

Ciemna strona Wszechświata

Nowoczesna fizyka w przyrodzie i technice

Uniwersytet Otwarty Uniwersytetu Warszawskiego



prof. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych
Instytut Fizyki Doświadczalnej, Wydział Fizyki U.W.

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania
- Podwójna natura cząstek: cząstki czy fale?

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania
- Podwójna natura cząstek: cząstki czy fale?
- Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania
- Podwójna natura cząstek: cząstki czy fale?
- Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i Ewolucja Wszechświata

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania
- Podwójna natura cząstek: cząstki czy fale?
- Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i Ewolucja Wszechświata
- Gęstość materii we Wszechświecie
Czy otacza nas ciemna materia?

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania
- Podwójna natura cząstek: cząstki czy fale?
- Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i Ewolucja Wszechświata
- Gęstość materii we Wszechświecie
Czy otacza nas ciemna materia?
- Mikrofalowe promieniowanie tła
Zdjęcie wielkiego wybuchu...

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania
- Podwójna natura cząstek: cząstki czy fale?
- Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i Ewolucja Wszechświata
- Gęstość materii we Wszechświecie
Czy otacza nas ciemna materia?
- Mikrofalowe promieniowanie tła
Zdjęcie wielkiego wybuchu...
- Ciemna energia
W jakim Wszechświecie żyjemy?

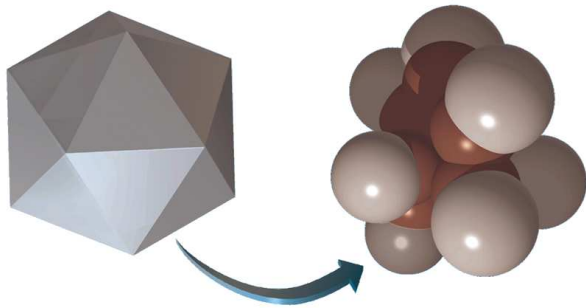
Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: cząstki i oddziaływania
- Podwójna natura cząstek: cząstki czy fale?
- Grawitacja w Ogólnej Teorii Względności
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i Ewolucja Wszechświata
- Gęstość materii we Wszechświecie
Czy otacza nas ciemna materia?
- Mikrofalowe promieniowanie tła
Zdjęcie wielkiego wybuchu...
- Ciemna energia
W jakim Wszechświecie żyjemy?
- Perspektywy

Wprowadzenie

Budowa materii

Cząsteczka

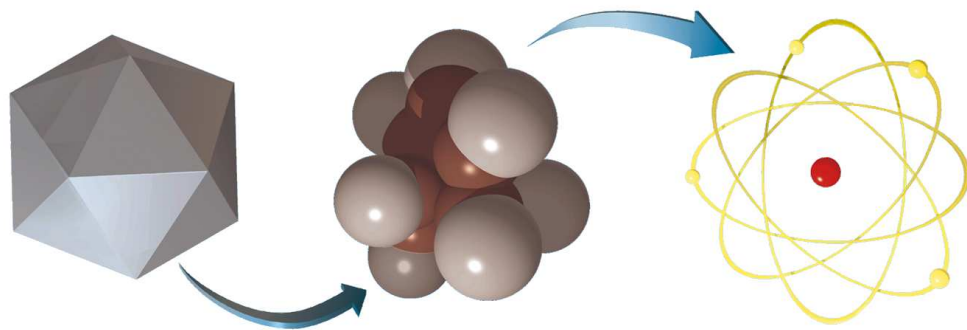


10^{-9} m

Wprowadzenie

Budowa materii

Atom

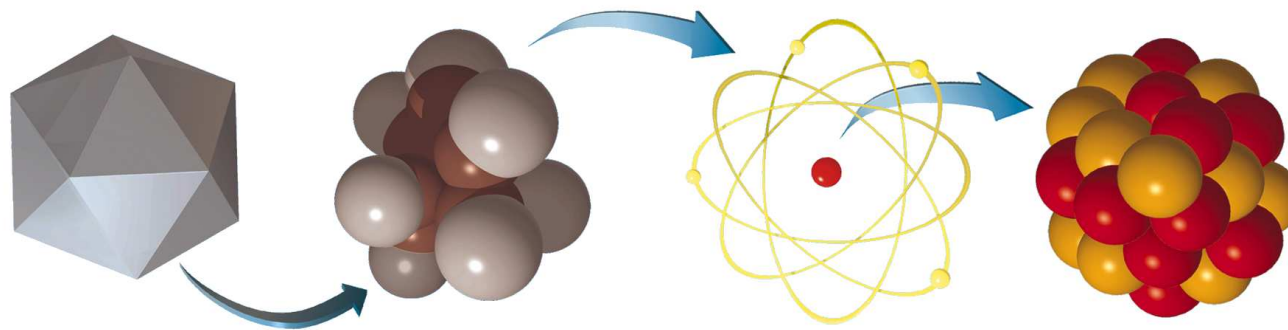


10^{-10} m

Wprowadzenie

Budowa materii

Jądro atomowe

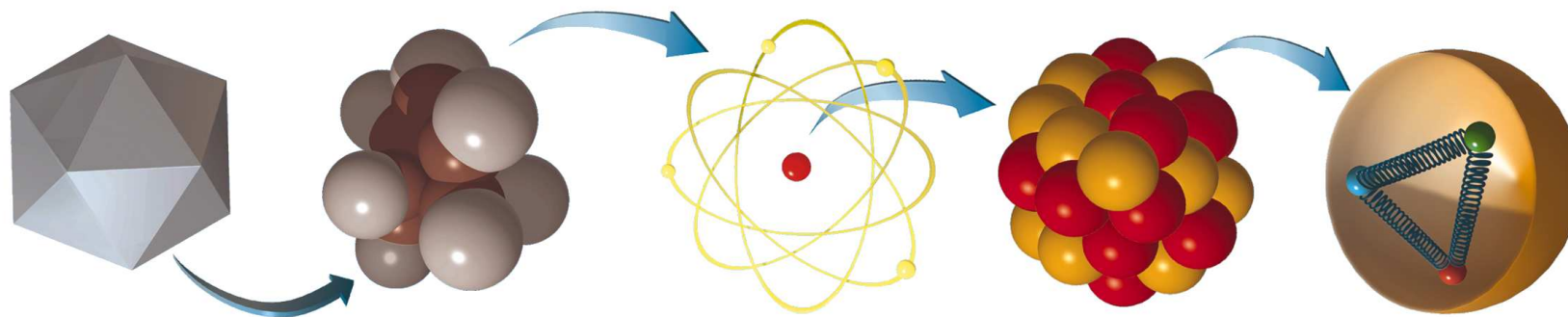


10^{-14} m

Wprowadzenie

Budowa materii

Nukleony

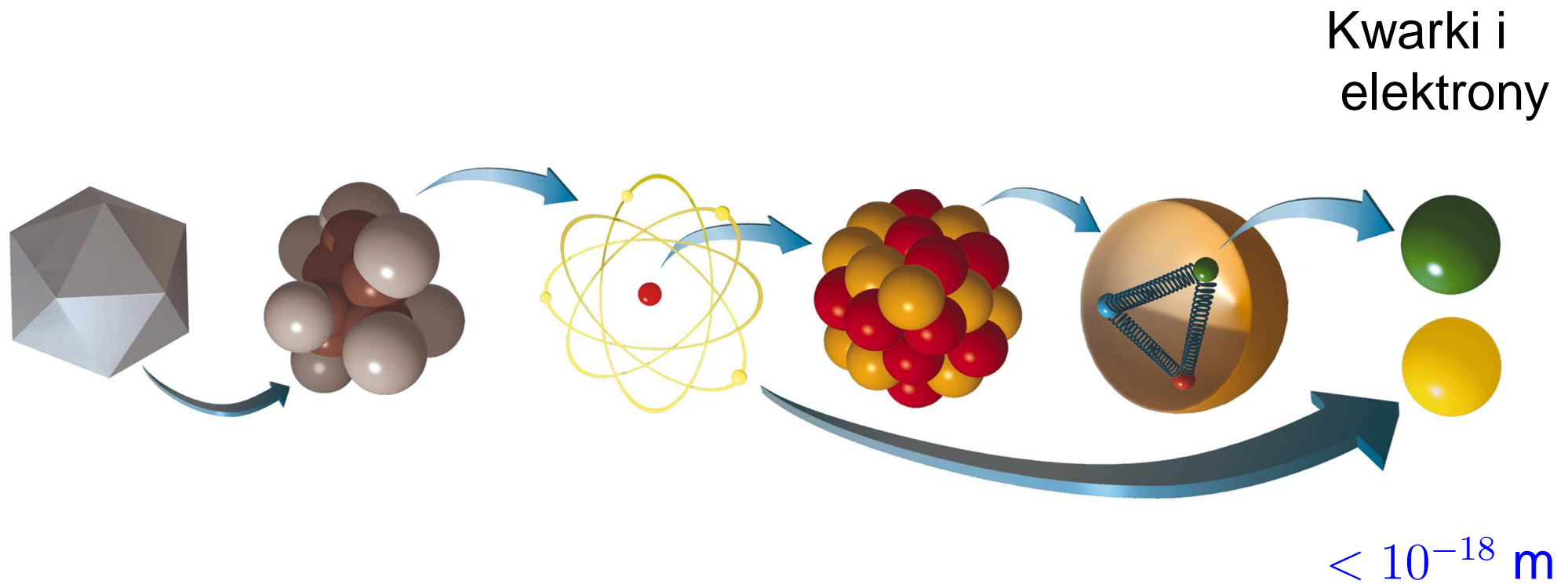


10^{-15} m



Wprowadzenie

Budowa materii



Model Standardowy

Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegiełki” (elektron oraz kwarki u i d)

	leptony		kwarki	
	e <i>elektron</i>		d <i>down</i>	u <i>up</i>
ładunek [e]	-1		-1/3	+2/3

Model Standardowy

Budowa materii

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

	leptony		kwarki	
	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

Model Standardowy

Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*
 Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <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

Model Standardowy

Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*
 Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

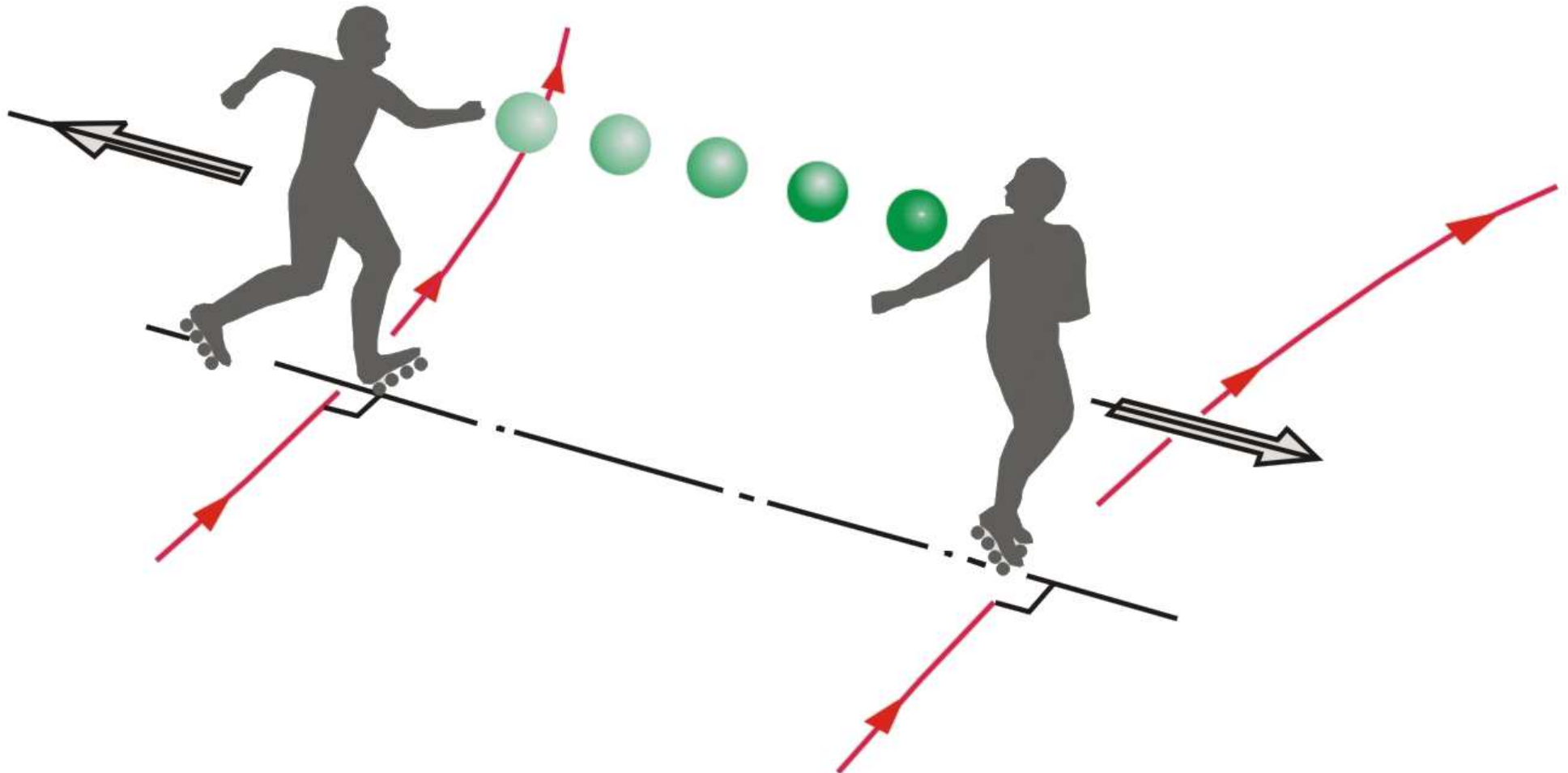
	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ **anty-fermiony** (kolejnych 12)

Model Standardowy

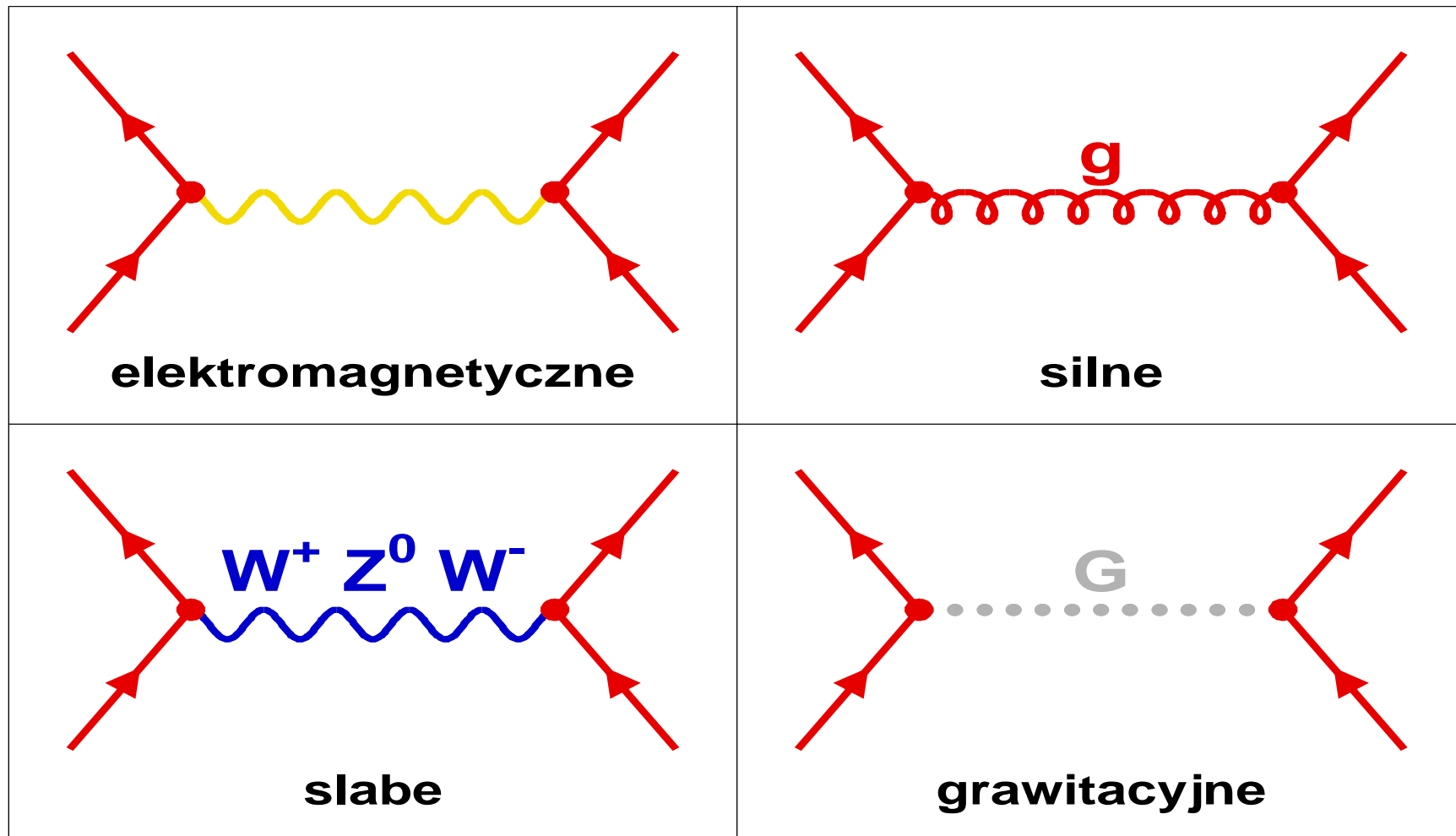
Oddziaływania

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	γ	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

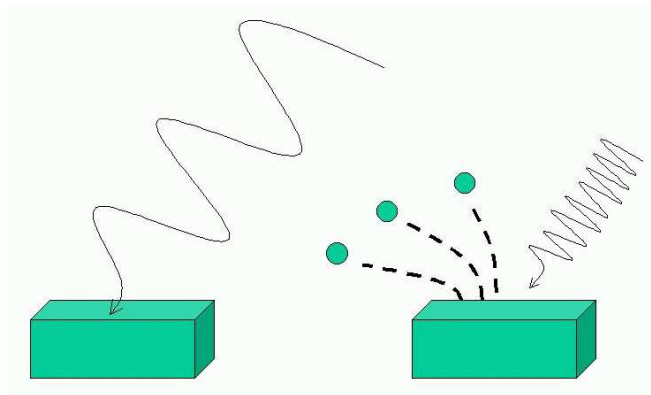
Nośniki oddziaływań uważamy za **punktowe** i **niepodzielne**, tak jak kwarki i leptyony...

