

# Ciemna strona wszechświata

*Letnia Szkoła Fizyki  
Wydział Fizyki U.W.*



prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

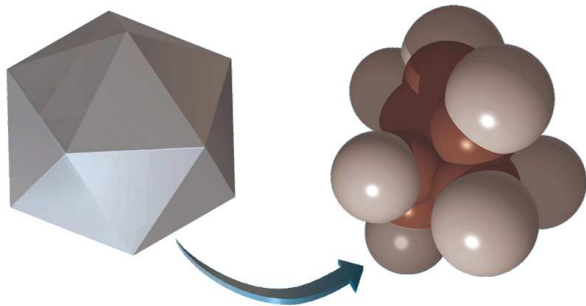
# Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie
- Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Efekt Dopplera i Prawo Hubblea
- Wielki Wybuch i Ewolucja Wszechświata
- Ile jest materii we Wszechświecie?
- Soczewkowanie grawitacyjne  
Jak możemy zobaczyć ciemną materię
- Mikrofalowe promieniowanie tła  
Zdjęcie narodzin Wszechświata
- Ciemna energia  
W jakim Wszechświecie żyjemy?
- Perspektywy

# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

Cząsteczka

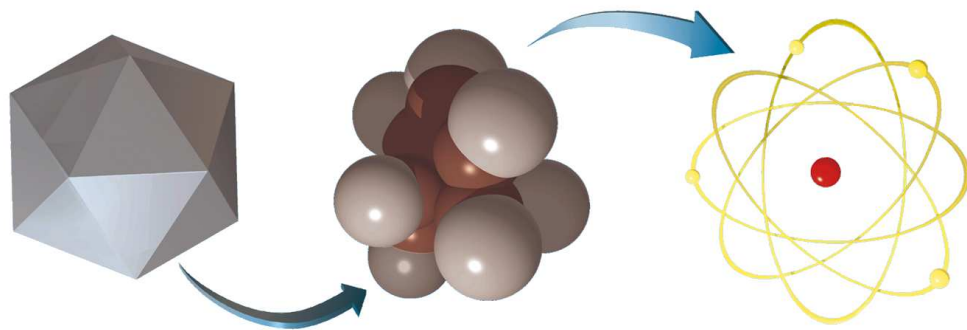


$10^{-9}$  m

# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

Atom



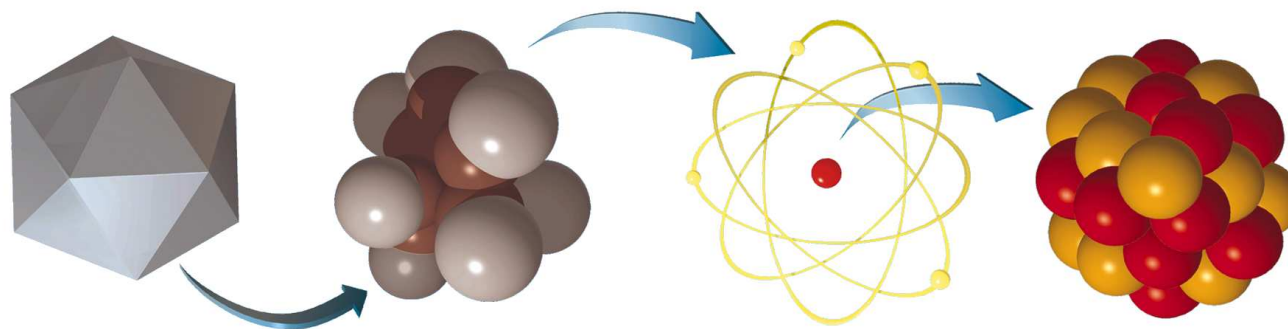
$10^{-10}$  m



# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

Jądro atomowe



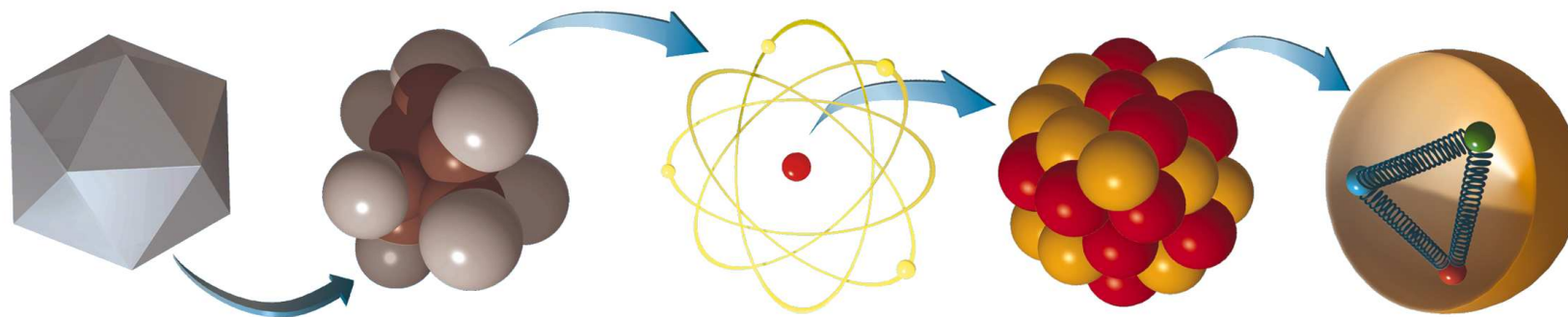
$10^{-14}$  m



# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

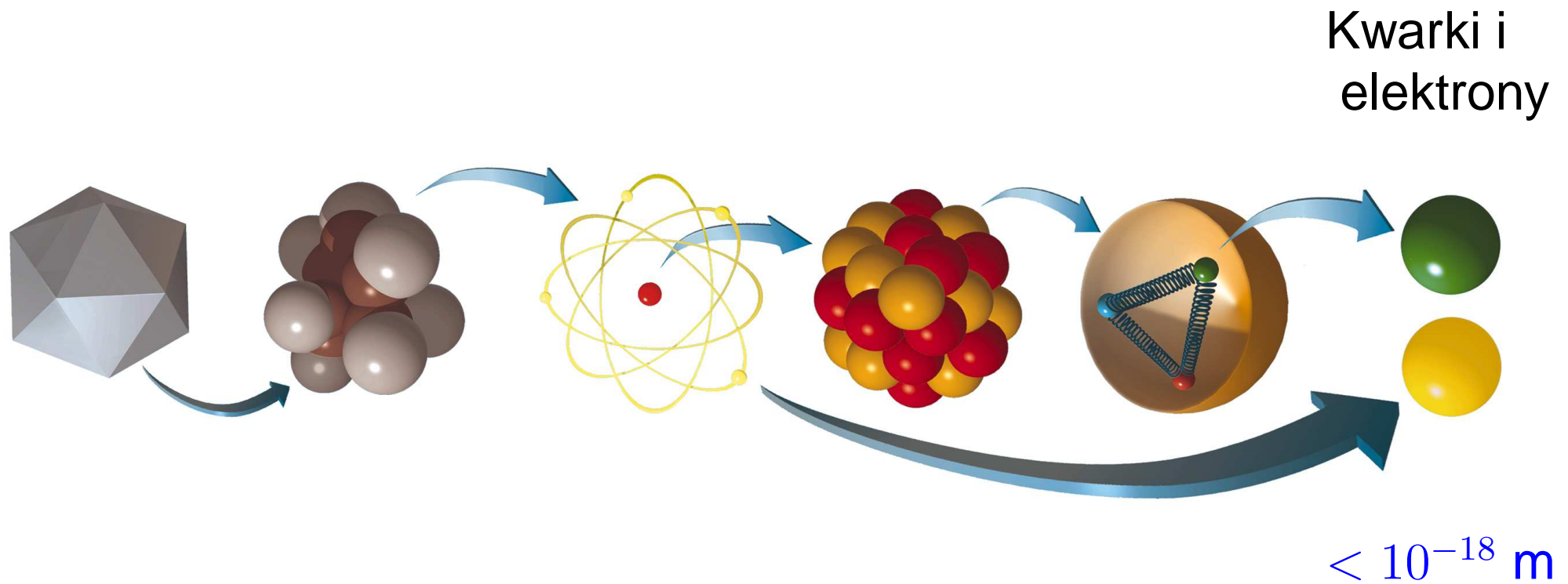
Nukleony



$10^{-15}$  m

# Wprowadzenie

## *Budowa materii*



# Model Standardowy

## Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegiełki” (elektron oraz kwarki  $u$  i  $d$ ) + *neutrino*

Fizyka cząstek  $\Rightarrow$  12 fundamentalnych “cegiełek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	$e$ <i>elektron</i>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <i>neutrino taonowe</i>	$b$ <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	$t$ <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

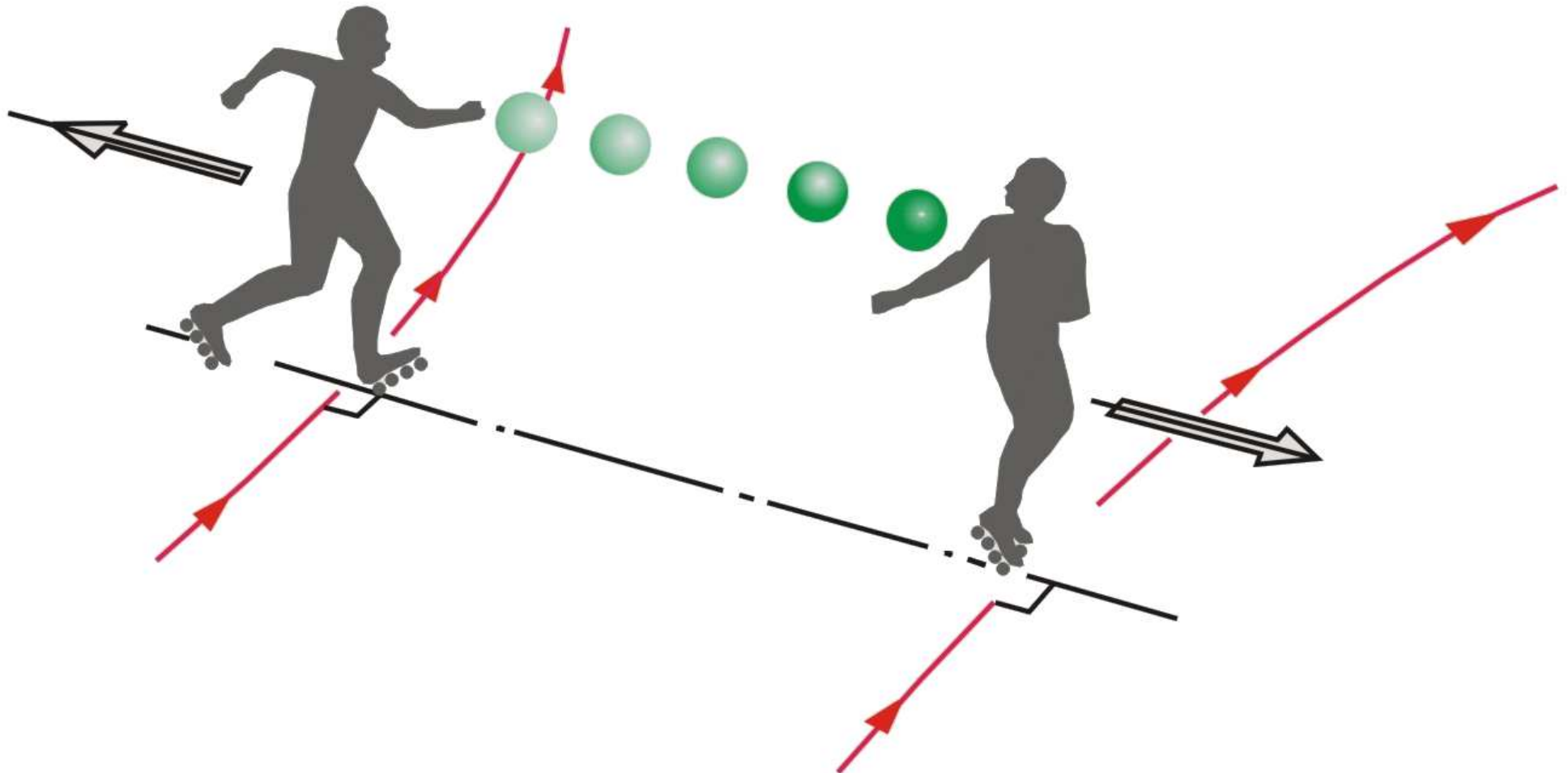




# Model Standardowy

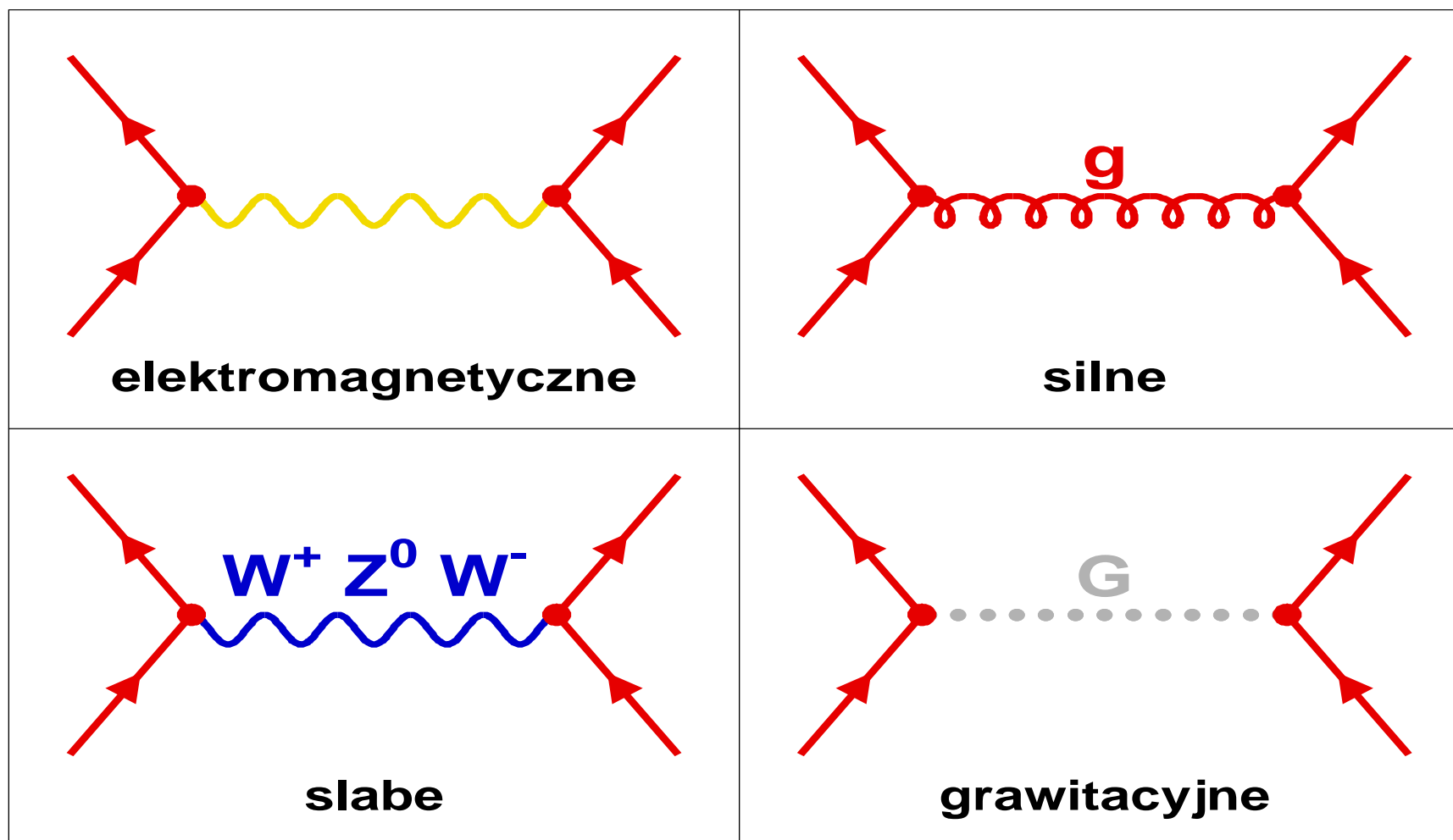
## *Oddziaływania*

Opisujemy je jako wymianę cząstek - “nośników”



# Model Standardowy

Wyróżniamy **cztery** podstawowe oddziaływania  
przenoszone przez odpowiednie nośniki



# Model Standardowy

## **Oddziaływania**

Nośnik oddziaływania przenosi **energię** i/lub **pęd** między cząstkami będącymi źródłami tego oddziaływania

<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>		<i>masa</i>
grawitacyjne	masa	graviton	G	0
elektromag.	ładunek	foton	$\gamma$	0
silne	“kolor”	gluony	$g$	0
słabe	“ładunek słaby”	“bozony	$W^\pm$	80 GeV
		pośredniczące”	$Z^0$	91 GeV

1 GeV = 1 000 000 000 eV  $\approx$  masa protonu

Nośniki oddziaływań uważamy za **punktowe** i **niepodzielne**, tak jak kwarki i leptyony...

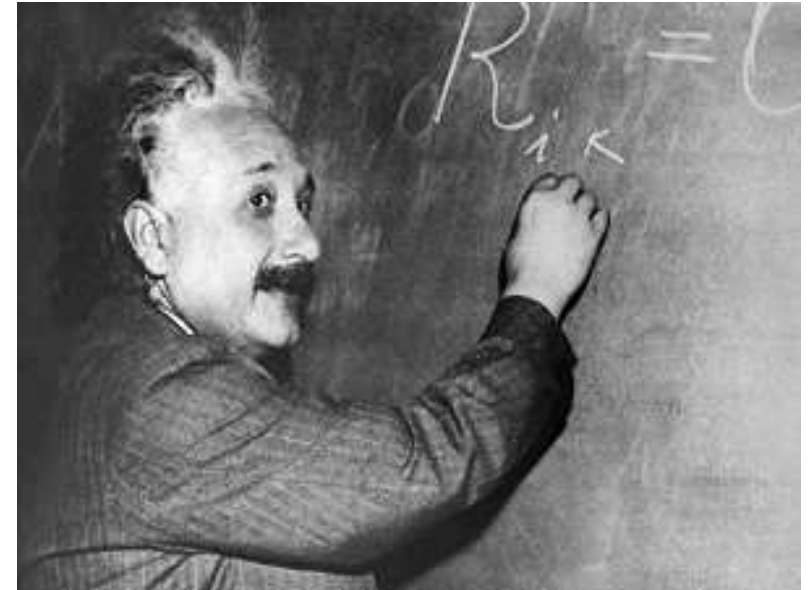


# Grawitacja

## *Ogólna Teoria Względności*

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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

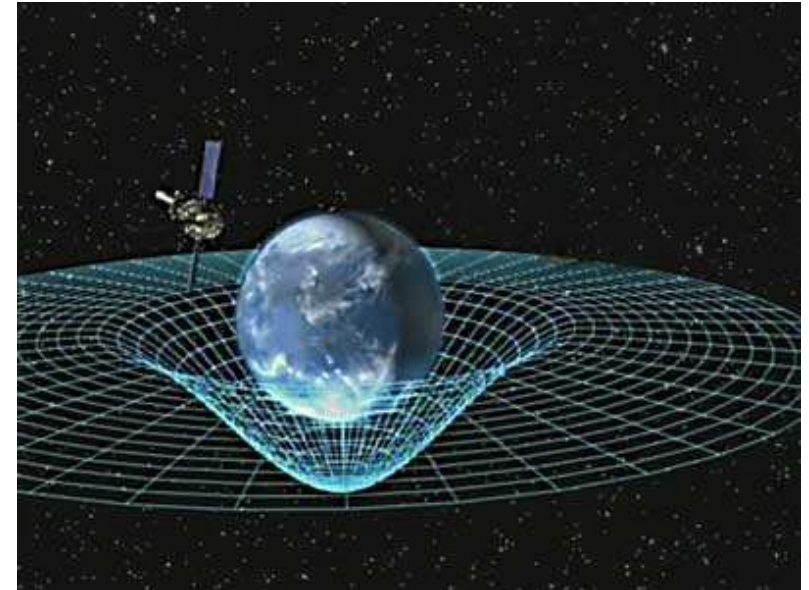


# Grawitacja

## *Ogólna Teoria Względności*

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



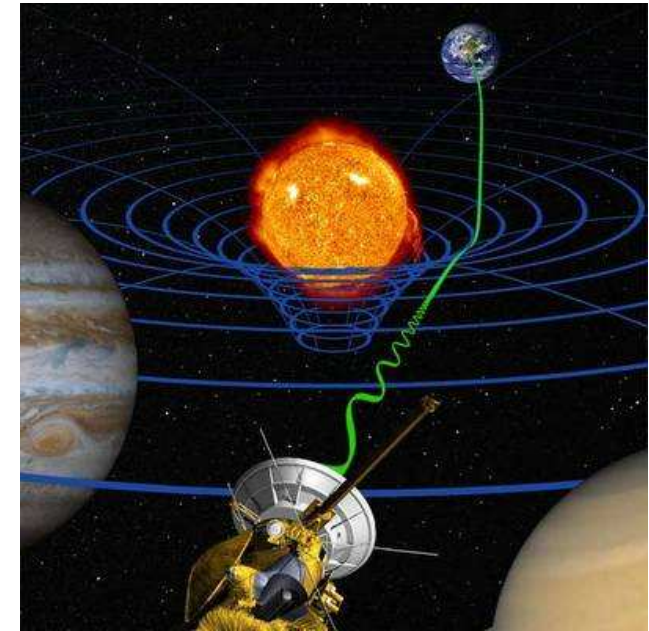
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.  
Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii.

# Grawitacja

## *Ogólna Teoria Względności*

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



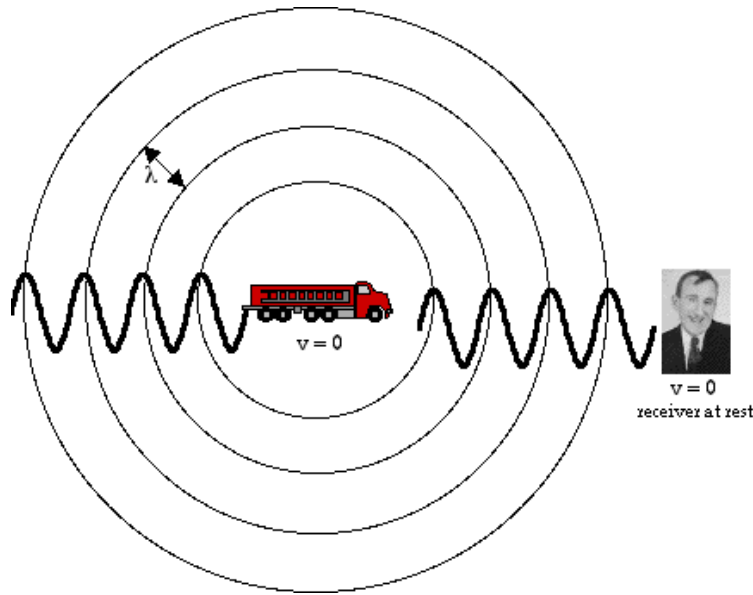
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.

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



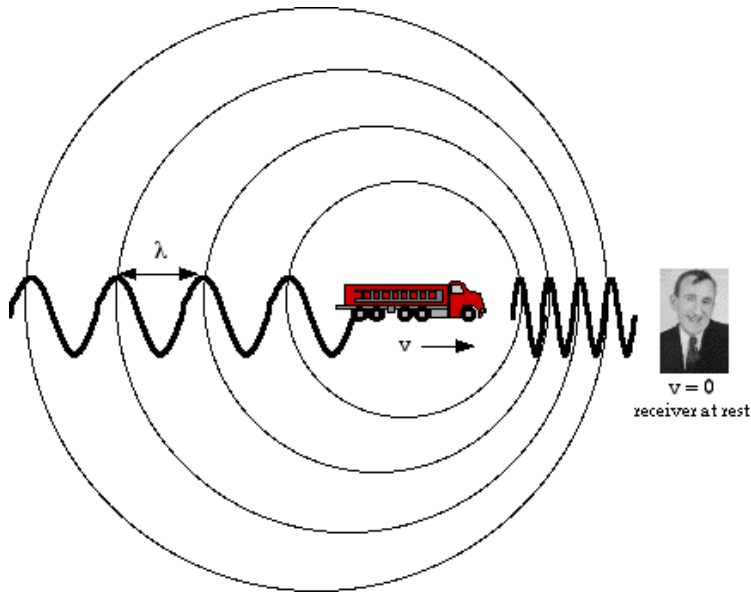
W przypadku fal dźwiękowych znamy z codziennego doświadczenia...

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**.

