria Względności*

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



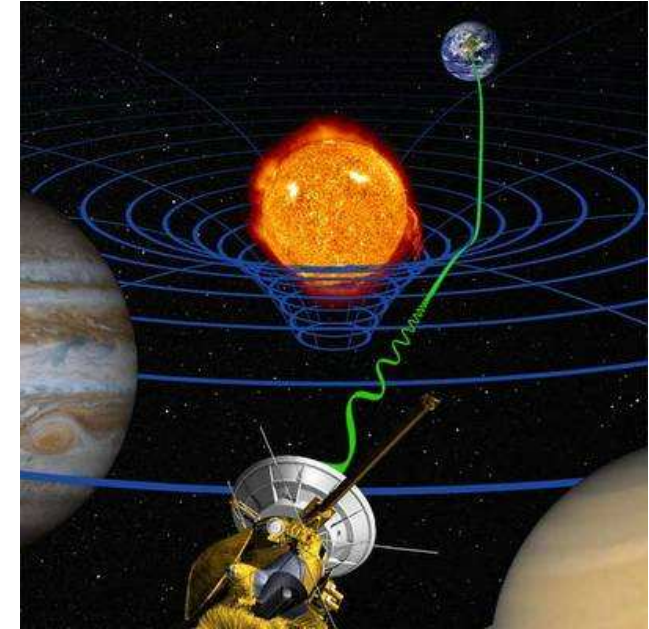
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.  
Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii.

# Wprowadzenie

## *Ogólna Teoria Względności*

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



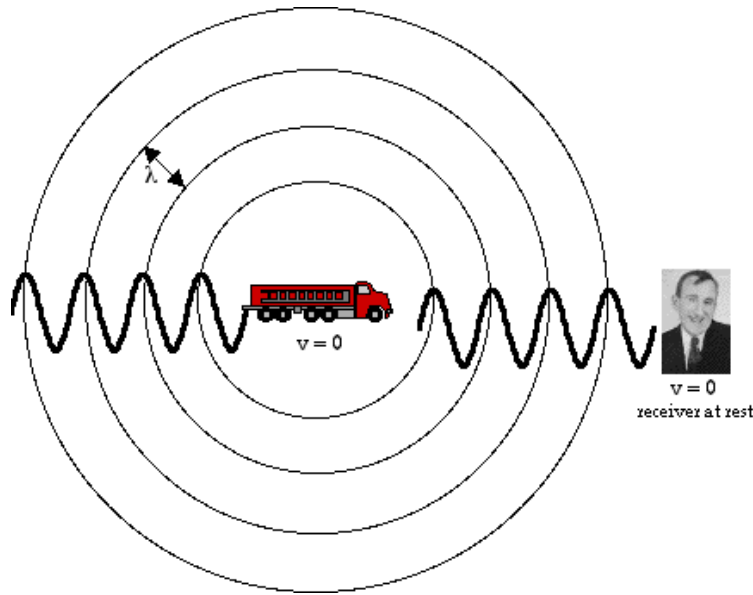
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.

Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii.

Problem teorii Einsteina: nie istniało statyczne rozwiązanie.

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

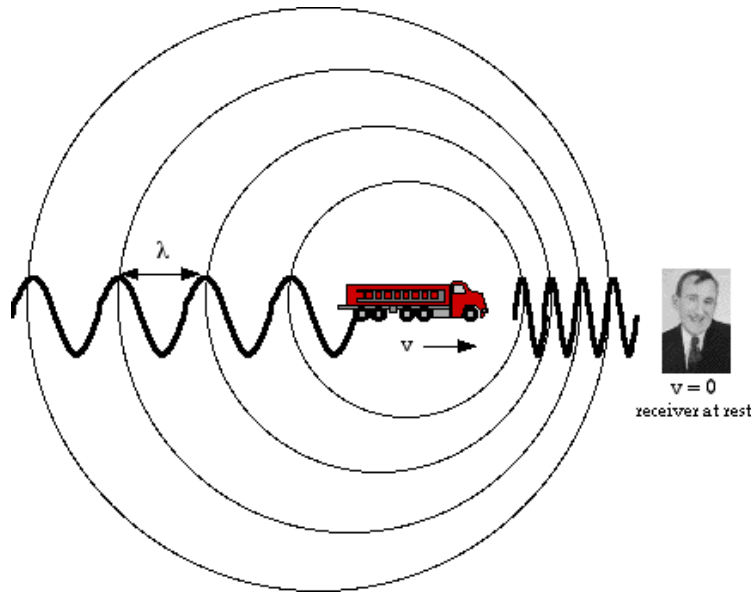
# Efekt Dopplera



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**.

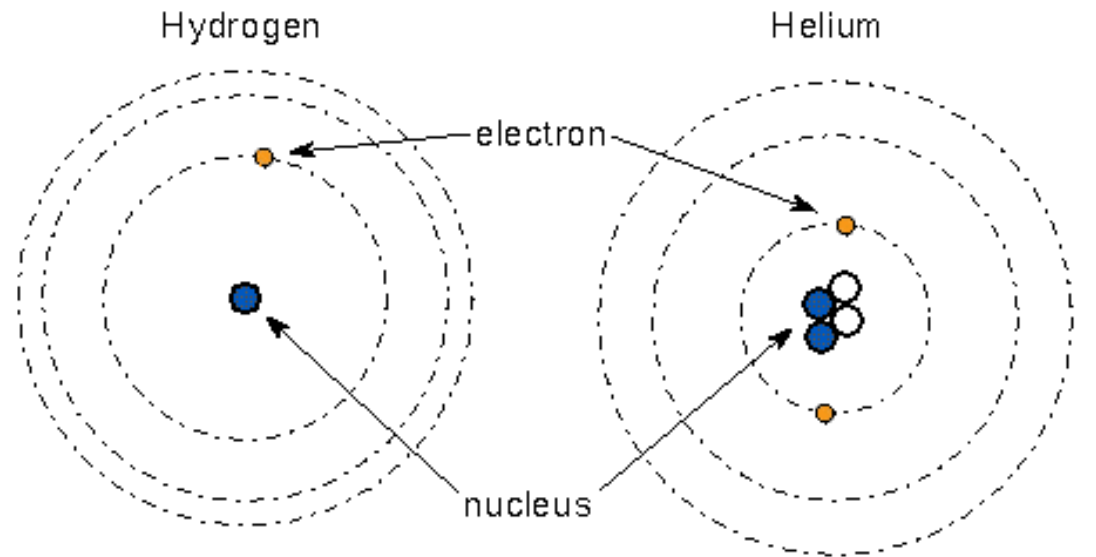
Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

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

# Linie widmowe

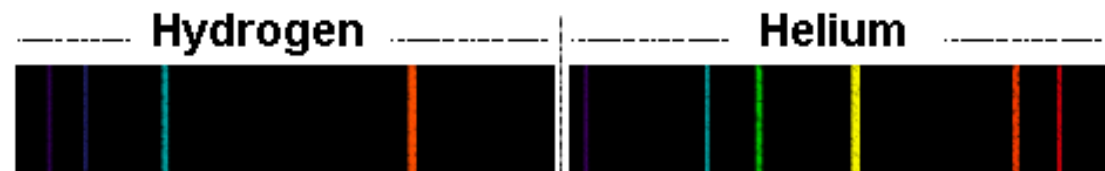
## *Linie emisyjne*

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.