Cząstki i fale

100 lat temu, w roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych **kwantów** energii, które dziś nazywamy **fotonami**.

Efekt fotoelektryczny

Hipoteza ta wyjaśniła zależność efektu fotoelektrycznego od długości fali światła

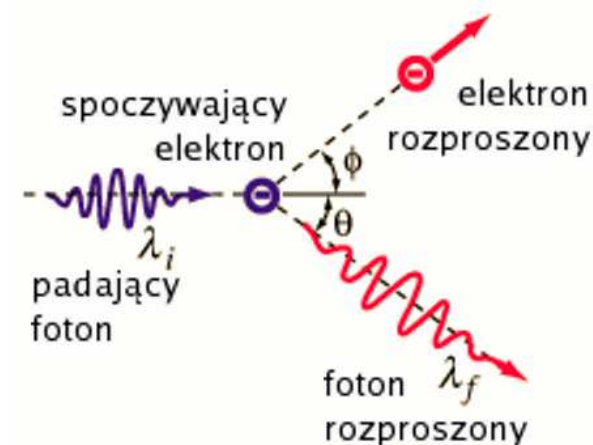


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

Rozpraszanie Comptona

W roku 1923 Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd** \Rightarrow zachowują się jak cząstki

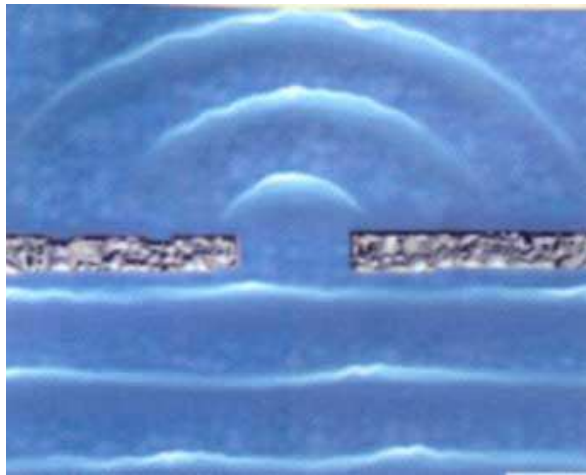


Cząstki i fale

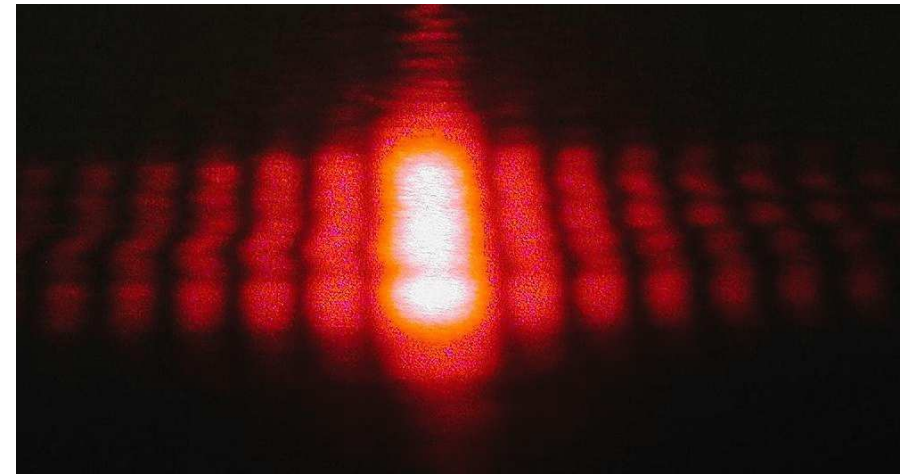
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.
Świadczą o tym m.in. zjawiskodyfrakcji i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

Fale na wodzie



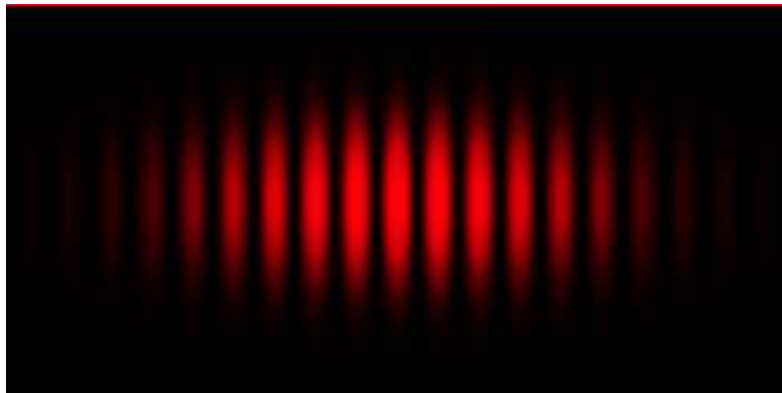
Światło



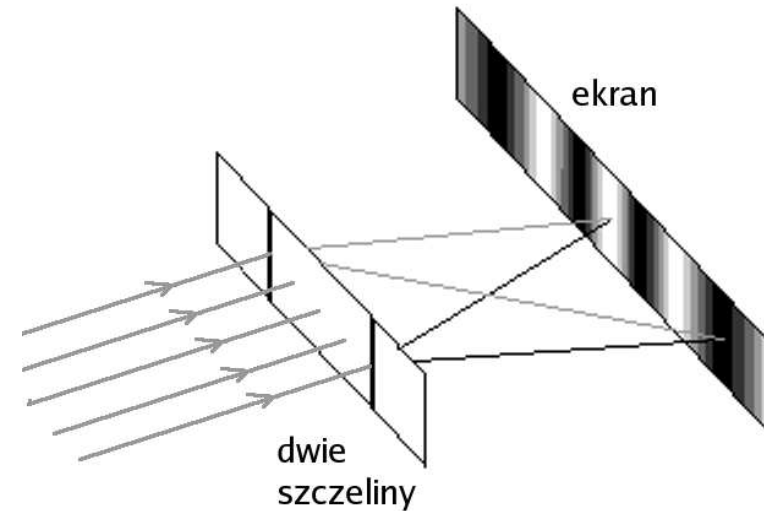
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



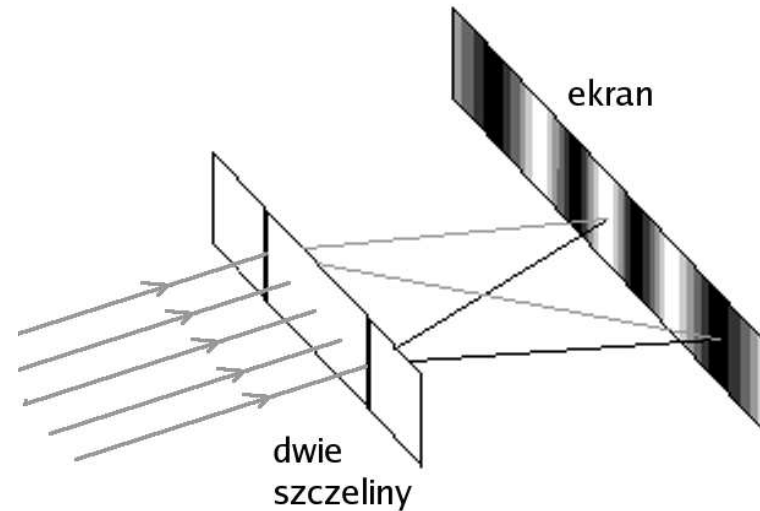
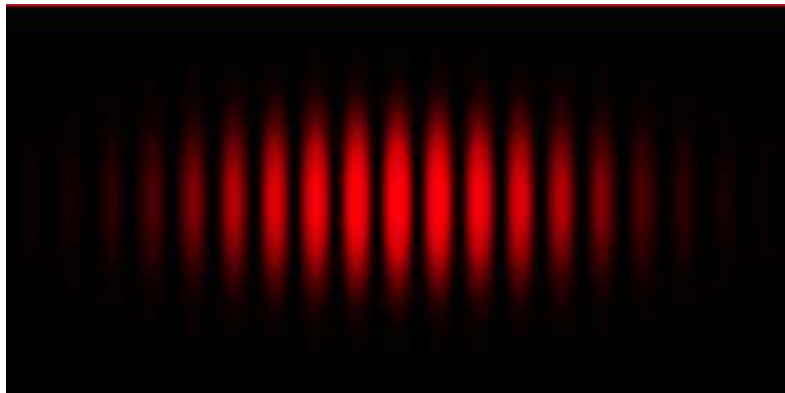
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**



Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**

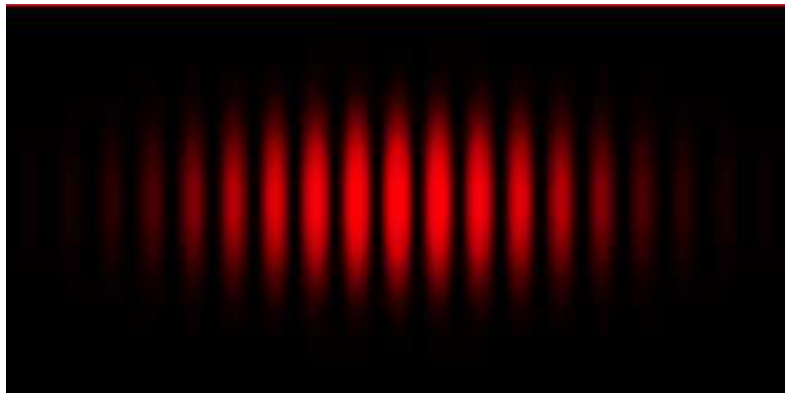
⇒ **prążki interferencyjne**

W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

Cząstki i fale

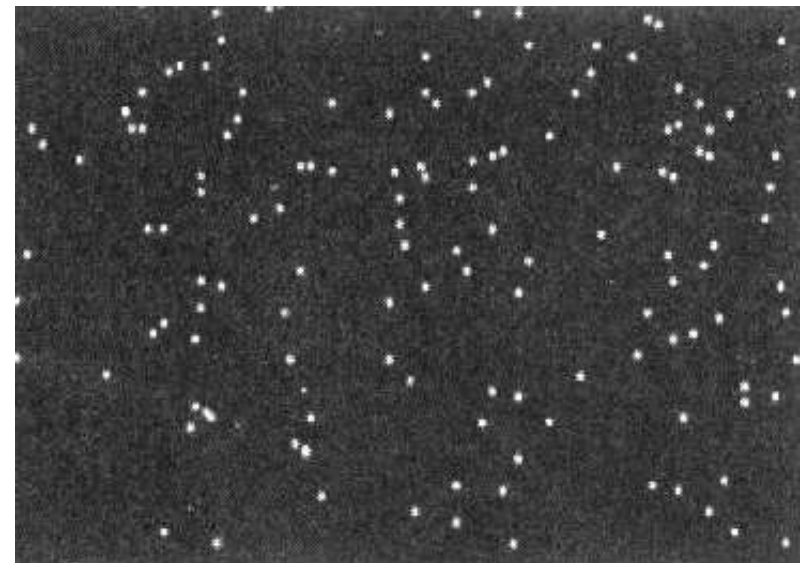
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

Elektrony

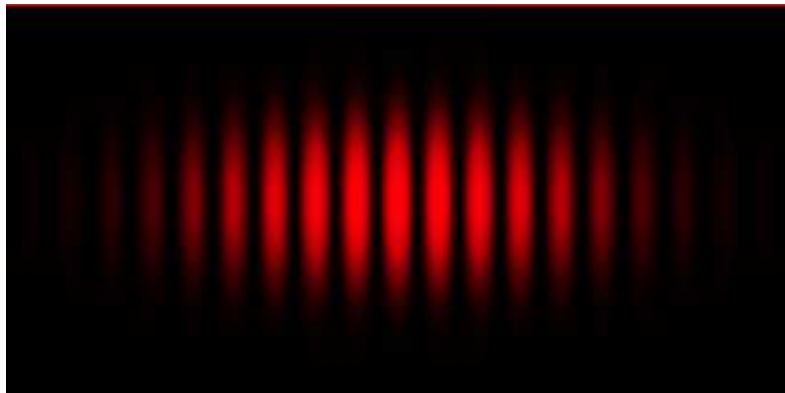


100 elektronów
rozkład przypadkowy ?

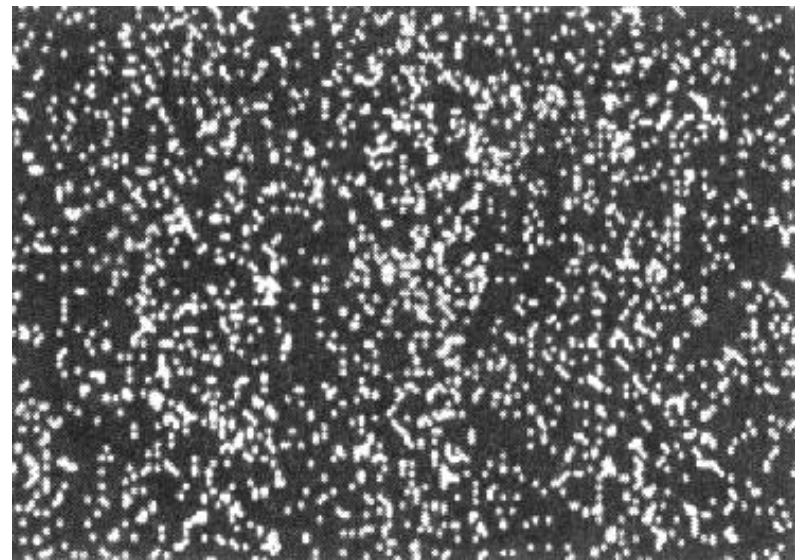
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



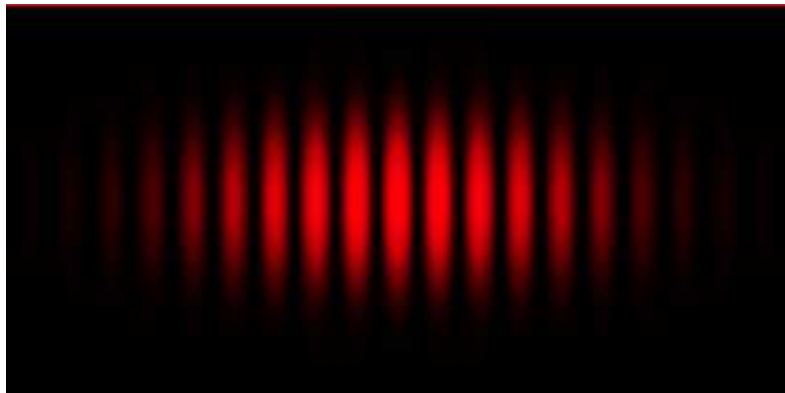
Złożenie **fal**
⇒ **prążki interferencyjne**

3000 elektronów

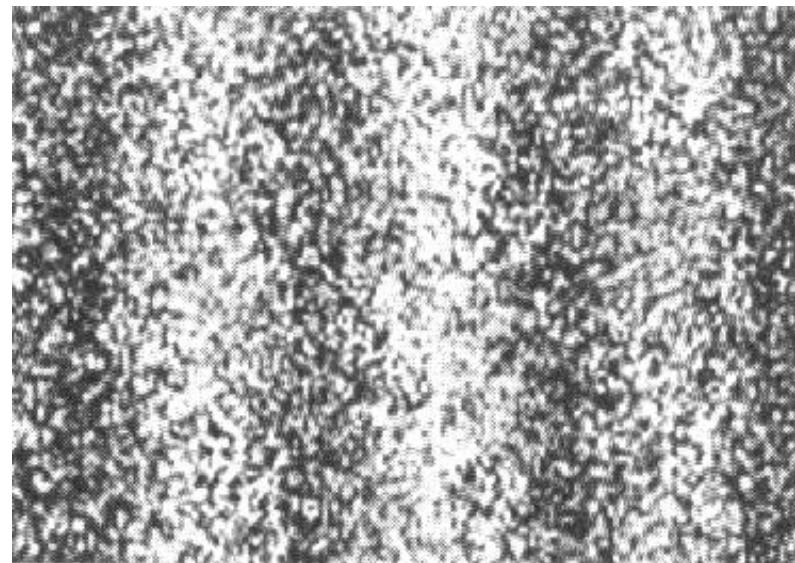
Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