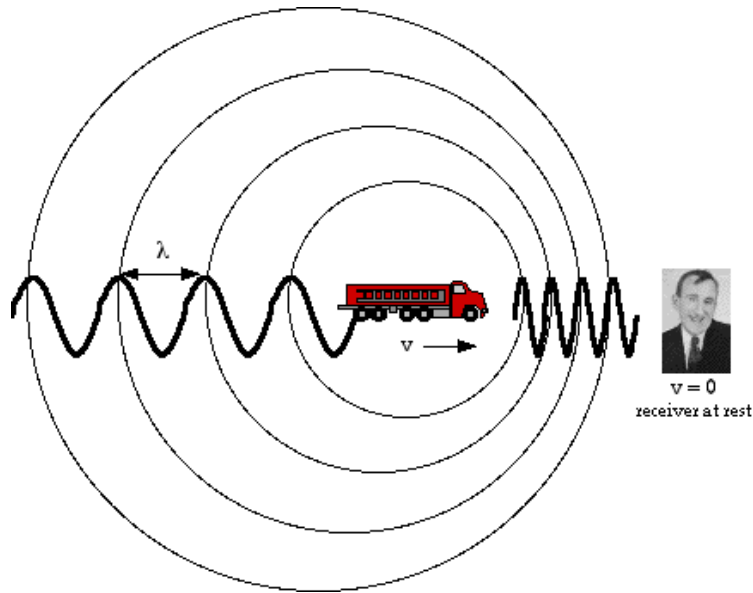


Jeśli **źródło** dźwięku **porusza się** względem **obserwatora**, obserwator słyszy dźwięk o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

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



# 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 światła porusza się** względem **obserwatora**, obserwator widzi **światło** o wyższej lub niższej częstotliwości (**zależnie od kierunku ruchu**)

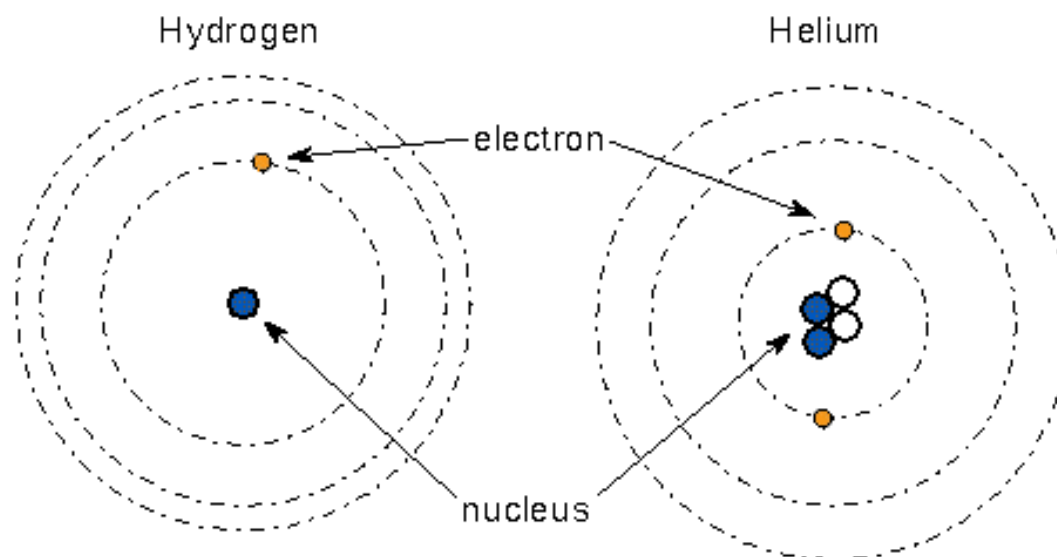
$$f_{obs} = f \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$



# Linie widmowe

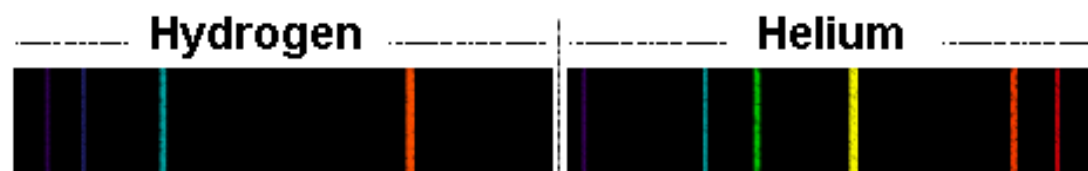
## *Linie emisyjne*

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.



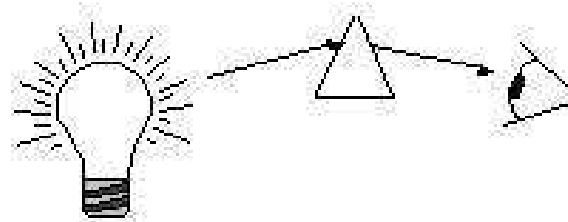
# Linie widmowe

## **Linie emisyjne**

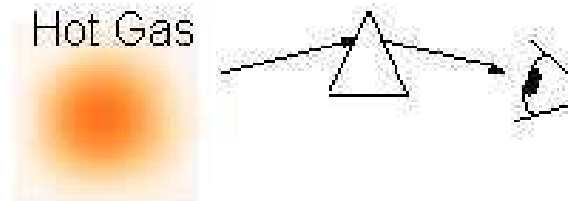
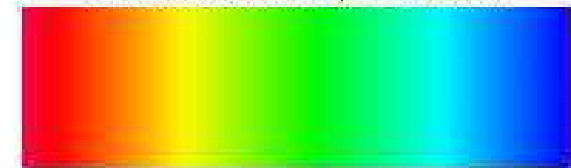
Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

## **Linie absorpcyjne**

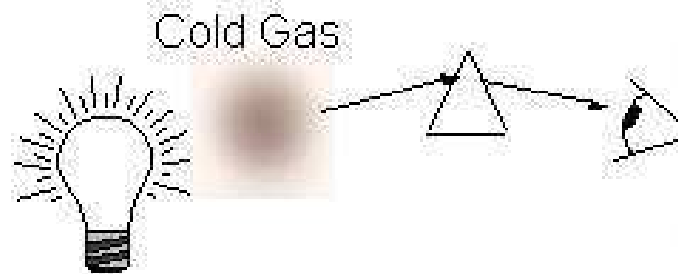
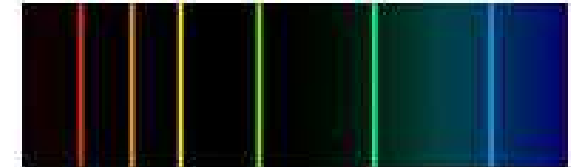
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



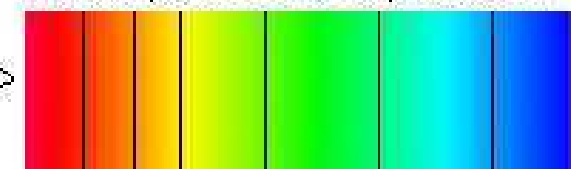
Continuum Spectrum



Emission Line Spectrum



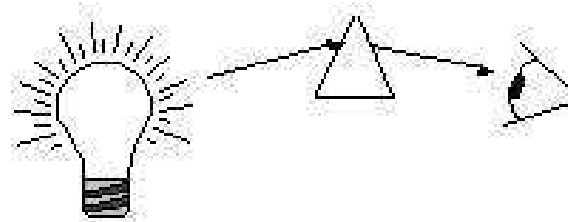
Absorption Line Spectrum



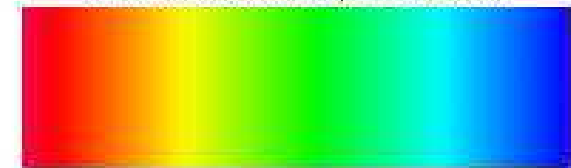
# Linie widmowe

## **Linie emisyjne**

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

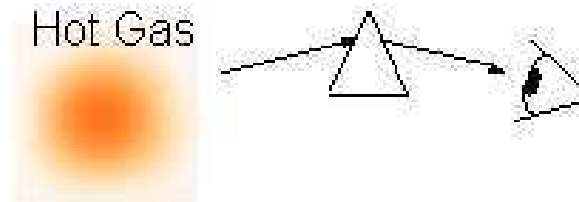


Continuum Spectrum

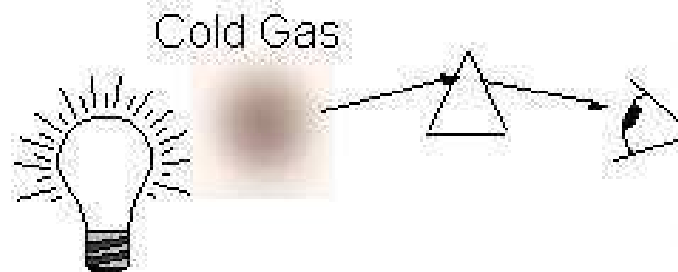
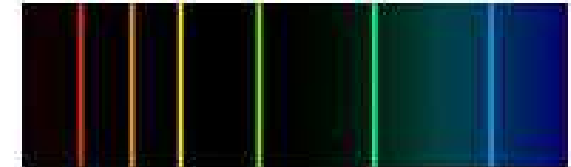


## **Linie absorpcyjne**

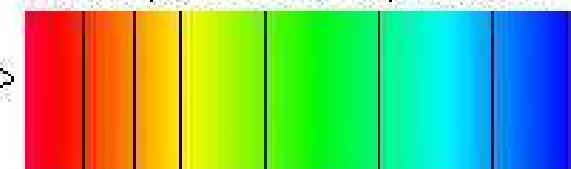
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



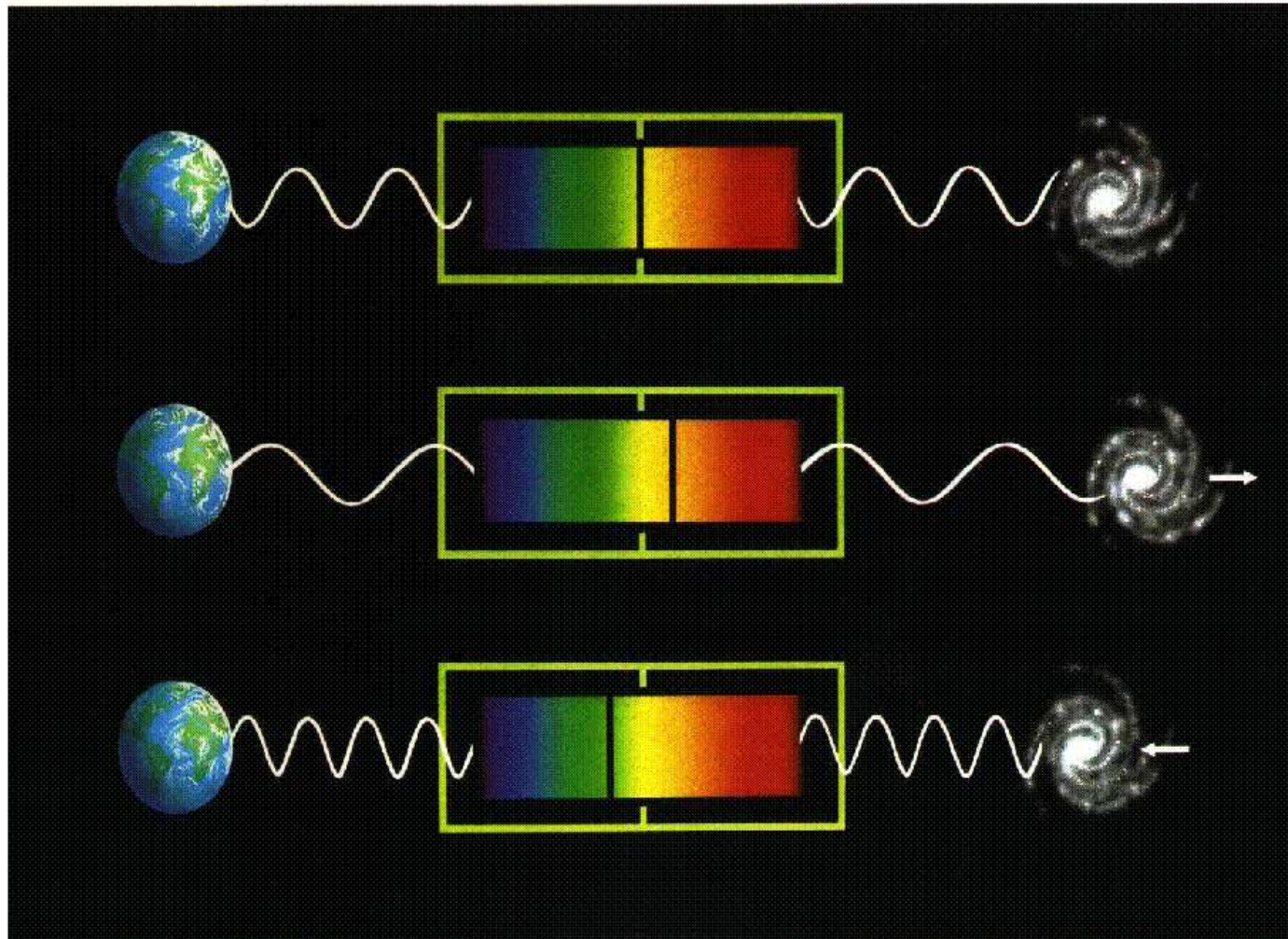
Absorption Line Spectrum



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

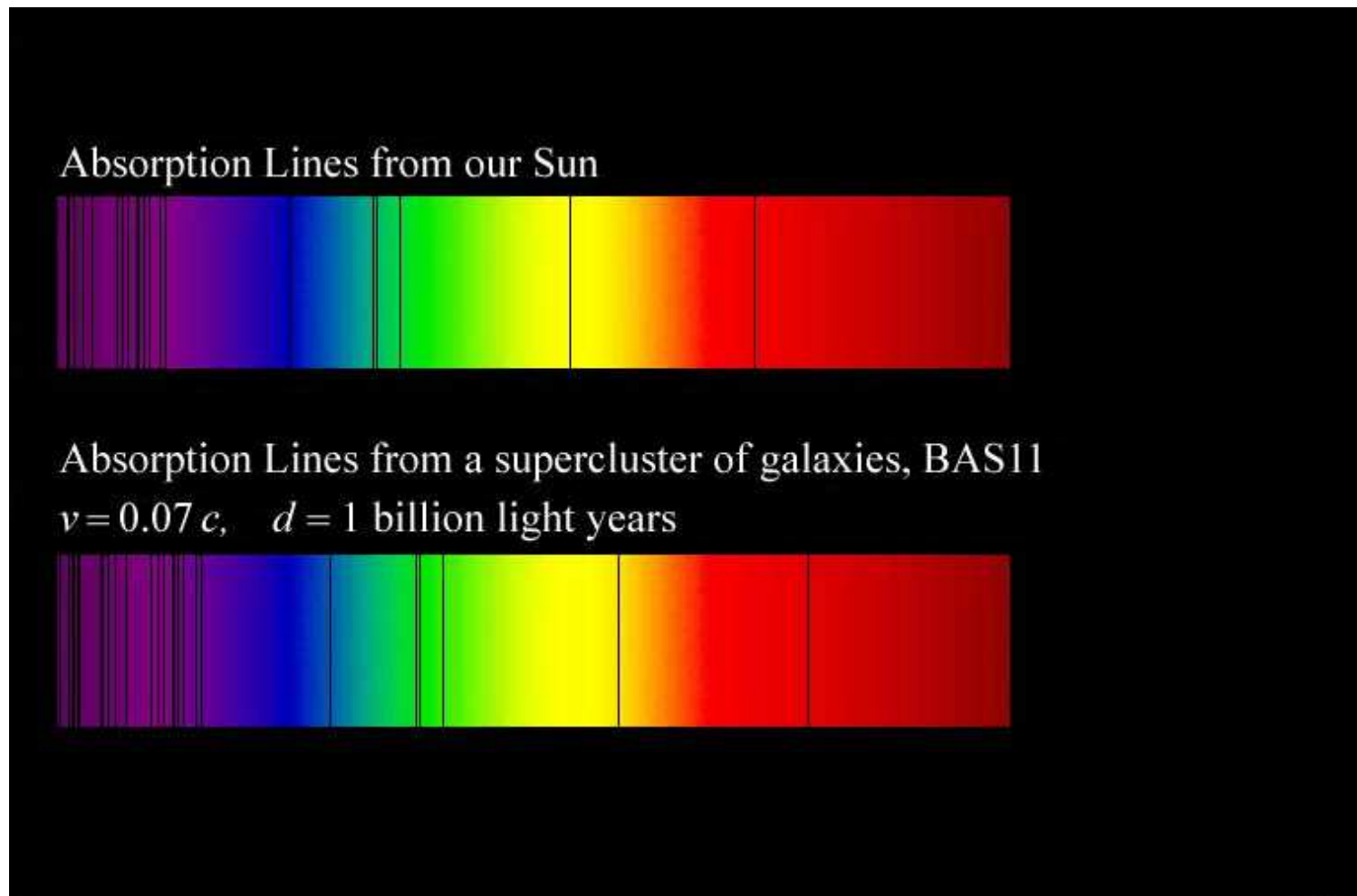
# Efekt Dopplera dla światła

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**

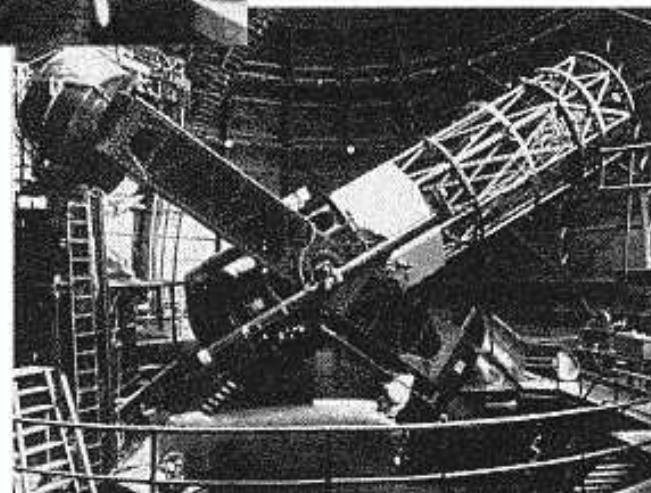
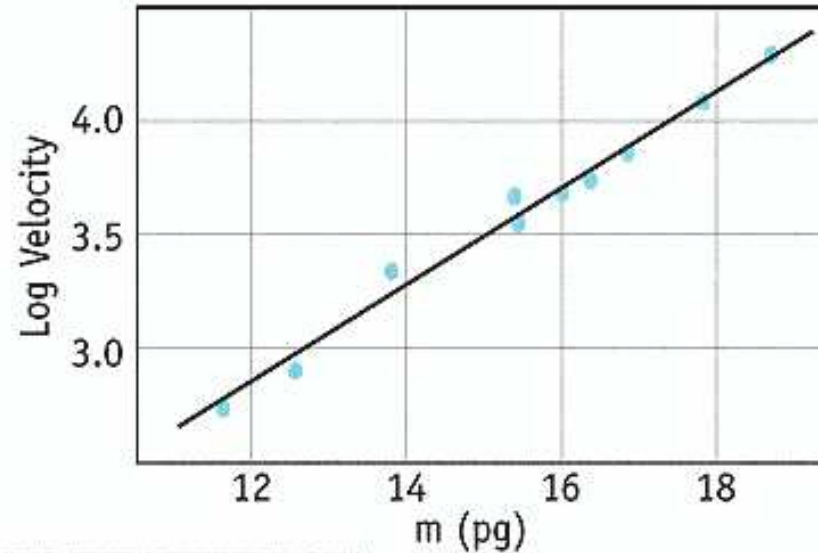


# Prawo Hubble (1929)

## DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

# Prawo Hubble'a (1929)

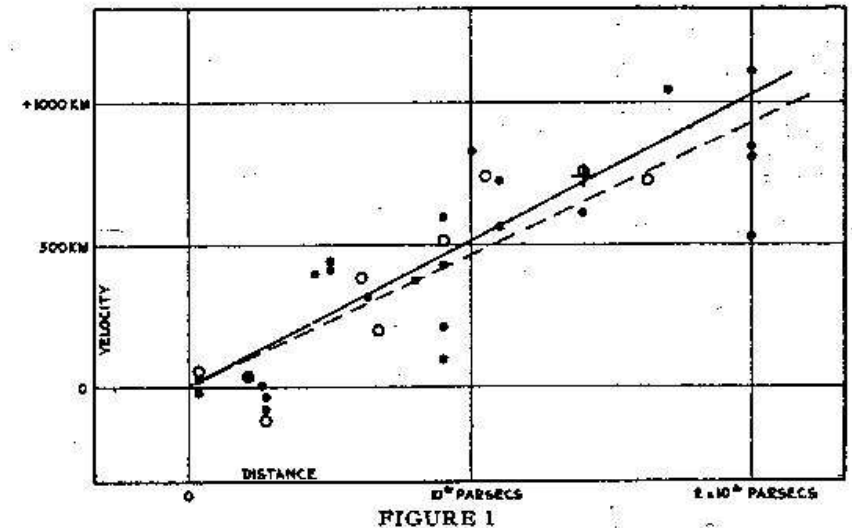
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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:

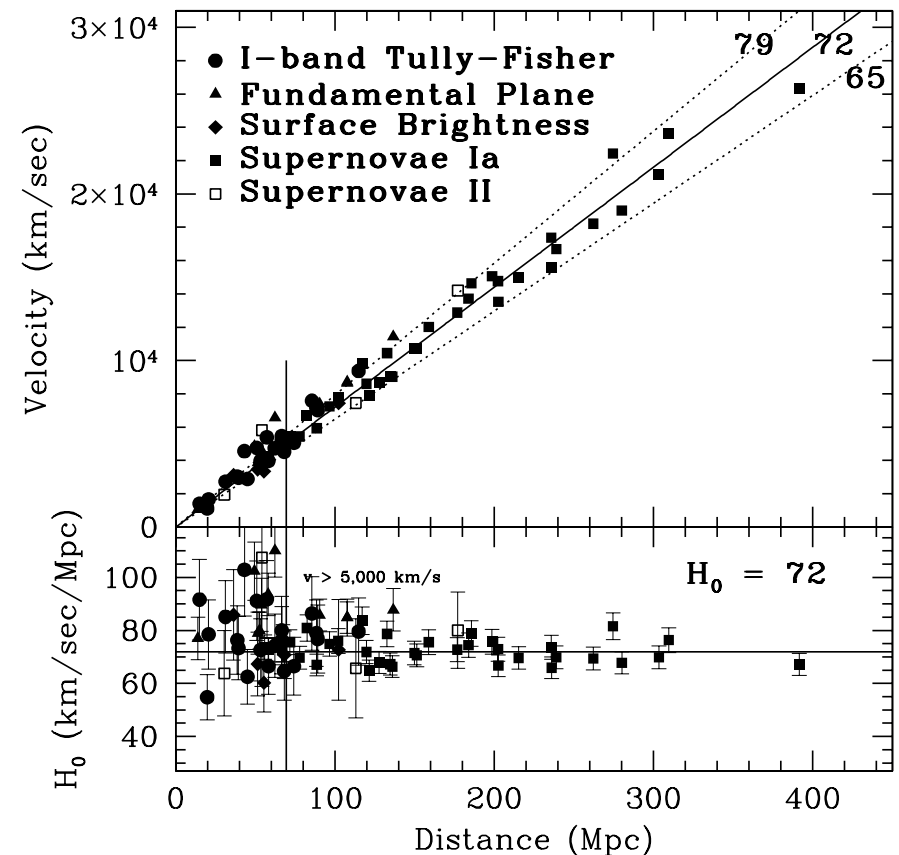
$$v = H \cdot r$$

$r$  - 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".

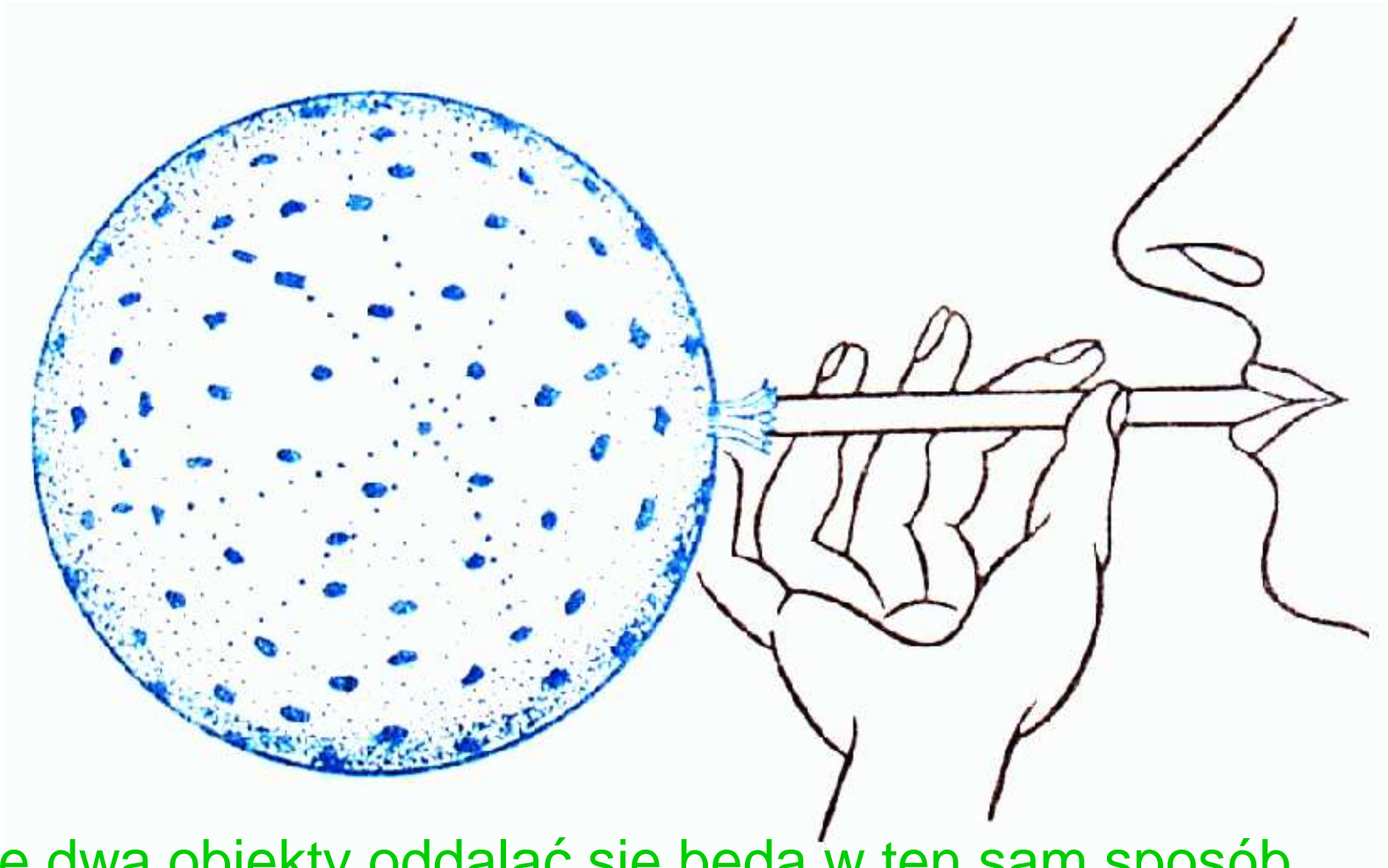
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

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



# Prawo 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 - **materia spoczywa**.

Z równań Einsteina wynika, że nasz Wszechświat rozpoczął swoją ewolucję od **pojedynczego punktu**, osobliwości, o nieskończonej gęstości energii...