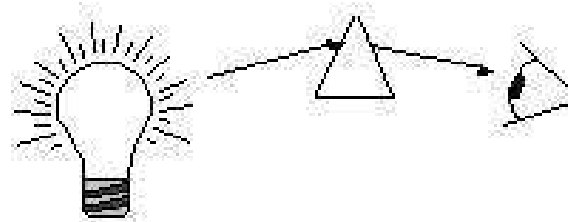




# Linie widmowe

## **Linie emisyjne**

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

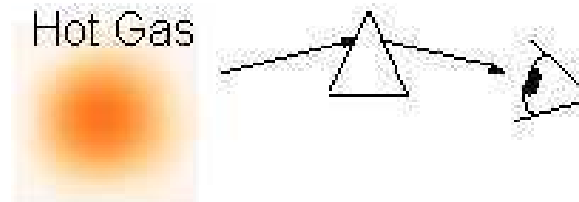


Continuum Spectrum

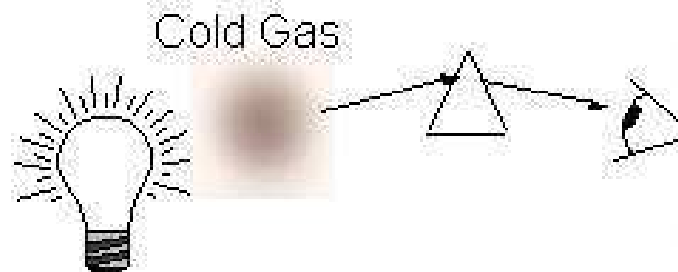
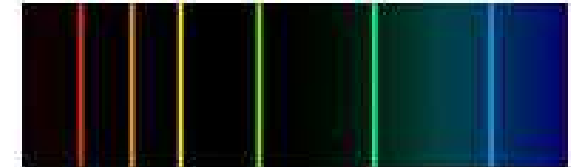


## **Linie absorpcyjne**

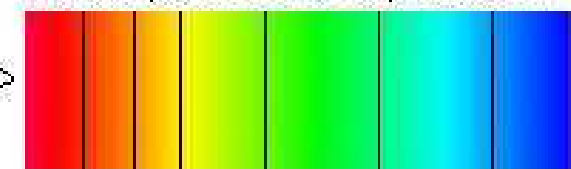
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



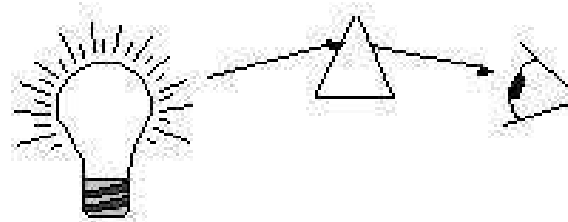
Absorption Line Spectrum



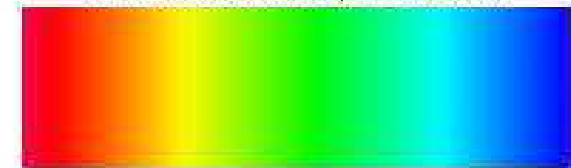
# Linie widmowe

## **Linie emisyjne**

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

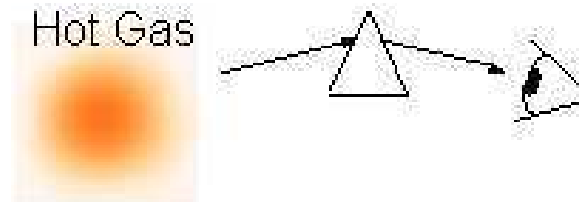


Continuum Spectrum

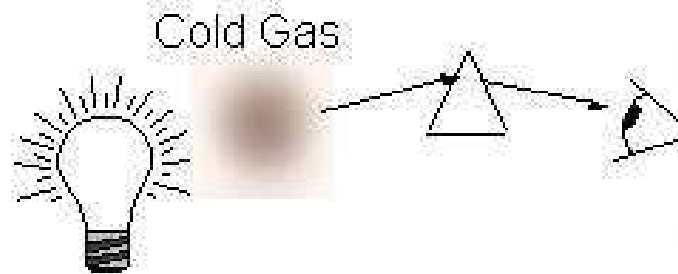
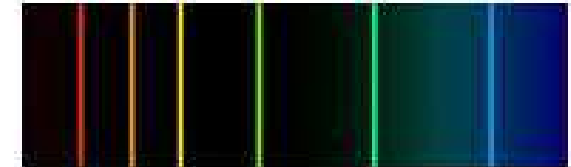


## **Linie absorpcyjne**

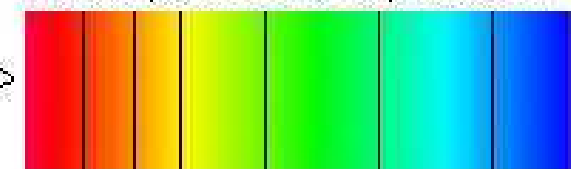
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