Światło



Elektrony



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

70000 elektronów

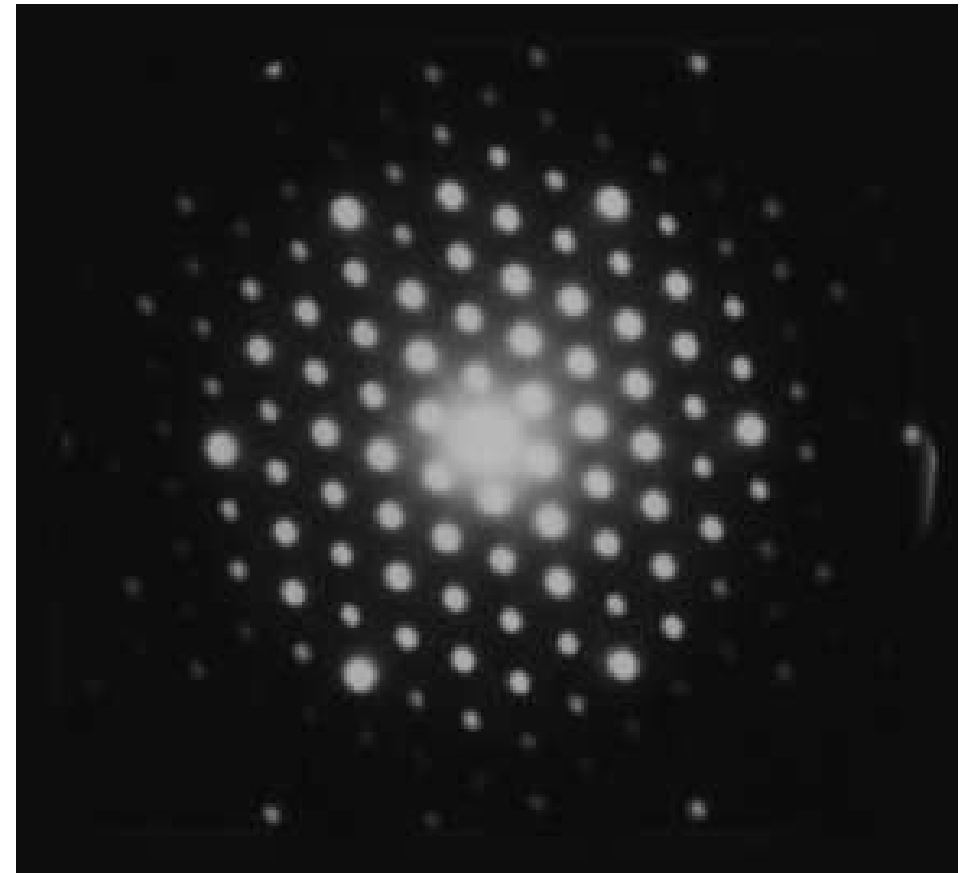
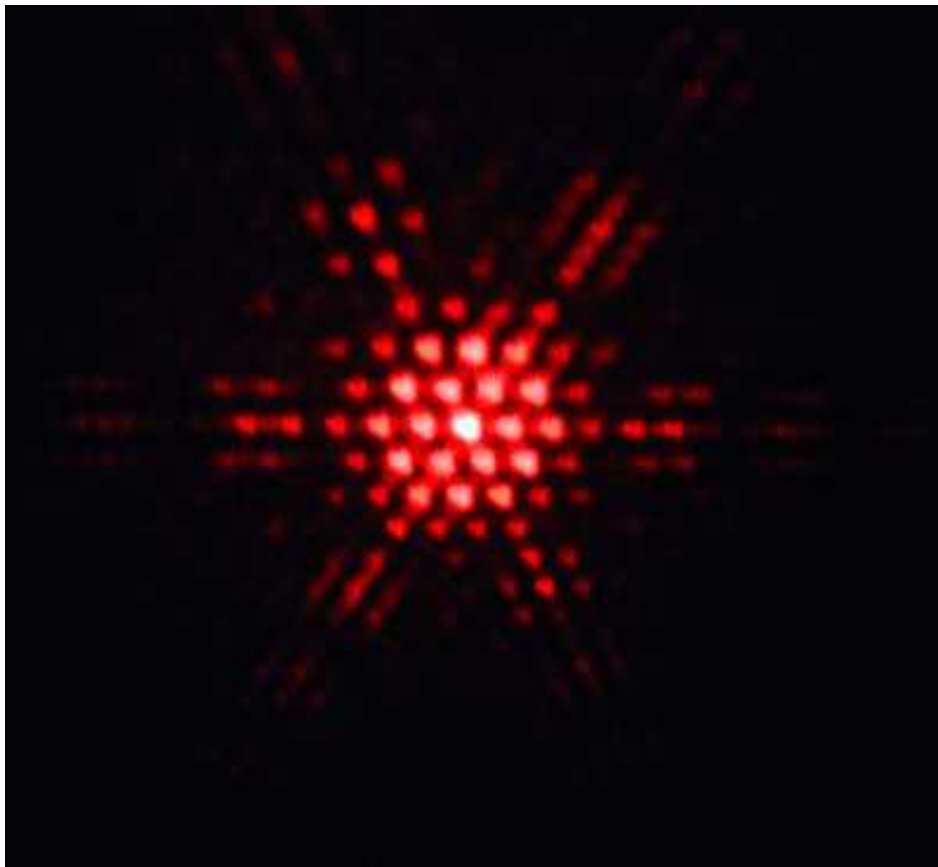
Elektrony też zachowują się jak fale !
Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.

Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

Światło

Elektrony

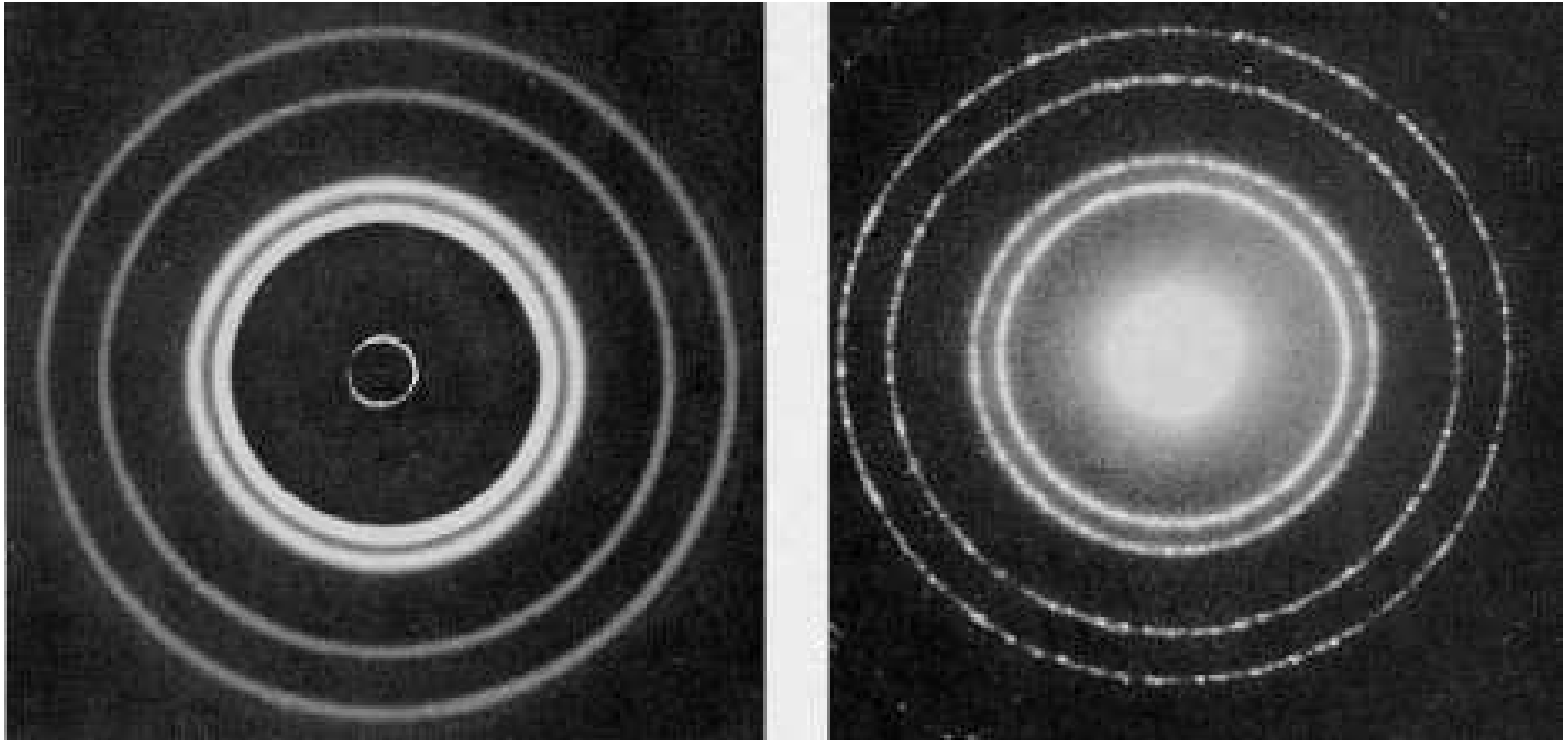


Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

Promieniowanie X

Elektrony



Cząstki i fale

Mechanika Newtona

Klasyczne **równania ruchu** pozwalają na ścisłe wyznaczenie zależności położenia ciała od czasu: $\vec{r}(t)$.

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (**np. planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Cząstki i fale

Mechanika Newtona

Klasyczne **równania ruchu** pozwalają na ścisłe wyznaczenie zależności położenia ciała od czasu: $\vec{r}(t)$.

Jeśli znamy **dokładnie** początkowe **położenia** i **prędkości** wszystkich elementów układu (**np. planet w Układzie Słonecznym**) potrafimy **przewidzieć** w jakim stanie będzie się znajdował w **przyszłości**.

Tego typu podejście zawodzi jednak w świecie subatomowym!

Falowa natura cząstek zmusza nas do rezygnacji z podejścia deterministycznego...

Cząstki i fale

Mechanika kwantowa

Mechanika kwantowa opisuje cząstki przez tzw. **funkcje falowe** $\psi(\vec{r}, t)$

Ruch cząstki to rozchodzenie się **“fal prawdopodobieństwa”**.

Cząstki i fale

Mechanika kwantowa

Mechanika kwantowa opisuje cząstki przez tzw. **funkcje falowe** $\psi(\vec{r}, t)$

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fal prawdopodobieństwa**”.

Amplituda tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

Cząstki i fale

Mechanika kwantowa

Mechanika kwantowa opisuje cząstki przez tzw. **funkcje falowe** $\psi(\vec{r}, t)$

Ruch cząstki to rozchodzenie się “**fal prawdopodobieństwa**”.

Amplituda tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

Dopiero dedykowany **pomiar** może rozstrzygnąć gdzie znajduje się cząstka. **Wcześniej możemy tylko "zgadywać"...**

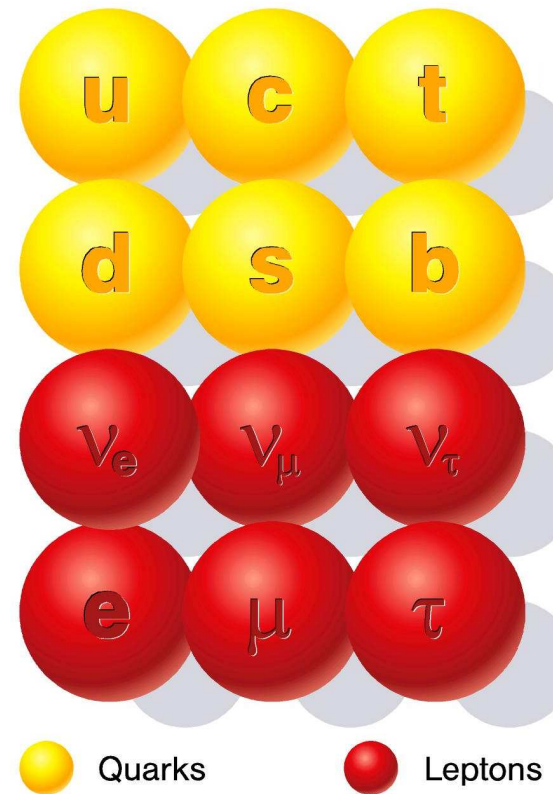
Teoria pozwala nam opisać rozchodzenie się (tzw. ewolucję) “**fal prawdopodobieństwa**” i dzięki temu wnioskować o możliwym zachowaniu cząstek.

Nie możemy **dowolnie dokładnie** poznać stanu cząstki, np. jednocześnie zmierzyć położenie i pęd - **zasada nieoznaczoności**.

Model Standardowy

Podsumowanie

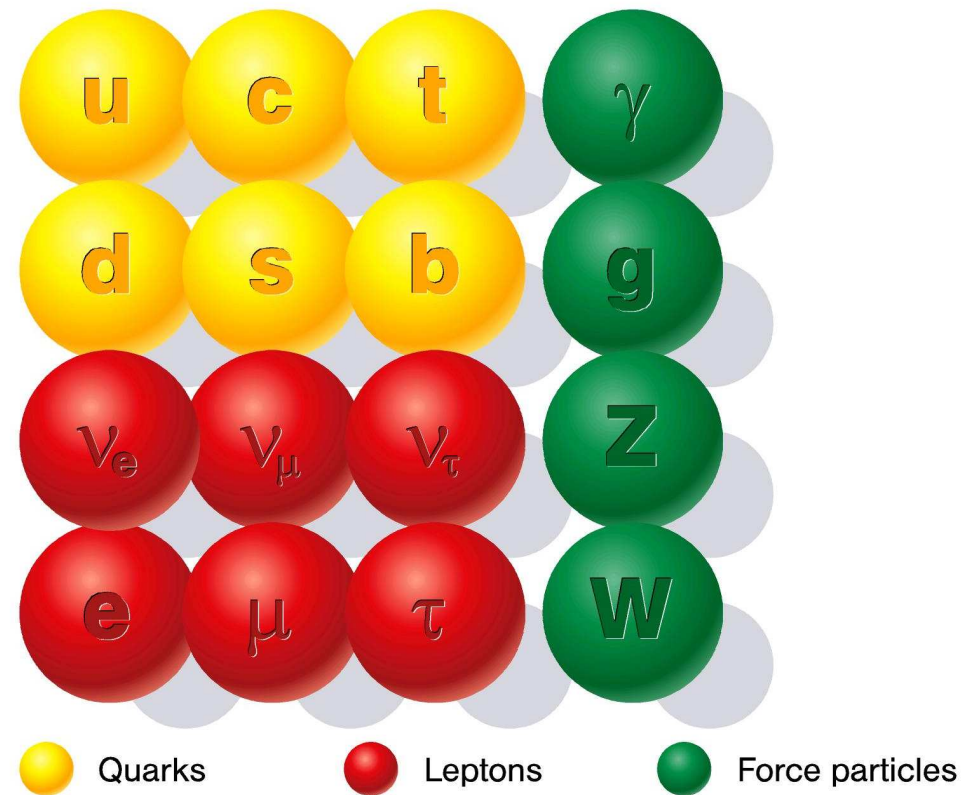
- cząstki materii
kwarki i leptony



Model Standardowy

Podsumowanie

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0

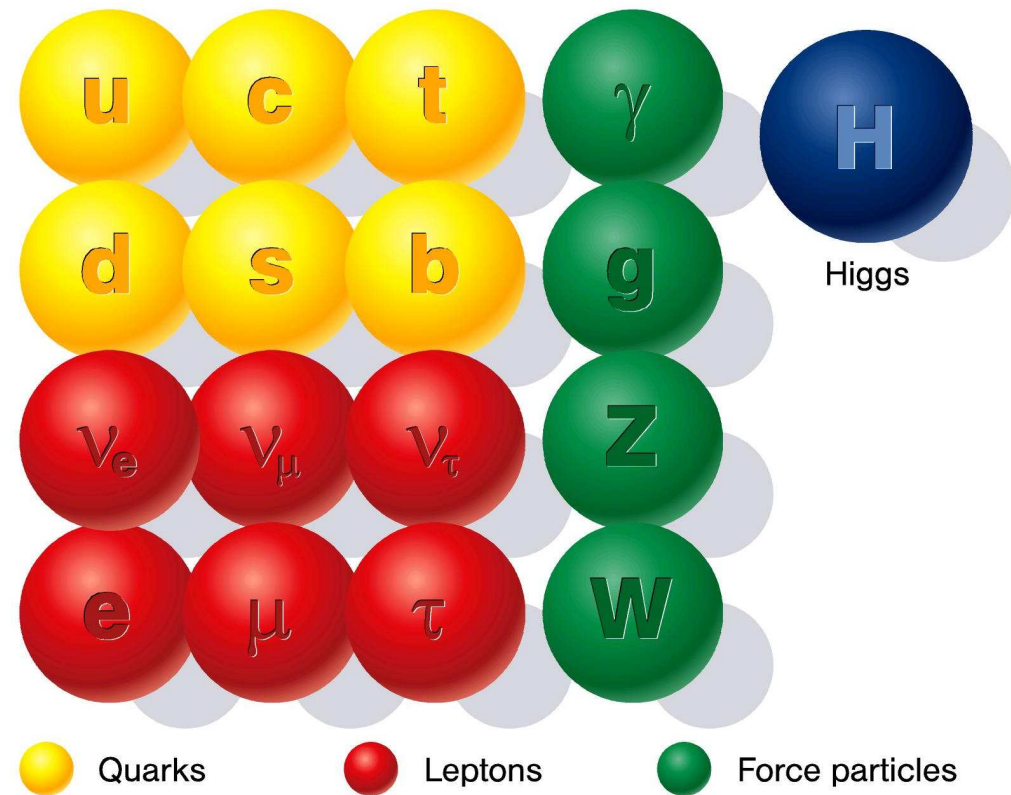


Model Standardowy

Podsumowanie

- cząstki materii
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań
 γ , g , W^\pm i Z^0
- bozon Higgsa
konieczny dla
spójności modelu

“Nadaje masy”
wszystkim cząstkom

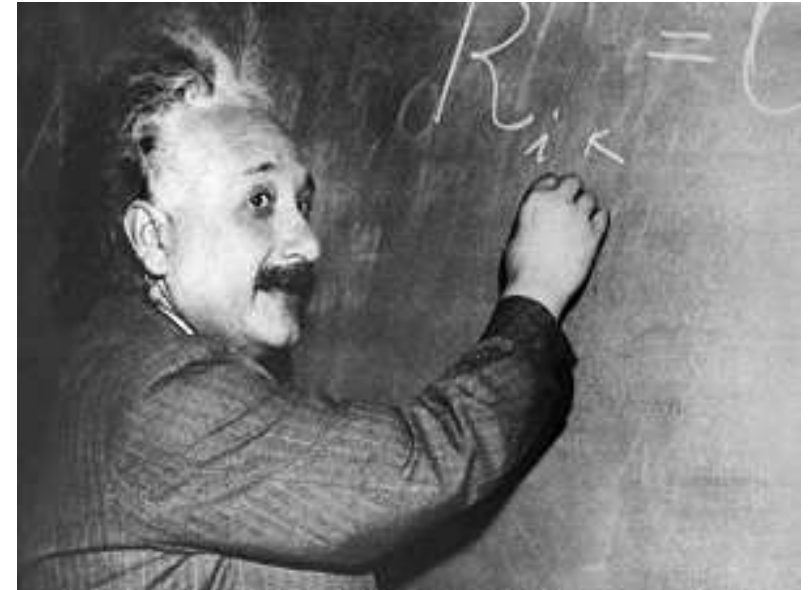


Grawitacja

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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

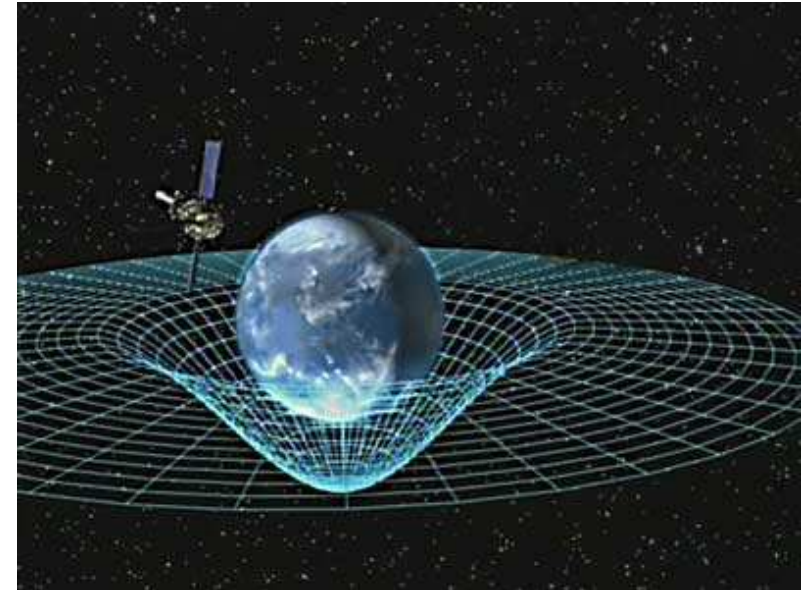


Grawitacja

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



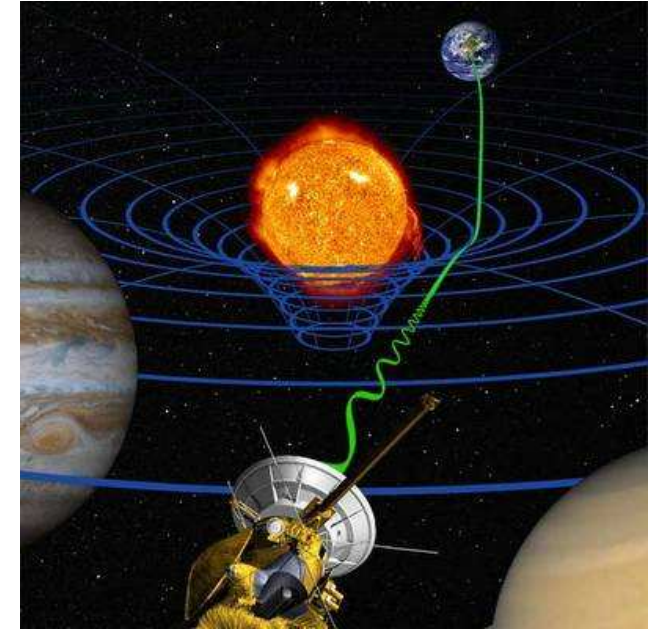
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.
Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii.