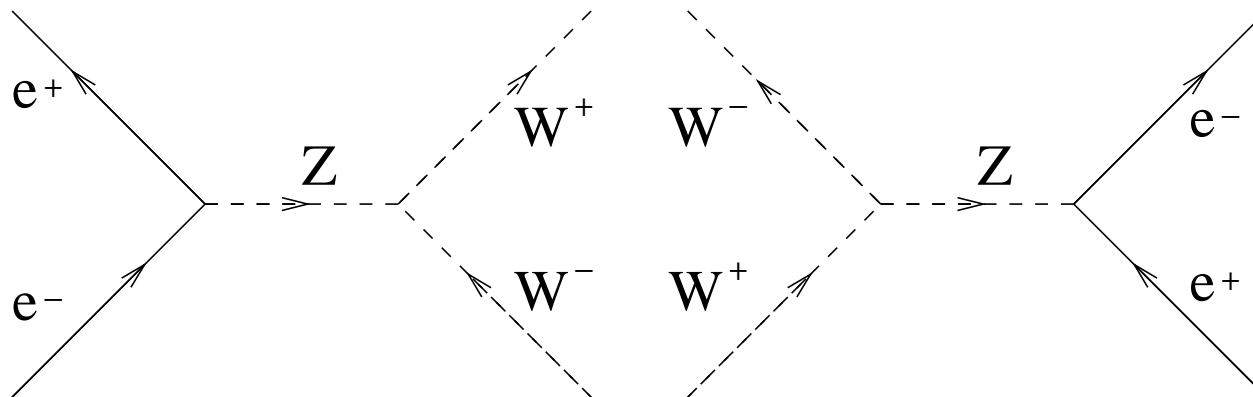
# Ewolucja Wszechświata

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

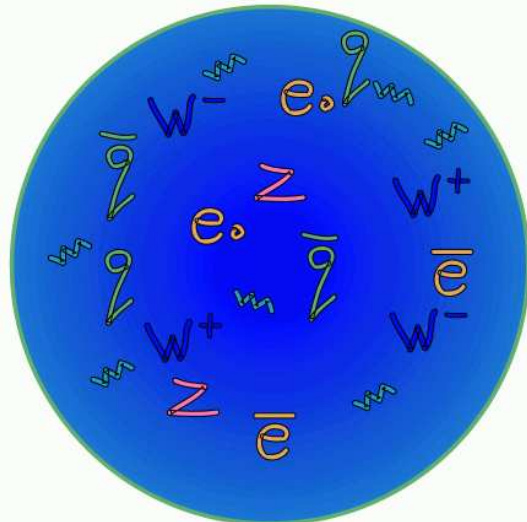
$10^{-34}$  **sekundy**

Materia znajduje się w stanie **Plazmy Kwarkowo-Gluonowej** (QGP). Oddziaływania silne oddzielają się od elektroslabych.

$10^{-10}$  **sekundy**

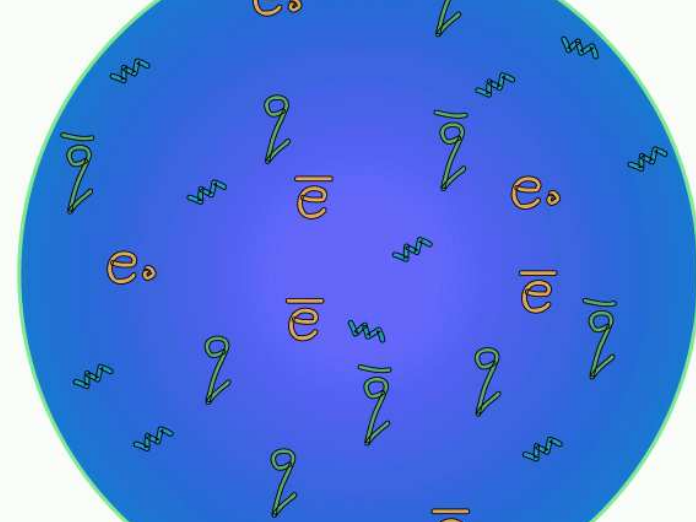
Oddzielenie oddziaływań elektromagnetycznych i słabych. **Zanikają swobodne bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$**  (do tej pory w równowadze z fotonami).

$10^{-34}$  seconds



$10^{27}$  degrees

$10^{-10}$  seconds



$10^{15}$  degrees

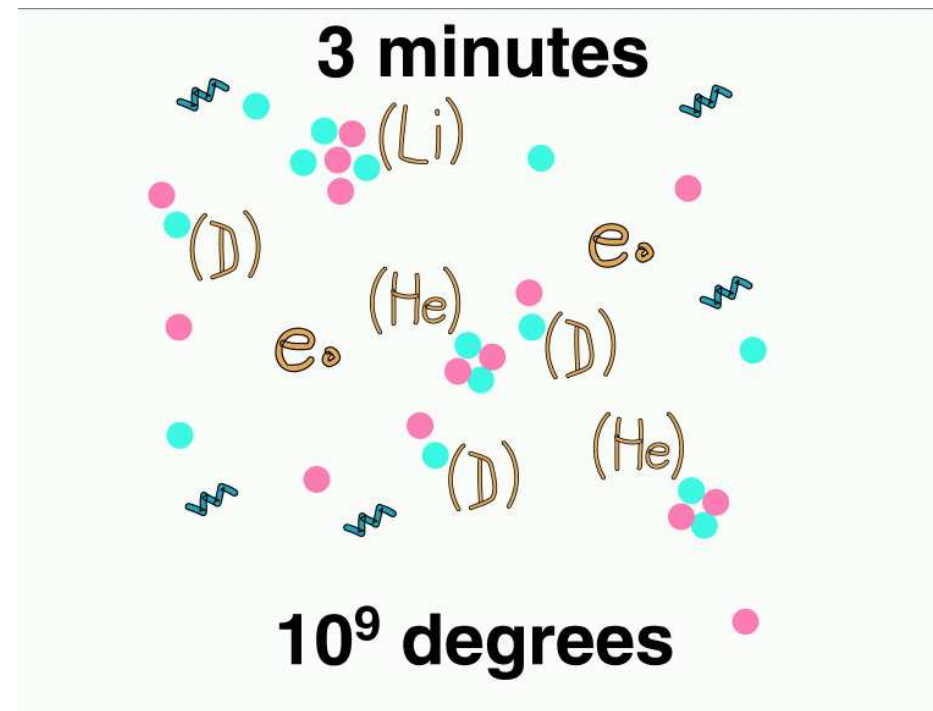
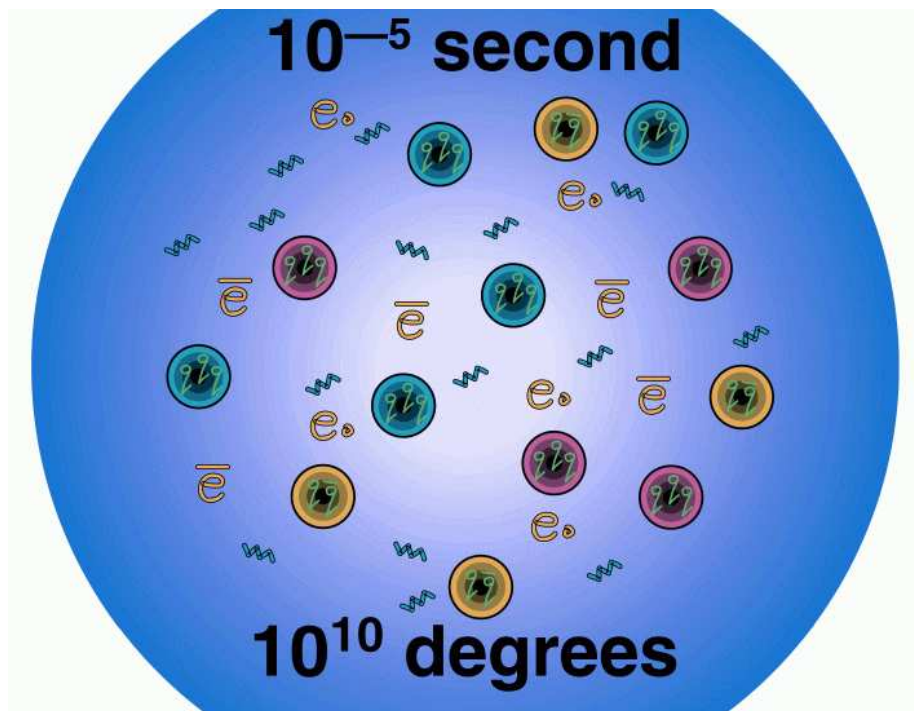
# Ewolucja Wszechświata

## $10^{-5}$ sekundy

Kwarki formują neutrony i protony. Antymateria zaczyna zanikać bo promieniowanie jest już zbyt słabe aby ją wciąż wytwarzać.

## 3 minuty

Protony i neutrony tworzą jądra lekkich pierwiastków. Wraz z zanikiem reakcji termojądrowych ustala się zawartości różnych izotopów we Wszechświecie.



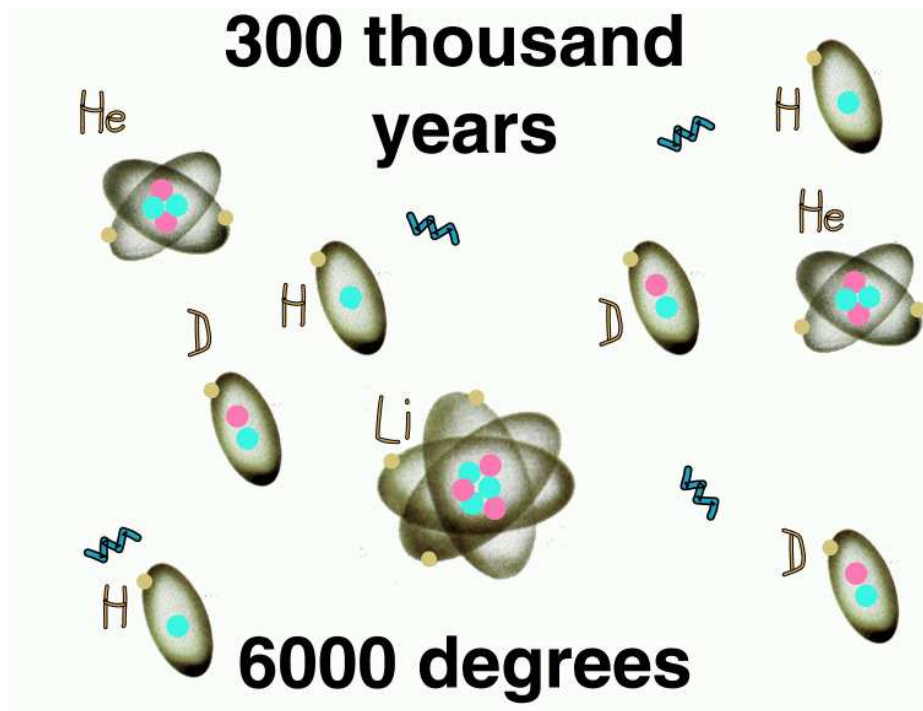
# Ewolucja Wszechświata

**300 000 lat**

Elektrony wychwytywane przez jądra tworzą atomy. Wszechświat staje się **przeźroczysty dla fotonów**.

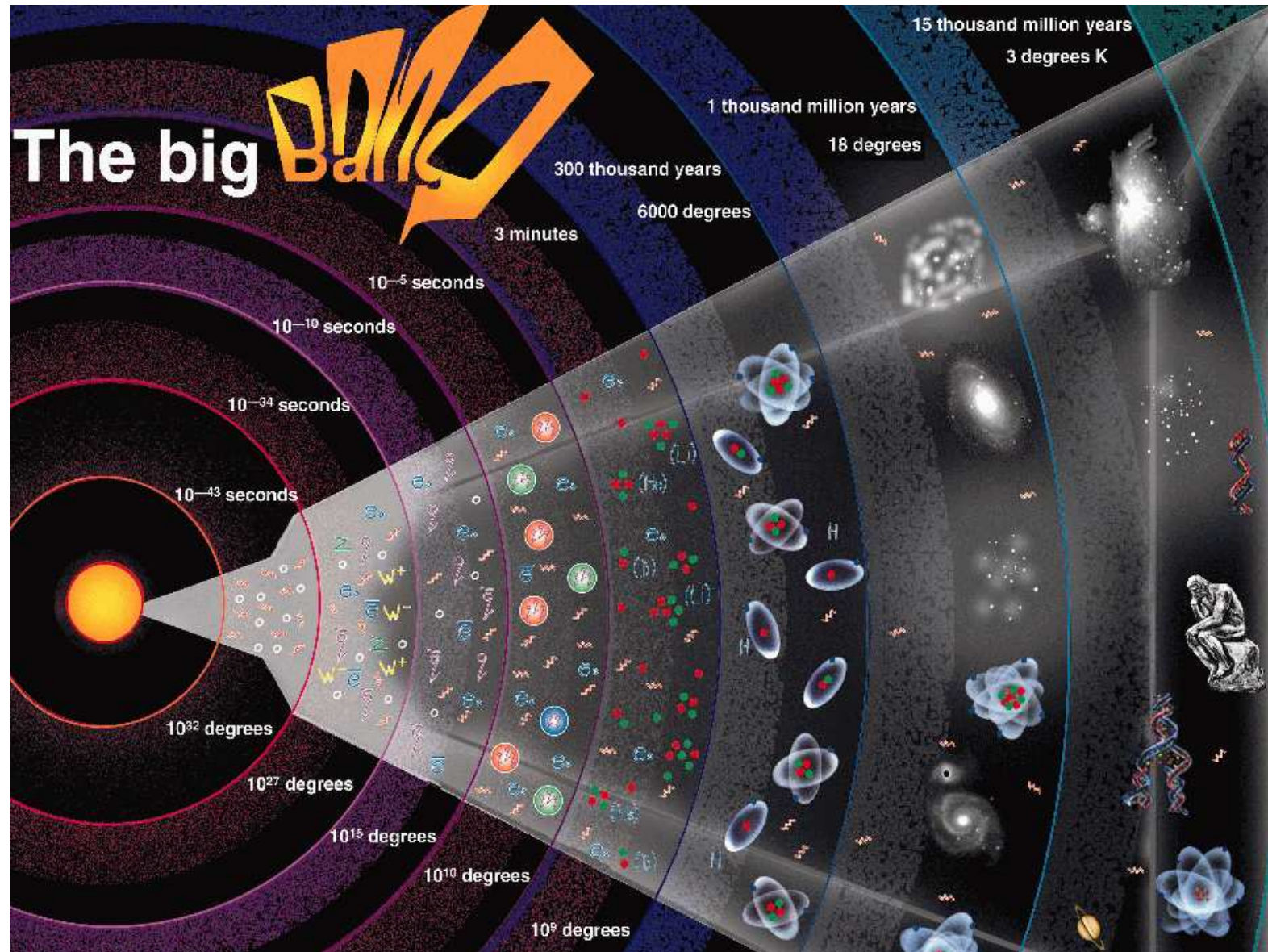
**1 000 000 000 lat**

Formacja galaktyk, synteza ciężkich pierwiastków w gwiazdach.



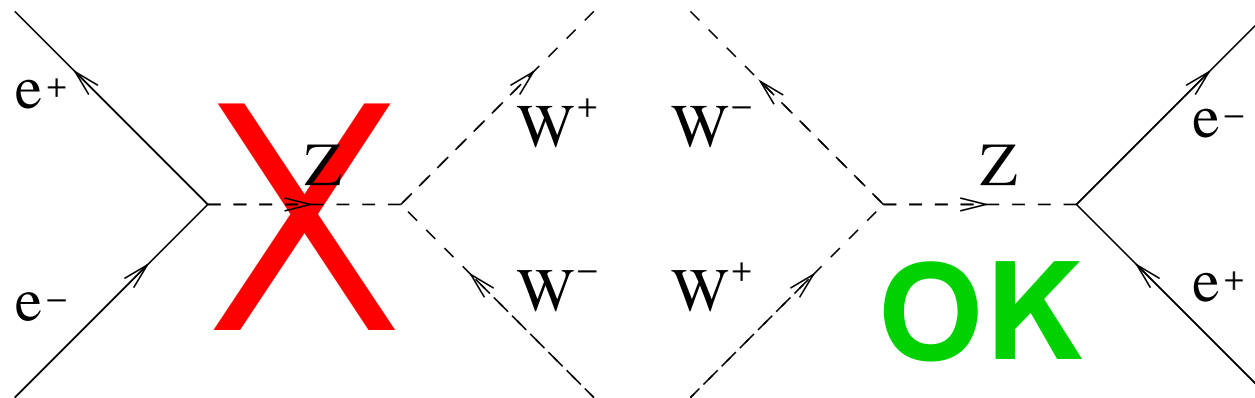


# Ewolucja Wszechświata



# Ewolucja Wszechświata

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.  
**Cząstki zbyt masywne** przestają być produkowane

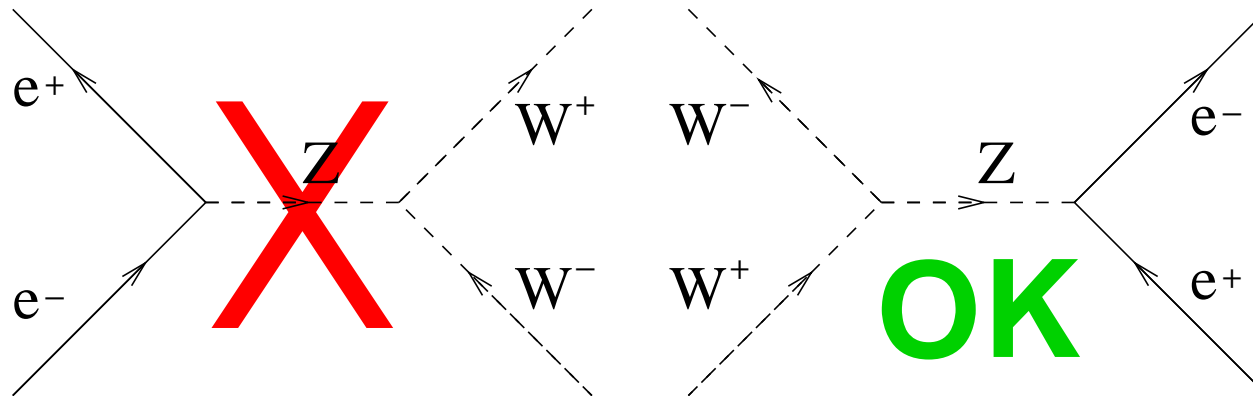


Jeśli są **nietrwałe**, **anihilują** lub tworzą stany związane to stopniowo **zanikają**...

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

# Ewolucja Wszechświata

W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek.  
**Cząstki zbyt masywne** przestają być produkowane

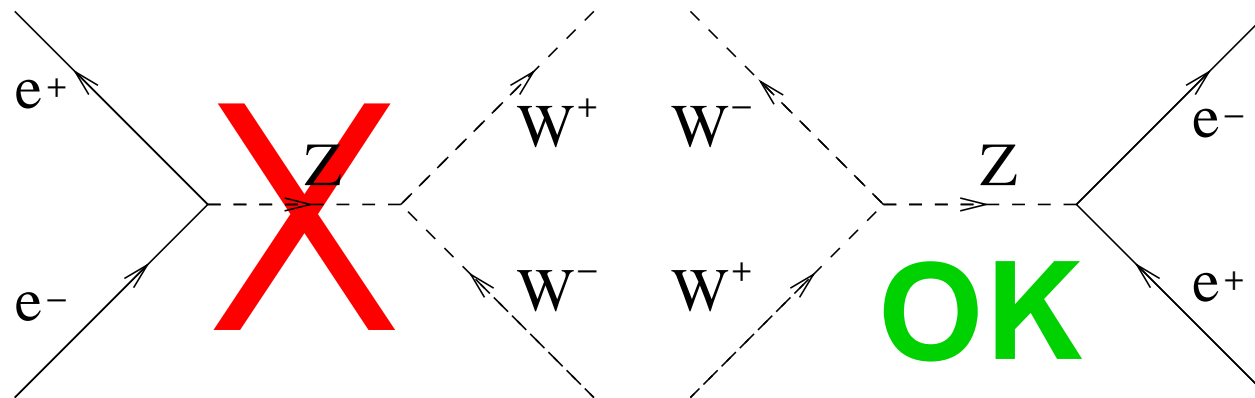


Jeśli są **nietrwałe**, **anihilują** lub tworzą stany związane to stopniowo **zanikają**...

- 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.  
**Cząstki zbyt masywne** przestają być produkowane

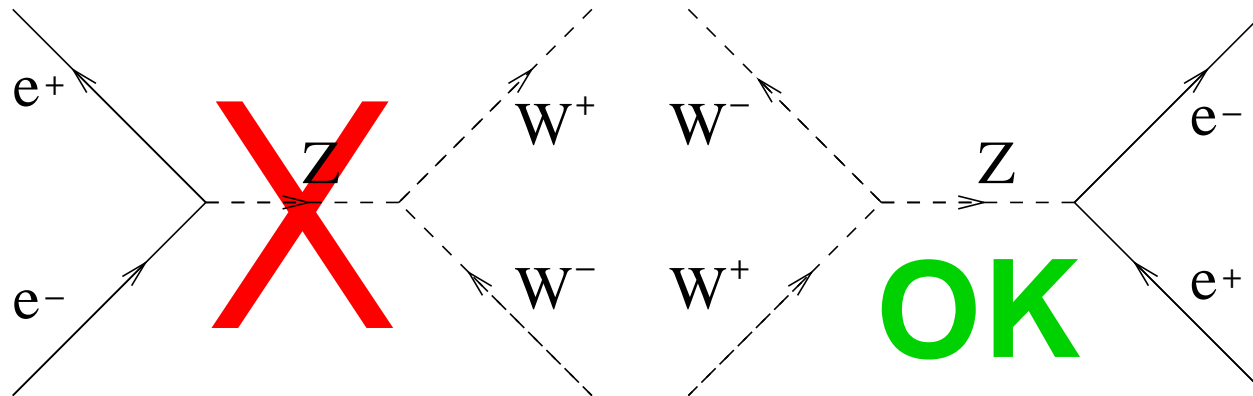


Jeśli są **nietrwałe**, **anihilują** lub tworzą stany związane to stopniowo **zanikają**...

- 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.  
**Cząstki zbyt masywne** przestają być produkowane

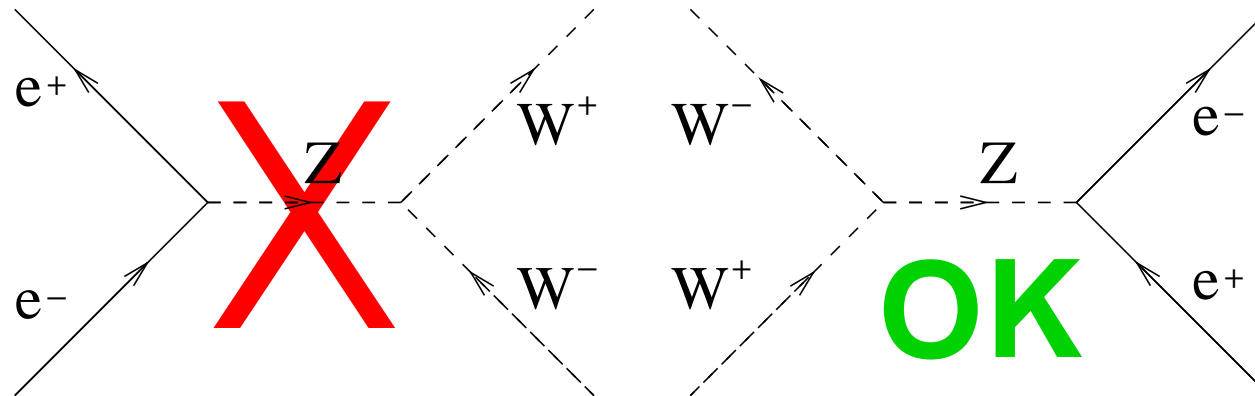


Jeśli są **nietrwałe**, **anihilują** lub tworzą stany związane to stopniowo **zanikają**...

- 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.  
**Cząstki zbyt masywne** przestają być produkowane



Jeśli są **nietrwałe**, **anihilują** lub tworzą stany związane to stopniowo **zanikają**...

- 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)

Masywne, **trwałe** i **słabo oddziałujące** cząstki mogą się “odprząc” !...



# Ewolucja Wszechświata

Czy Wszechświat będzie się rozszerzał w nieskończoność ?

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

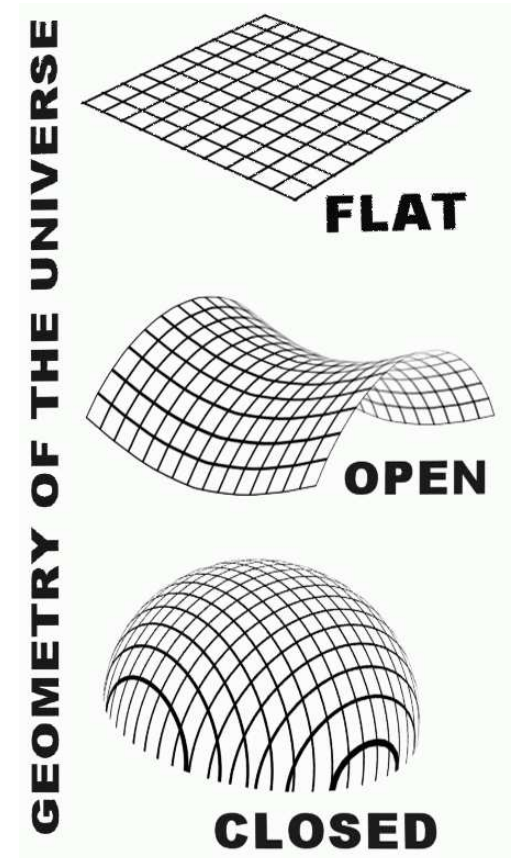
Gęstość krytyczna:  $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

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

$\rho < \rho_c$  będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$  kiedyś zacznie się zapadać

Pomijając wkład od stałej kosmologicznej!