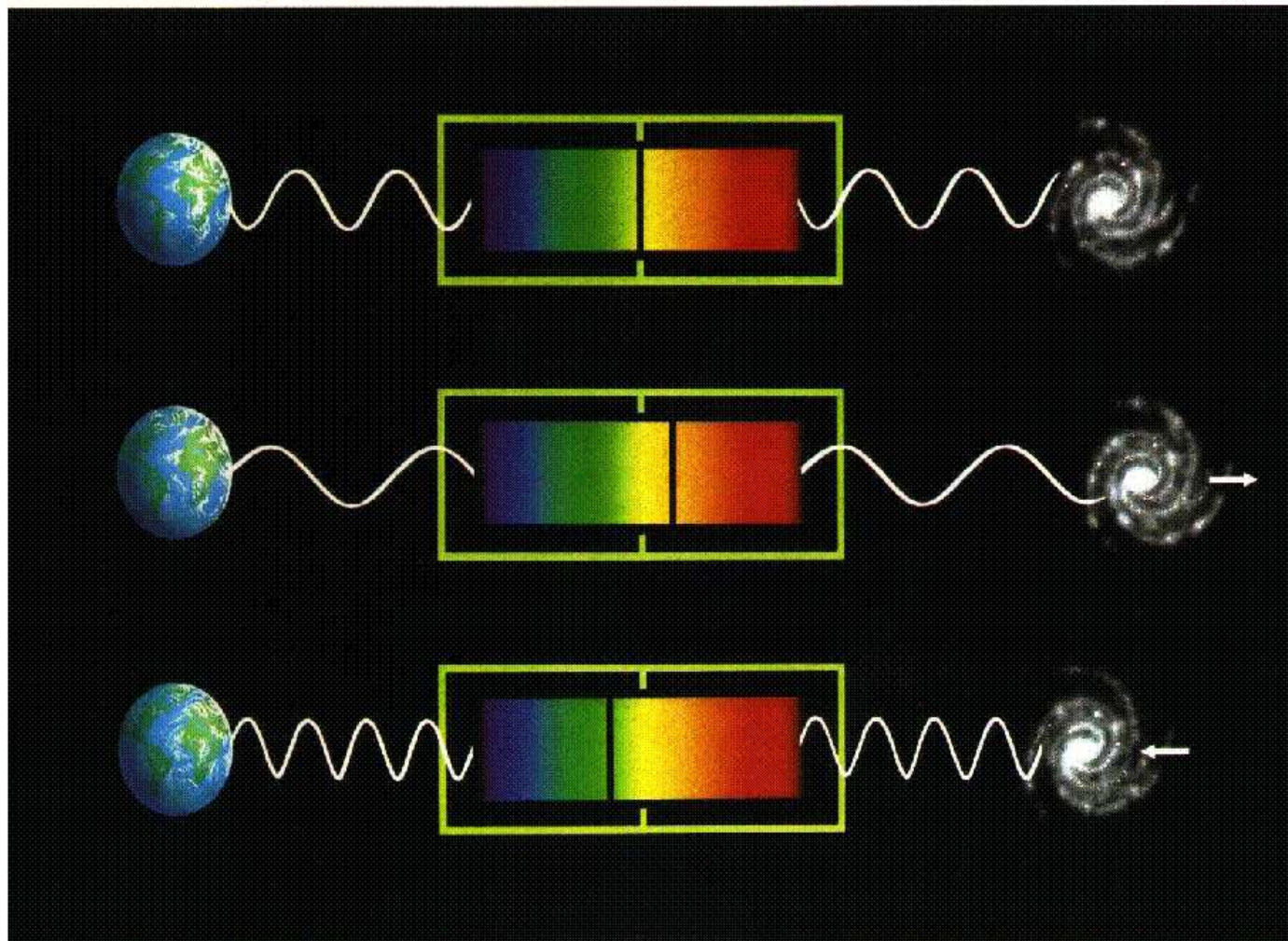
Absorption Line Spectrum



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

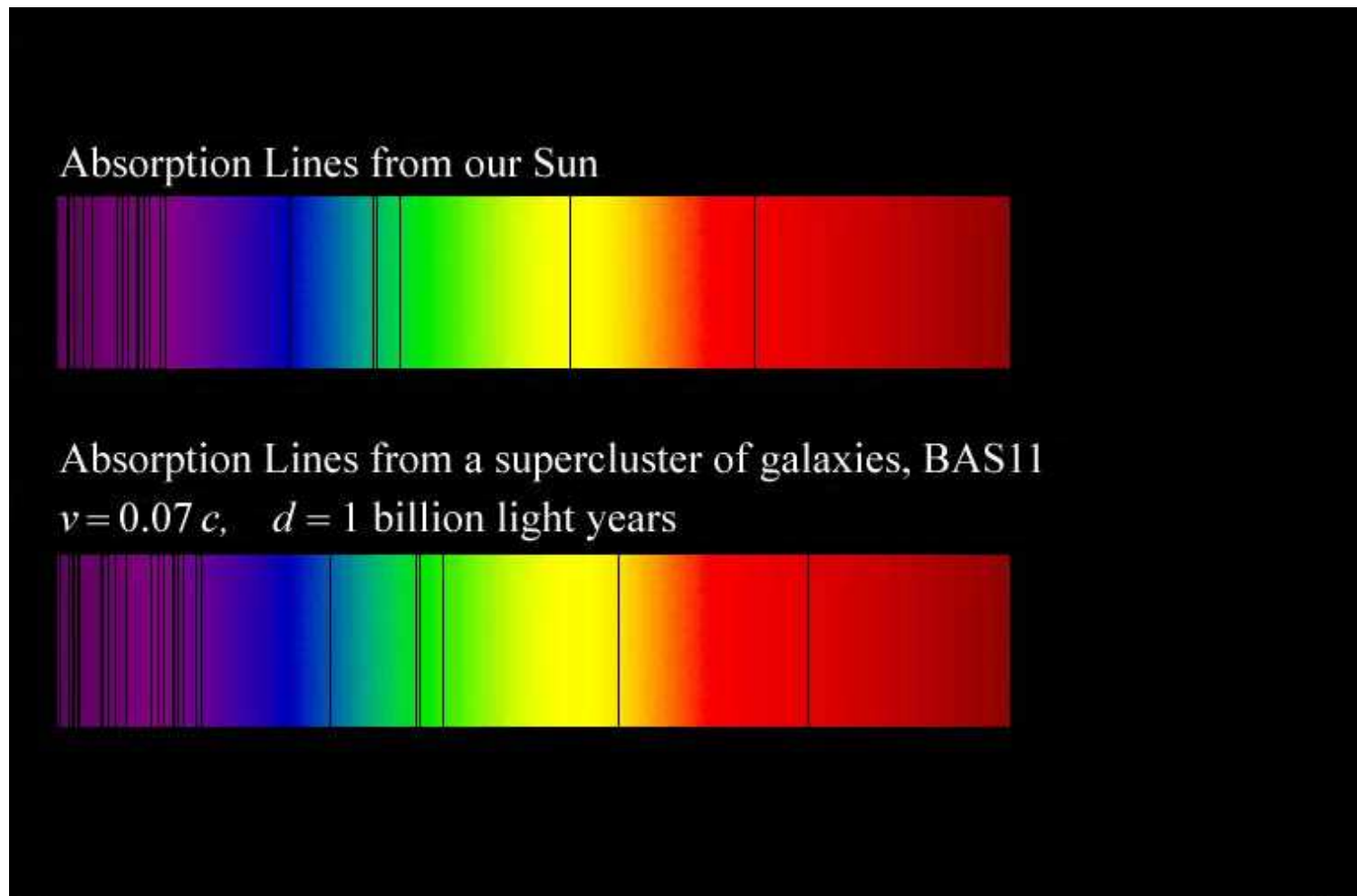
# Efekt Dopplera dla światła

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**



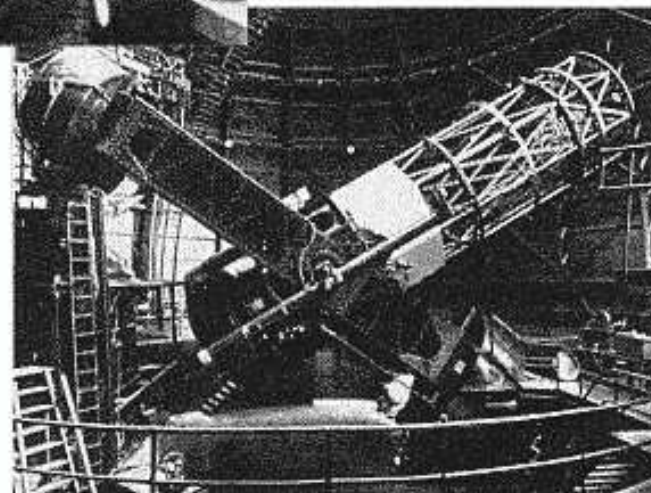
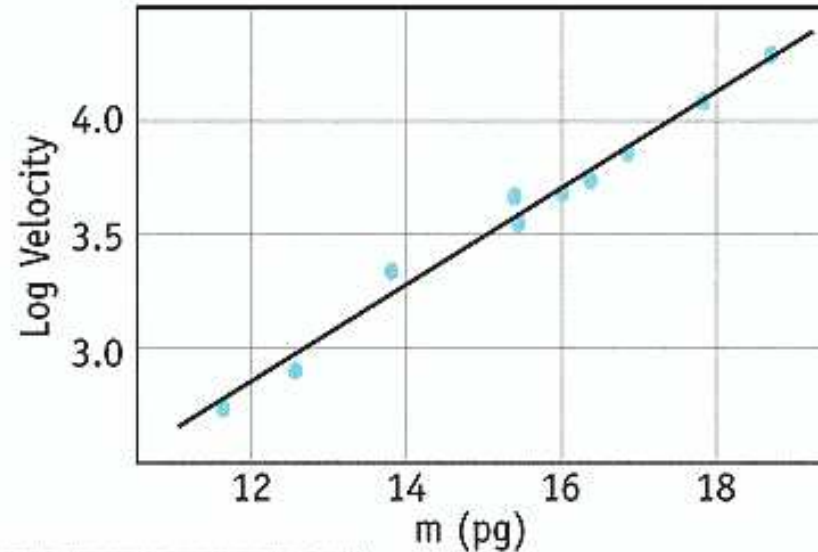