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.

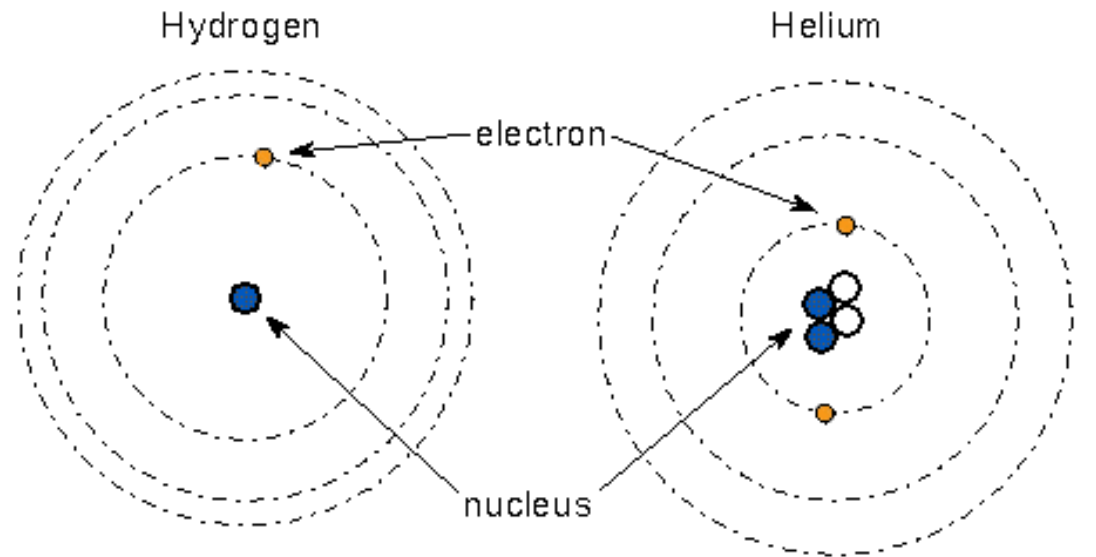
Problem teorii Einsteina: nie istniało statyczne rozwiązanie.

Aby uratować statyczny Wszechświat Einstein dołożył do swoich równań **stałą kosmologiczną - Λ**

Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



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

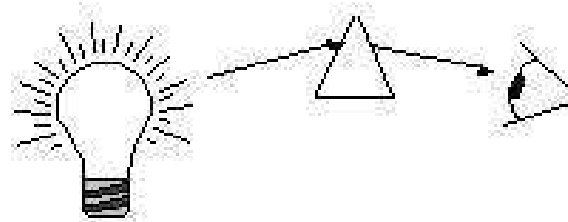
The structure of the atoms for the two most common elements in nature. Different elements have different number of **protons** and different layouts of their energy levels.



Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

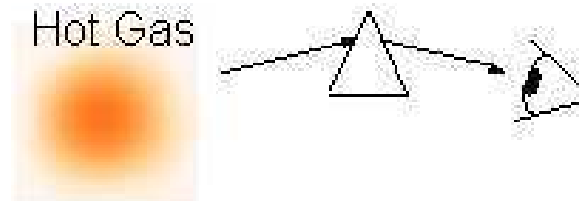


Continuum Spectrum

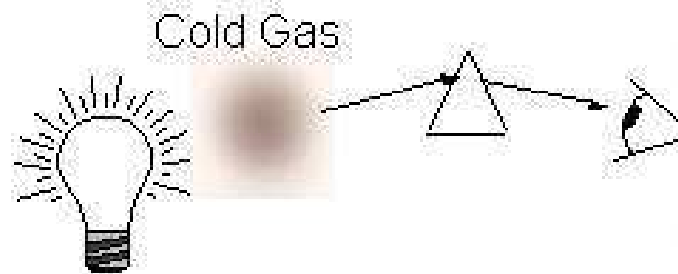
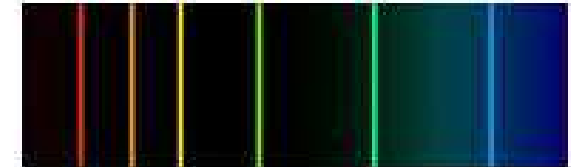


Linie absorpcyjne

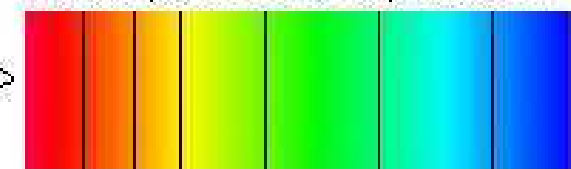
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



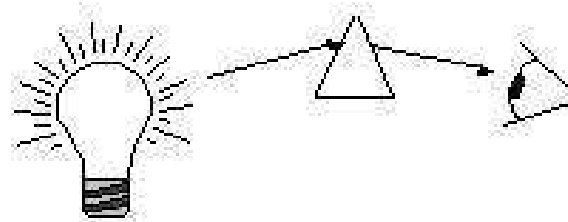
Absorption Line Spectrum



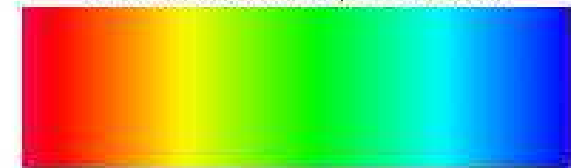
Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

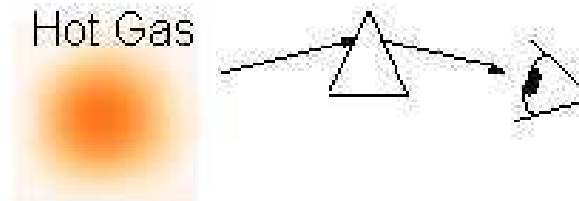


Continuum Spectrum

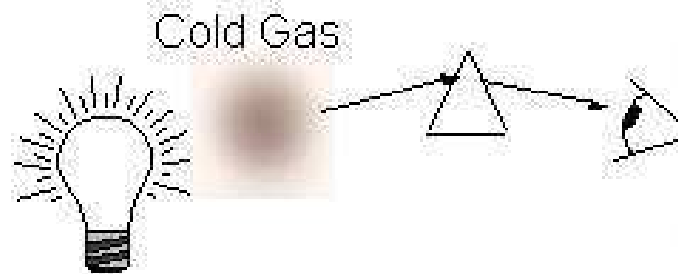
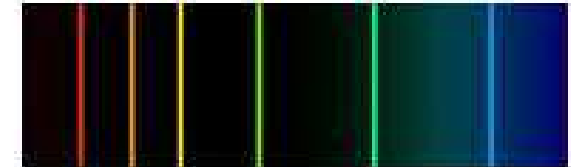


Linie absorpcyjne

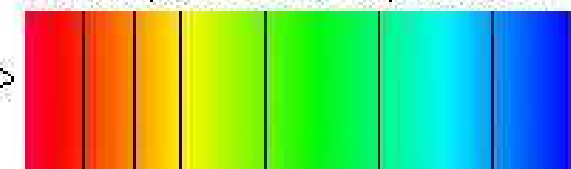
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



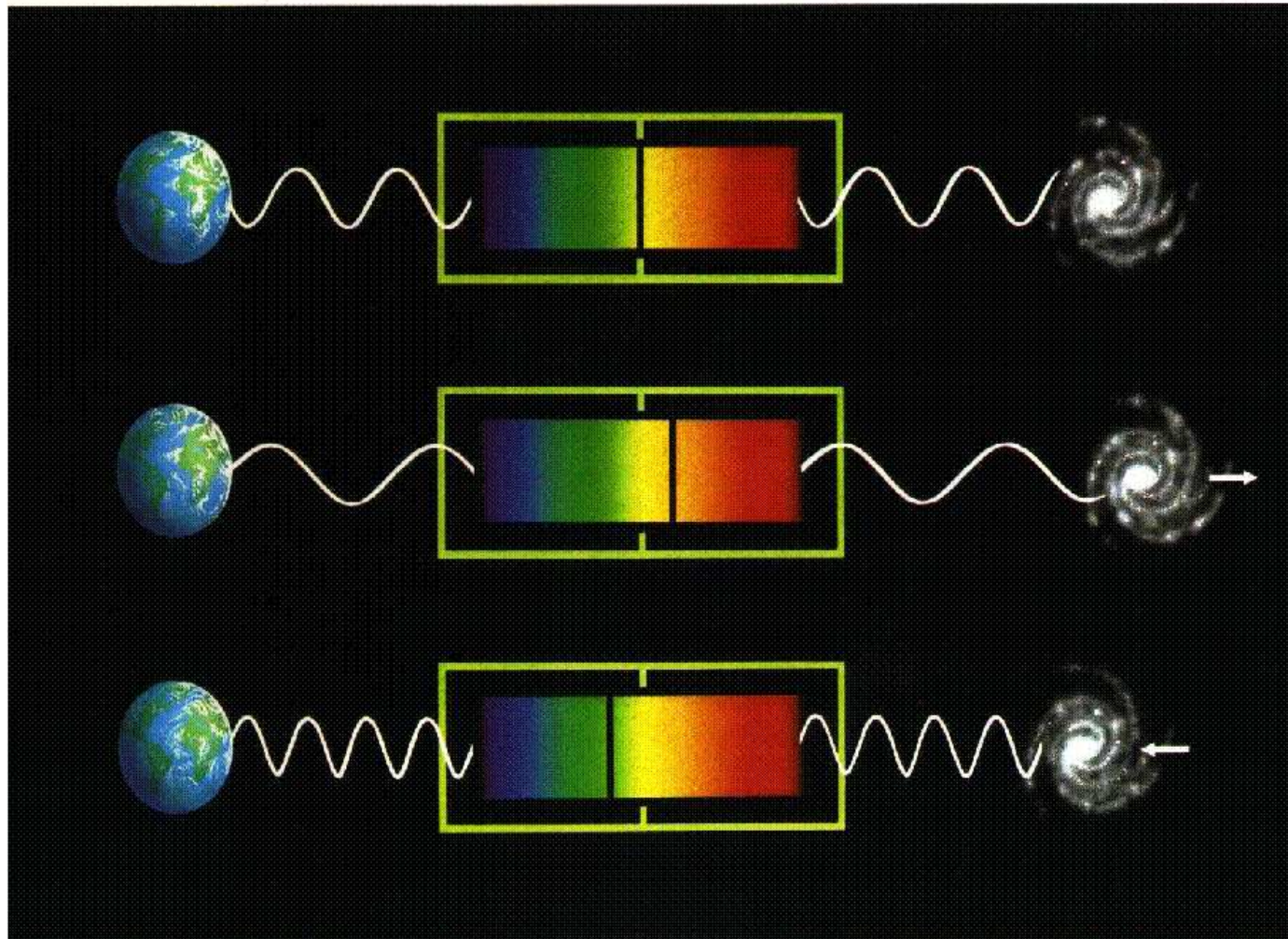
Absorption Line Spectrum



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

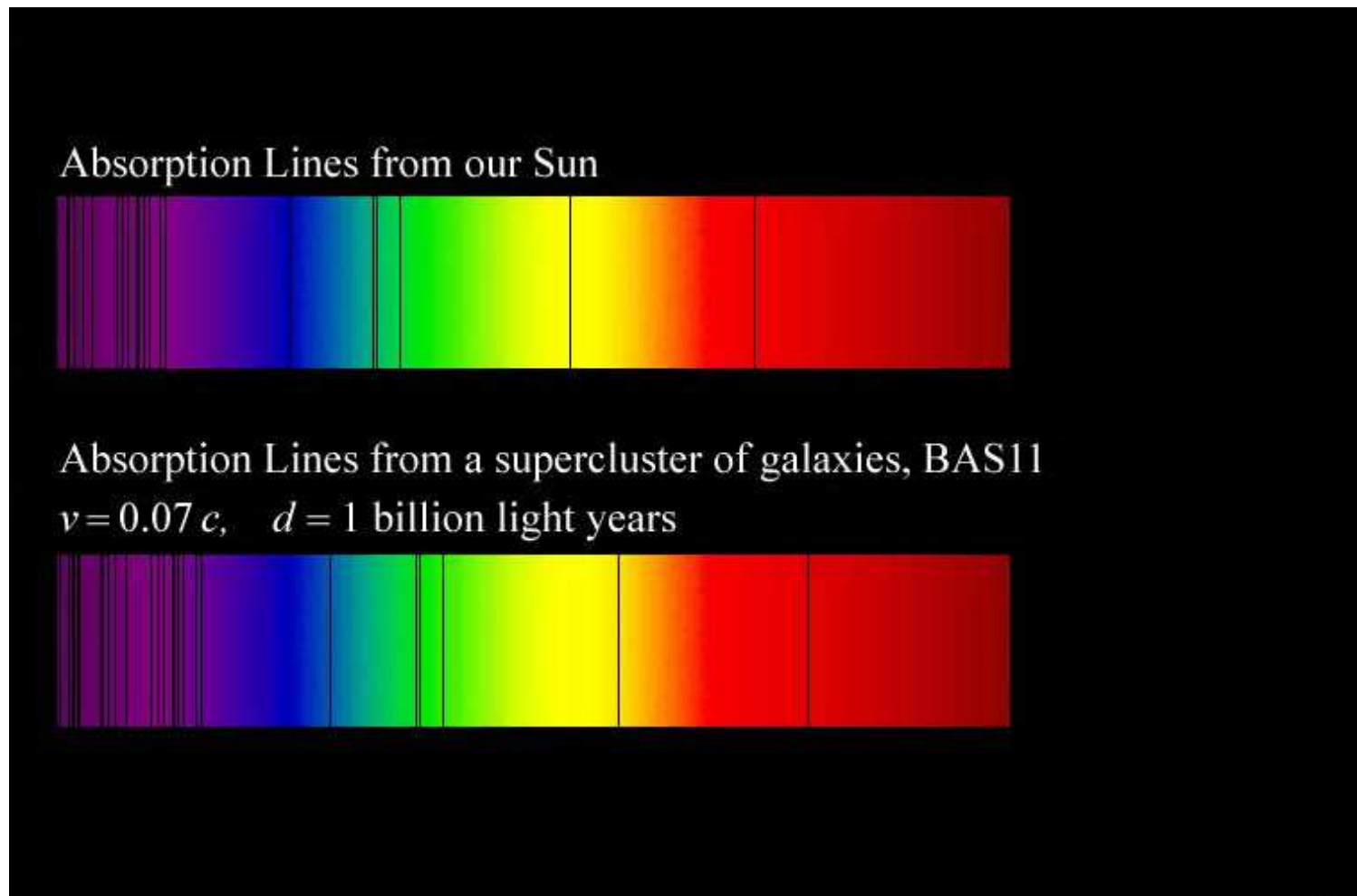
Efekt Dopplera dla światła

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**

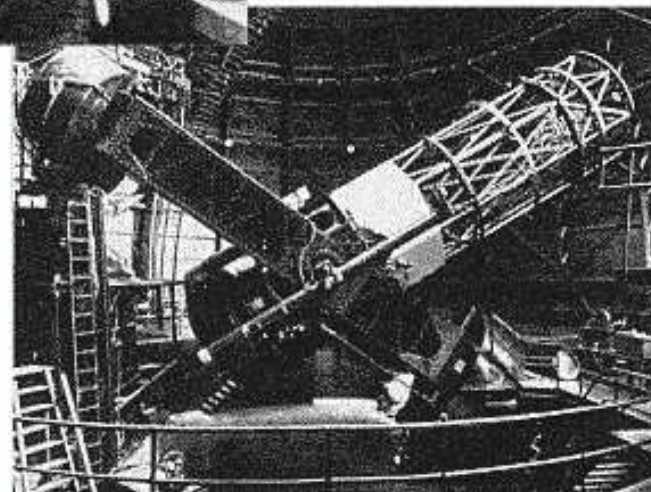
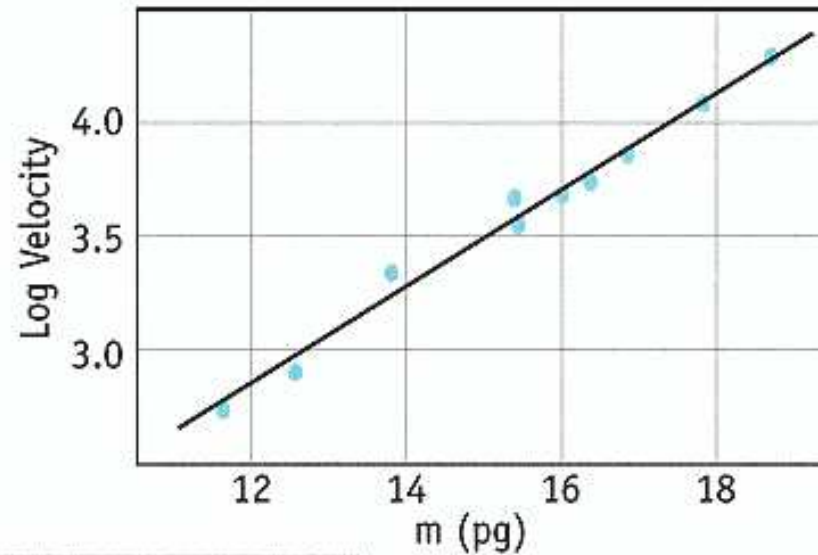