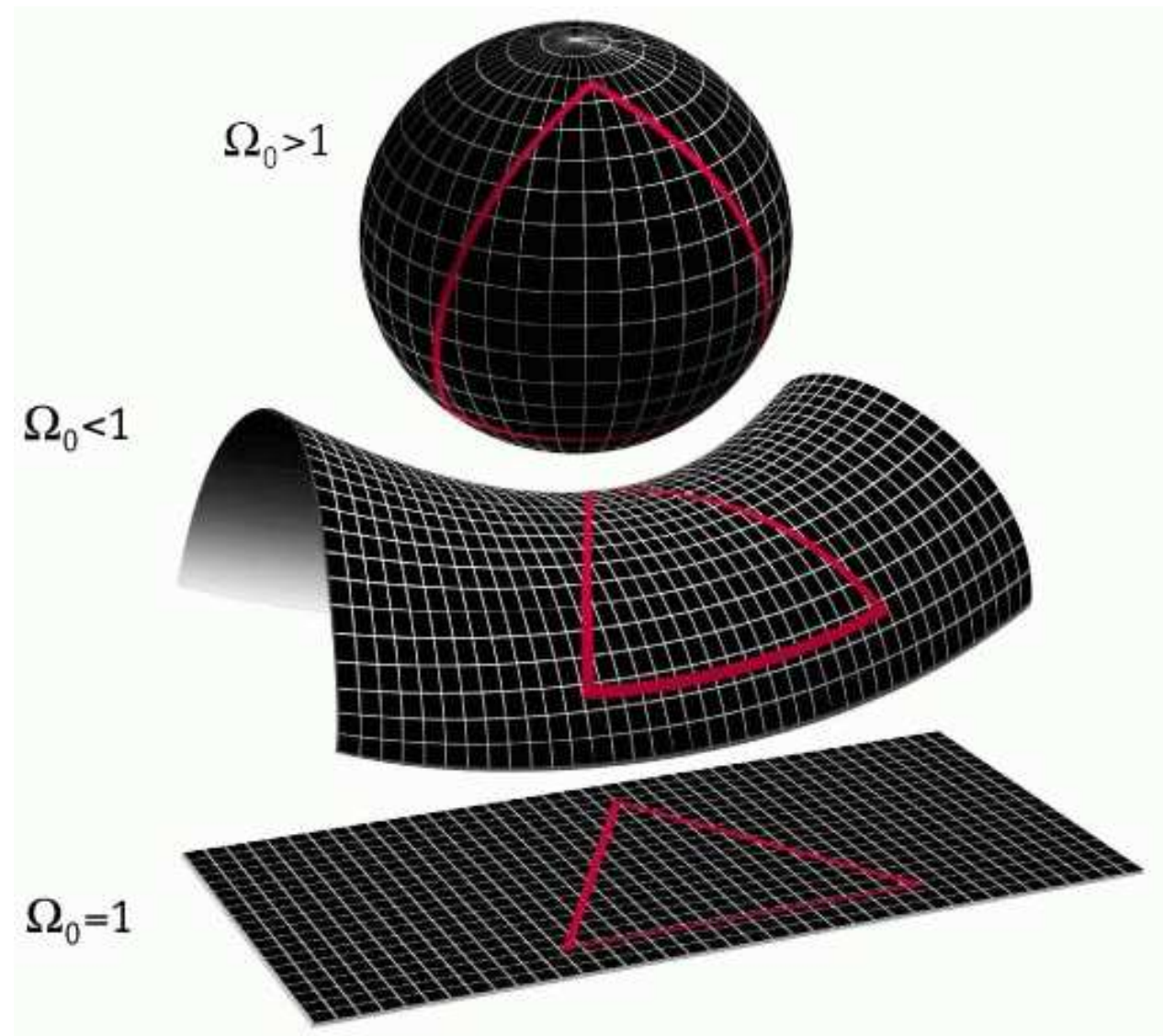


# Krzywizna przestrzeni

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”**

$$\Omega_b \sim 0.04$$

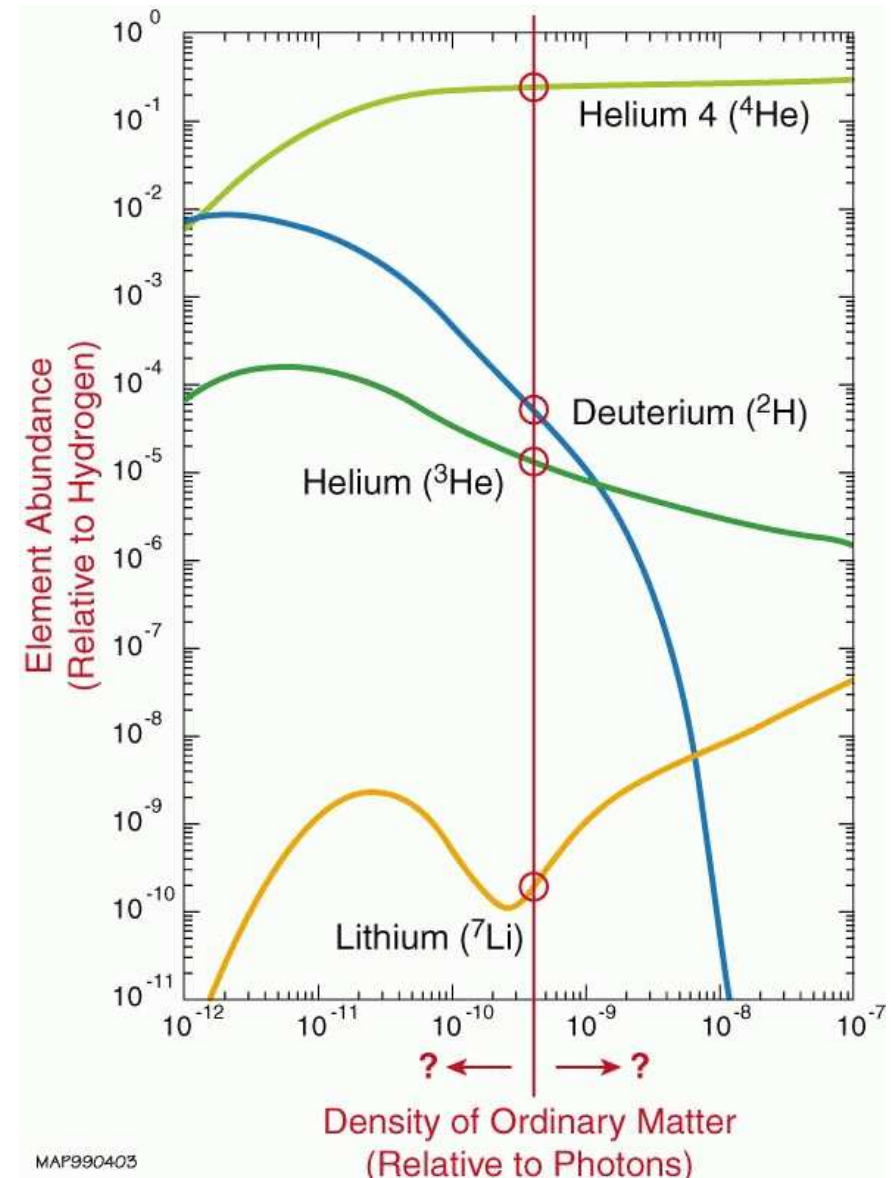
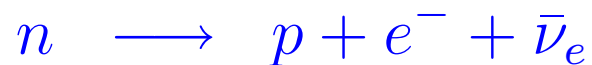
# Pierwotna nukleosynteza

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

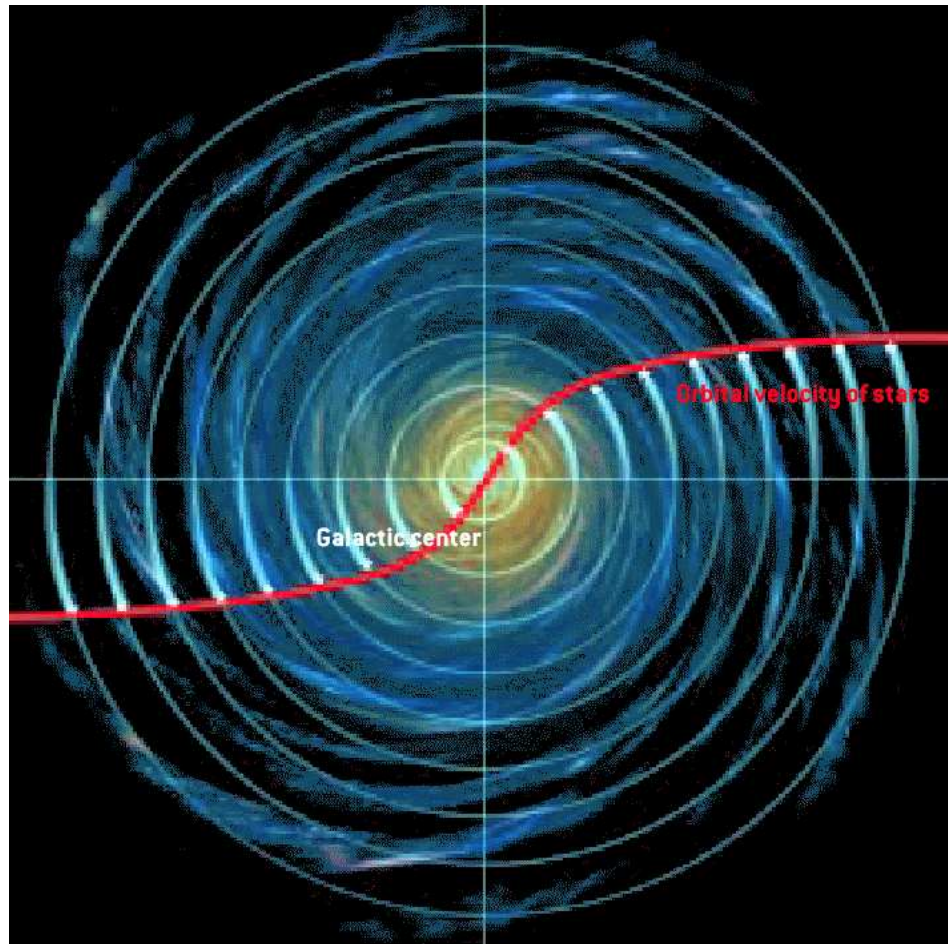
Produkcja deuteru:



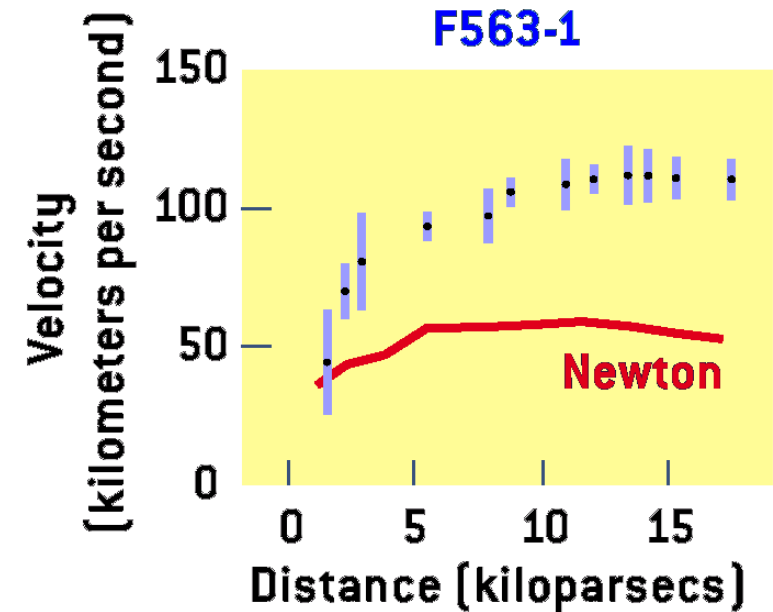
Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):



# Oddziaływania grawitacyjne



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.

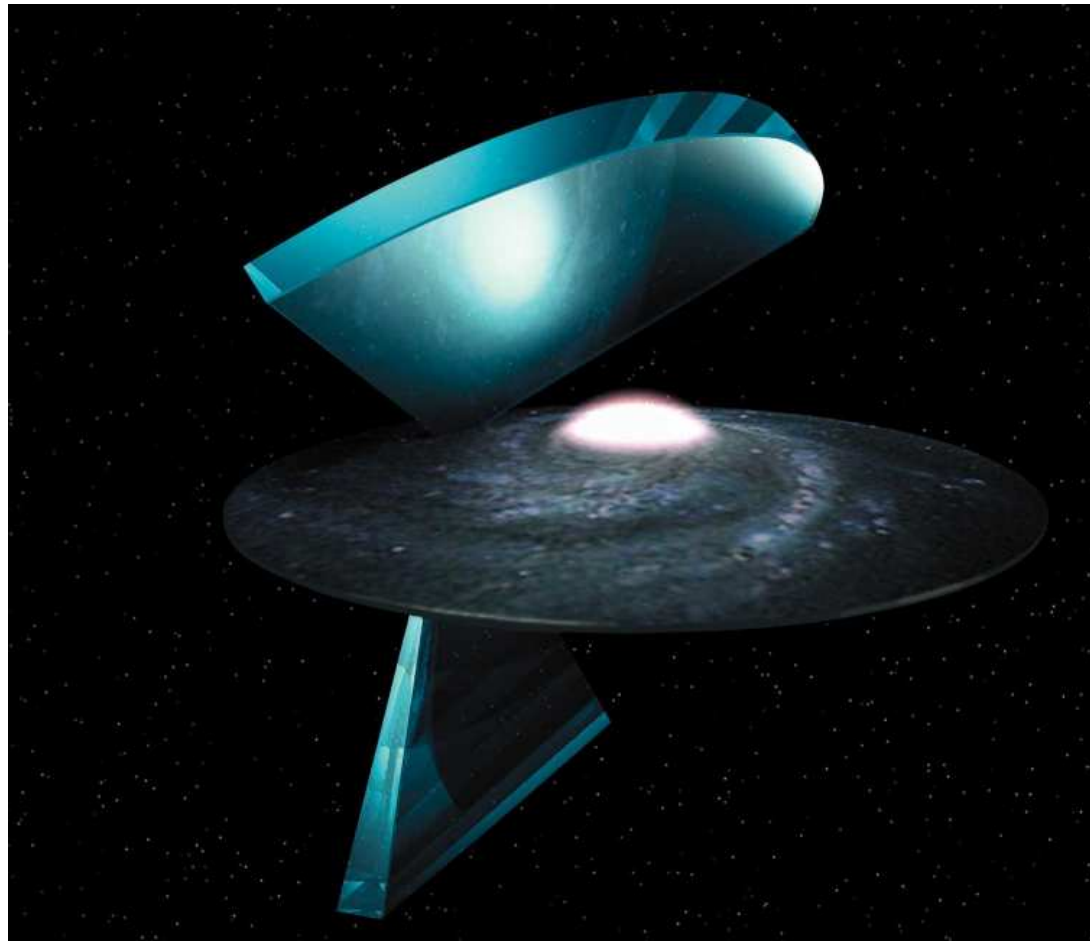


Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

# Oddziaływania grawitacyjne

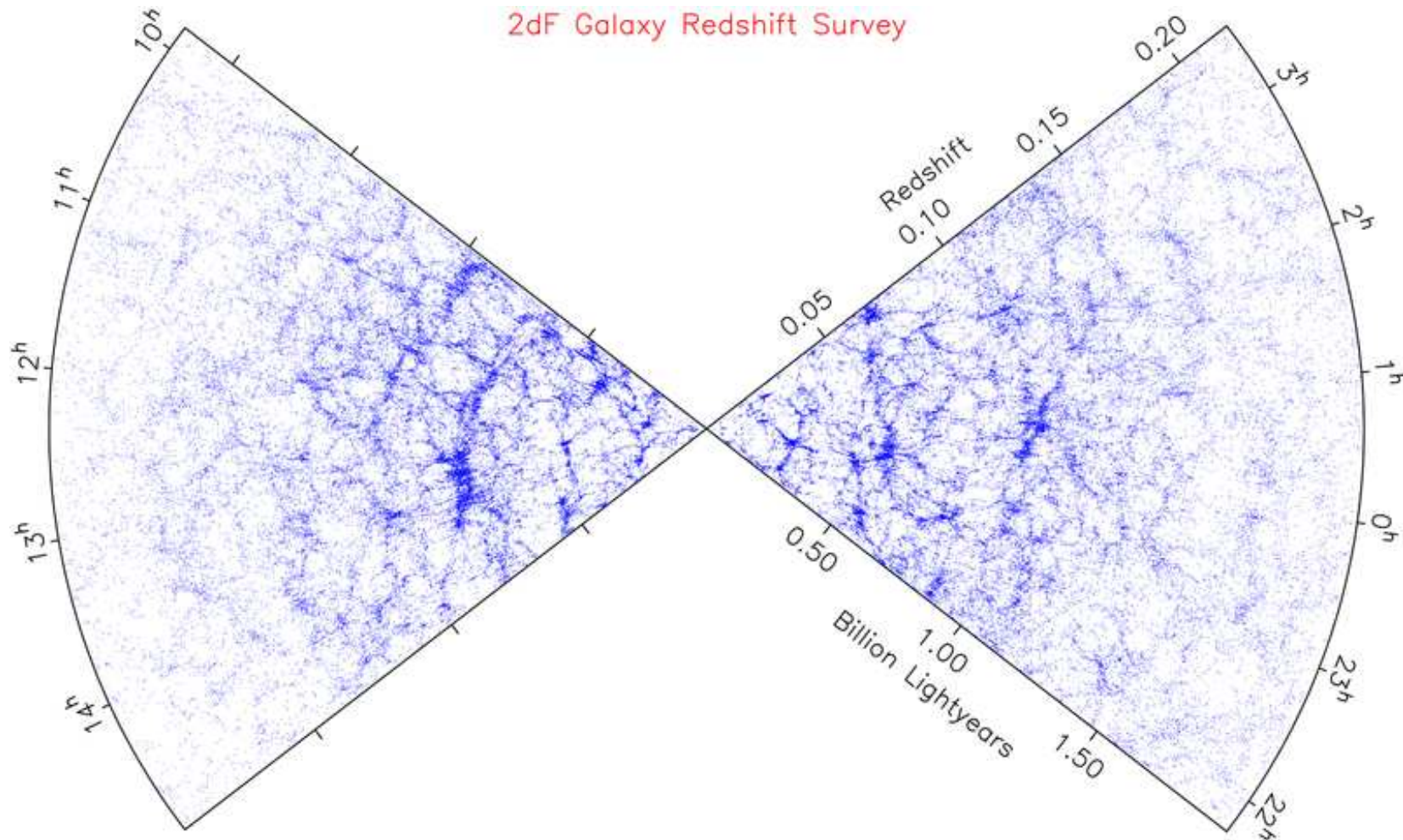
## *Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey*

Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



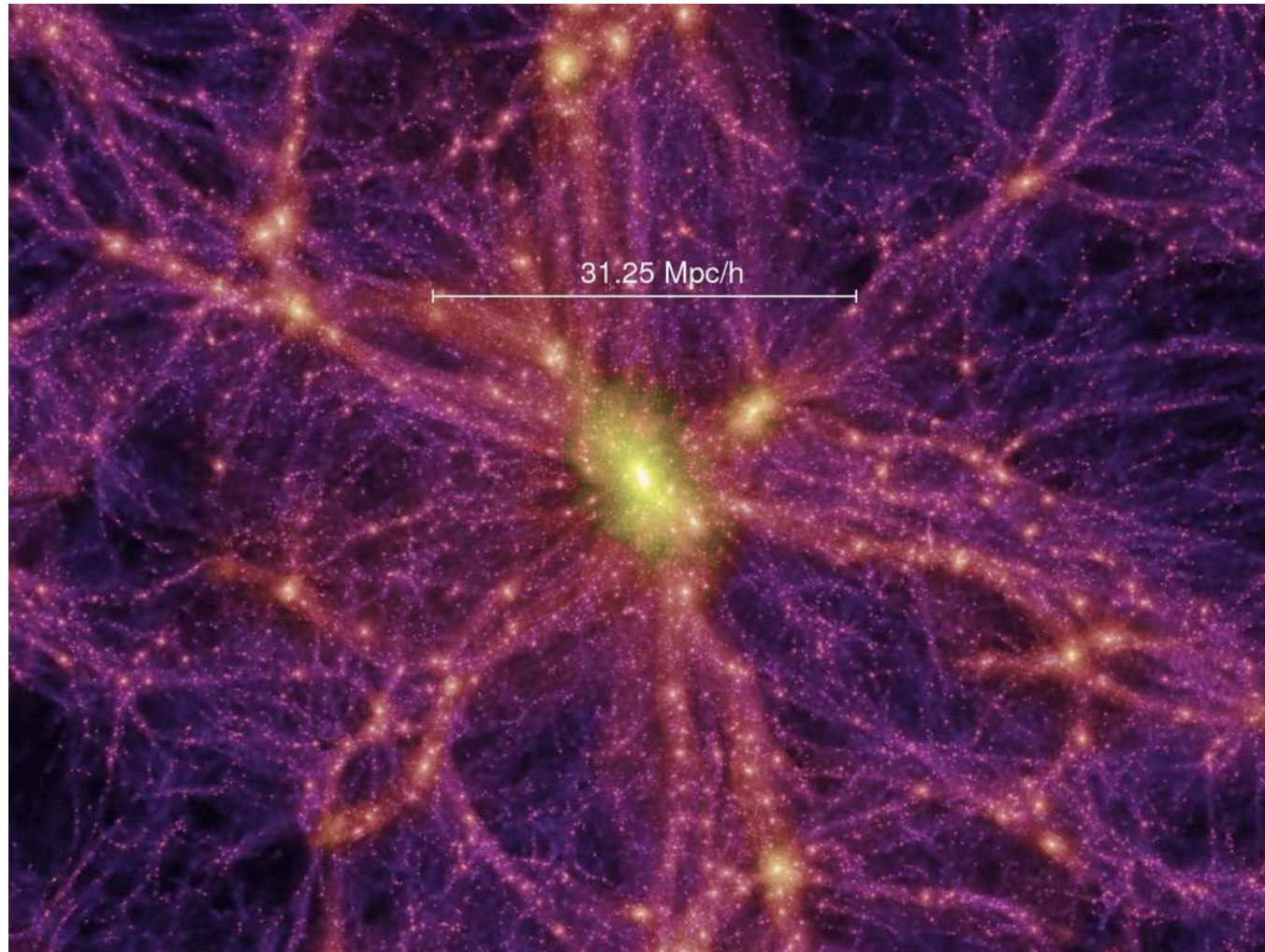
# Oddziaływania grawitacyjne

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.



# 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/symulacji oddziaływań **grawitacyjnych**  
⇒ materia **“grawitacyjna” (całkowita ?)**

$$\Omega_m \sim 0.3$$

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





# Ciemna materia

Wiemy że ciemna materia:

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

# Ciemna materia

Wiemy że ciemna materia:

- jest “zimna” (nierelatywistyczna)  $\Rightarrow$  masywna
- jest niebarionowa
- jest stabilna (nie rozpada się)
- bardzo słabo oddziałuje (tylko grawitacyjnie?)  
“Odprzęgła się” na wczesnym etapie ewolucji Wszechświata ?...
- 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

Wiemy że ciemna materia:

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

Nie wiemy:

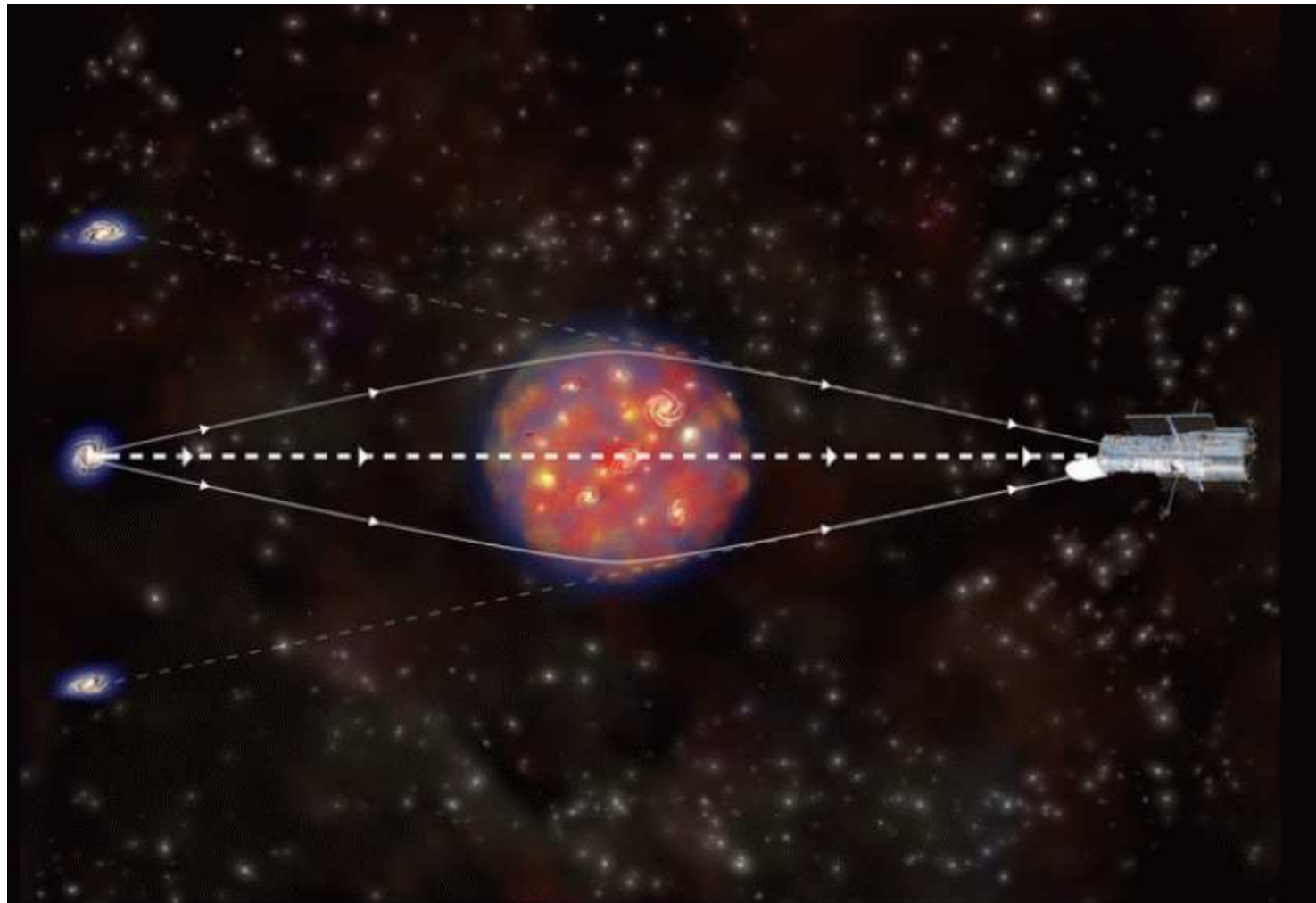
- Co się na nią składa (jedna czy wiele cząstek)?
- Jak ją bezpośrednio zaobserwować?