# Prawo Hubble (1929)

## DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

# Prawo Hubble'a (1929)

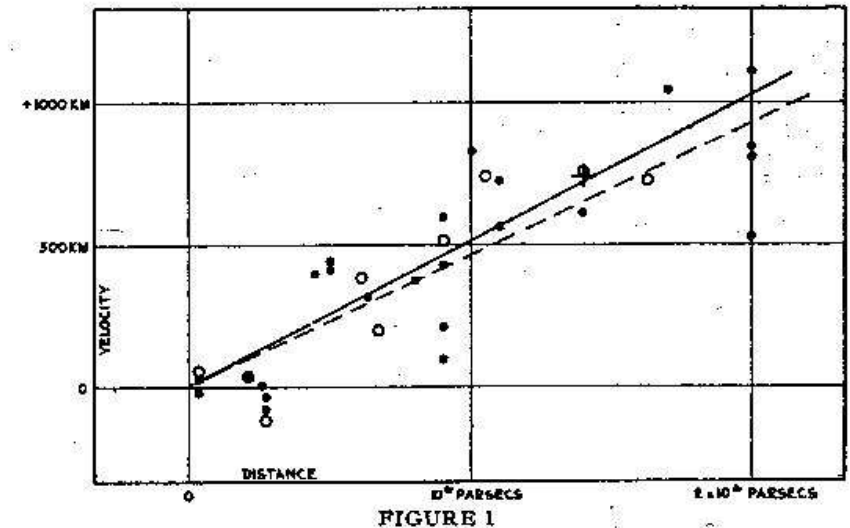
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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:

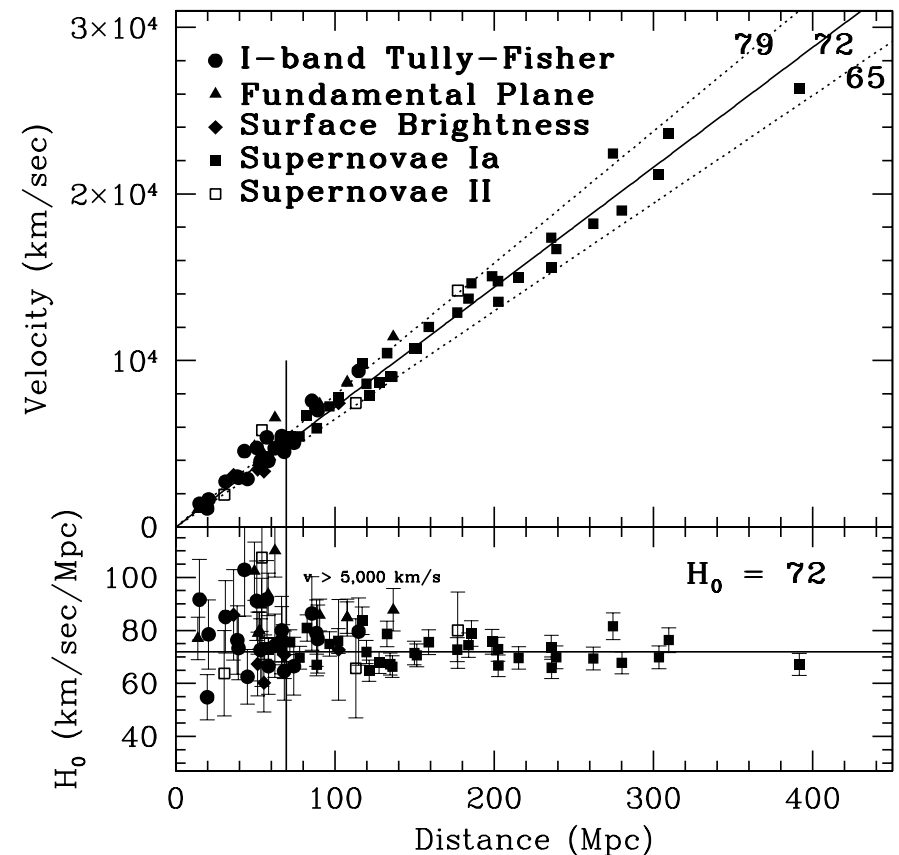
$$v = H \cdot r$$

$r$  - 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.

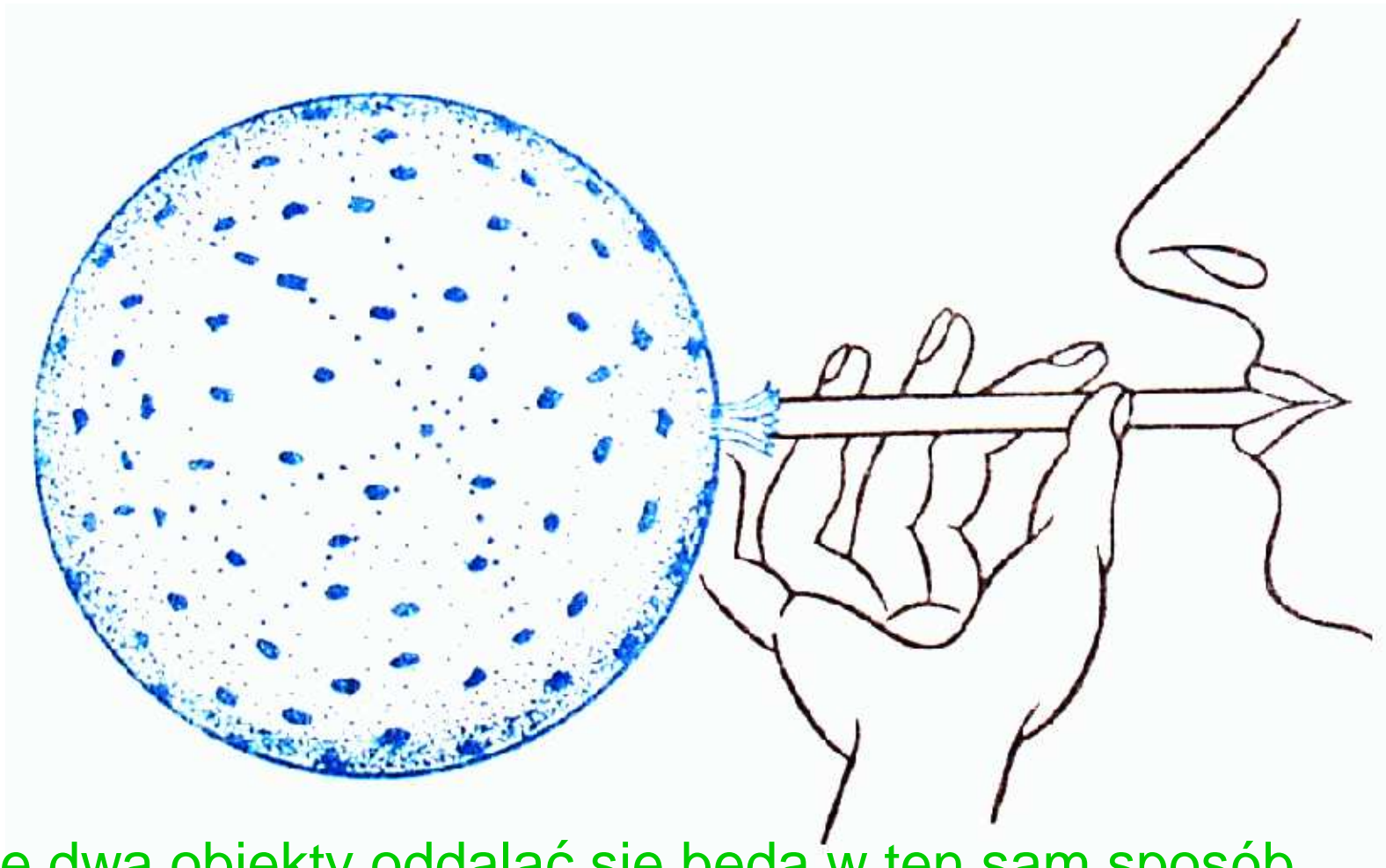
Na największych odległościach są to **Supernowe typu 1A**.