Prawo Hubble (1929)

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope



Prawo Hubble'a (1929)

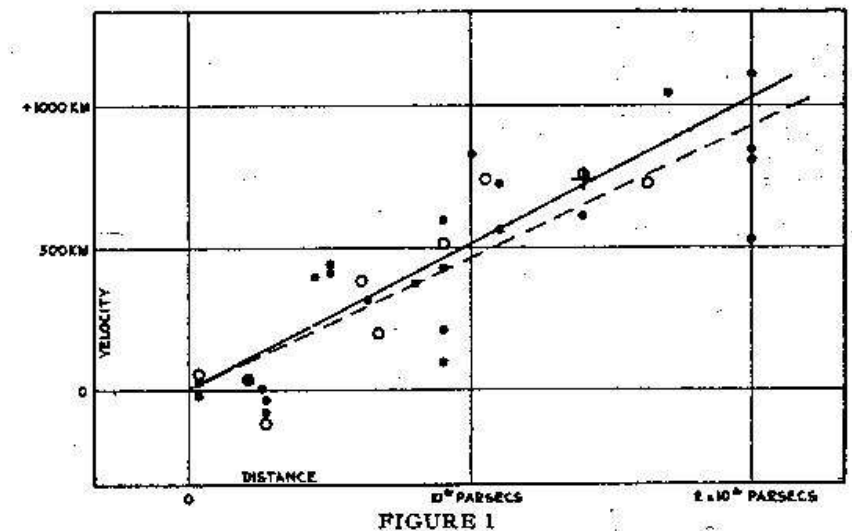
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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:

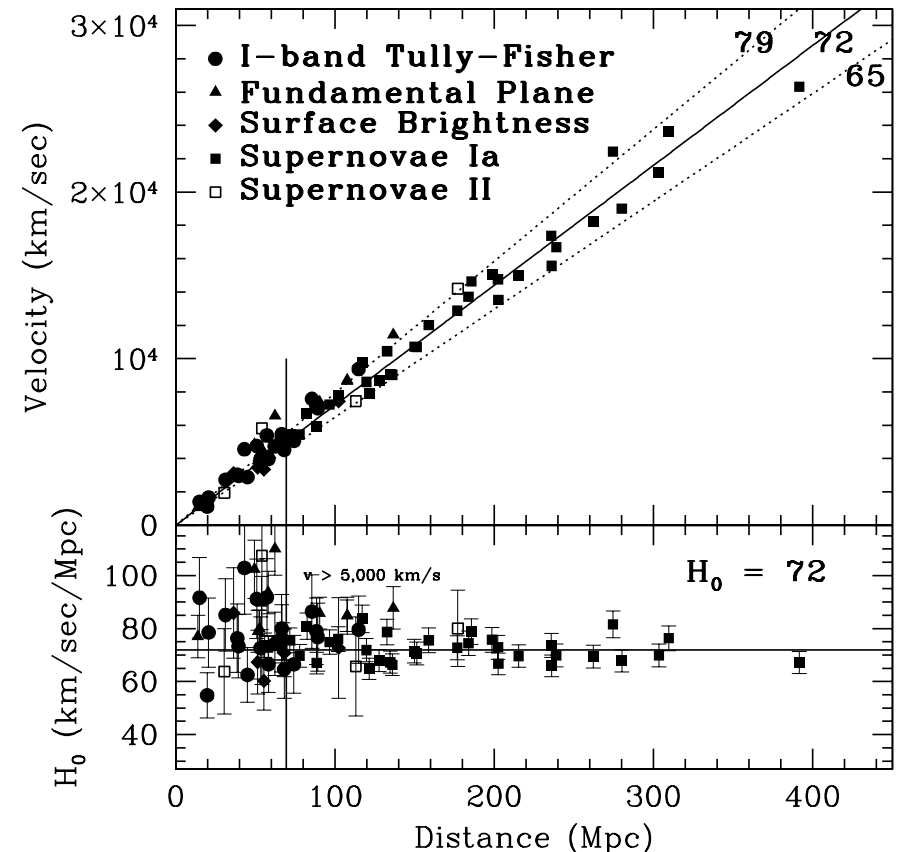
$$v = H \cdot r$$

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".

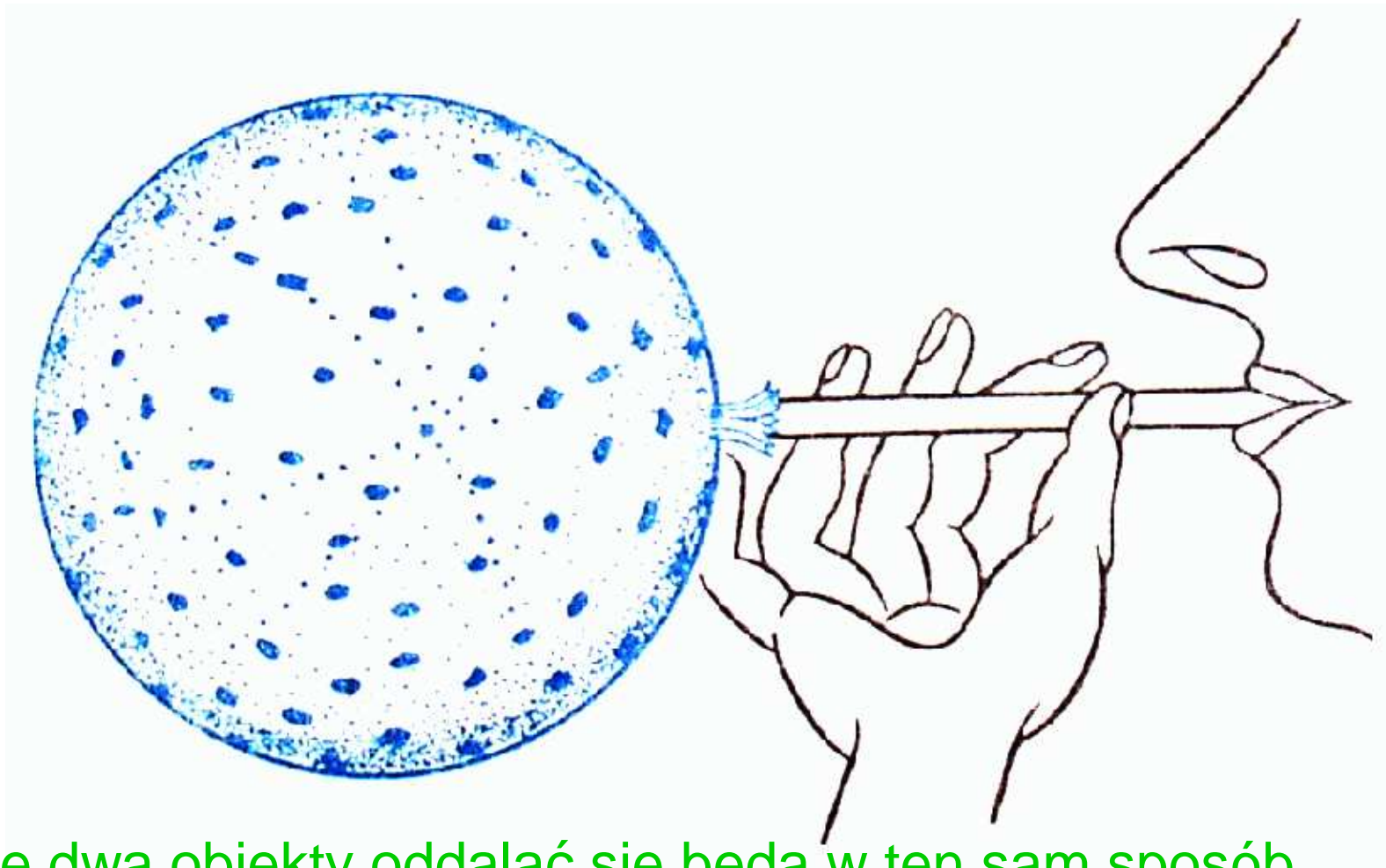
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

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



Prawo 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 punktowego skupiska nieskończonej energii...

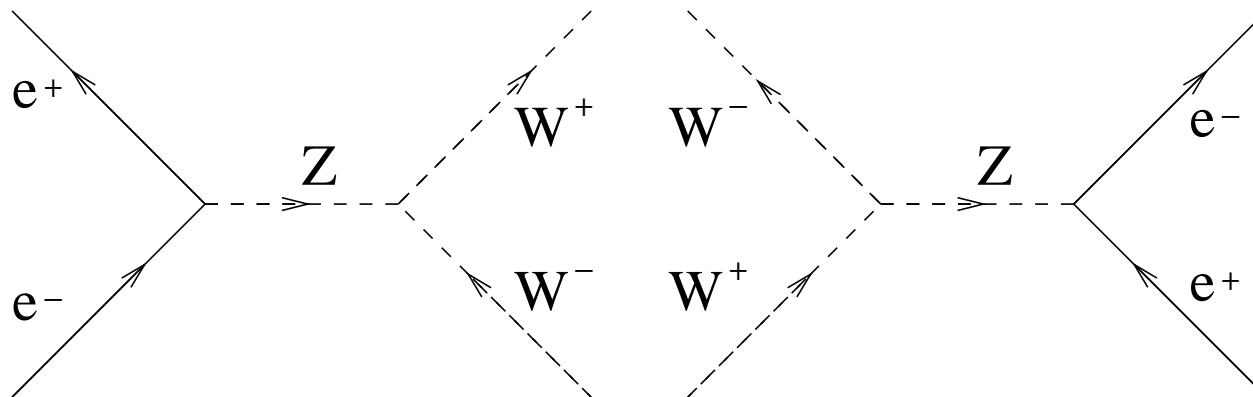
Ewolucja Wszechświata

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.

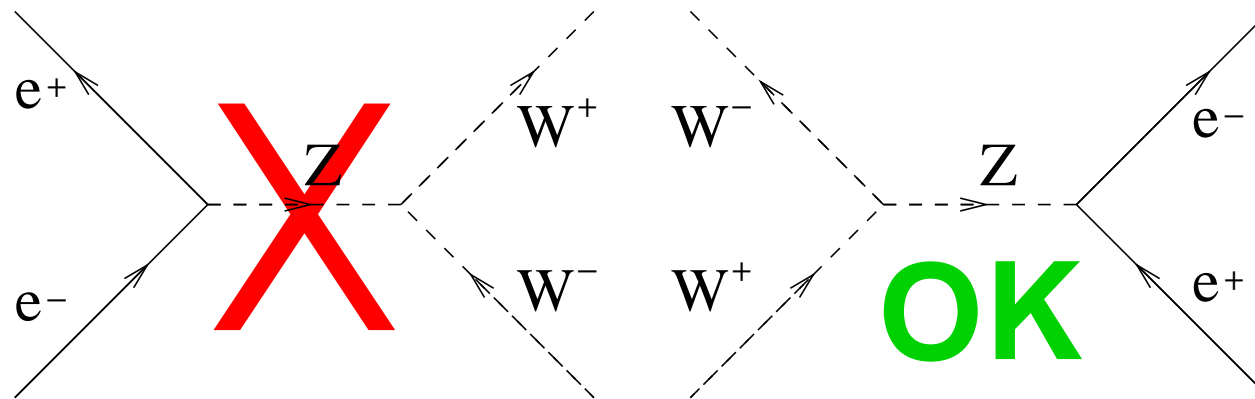
Wszystkie cząstki elementarne znajdowały się w **stanie równowagi**, gdyż nieustannie zachodziły procesy **anihilacji i kreacji**.



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

Ewolucja Wszechświata

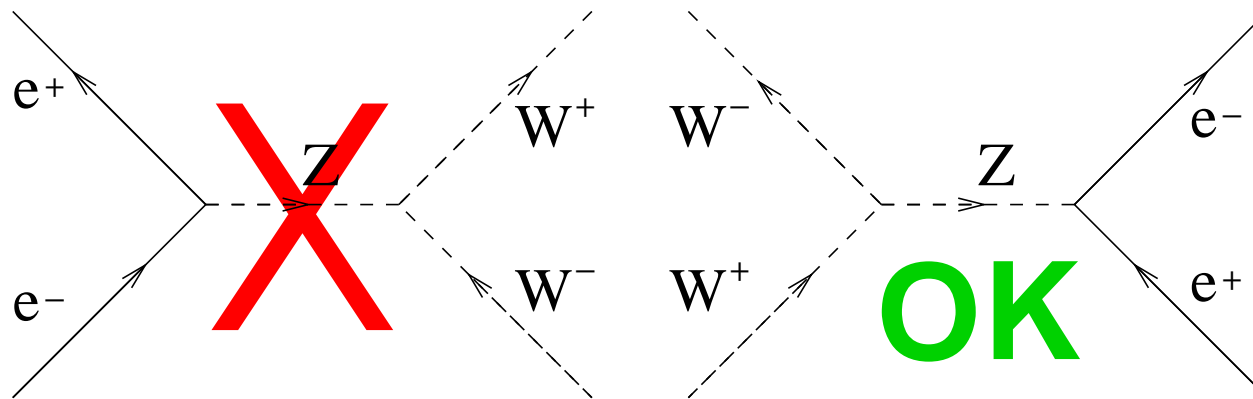
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

Ewolucja Wszechświata

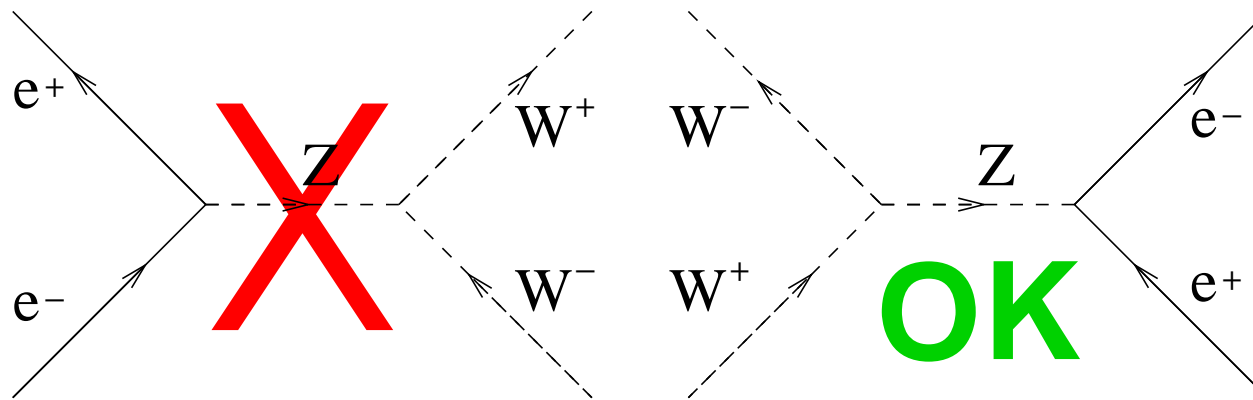
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

Ewolucja Wszechświata

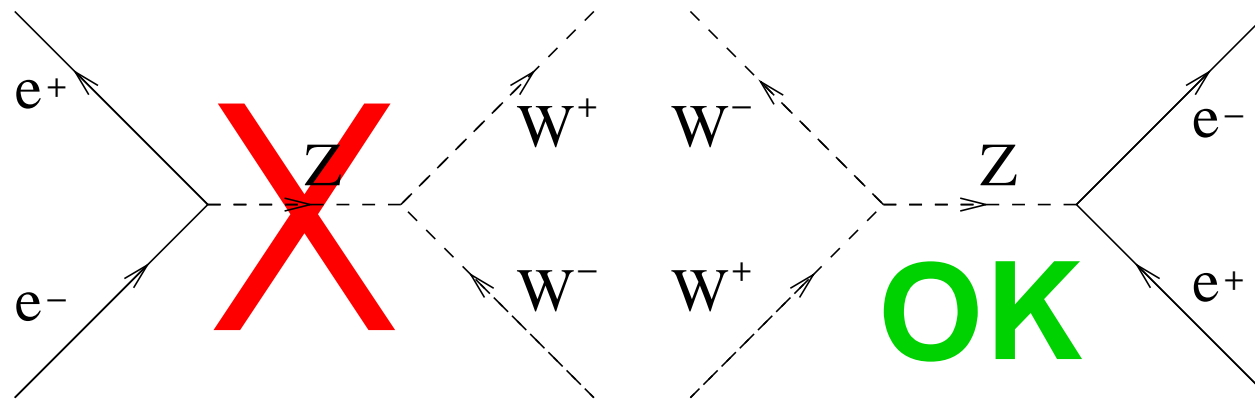
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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)