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



# Soczewkowanie grawitacyjne

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



# 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.



# Soczewkowanie grawitacyjne

## ***Silne soczewkowanie grawitacyjne***

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.

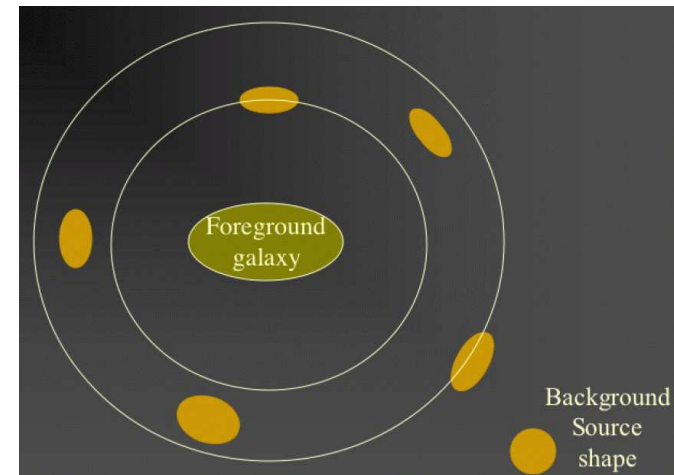
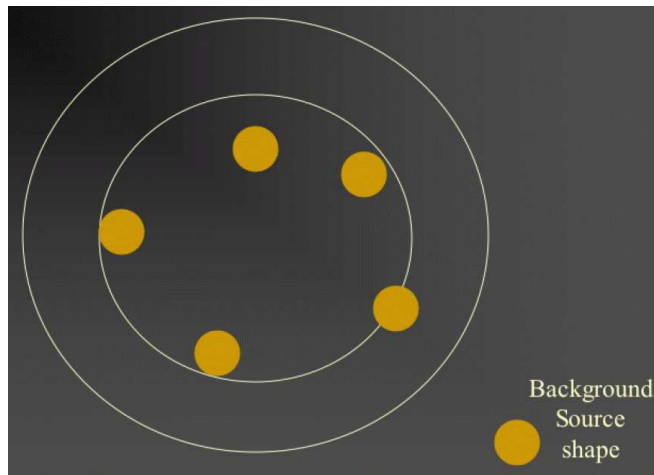
# Soczewkowanie grawitacyjne

## **Silne soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.

## **Słabe soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **zniekształcenie obrazu**.





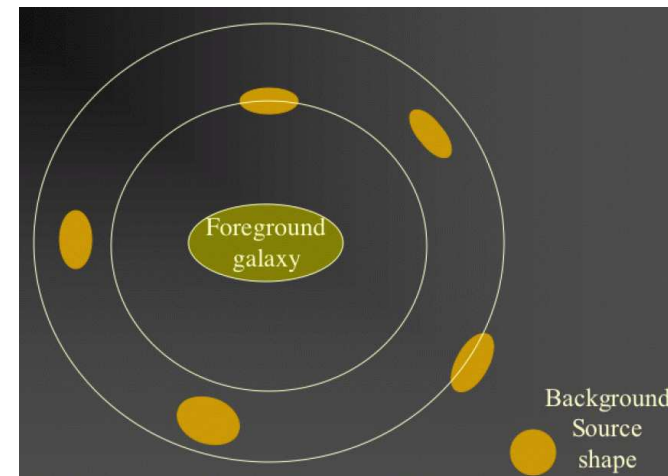
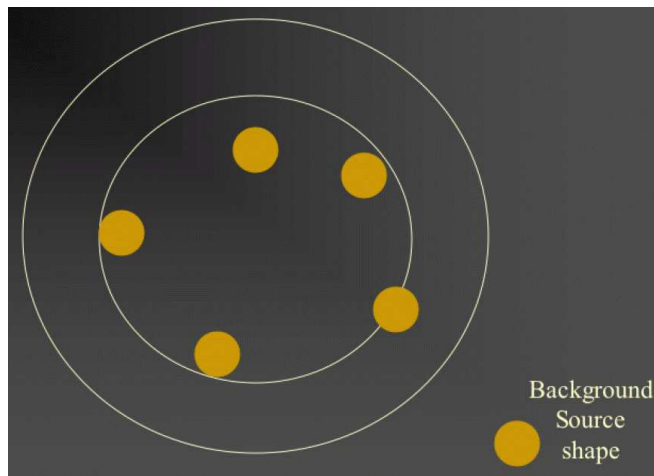
# Soczewkowanie grawitacyjne

## **Silne soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku dużego zakrzywienia przestrzeni możemy obserwować **wielokrotne obrazy** tego samego obiektu.

## **Słabe soczewkowanie grawitacyjne**

W przypadku mniejszego zakrzywienia przestrzeni obserwujemy jedynie **zniekształcenie obrazu**.



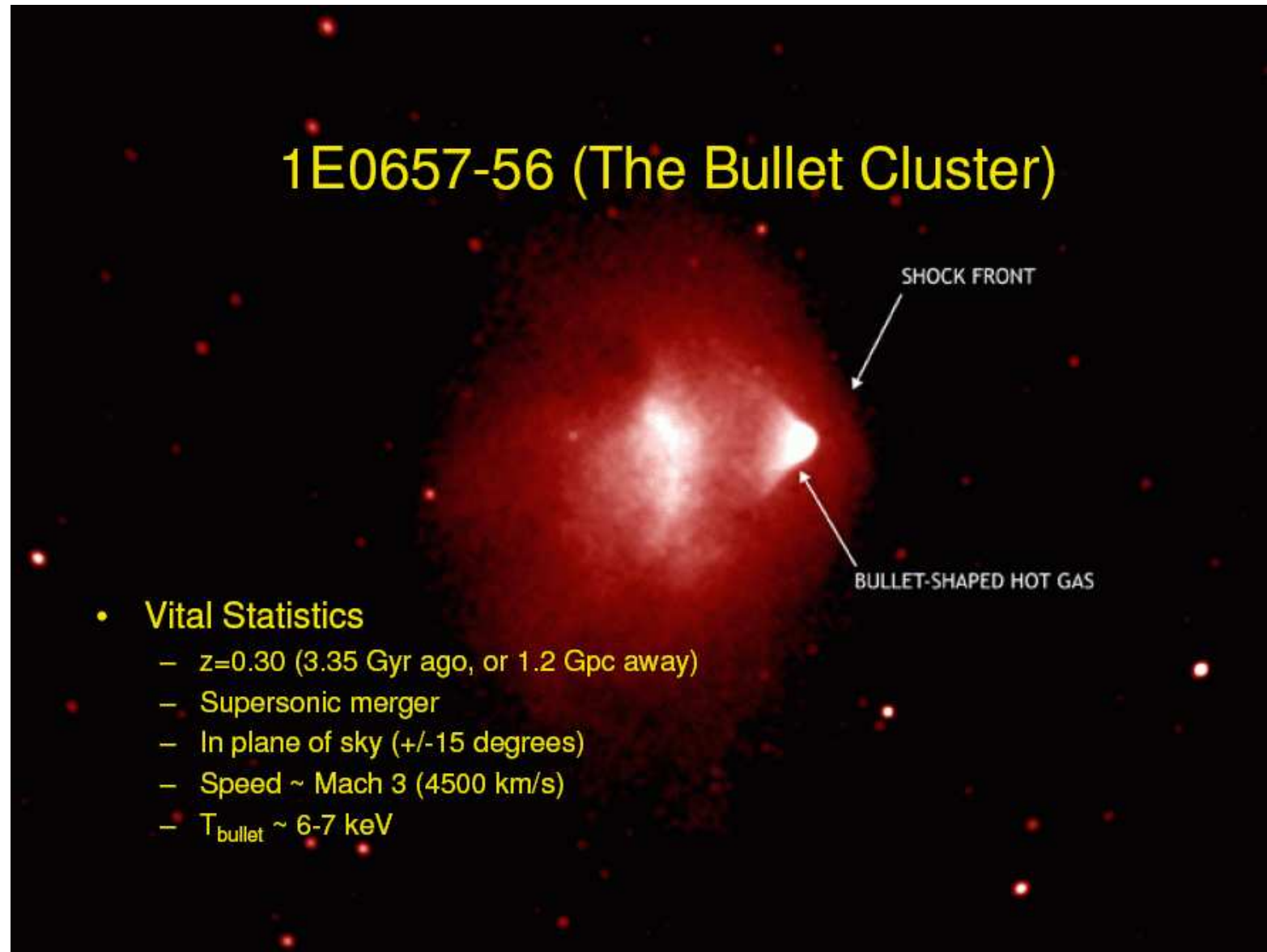
W obu przypadkach możemy wnioskować o **masie** obiektów znajdujących się na drodze promieni świetlnych.

# Kosmiczna kolizja

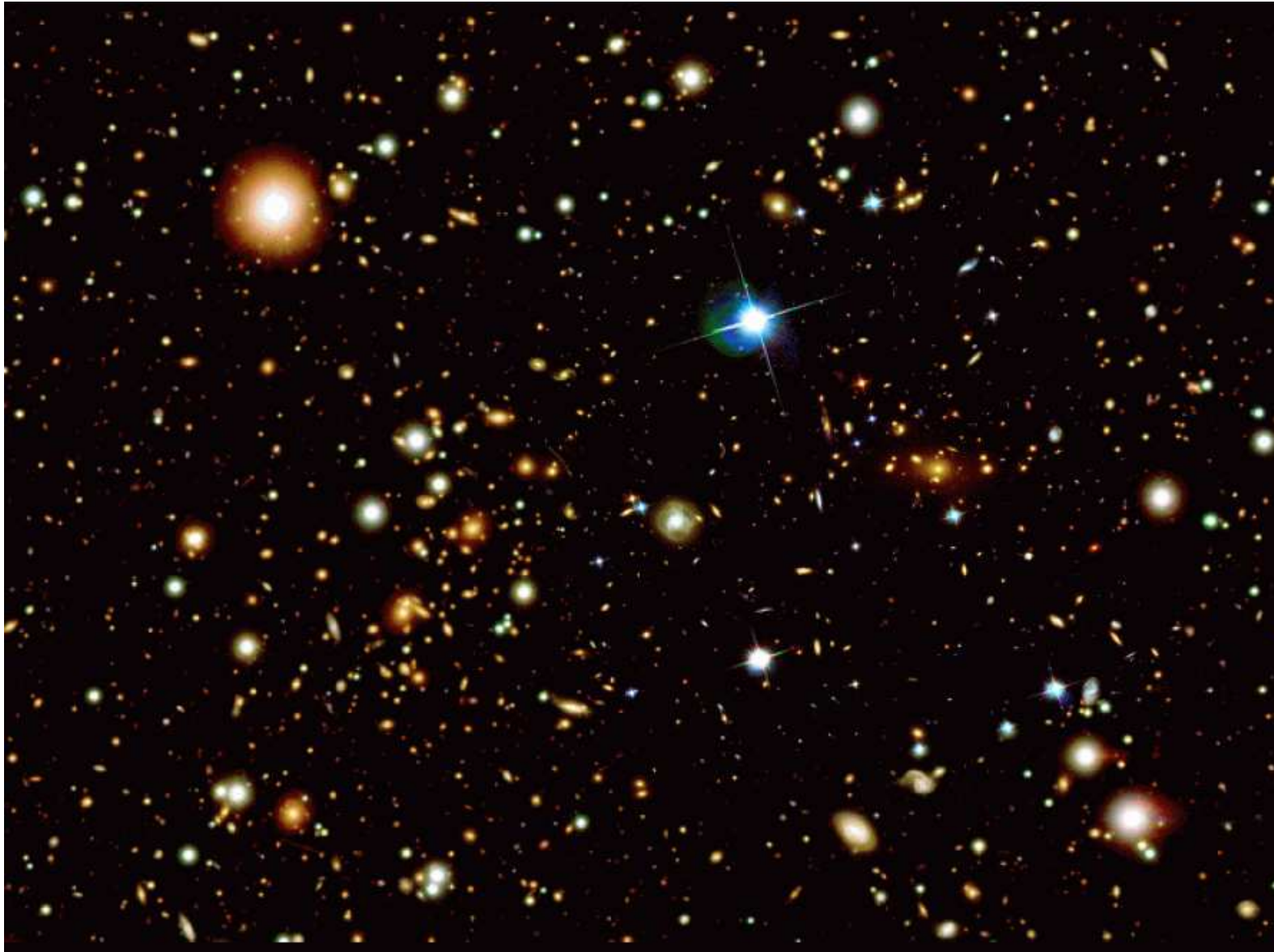
Atomy w przestrzeni międzygwiazdnej są źródłem bardzo słabego, ale mierzalnego **promieniowania rentgenowskiego**. W ostatnich latach bardzo dokładne pomiary tego promieniowania stały się możliwe dzięki wystrzeleniu teleskopu kosmicznego **Chandra**.



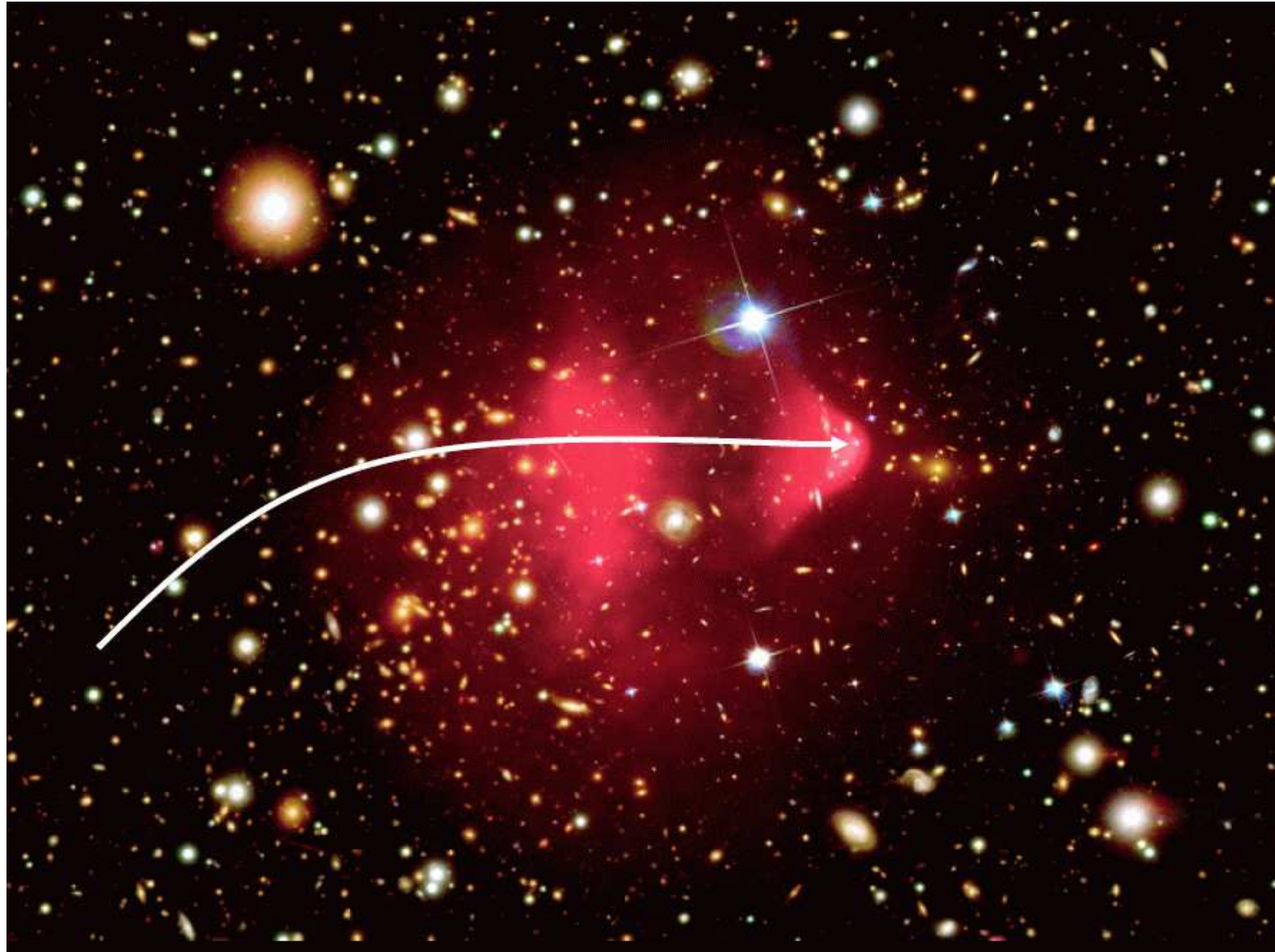
# Kosmiczna kolizja



# Kosmiczna kolizja

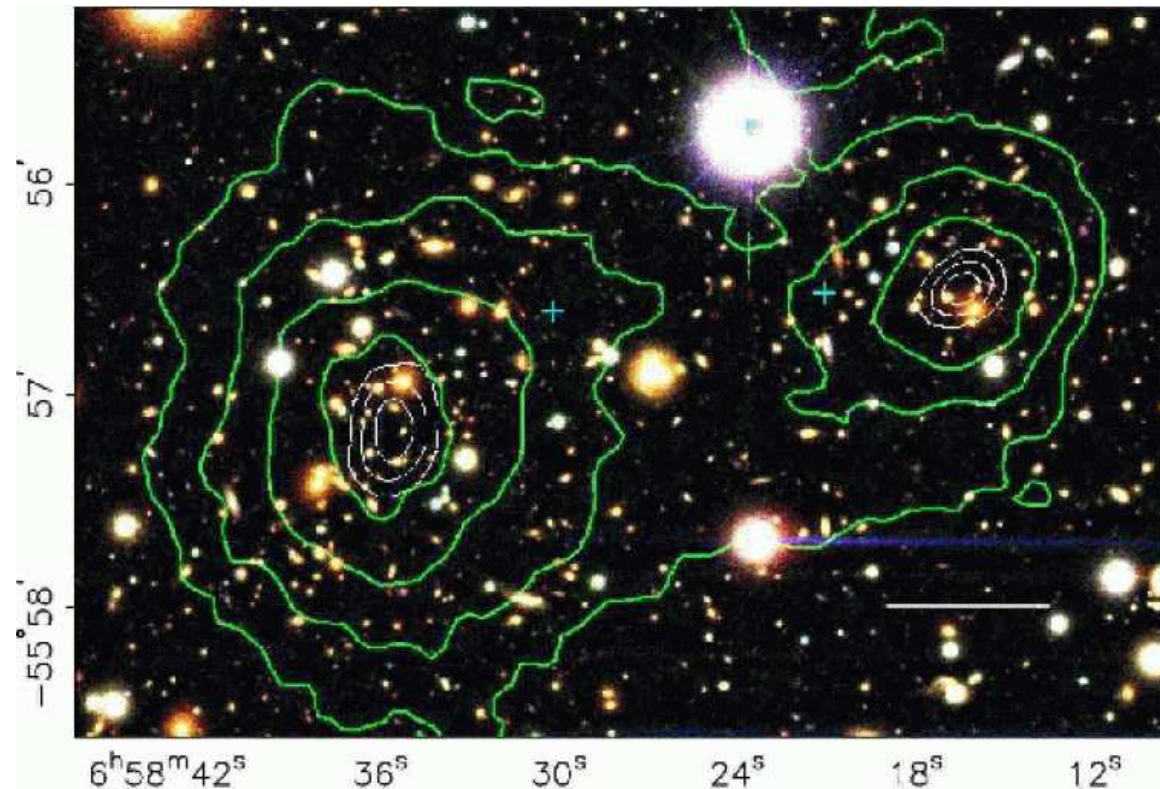


# Kosmiczna kolizja



# Kosmiczna kolizja

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "grawitacyjnej" w widocznym układzie. Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.

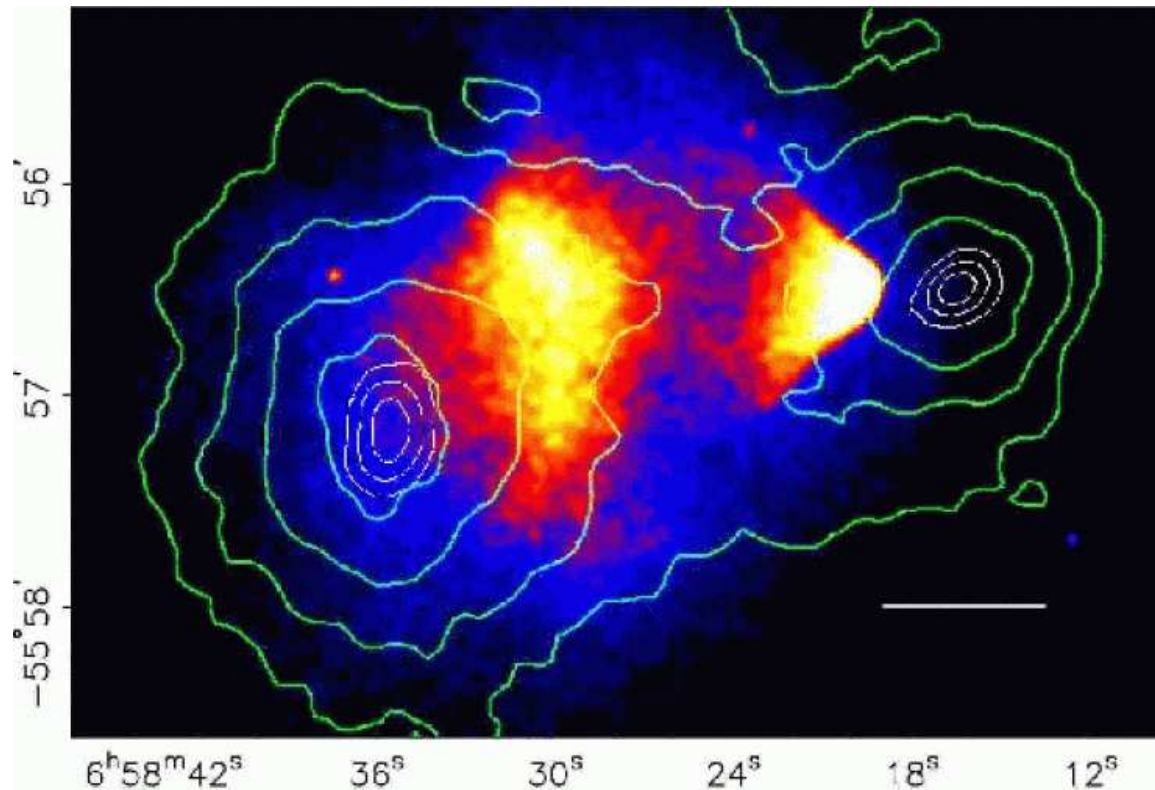


# Kosmiczna kolizja

Na podstawie pomiarów soczewkowania grawitacyjnego można było wyznaczyć rozkład masy "grawitacyjnej" w widocznym układzie.

Rozkład ten jest **zgodny** z rozkładem **gwiazd**.