# 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...

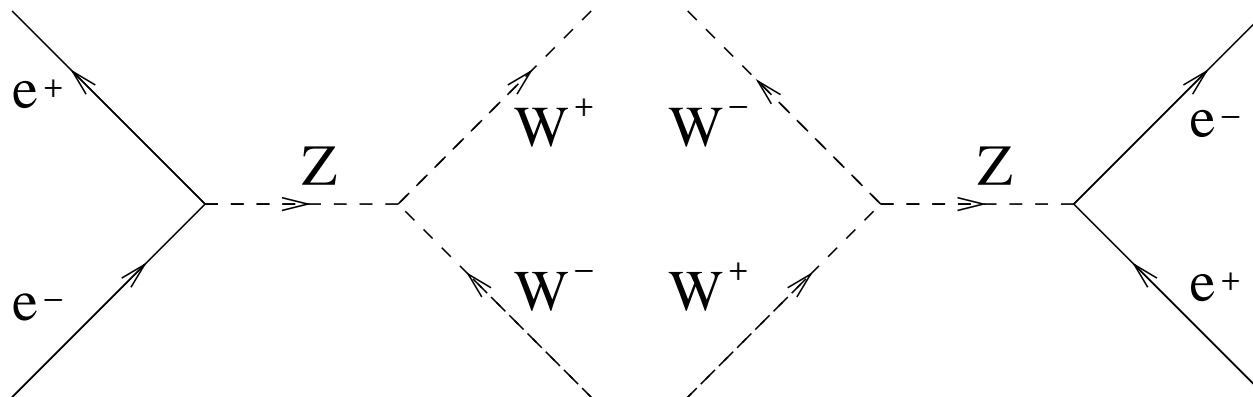
# Ewolucja Wszechświata

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**.

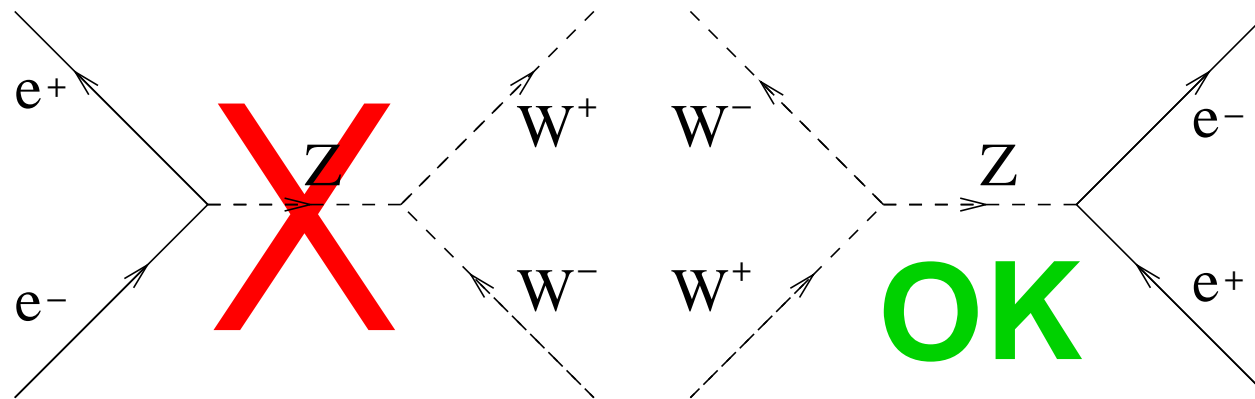


Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**



# Ewolucja Wszechświata

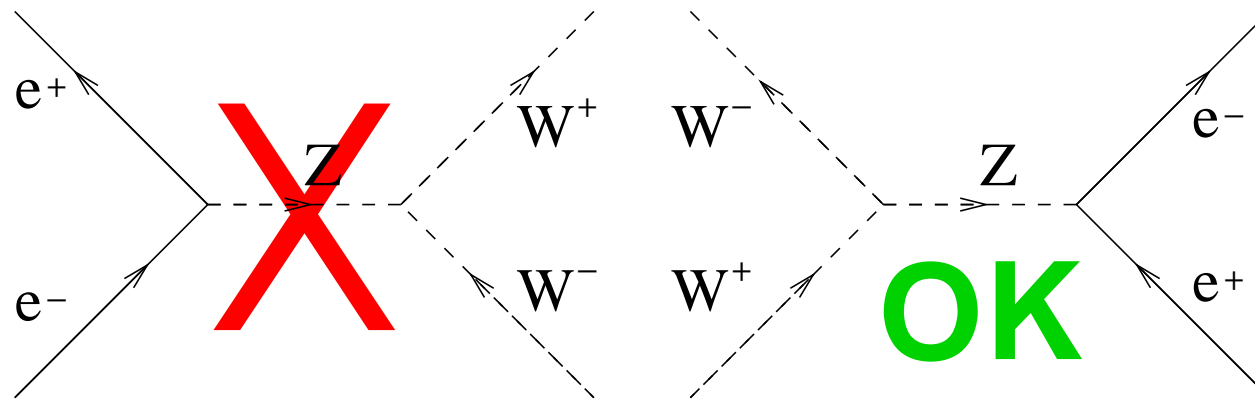
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

# Ewolucja Wszechświata

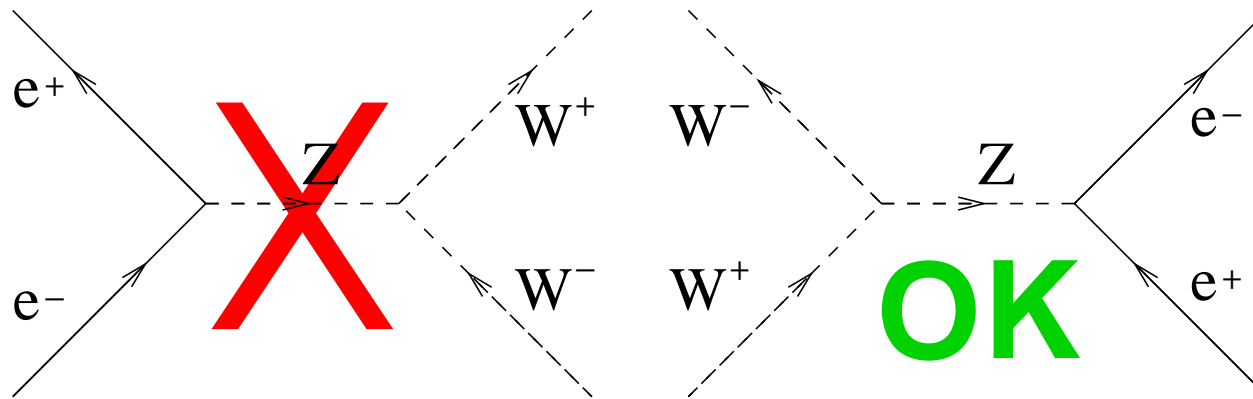
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