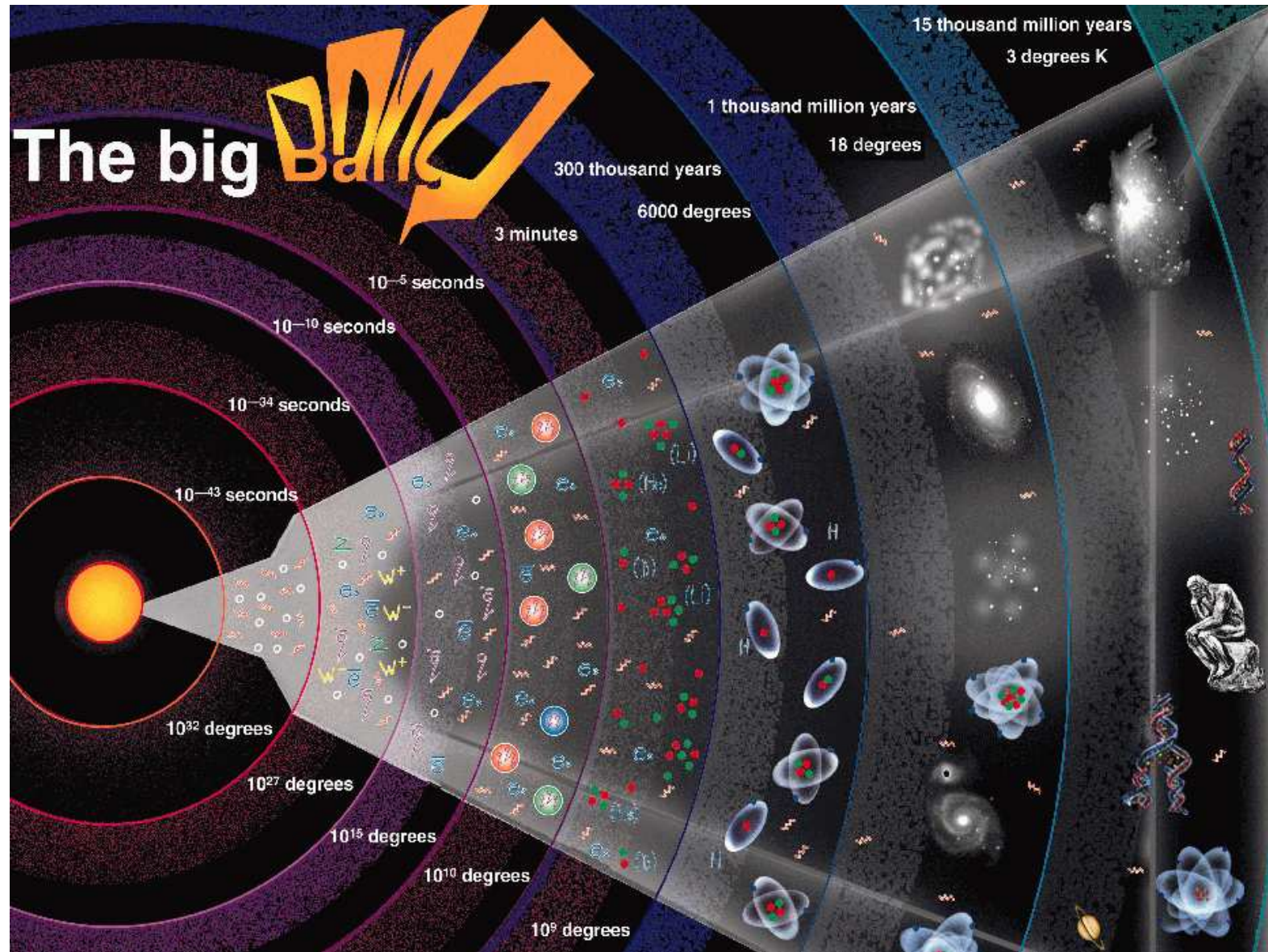
Ewolucja Wszechświata

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 ρ .

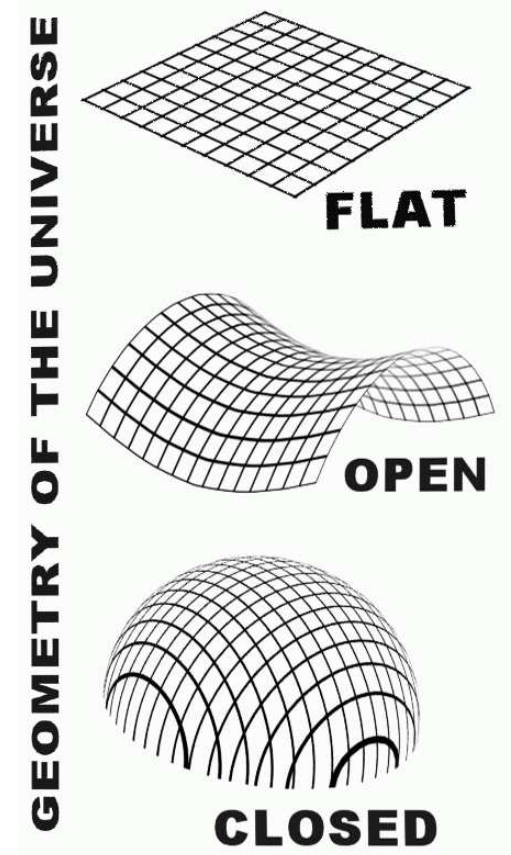
Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

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

$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

Pomijając wkład od stałej kosmologicznej!

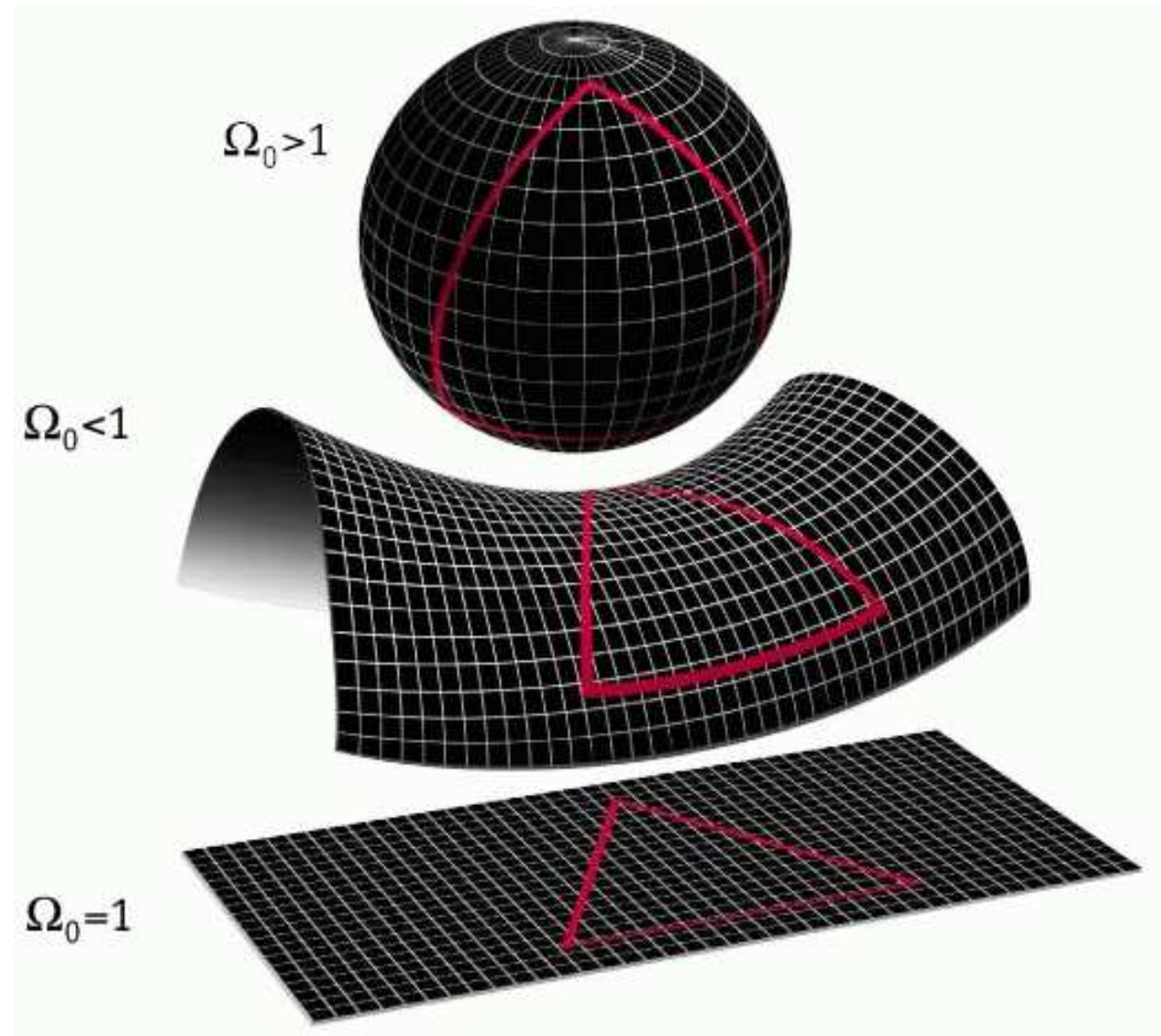


Krzywizna przestrzeni

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°).

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”

$$\Omega_b \sim 0.04$$

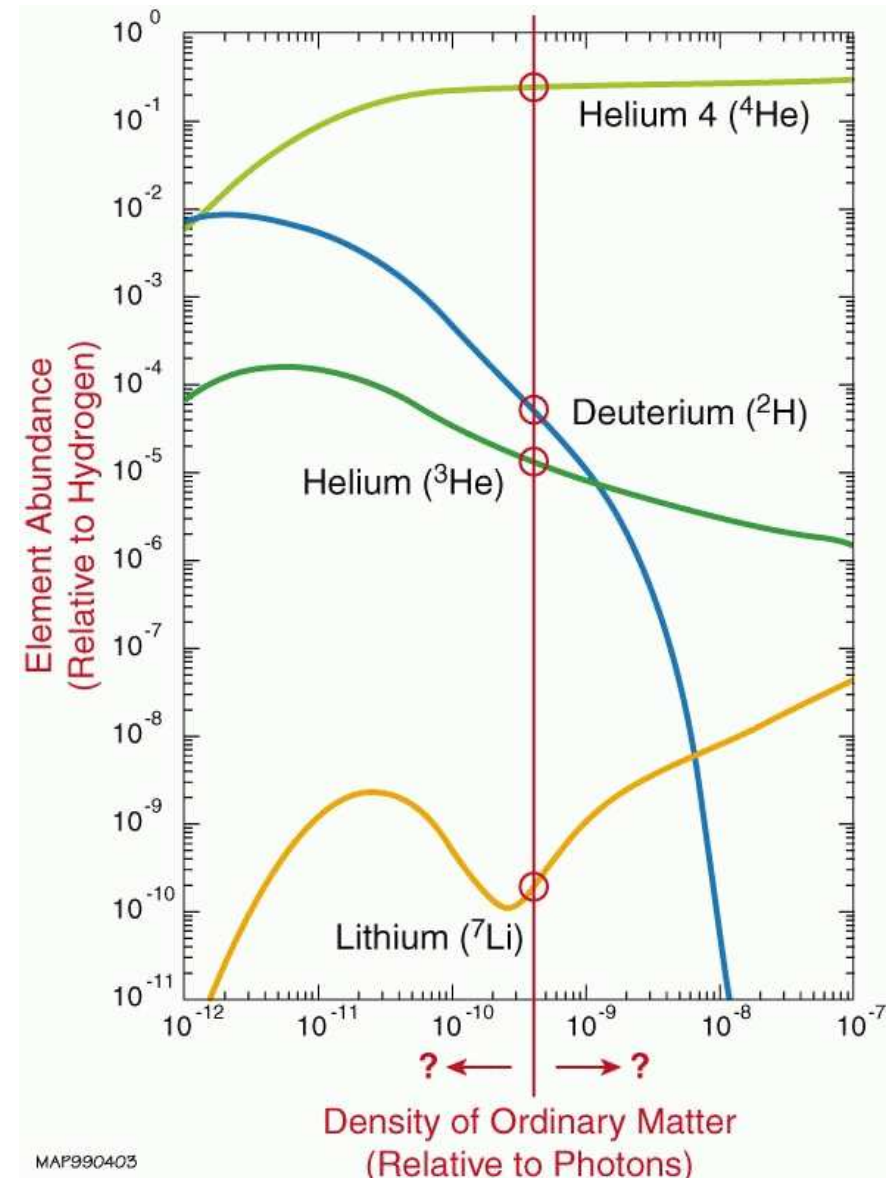
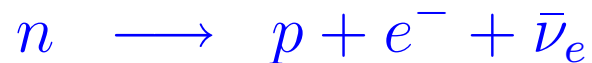
Pierwotna nukleosynteza

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

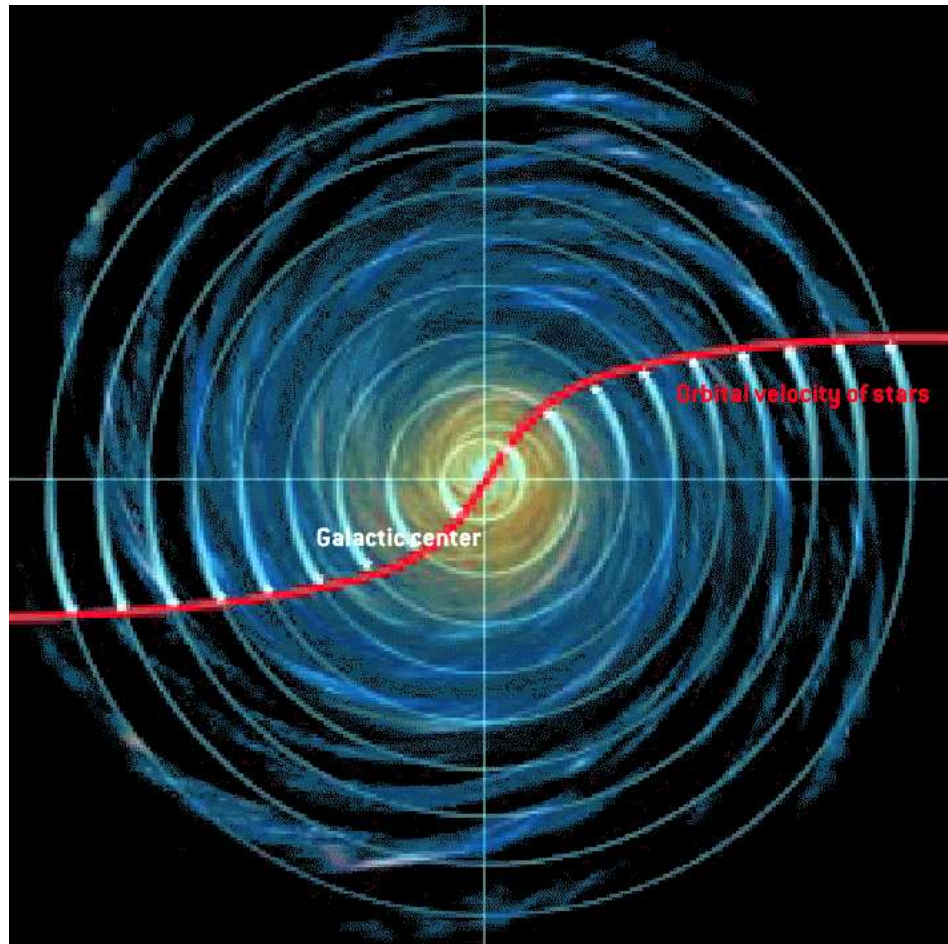
Produkcja deuteru:



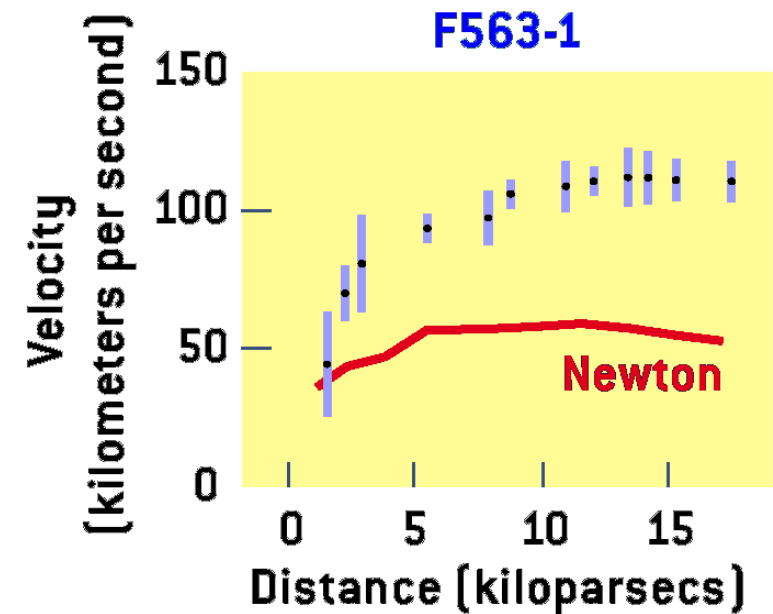
Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):



Oddziaływania grawitacyjne



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.