**Nie zgadza się** z rozkładem materii międzygwiazdnej.

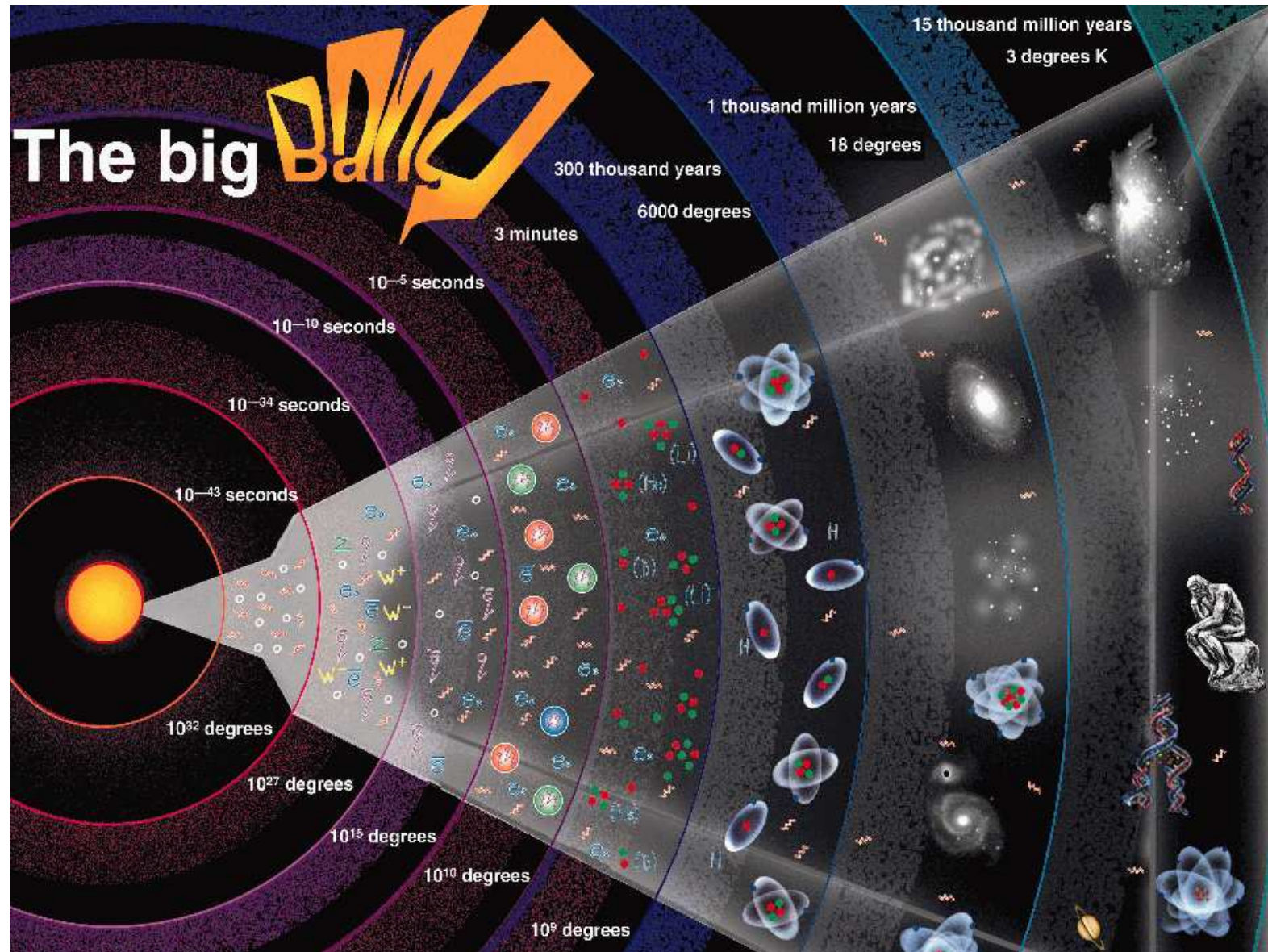


# Kosmiczna kolizja





# Ewolucja Wszechświata

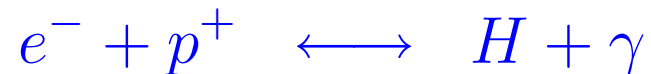


# Promieniowanie tła

W miarę **rozszerzania** się Wszechświata malały energie zderzających się cząstek. Stopniowo zanikały cięższe cząstki (przestawały być produkowane, a rozpadały się).

Gdy Wszechświat miał kilka godzin pozostały już tylko **jądra** lekkich pierwiastków, **elektrony** i **fotony**.

Elektrony i jądra mogły tworzyć atomy, ale były one nieustannie "rozbijane" w wyniku zderzeń z fotonami.



# Promieniowanie tła

W miarę **rozszerzania** się Wszechświata malały energie zderzających się cząstek. Stopniowo zanikały cięższe cząstki (przestawały być produkowane, a rozpadały się).

Gdy Wszechświat miał kilka godzin pozostały już tylko **jądra** lekkich pierwiastków, **elektrony** i **fotony**.

Elektrony i jądra mogły tworzyć atomy, ale były one nieustannie "rozbijane" w wyniku zderzeń z fotonami.



Okolo **300'000 lat po Wielkim Wybuchu** fotony nie mają już dość energii, żeby jonizować atomy. Elektrony łączą się z jądrami tworząc obojętne atomy. Pozostają tylko atomy i **fotony**.

# Promieniowanie tła

W przezroczystym Wszechświecie fotony praktycznie nie oddziałują. Jedynie ich energia wciąż maleje (**długość fali rośnie**).

W 1948 **George Gamow**, Ralph Alpher i Robert Herman doszli do wniosku, że fotony powstałe 300'000 lat po Wielkim Wybuchu muszą wciąż wypełniać Wszechświat.

Tylko ich energia jest tak mała, że bardzo długo nie byliśmy w stanie ich obserwować.

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

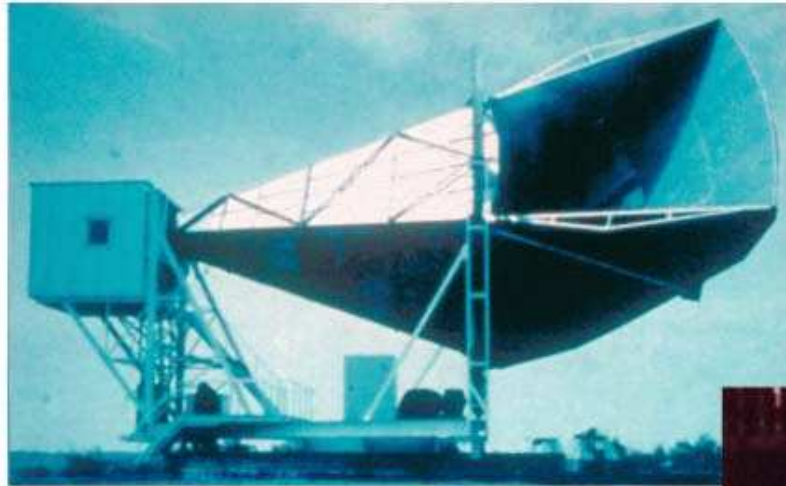
Rozkład widmowy promieniowania powinien odpowiadać rozkładowi promieniowania ciała doskonale czarnego.

$$T \sim 5 K$$

# Promieniowanie tła

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

## DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

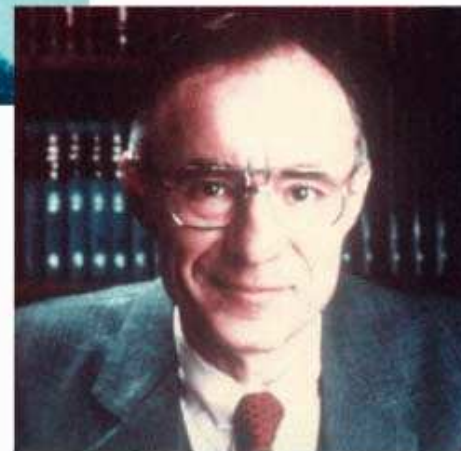


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

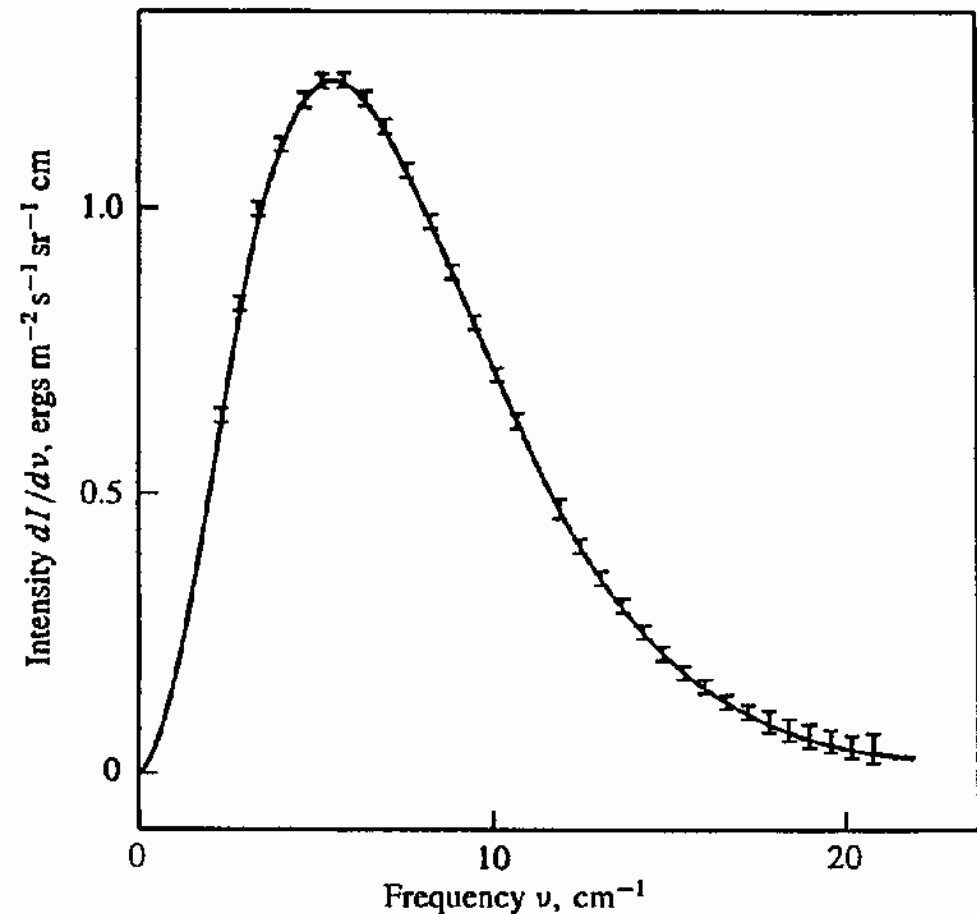
# Promieniowanie tła

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

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

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

Wyniki z satelity **COBE**: (1999)



# Promieniowanie tła

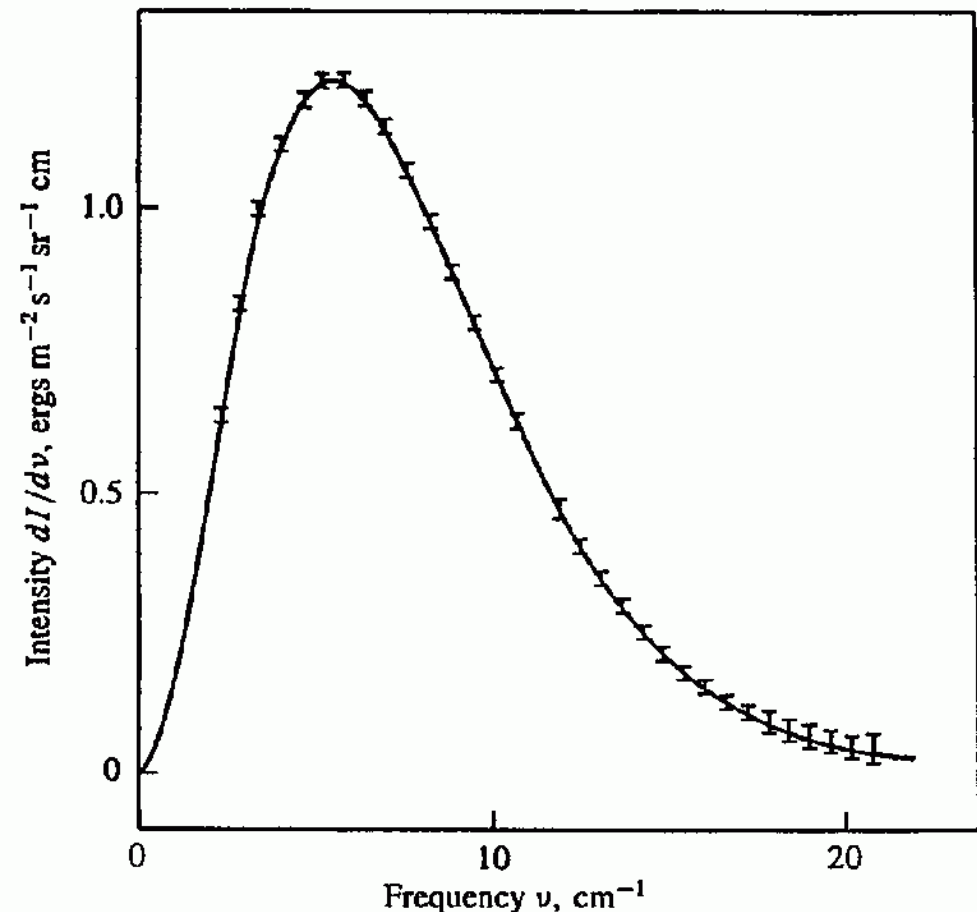
zostało odkryte w 1965 roku przez **A.A.Penzisa** i **R.W.Wilsona**.

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

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

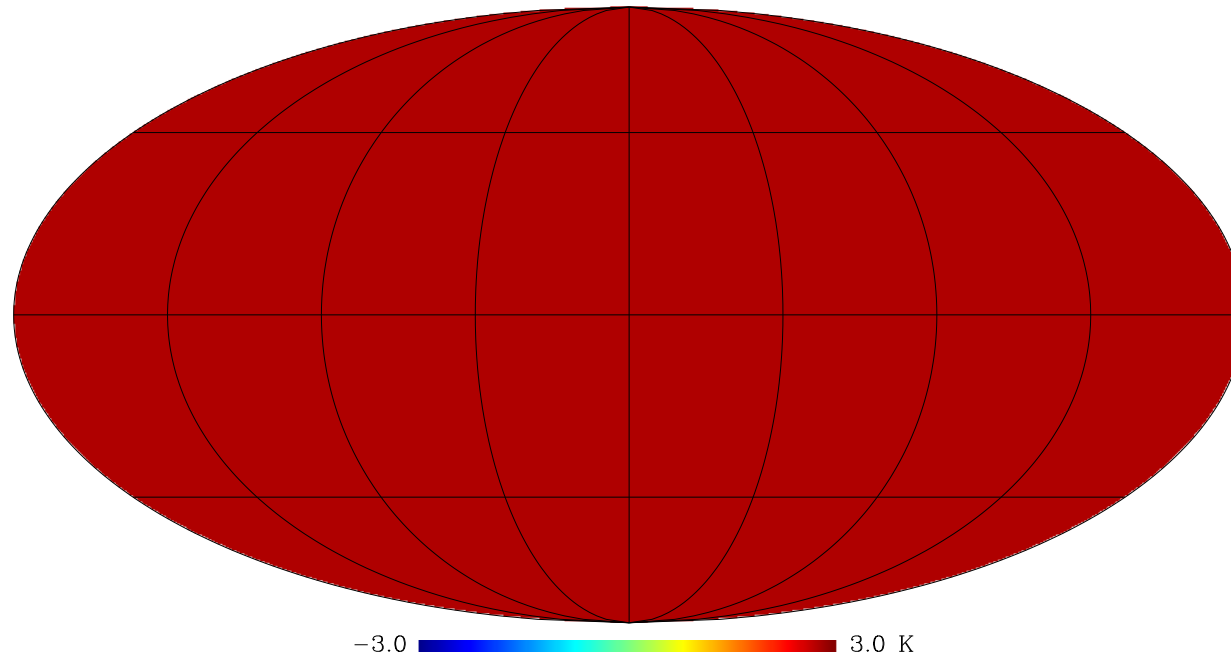
Obserwacja **CMB** była rozstrzygającym dowodem **Wielkiego Wybuchu** i "pogrzebała" model statycznego Wszechświata.

Wyniki z satelity **COBE**: (1999)



# Promieniowanie tła

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

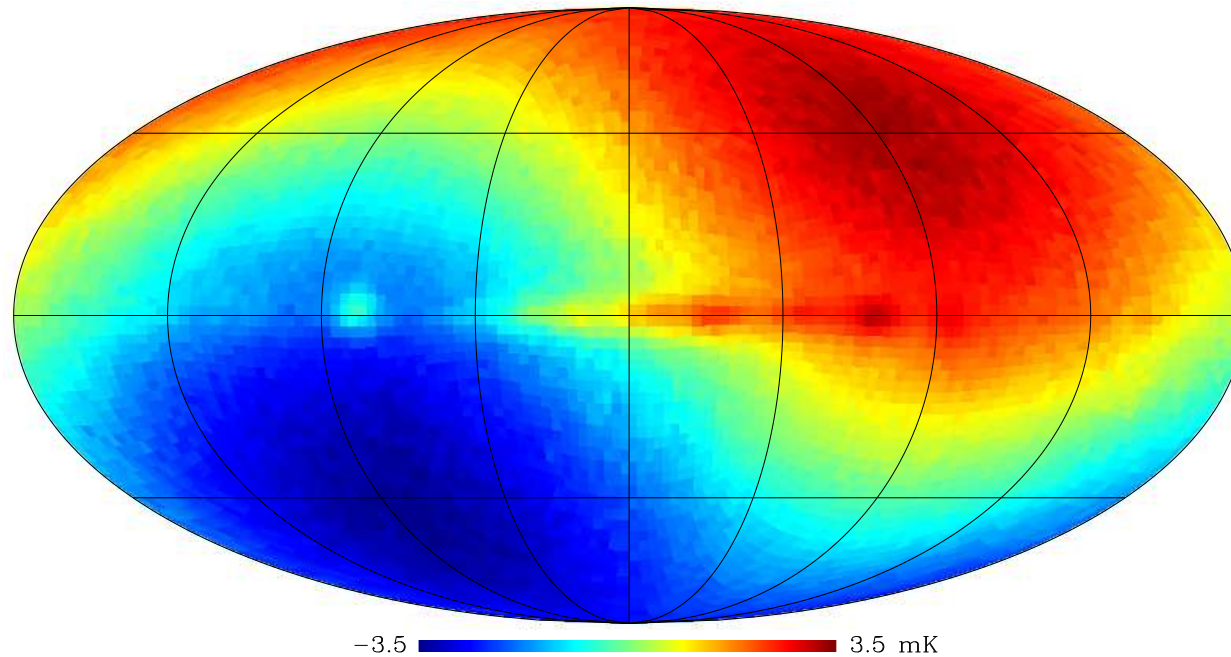


promieniowanie tła jest **izotropowe**, wypełnia jednolicie całe niebo.



# Promieniowanie tła

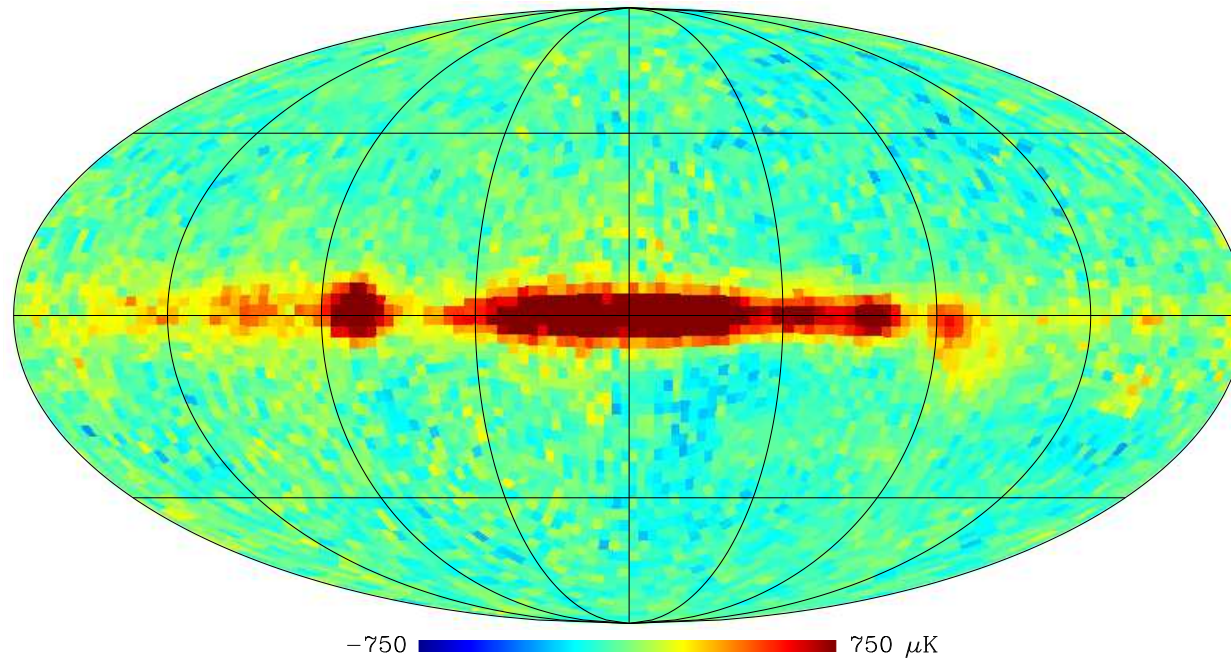
Jednak gdy przyjrzymy się bliżej ( $\Delta T \sim 1\text{mK}$ )



widzimy wpływ **ruchu Ziemi** względem 'globalnego' układu.

# Promieniowanie tła

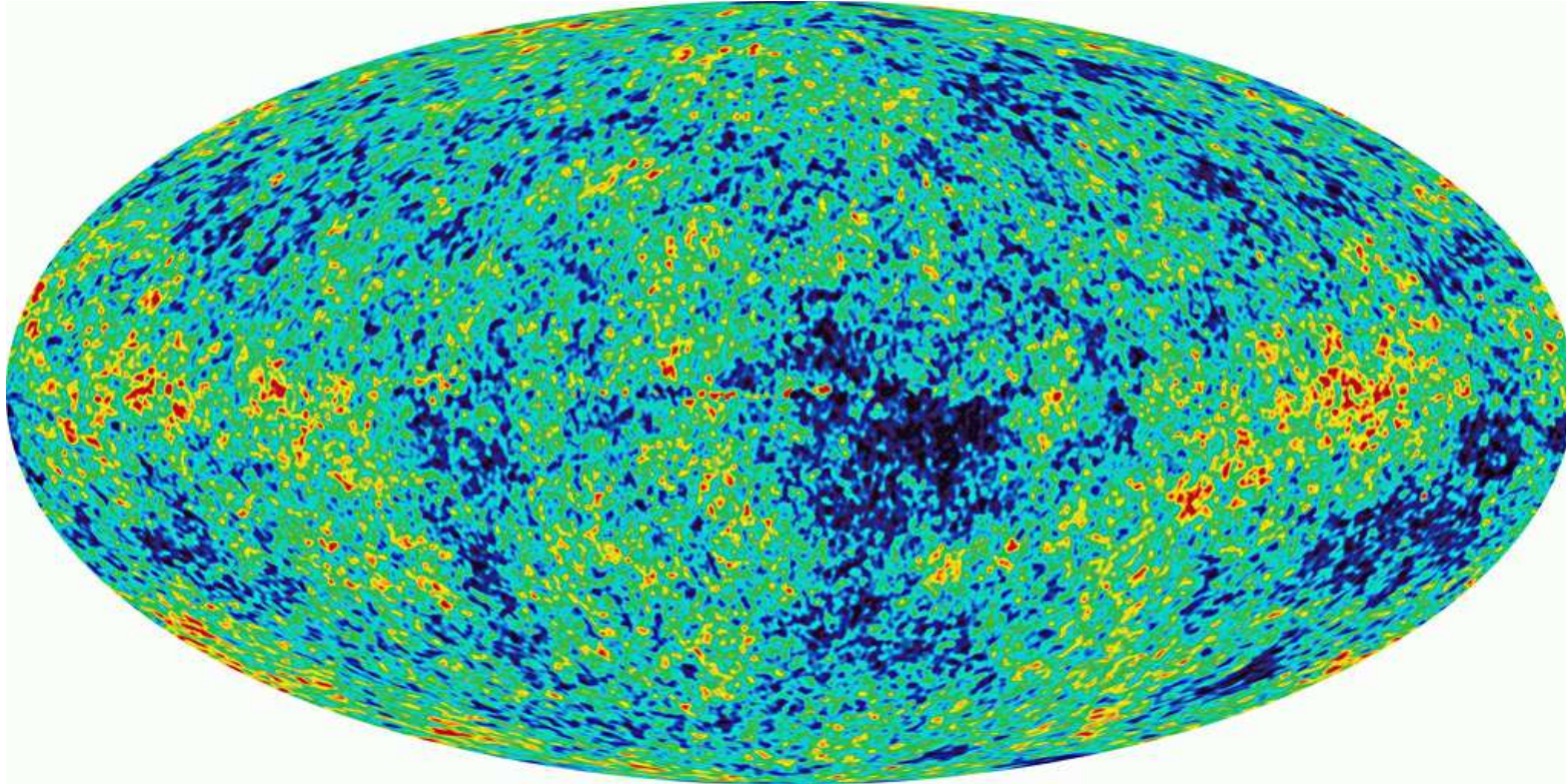
Odejmując wpływ efektu Dopplera ( $\Delta T \sim 200 \mu K$ )



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

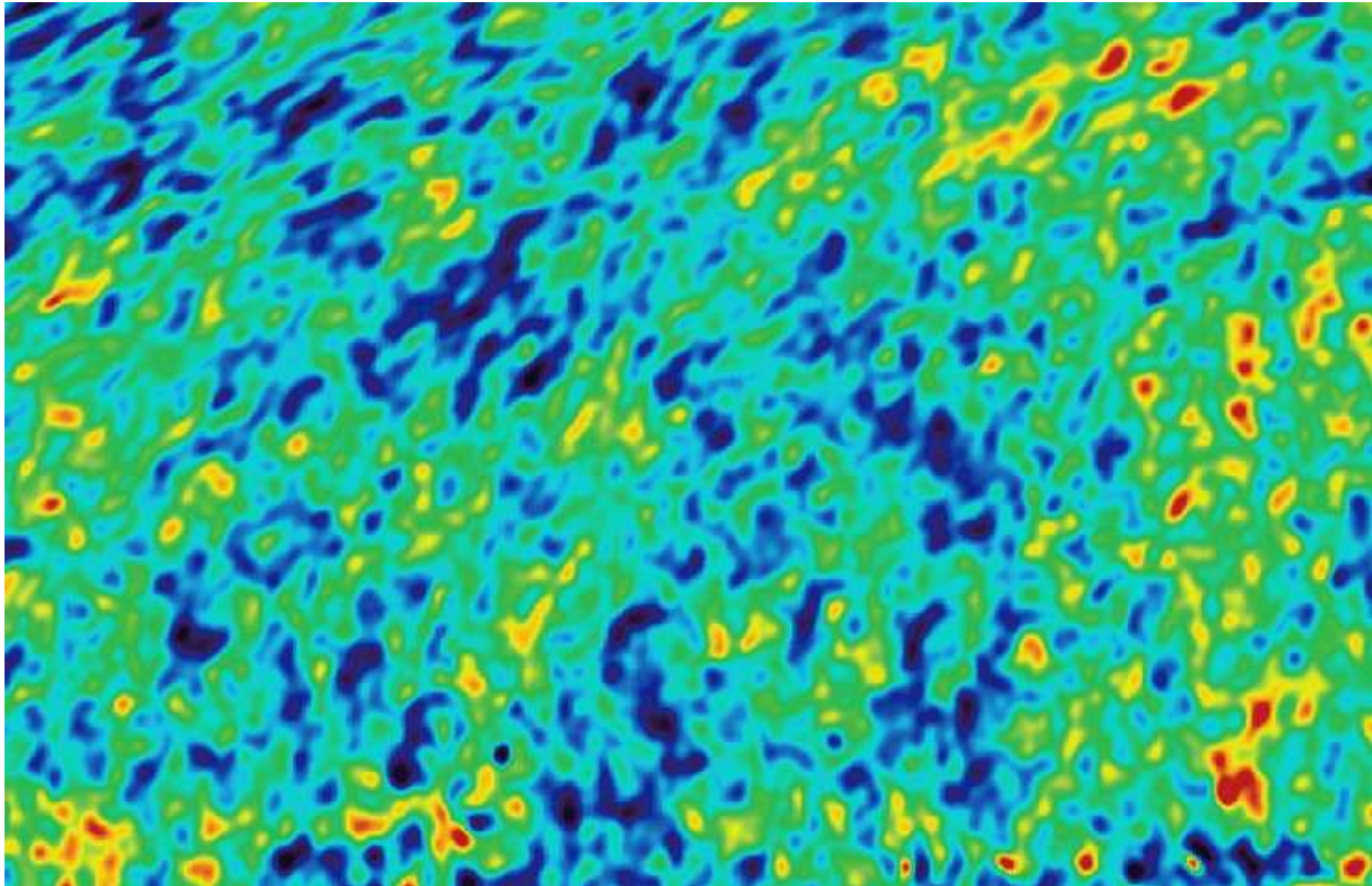
# Promieniowanie tła

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



widzimy przypadkowe fluktuacje w rozkładzie energii promieniowania  
⇒ czy w tym chaosie tkwi jakaś informacja?