# Ewolucja Wszechświata

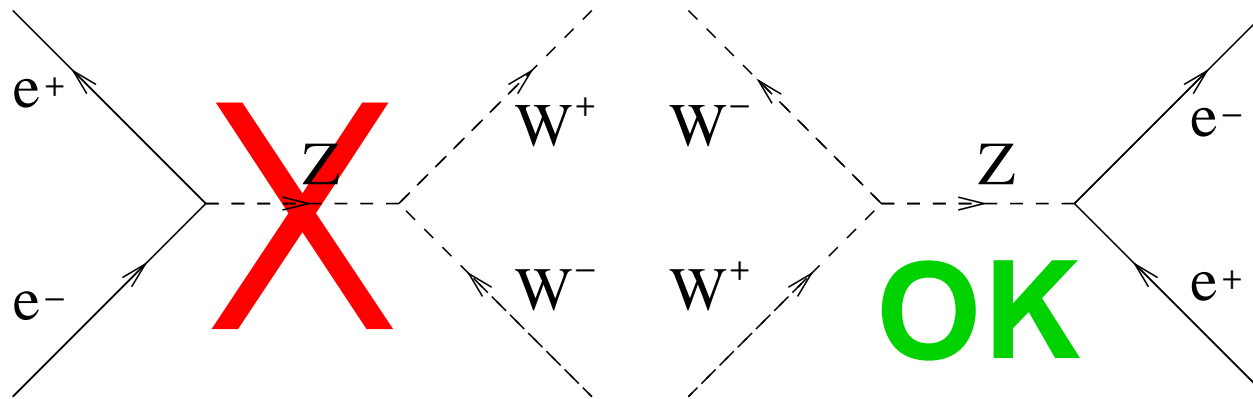
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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

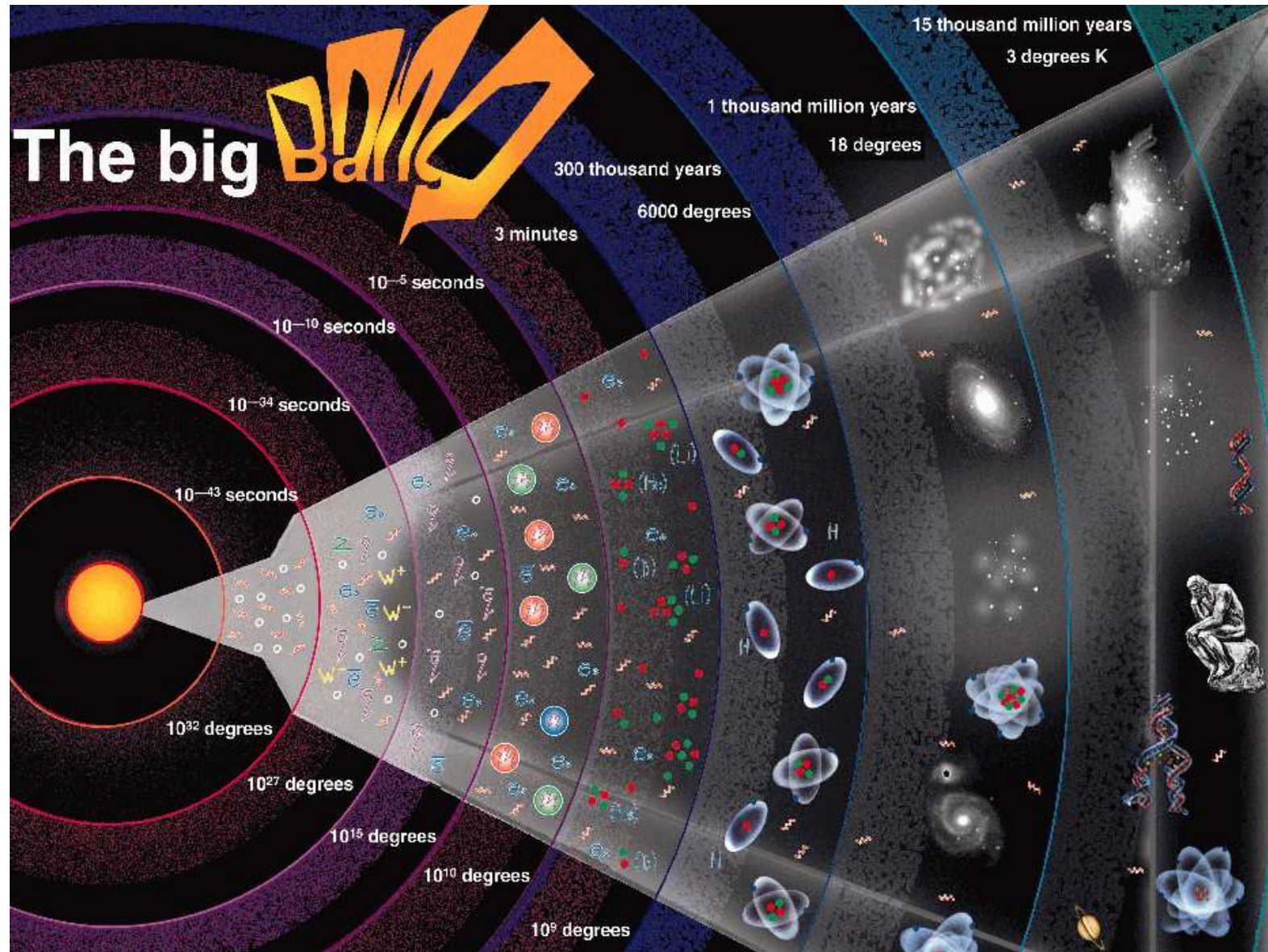
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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 ?

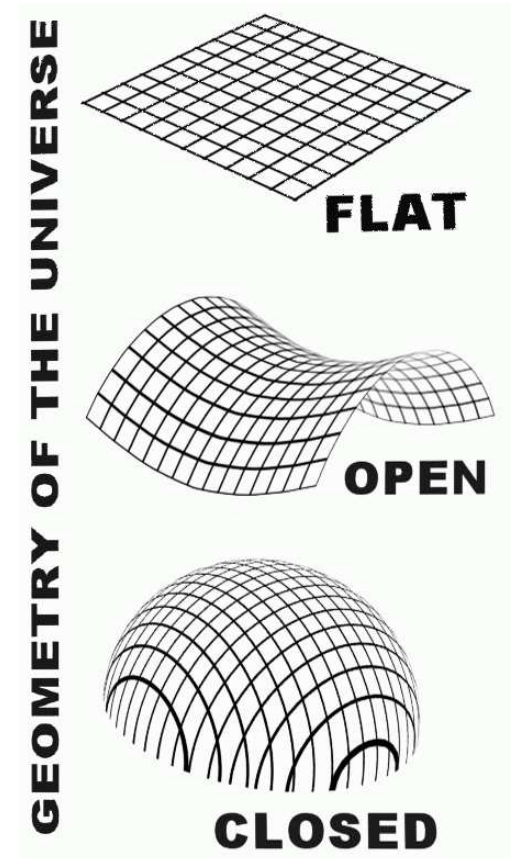
Z Ogólnej Teorii Względności wynika, że **przyszłość Wszechświata** zależy od **gęstości** materii  $\rho$ .