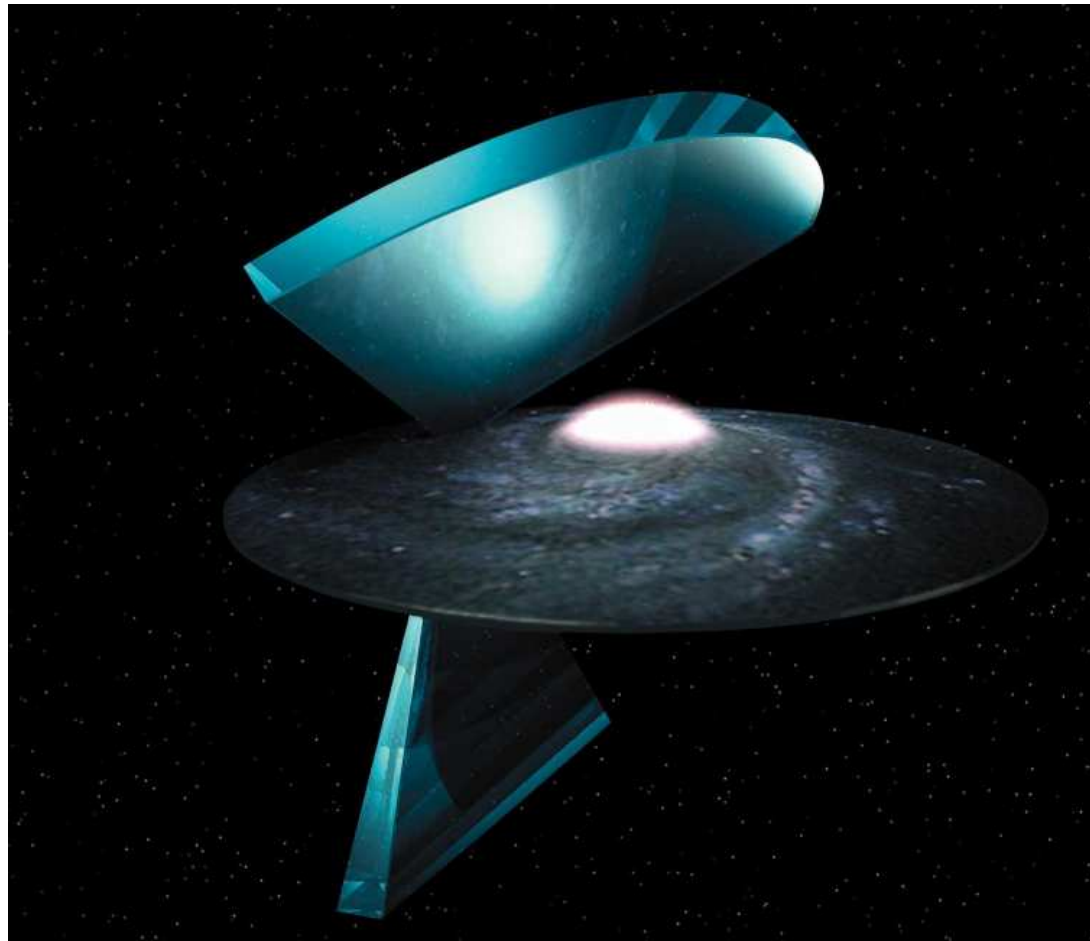


Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

Oddziaływania grawitacyjne

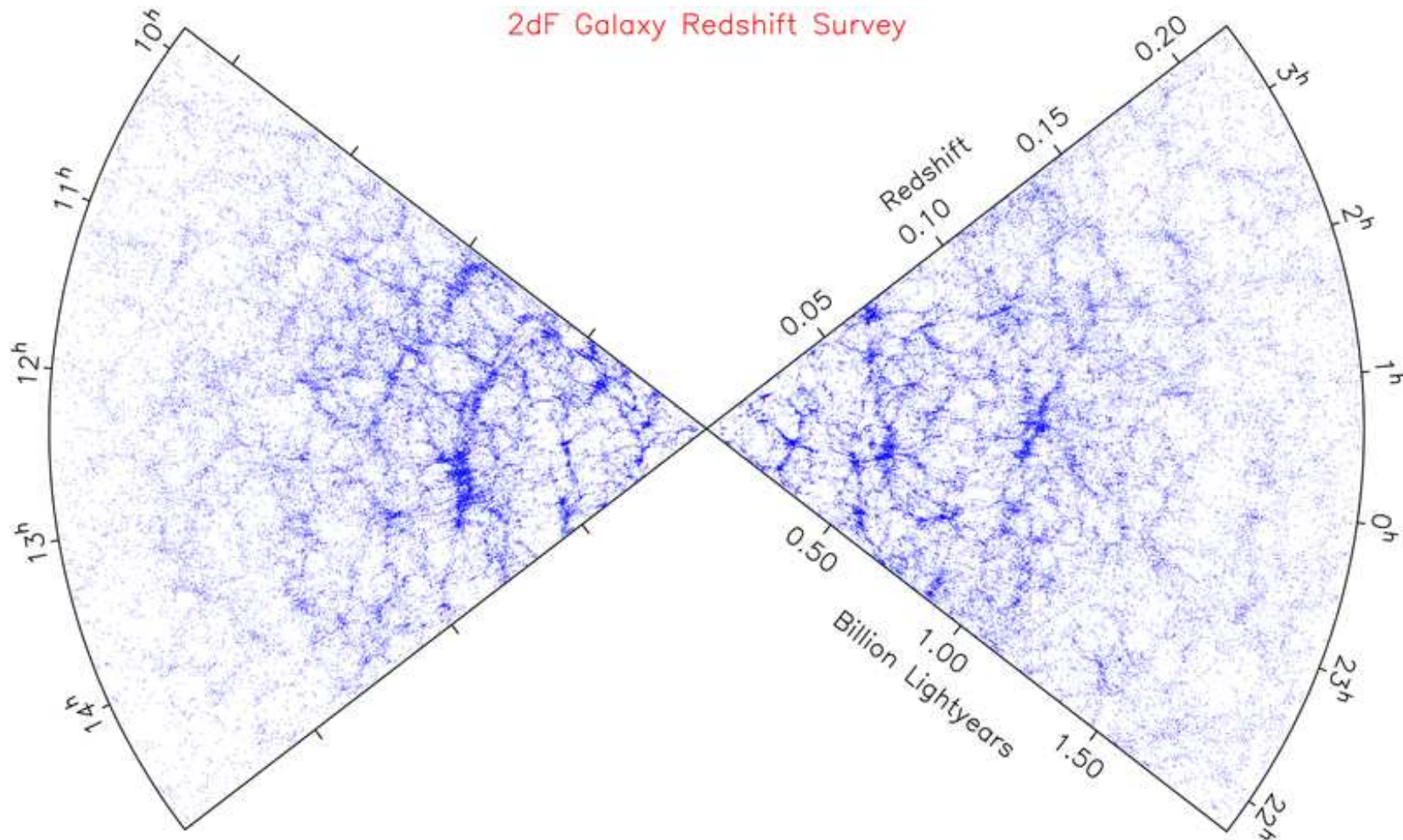
Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey

Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



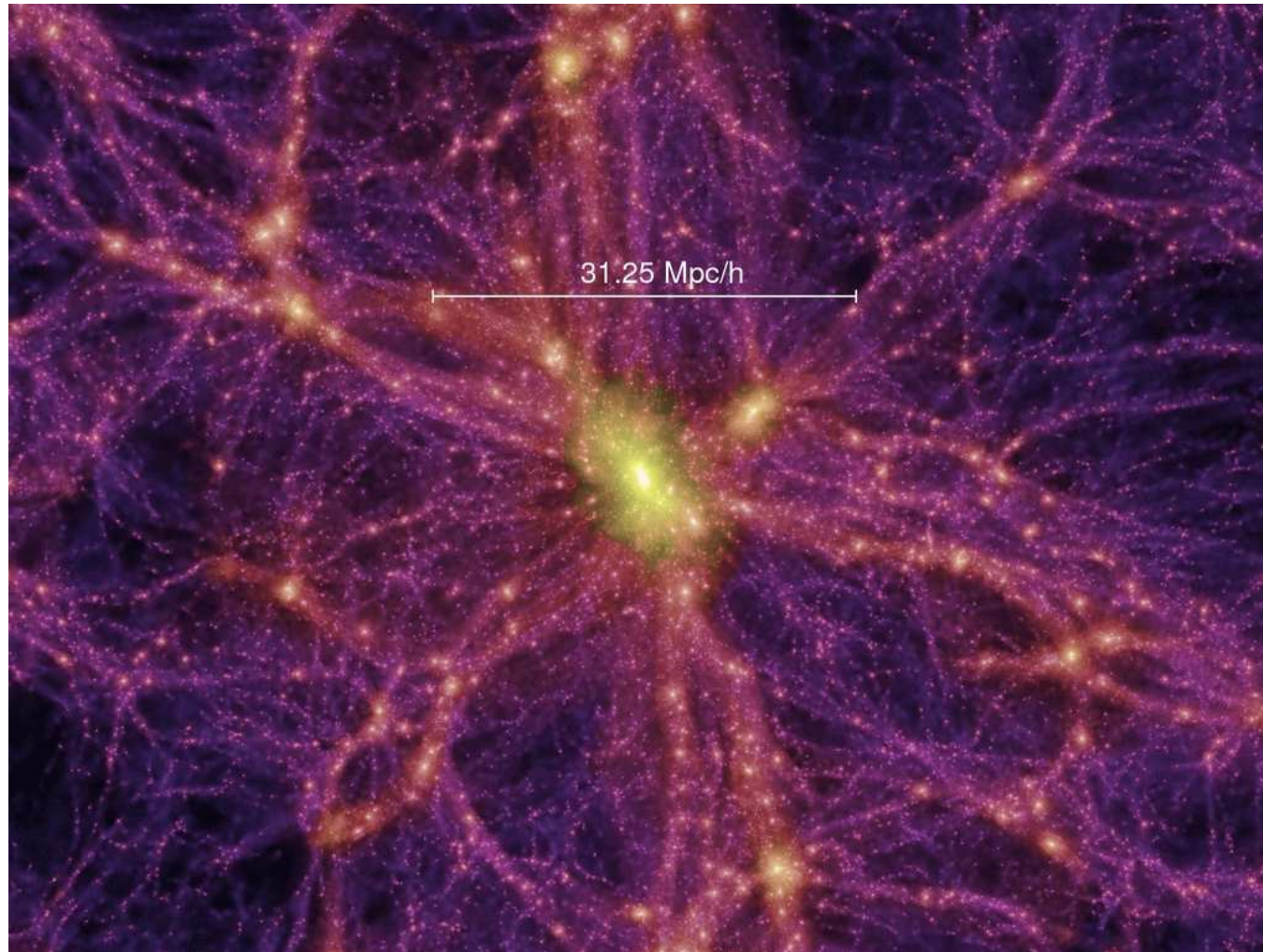
Oddziaływania grawitacyjne

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)

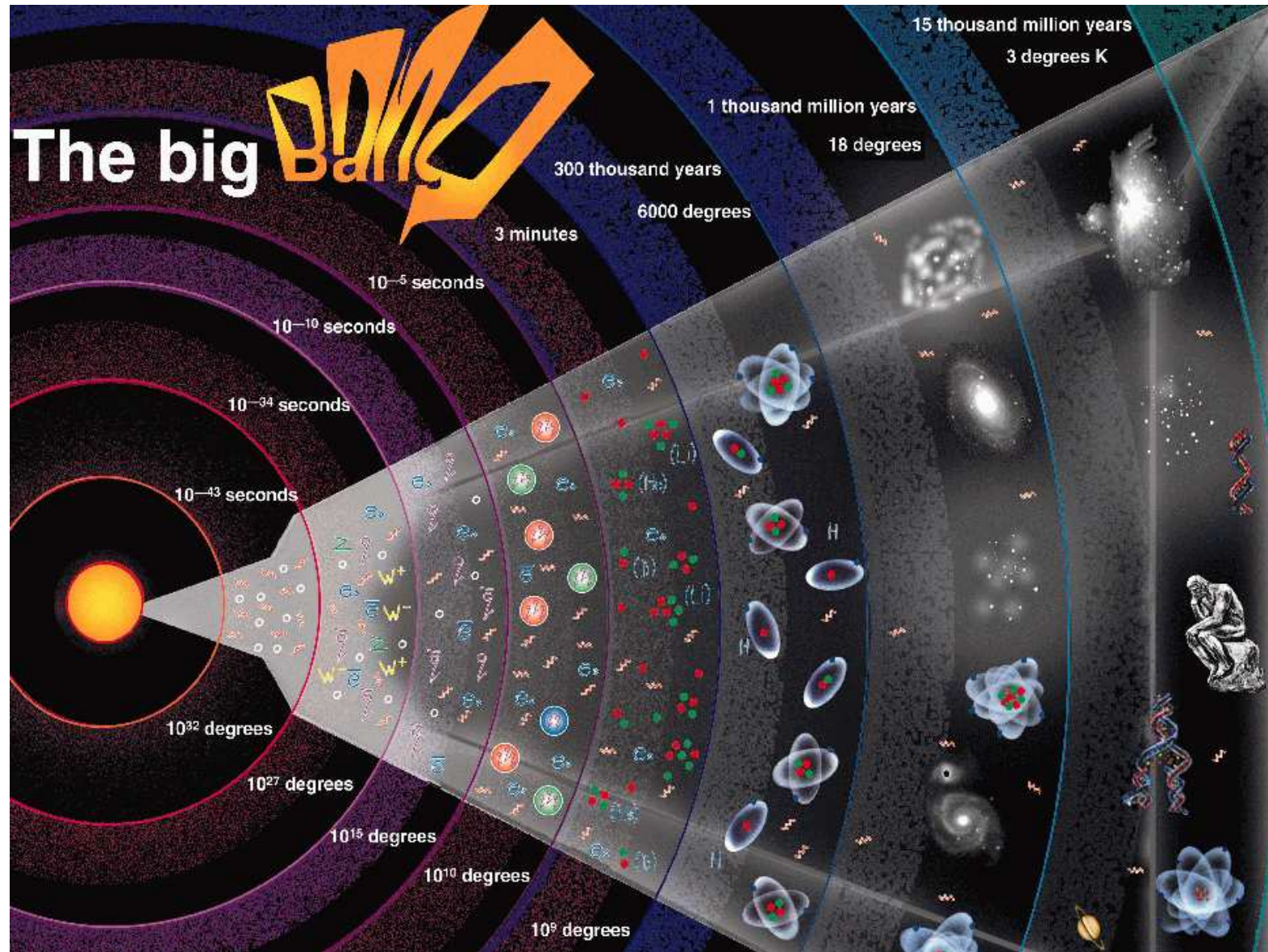
Nie wiemy:

- 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.



Ewolucja Wszechświata

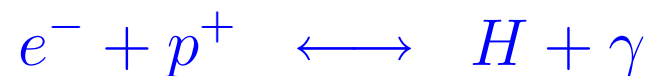


Promieniowanie tła

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.

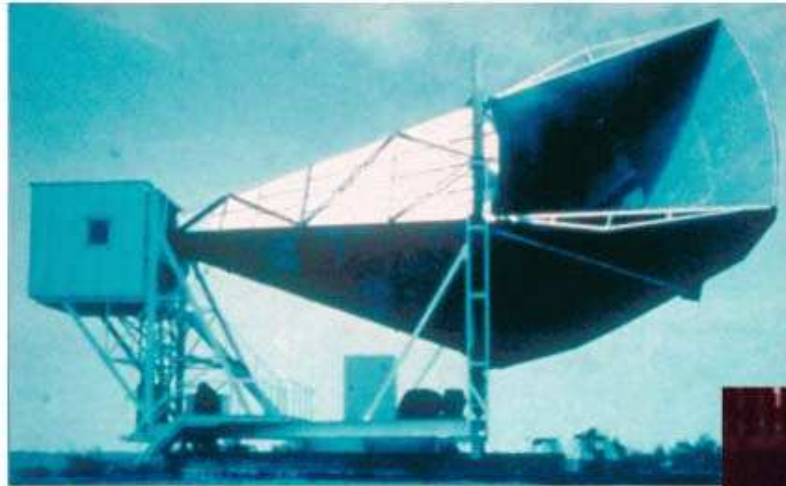
$$T \sim 5 K$$



Promieniowanie tła

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

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND

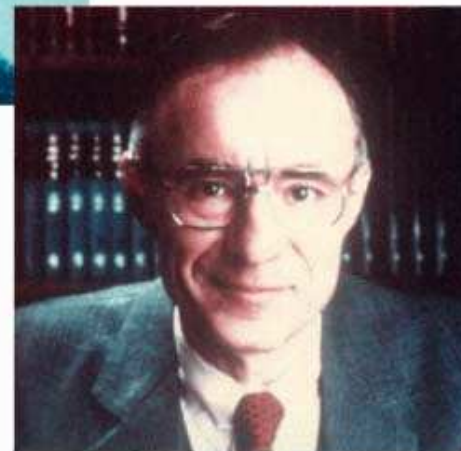


Microwave Receiver



MAP990045

Robert Wilson



Arno Penzias

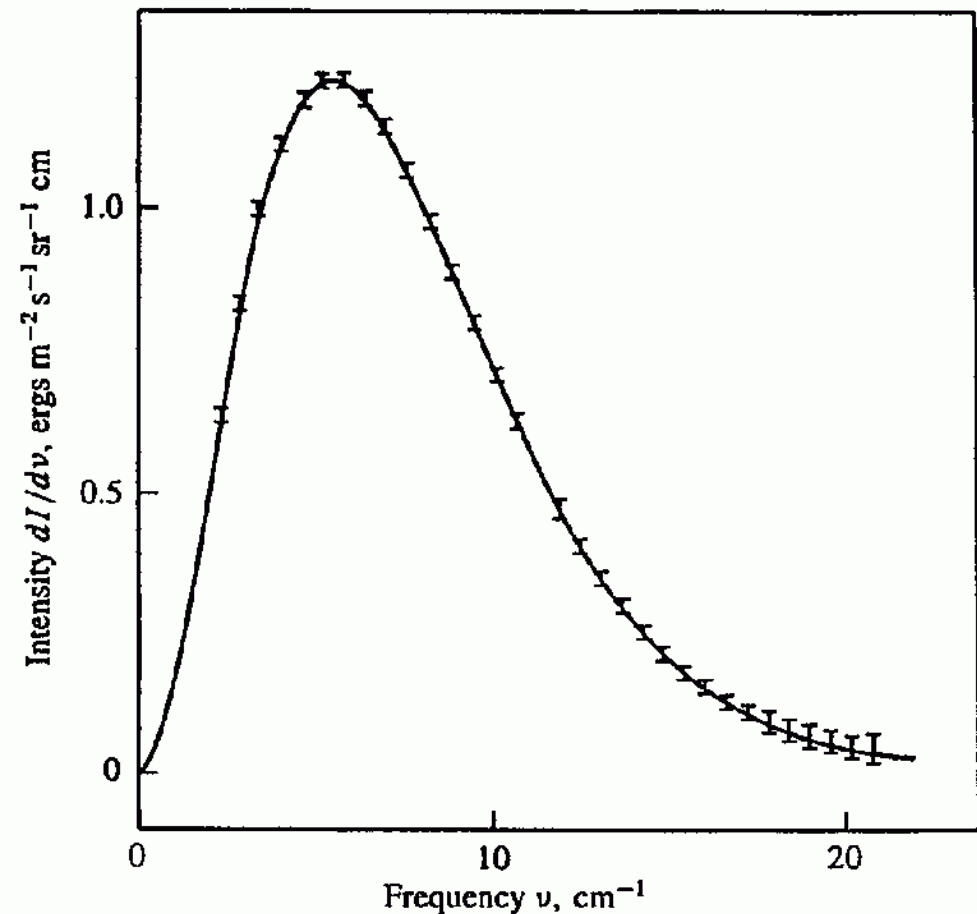
Promieniowanie tła

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

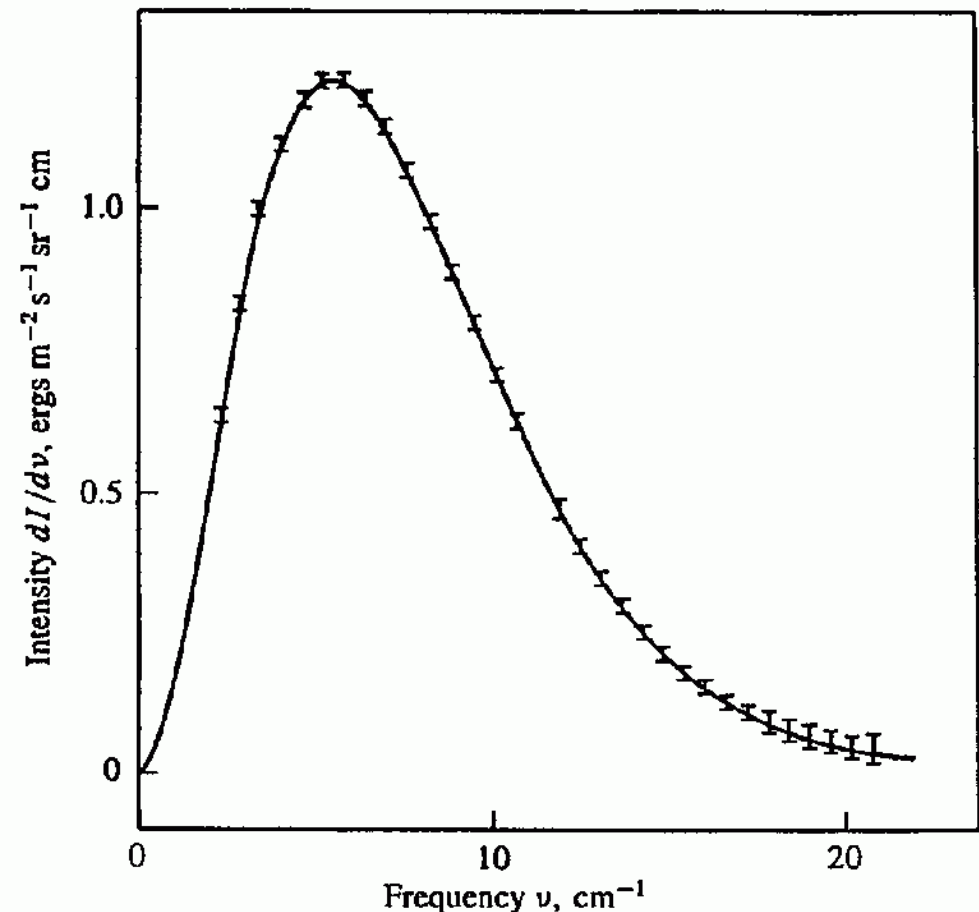
zostało odkryte w 1965 roku przez **A.A.Penzisa** i **R.W.Wilsona**.