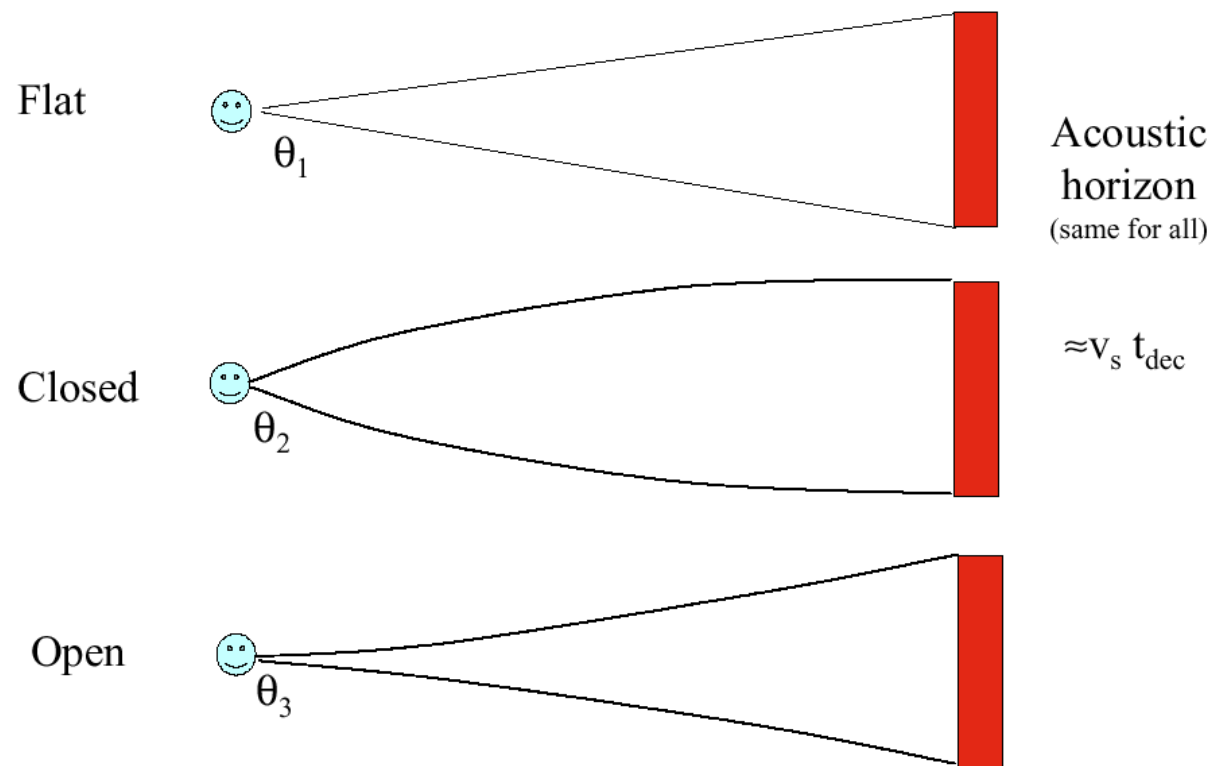
# Promieniowanie tła



# Promieniowanie tła

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

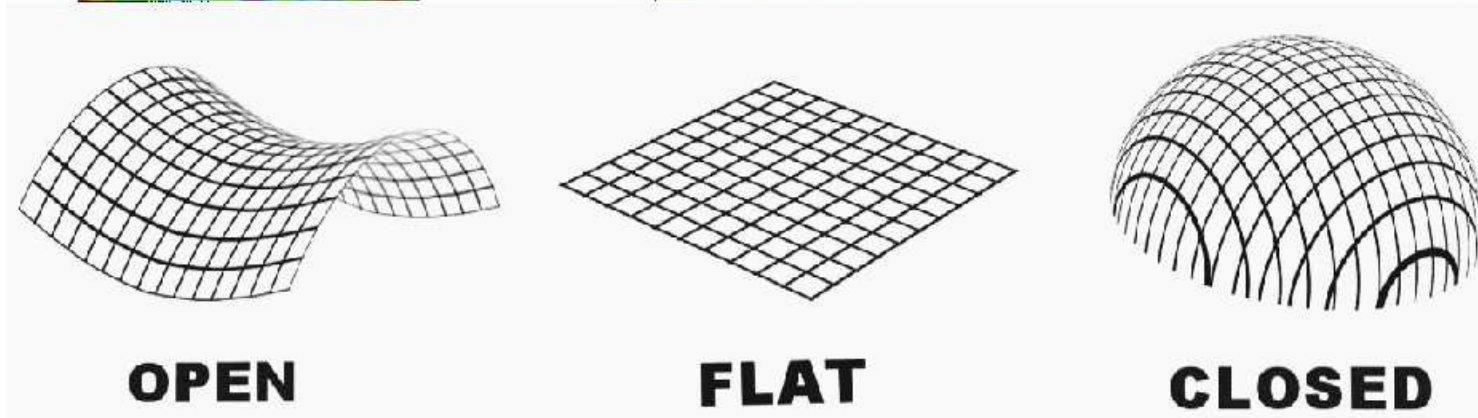
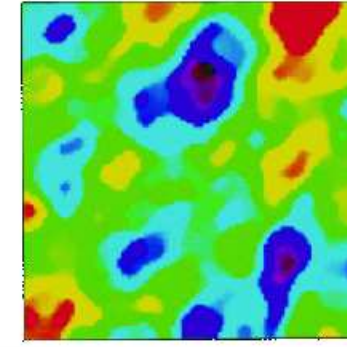
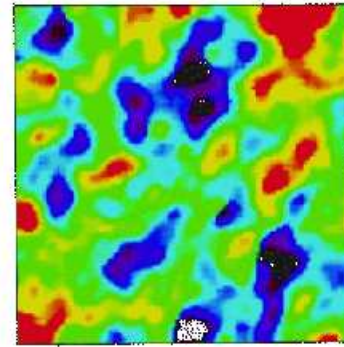
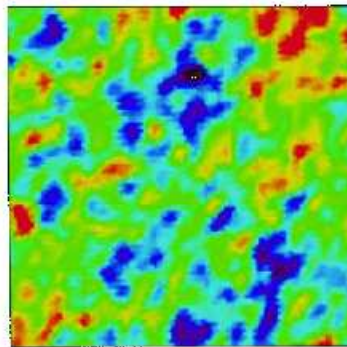
Rozmiary jakie **obecnie** obserwujemy zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



# Promieniowanie tła

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

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

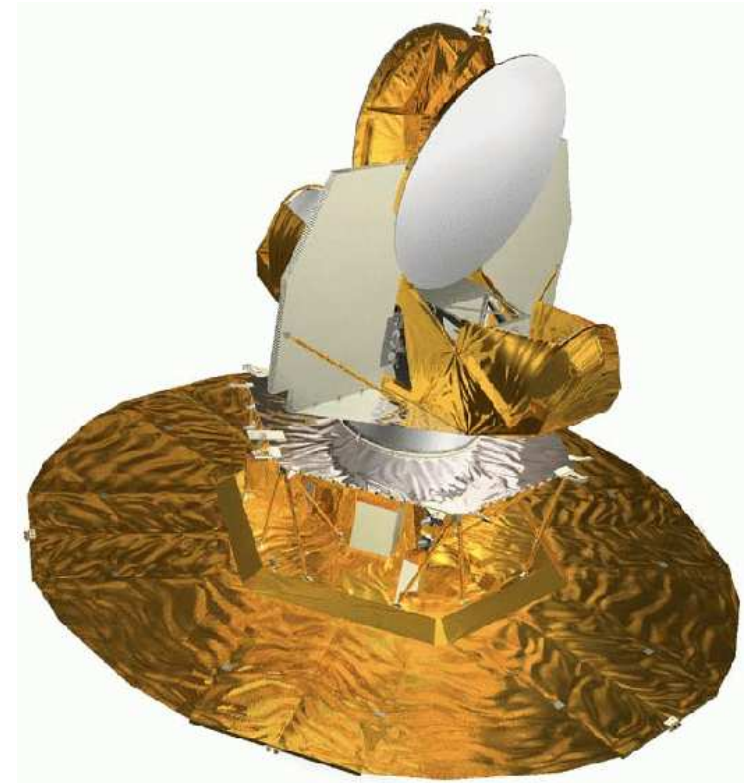


# WMAP

## Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.  
Pomiar promieniowania mikrofalowego  
w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w **różnych zakresach** częstości umożliwia efektywne **odjęcie tła** pochodzącego od Galaktyki.



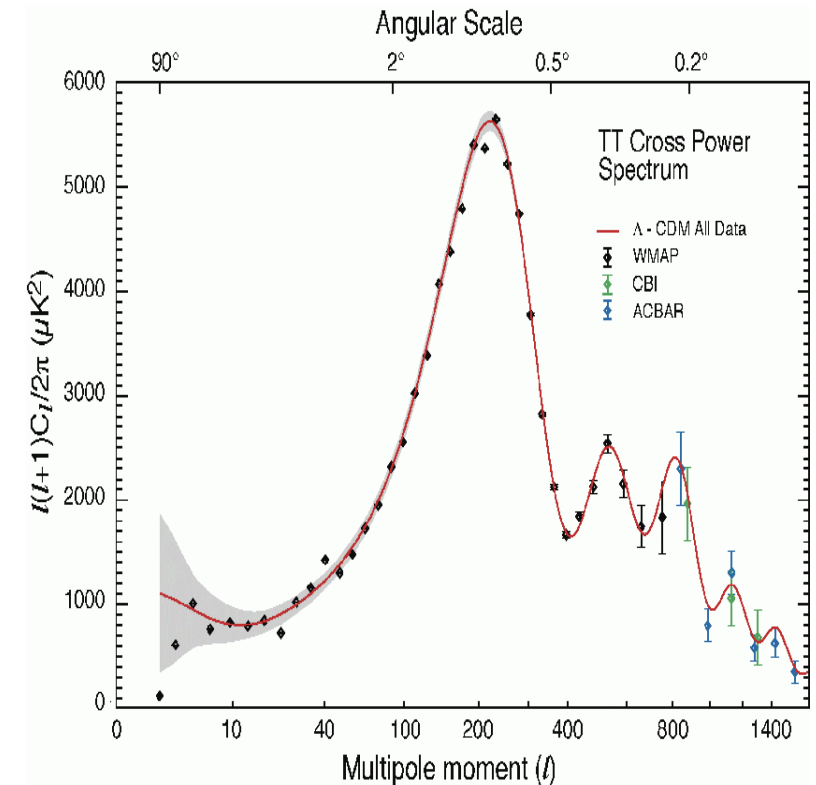
# WMAP

## Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.  
Pomiar promieniowania mikrofalowego  
w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w **różnych zakresach** częstości umożliwia efektywne **odjęcie tła** pochodzącego od Galaktyki.

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu  $0.8^\circ$





# WMAP

## Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

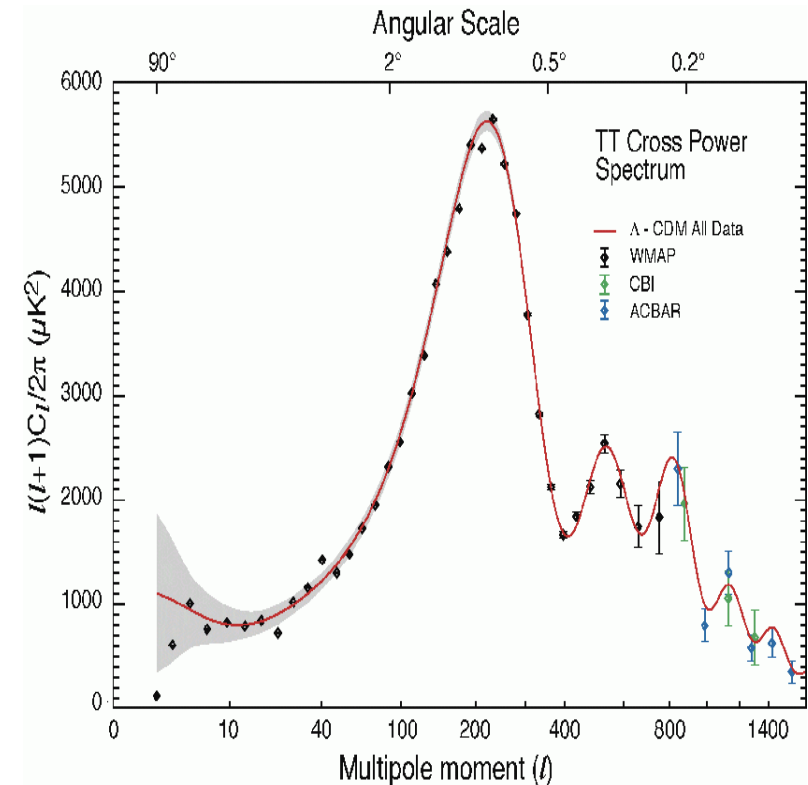
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.  
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

Porównanie pomiarów w **różnych zakresach** częstości umożliwia efektywne **odjęcie tła** pochodzącego od Galaktyki.

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu  $0.8^\circ$

⇒ Wszechświat jest **płaski** !

⇒ całkowita gęstość materii/energii:  $\rho_{tot} = 1.02(\pm 0.02) \rho_c$   
(w granicach błędu zgodna z gęstością krytyczną)



# Wyniki

Chcąc opisać wszystkie dostępne dane musimy przyjąć, że:

- **atomy** (bariony) wypełniają tylko około **4%** Wszechświata.
- **23%** stanowi **ciemna materia**...
- **73%** to tzw. “**ciemna energia**”, którą możemy opisać poprzez stałą kosmologiczną ( $\Lambda$ )



**Wszechświat** zdominowany przez stałą kosmologiczną **rozszerza się coraz szybciej** (!)

Wiek Wszechświata:  $T = 13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr}$

# Ciemne strony Wszechświata

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (**np. cząstki supersymetryczne**)

# Ciemne strony Wszechświata

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (np. **cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...

# Ciemne strony Wszechświata

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (**np. cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie  
Wszechświat zbudowany jest z **materii**  
 $\Rightarrow$  jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?  
**Wiemy już, że wymagało to złamania symetrii CP, znacznie silniejszego niż w Modelu Standardowym...**

# Ciemne strony Wszechświata

W ostatnich latach, zwłaszcza w świetle nowych wyników, **kosmologia** zbliża się coraz bardziej do **fizyki cząstek**  $\Rightarrow$  **astrofizyka cząstek**

Jest wiele pytań na które wspólnie szukamy odpowiedzi:

- **ciemna materia** Nie wiemy co nią jest, choć mamy szereg propozycji (**np. cząstki supersymetryczne**)
- **ciemna energia** Całkowita zagadka...
- **asymetria barionowa** we Wszechświecie  
Wszechświat zbudowany jest z **materii**  
 $\Rightarrow$  jak złamana została symetria **materia-antymateria** ?  
**Wiemy już, że wymagało to złamania symetrii CP, znacznie silniejszego niż w Modelu Standardowym...**
- cząstki o bardzo wysokich energiach w **promieniowaniu kosmicznym**, błyski  $\gamma$ , ...

# LHC

## *Large Hadron Collider*

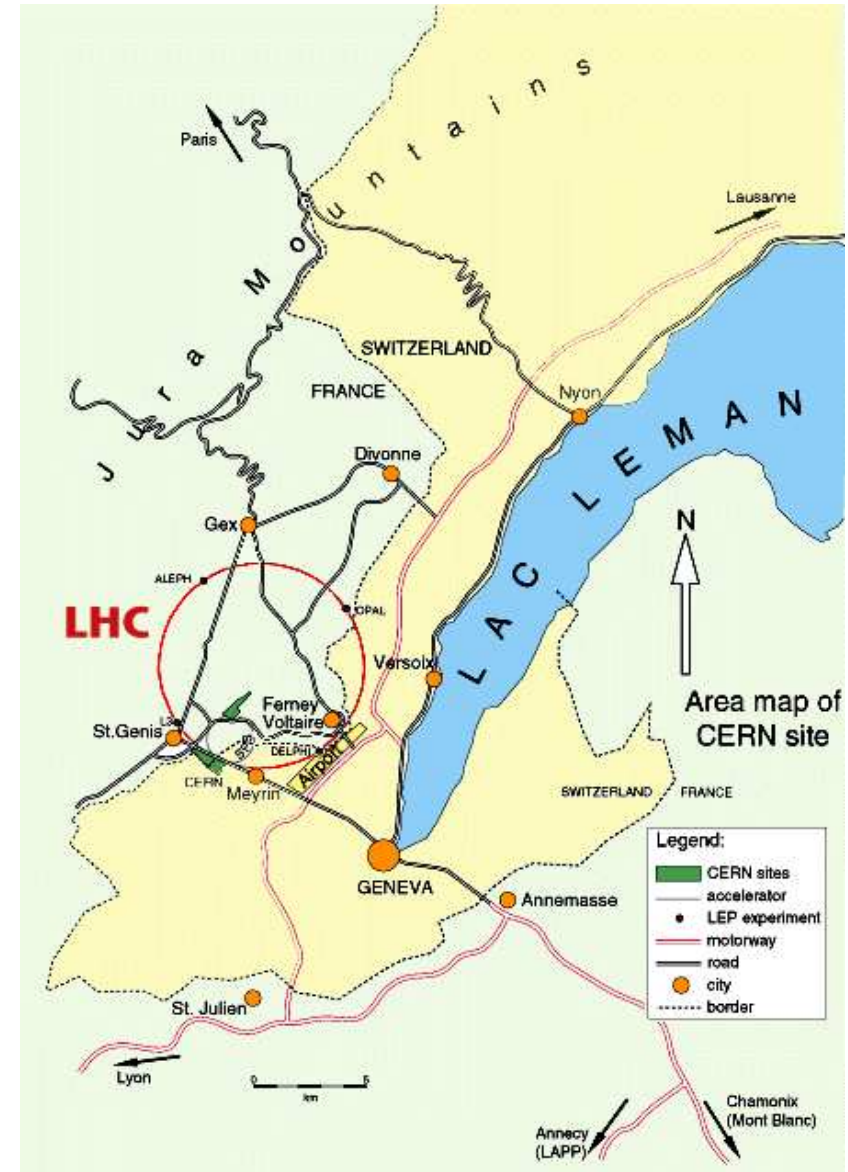
Zbudowany w CERN pod Genewą ma obwód ok. 27 km, czeka obecnie na uruchomienie.

Przeciwbieżne wiązki protonów o energii 7 TeV.

W każdej 2800 "paczek" po  $10^{11}$  protonów.

Zderzenia paczek co 25 ns  
(40 milionów na sekundę)

W tym samym tunelu działał poprzednio akcelerator LEP.



# LHC





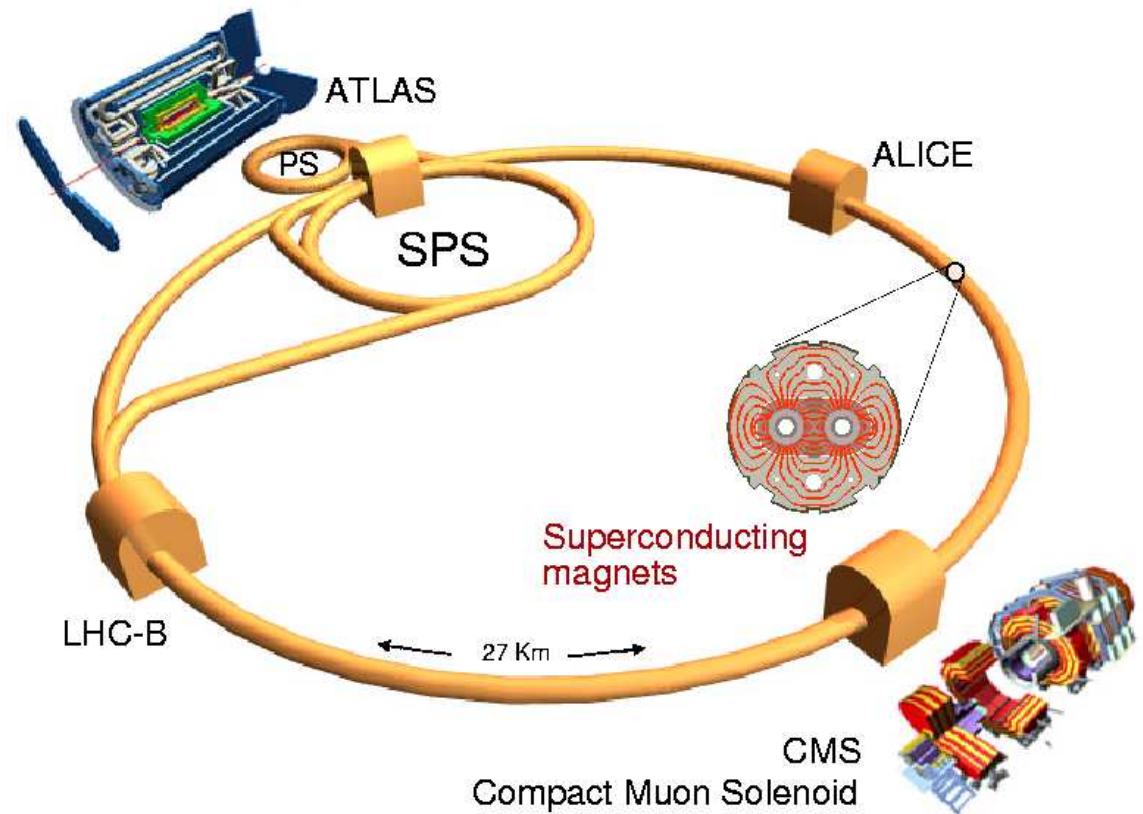
# LHC

Przeciwbieżne wiązki protonów w LHC mają mieć energię  $2 \times 7 \text{ TeV}$  ( $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$ )

Intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do 1000 nowych, ciężkich cząstek (np. cząstek supersymetrycznych) na godzinę !