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

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

$\rho < \rho_c$       będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$       kiedyś zacznie się zapadać

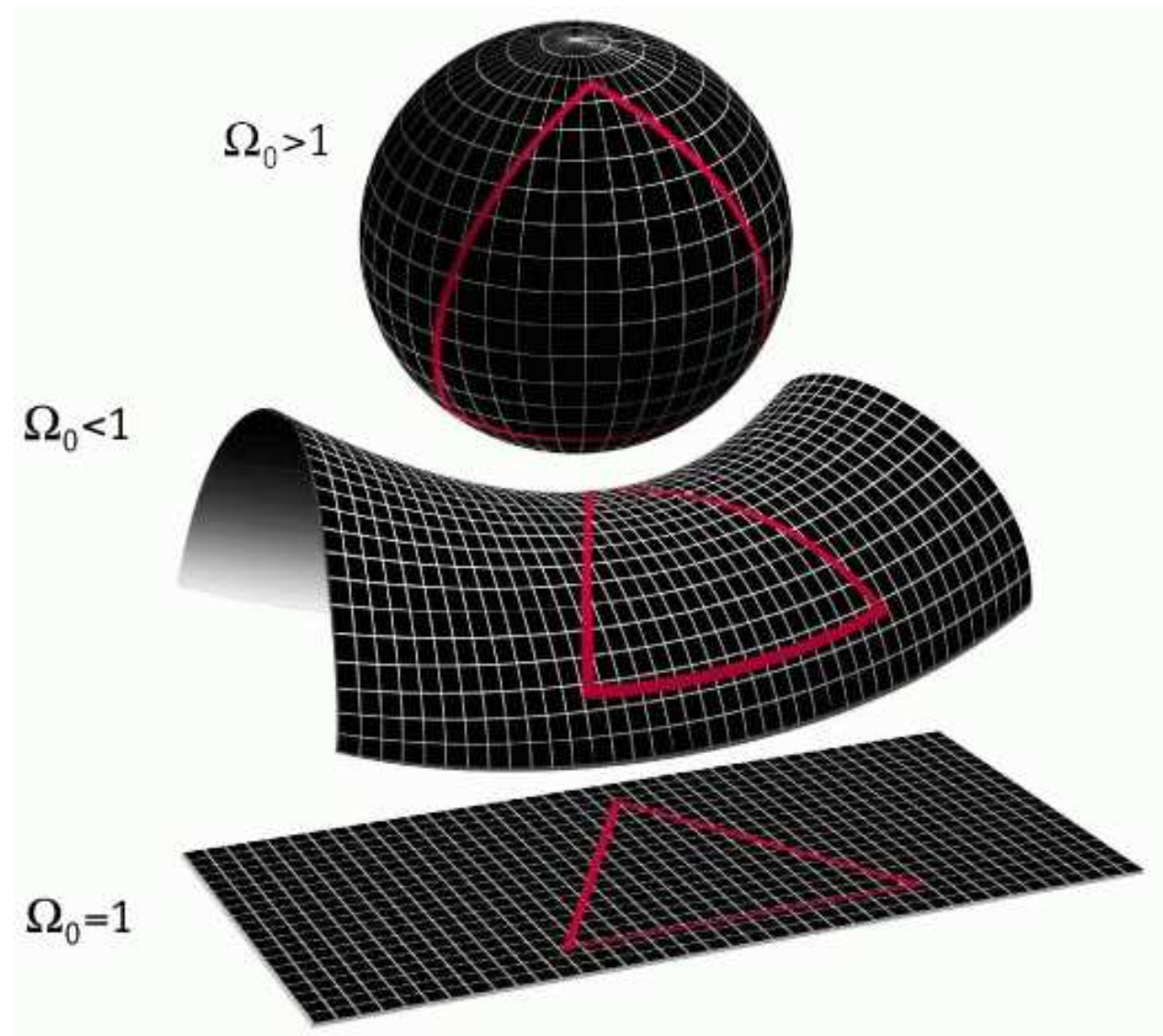


# Krzywizna przestrzeni

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”**

$$\Omega_b \sim 0.04$$

# 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 **gravitacyjnych**  
⇒ materia “**gravitacyjna**” (całkowita ?)

$$\Omega_m \sim 0.3$$

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



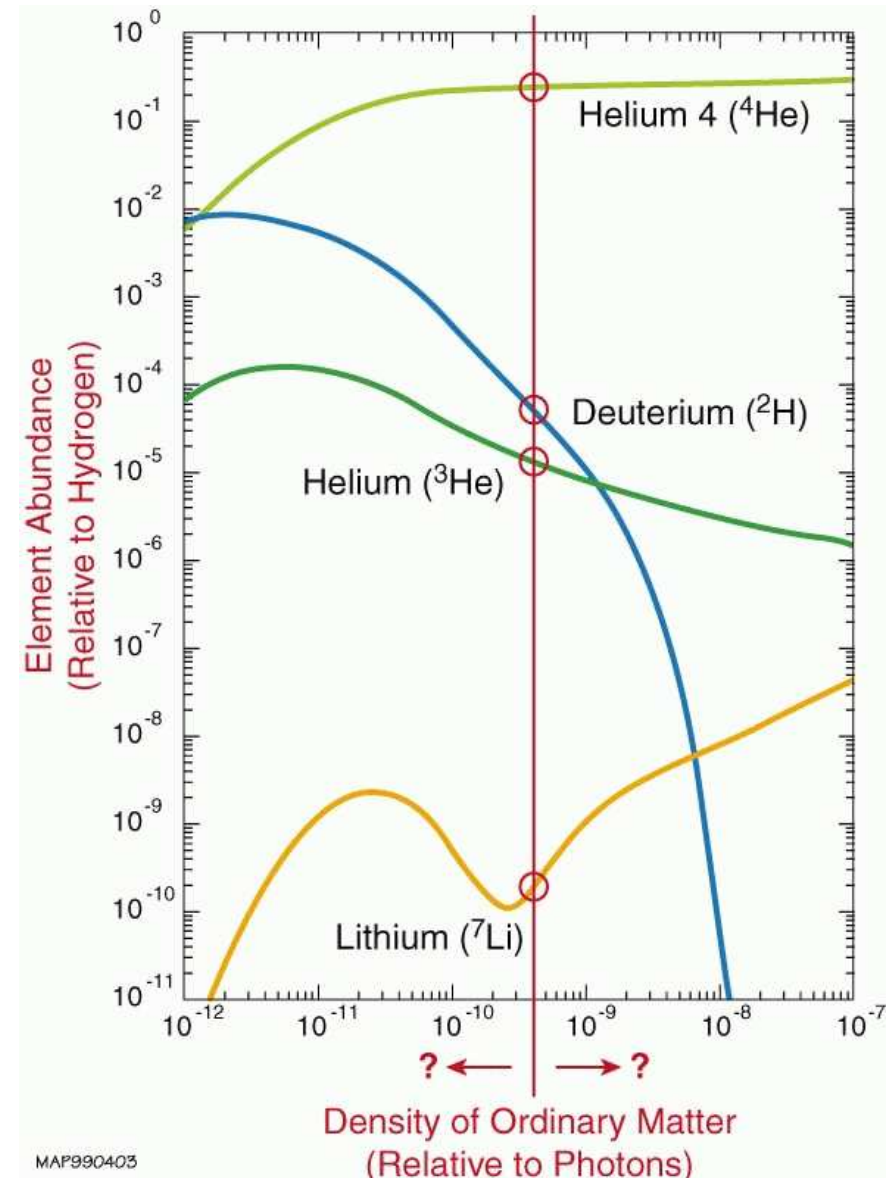
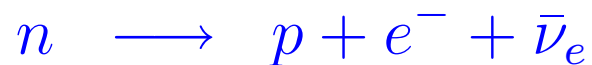
# Pierwotna nukleosynteza

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

Produkcja deuteru:

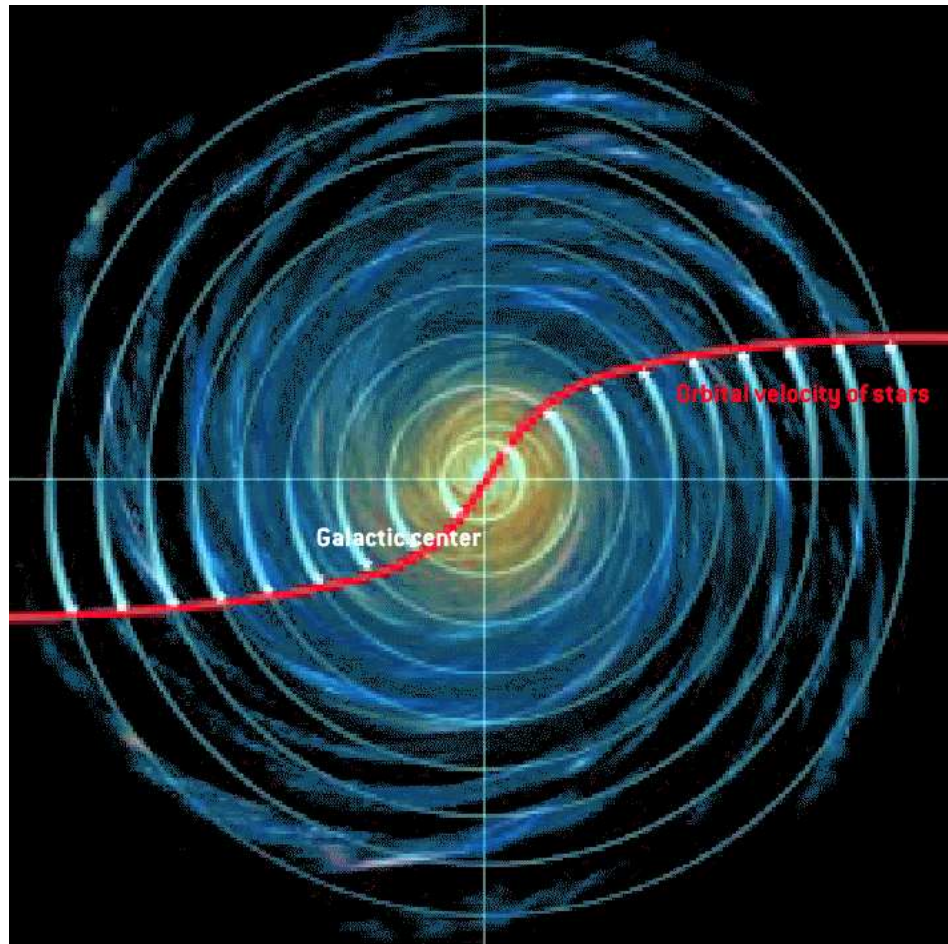


Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):

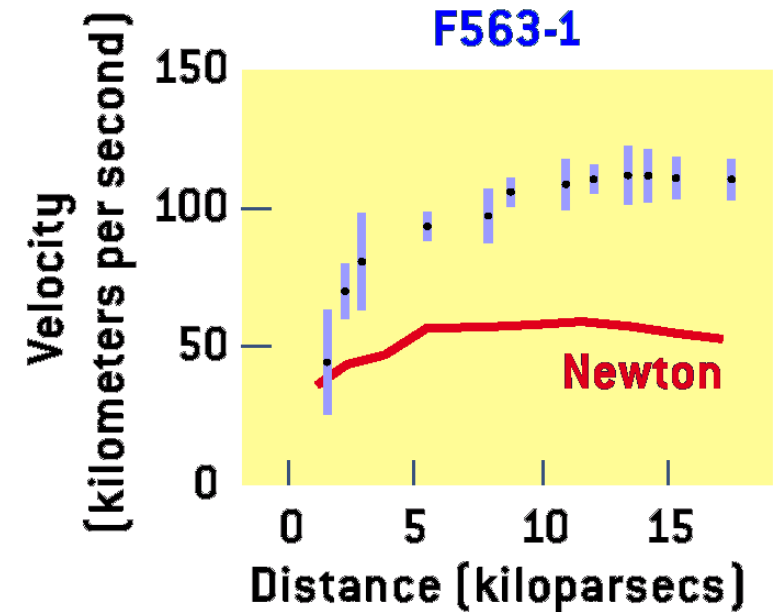




# Ciemna materia?



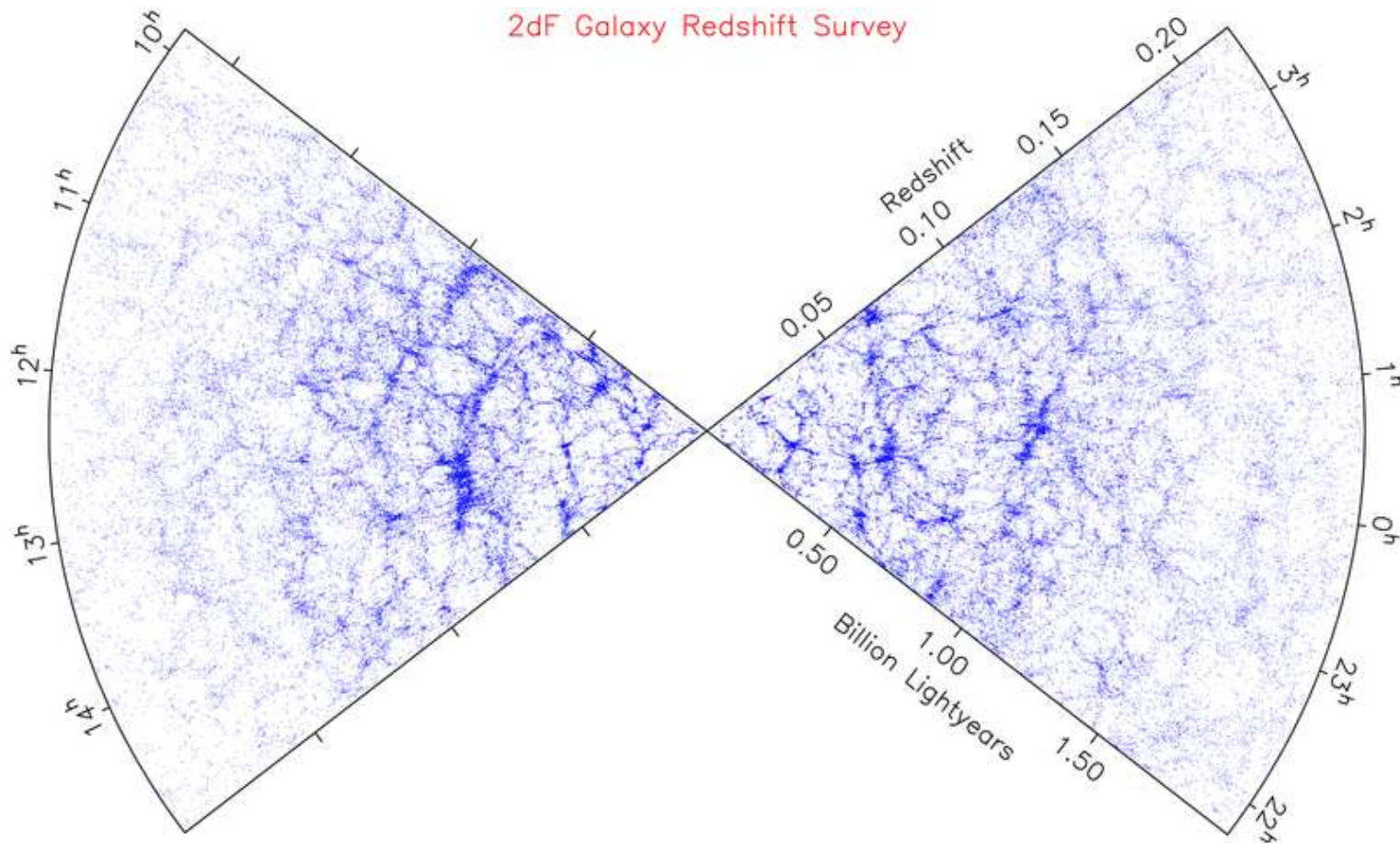
Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.



Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

# Ciemna materia?

Znana nam materia barionowa nie tłumaczy **tworzenia się struktur** we Wszechświecie i nie wystarcza też do opisu **oddziaływań grawitacyjnych** na skalach międzygalaktycznych.





# 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 mamy nadzieję odkryć w LHC.