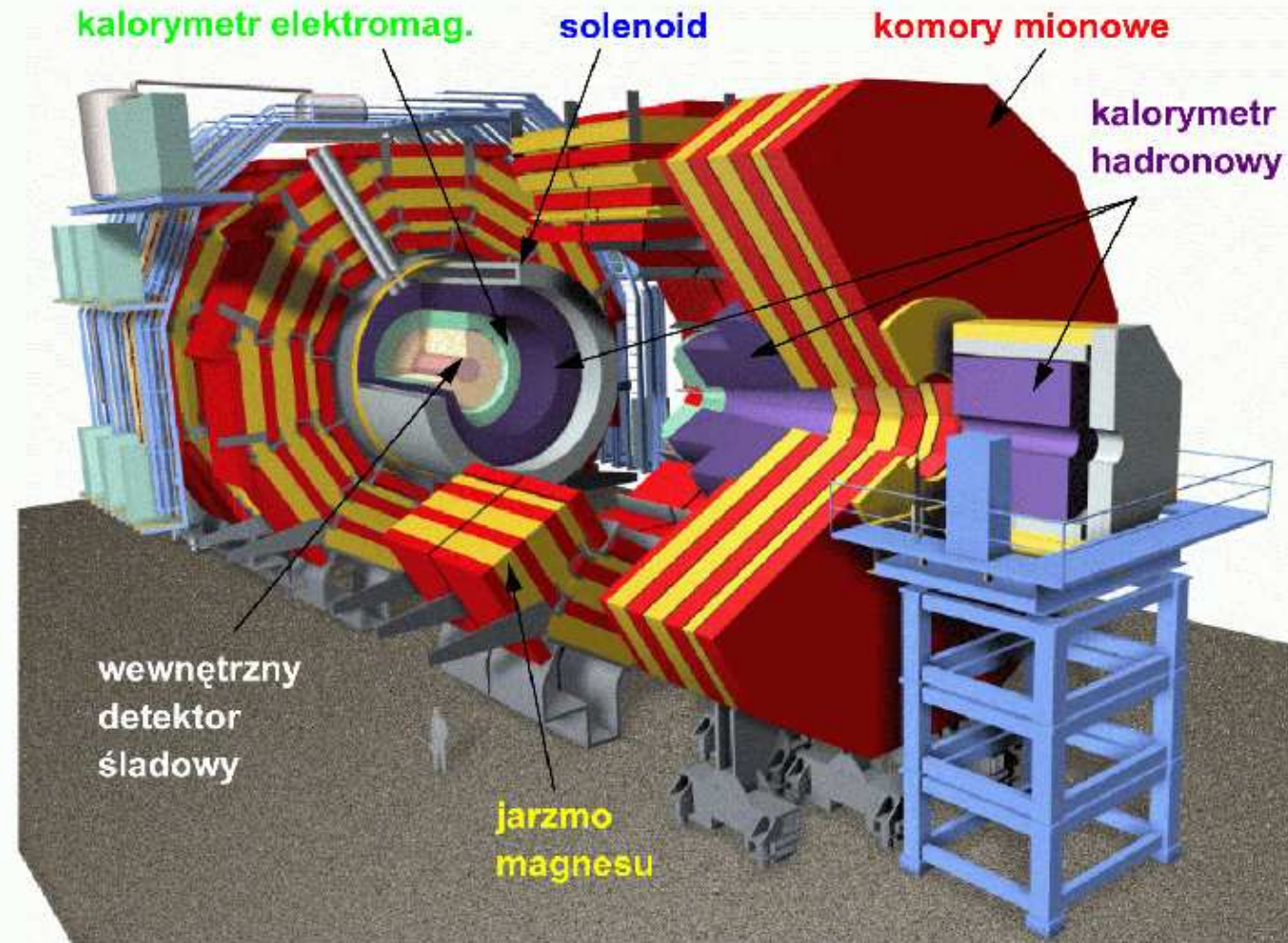
Przypadków produkcji nowych cząstek będą poszukiwać dwa eksperymenty: ATLAS i CMS

## The Large Hadron Collider (LHC)



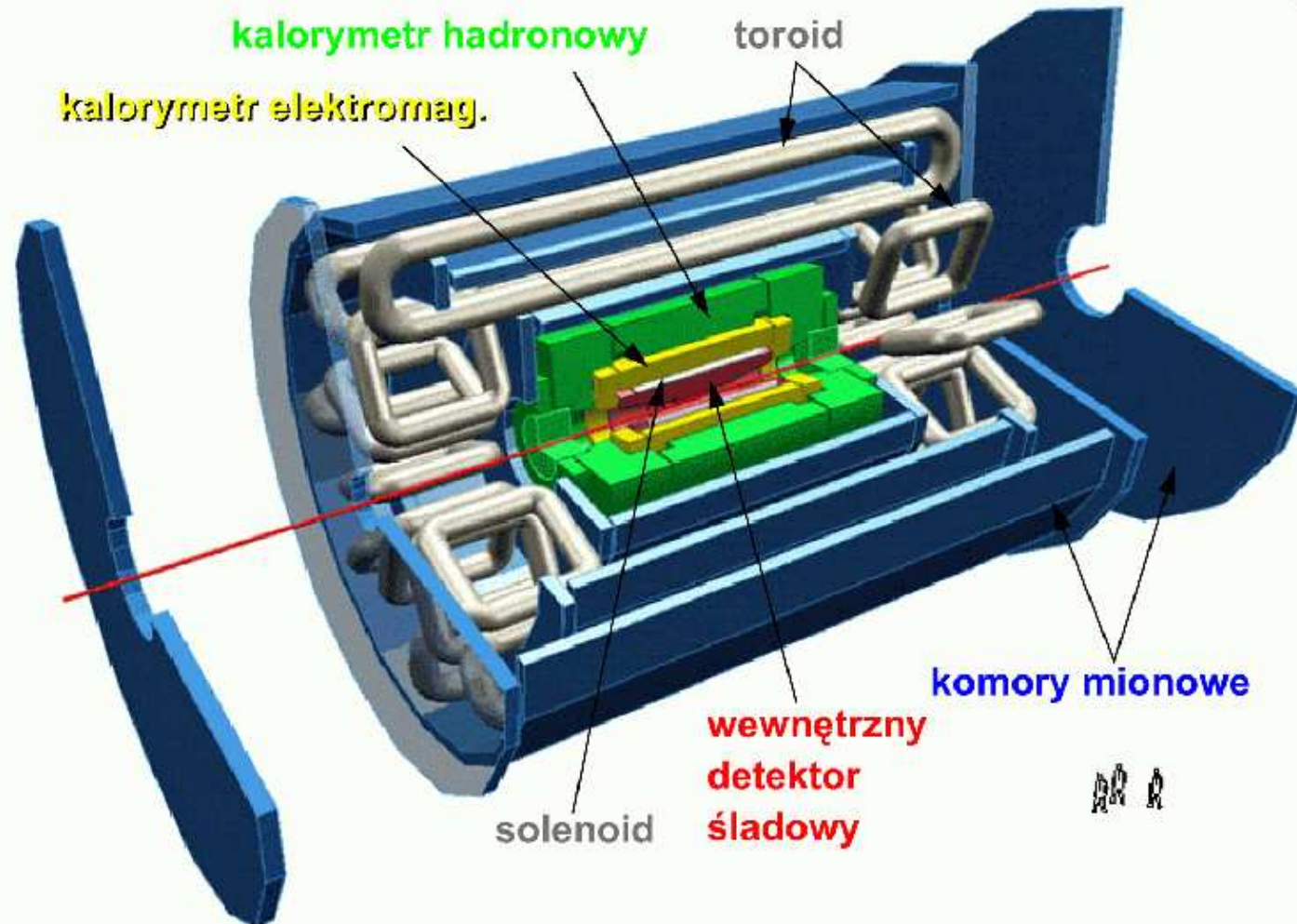
# Eksperymenty przy LHC

## Compact Muon Solenoid



# Eksperymenty przy LHC

## A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



# Stan przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2003



# Stan przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2004

UX15 Jura Tue Jun 15 17:00:02 2004



# Stan przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2004



# Stan przygotowań - ATLAS

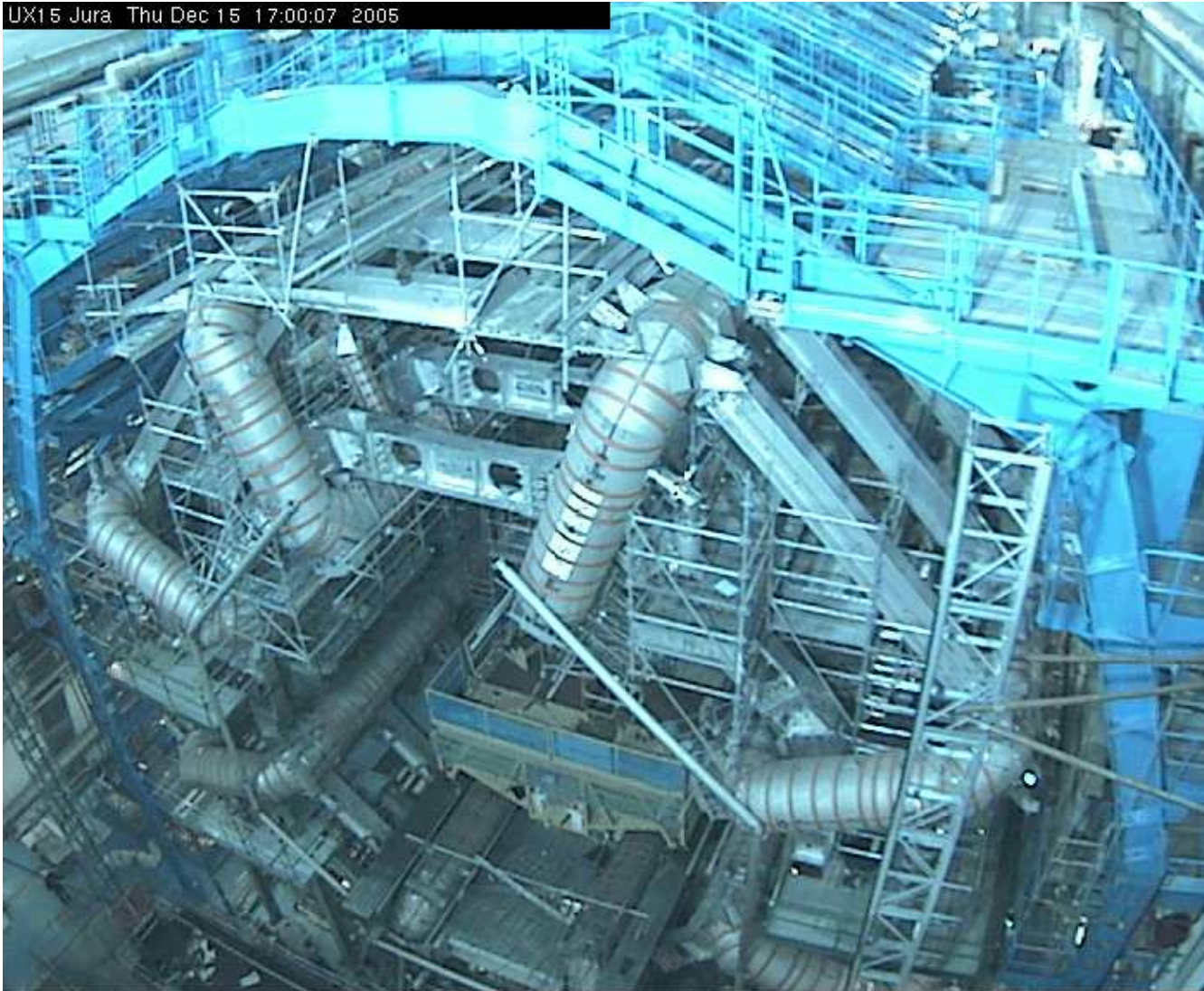
15 czerwca 2005



# Stan przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2005

UX15 Jura. Thu Dec 15 17:00:07 2005





# Stan przygotowań - ATLAS

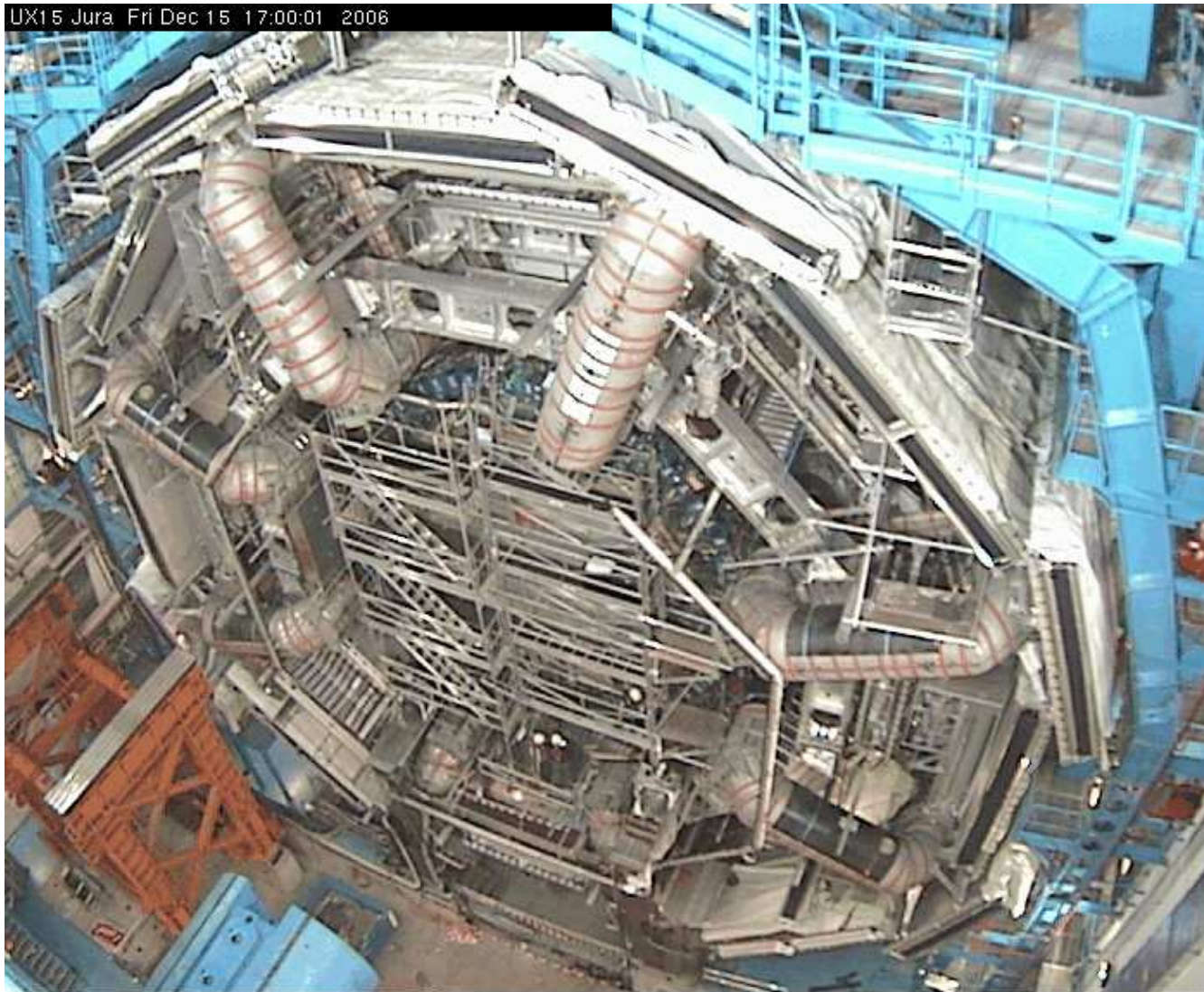
15 czerwca 2006

UX15 Jura Thu Jun 15 17:00:02 2006



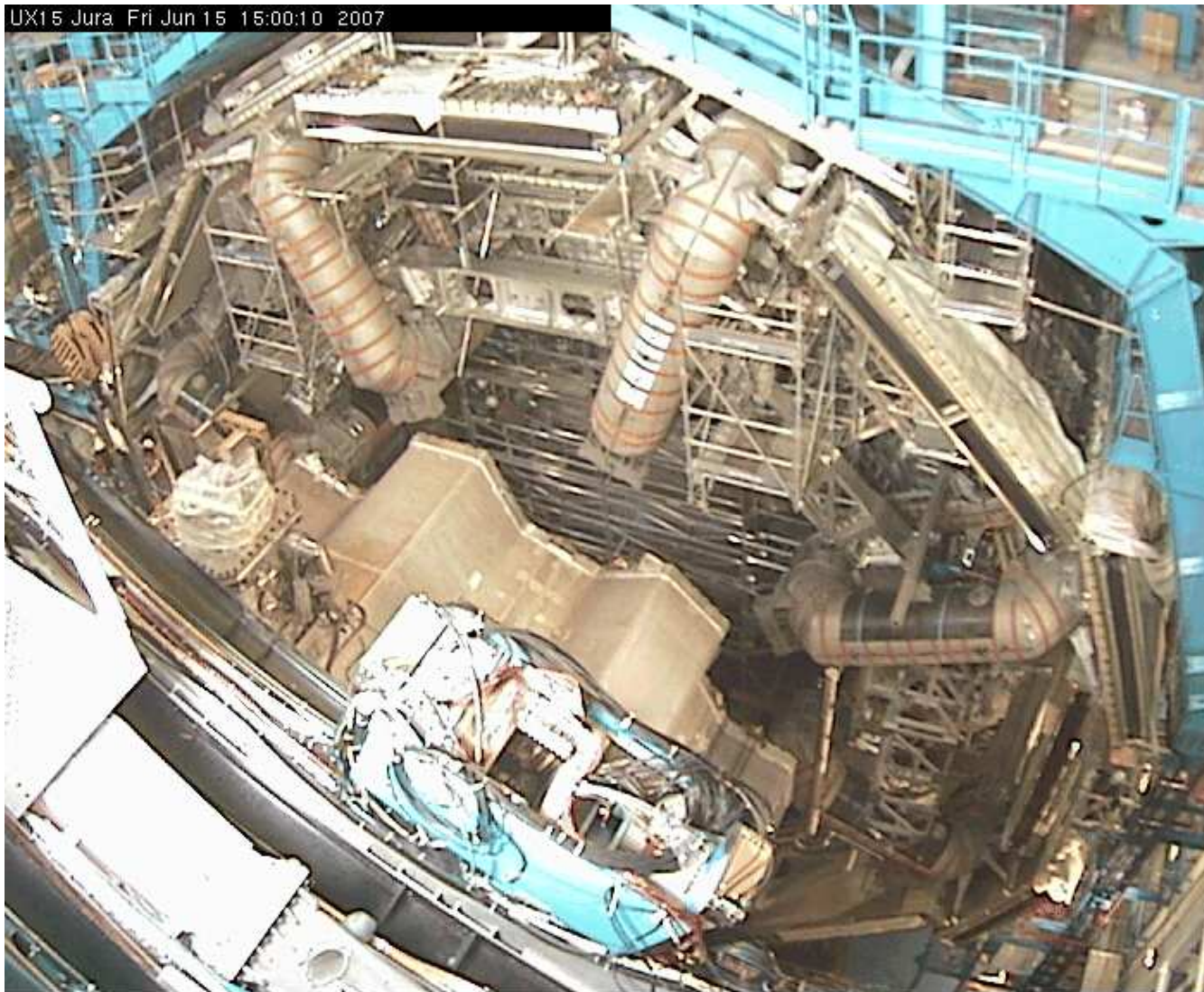
# Stan przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2006



# Stan przygotowań - ATLAS

15 czerwca 2007



# Stan przygotowań - ATLAS

15 grudnia 2007



# Stan przygotowań - ATLAS

23 luty 2008

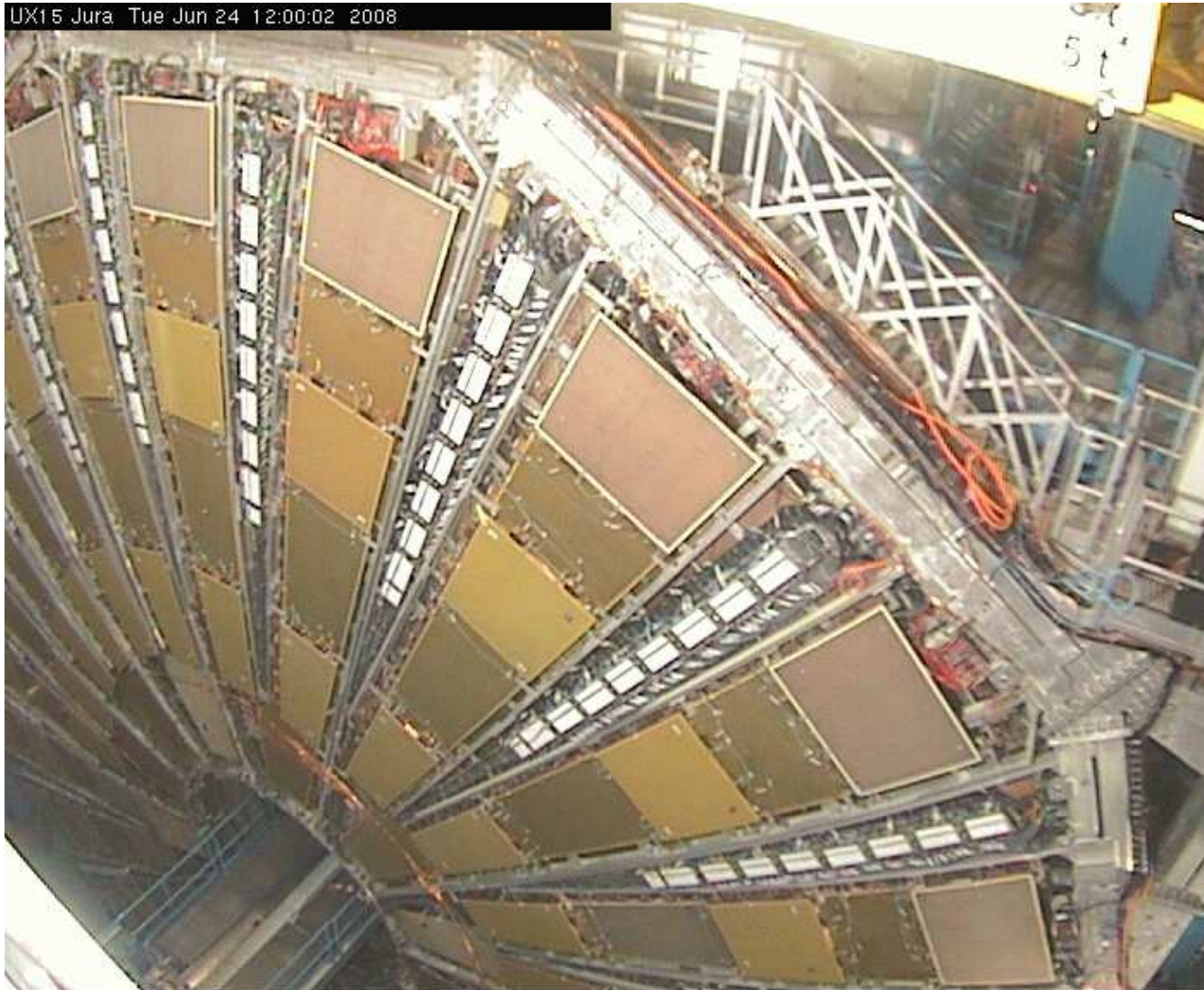
UX15 Jura Sat Feb 23 14:00:02 2008



# Stan przygotowań - ATLAS

24 czerwca 2008

UX15 Jura Tue Jun 24 12:00:02 2008



# Perspektywy

Uruchomienie LHC (jesień 2008) otworzy nowy rozdział w fizyce cząstek elementarnych i astrofizyce cząstek.

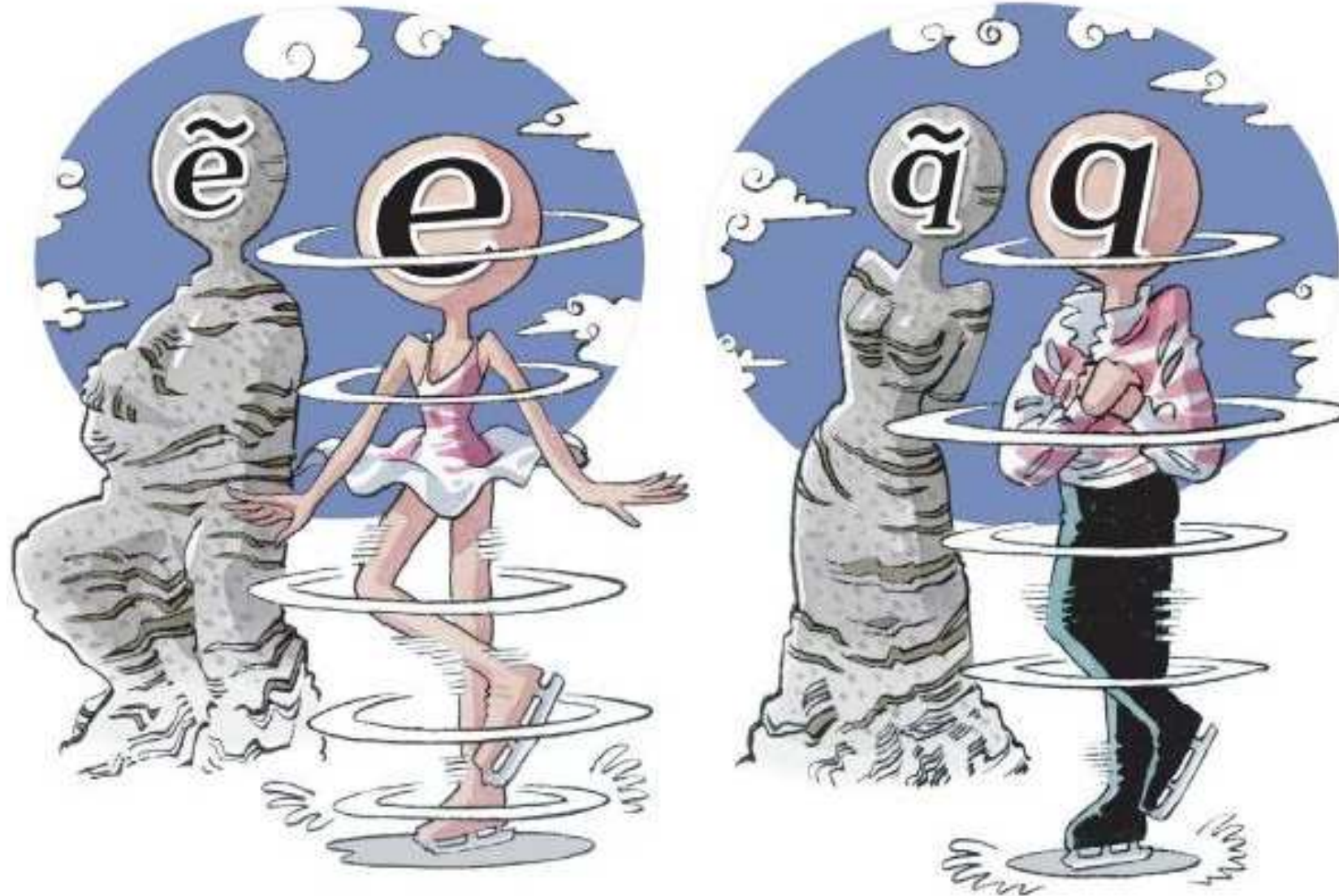
Wyniki wszystkich wcześniejszych eksperymentów mogą być dobrze opisane w ramach Modelu Standardowego.

Ale szereg przesłanek, w tym zwłaszcza obserwacje kosmologiczne, świadczą o tym, że musi istnieć jakaś “nowa fizyka”, nowe cząstki lub oddziaływania.

Jednym z głównych celów poszukiwań (obok tzw. cząstek Higgsa) są cząstki ciemnej materii...

# Na tropach ciemnej materii...

Cząstki supersymetryczne ?...





# Na tropach ciemnej materii...

Ukryte wymiary ?...



# Na tropach ciemnej materii...

A może będzie to “wyprawa w nieznanne”...



W roku 2008 rozpocznie się **nowa era** w fizyce i astrofizyce cząstek.  
**Wciąż możesz wziąć w tym udział !...**



**Czekamy także na Ciebie !**