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

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

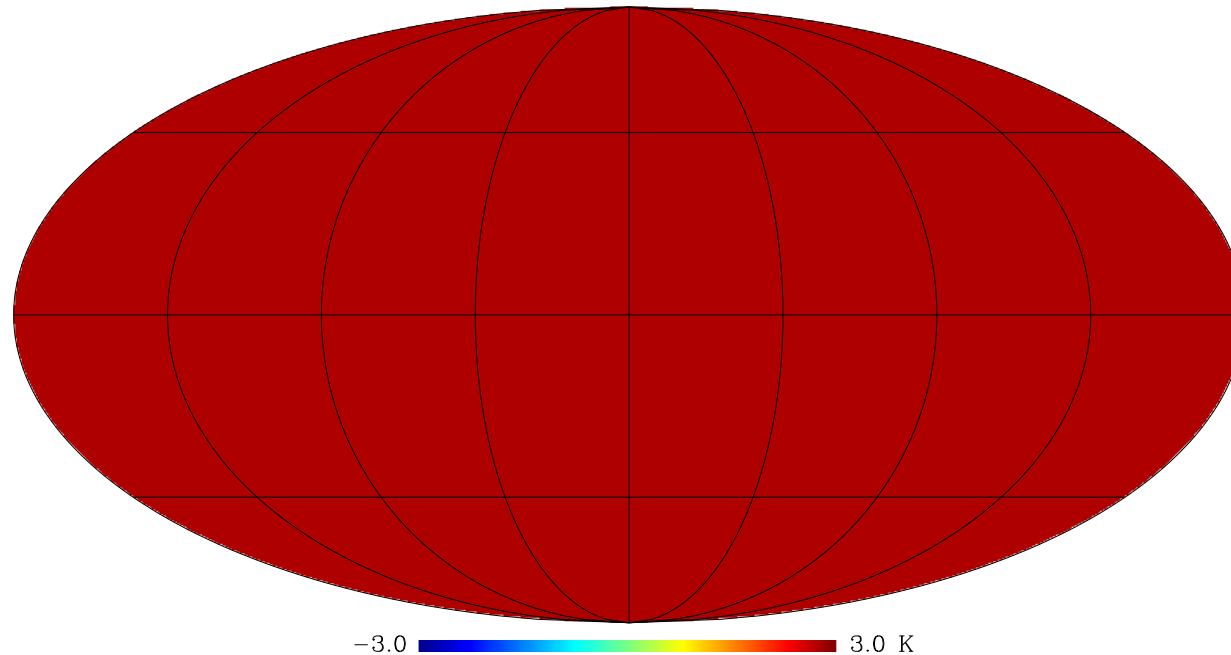
Obserwacja **CMB** była rozstrzygającym dowodem **Wielkiego Wybuchu** i "pogrzebała" model statycznego Wszechświata.

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



Promieniowanie tła

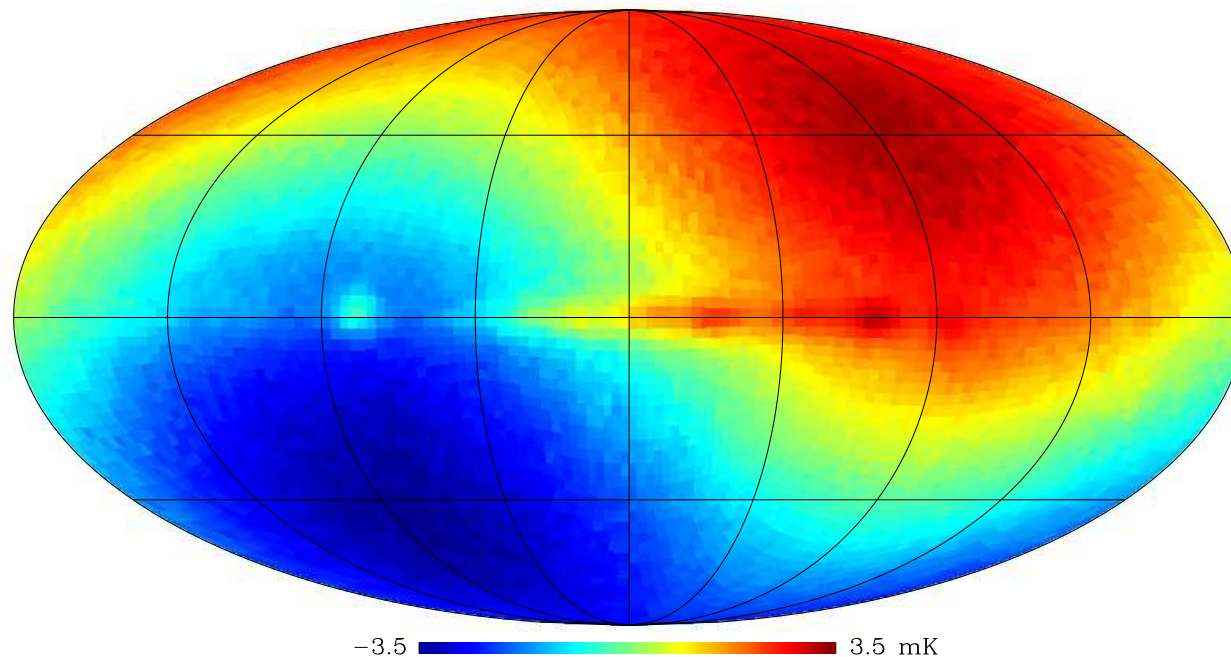
W pierwszym przybliżeniu $(\Delta T \sim 1K)$



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

Promieniowanie tła

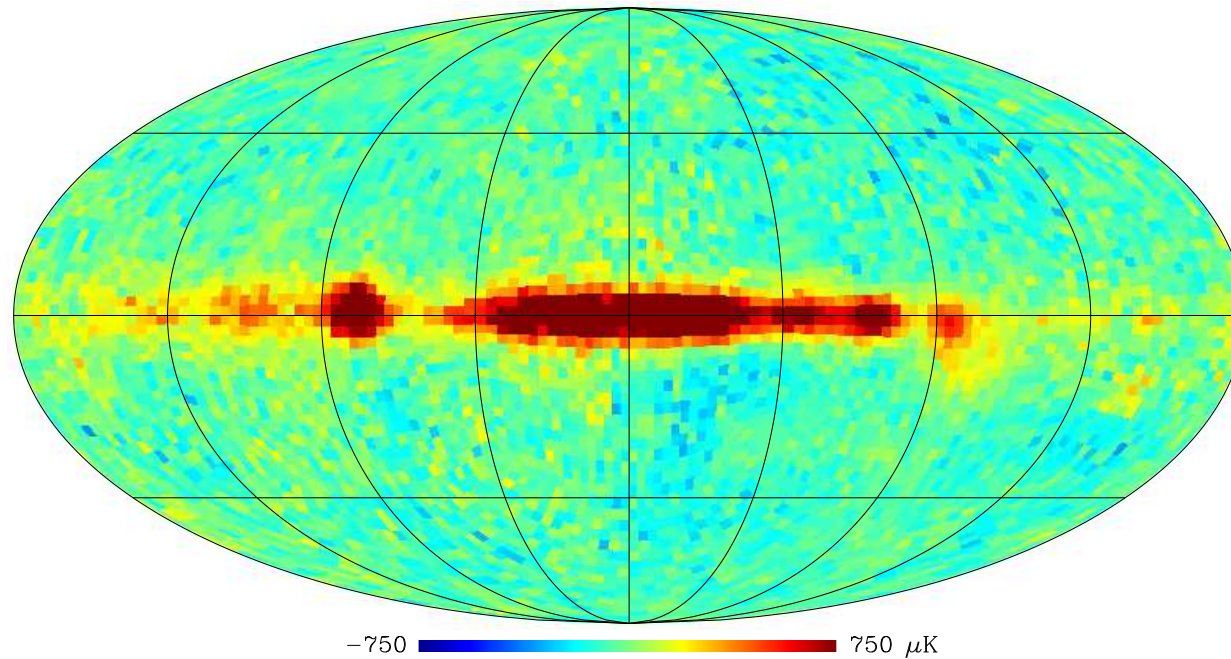
Jednak gdy przyjrzymy się bliżej $(\Delta T \sim 1\text{mK})$



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

Promieniowanie tła

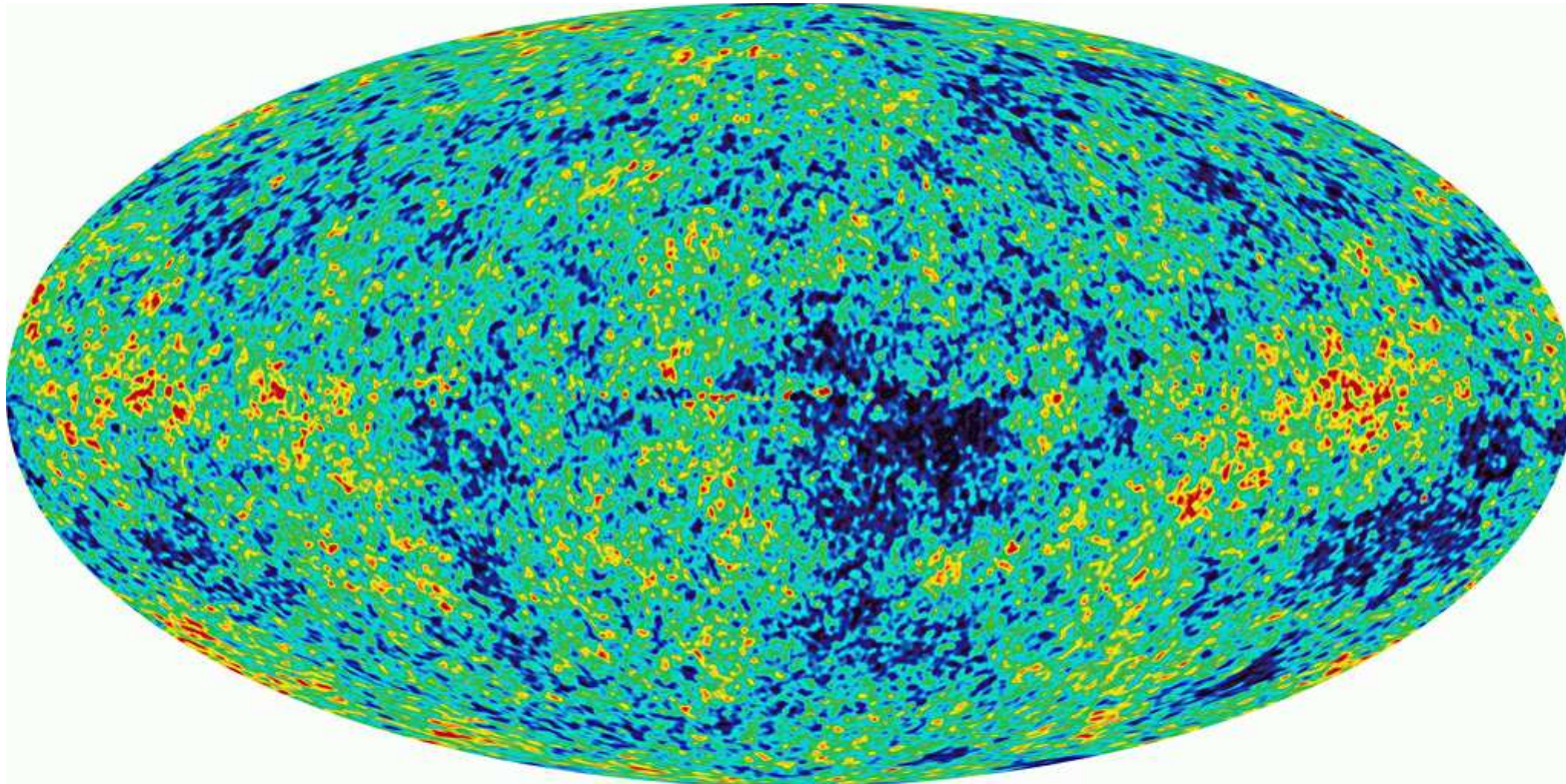
Odejmując wpływ efektu Dopplera ($\Delta T \sim 200 \mu K$)



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

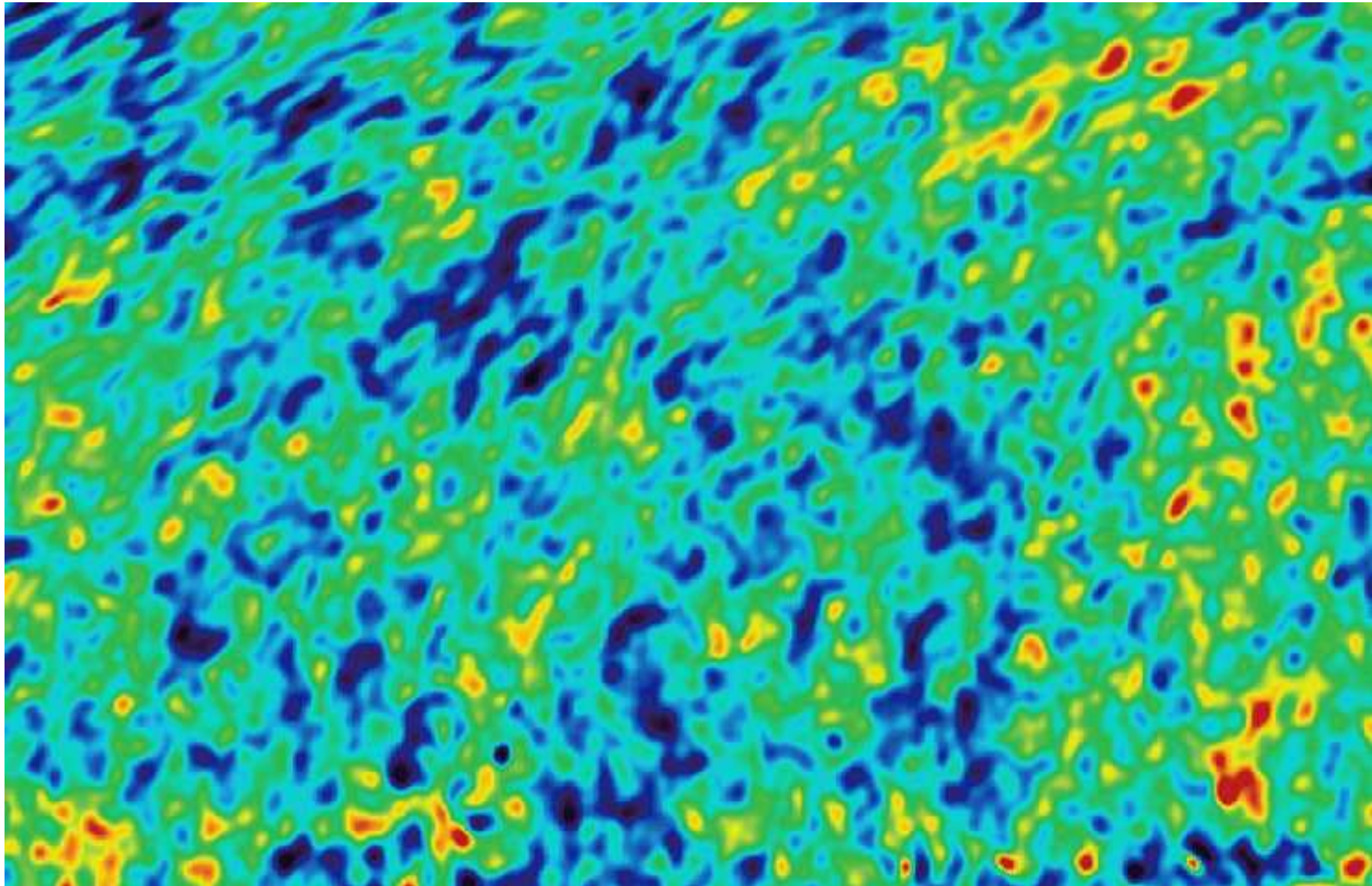
Promieniowanie tła

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?

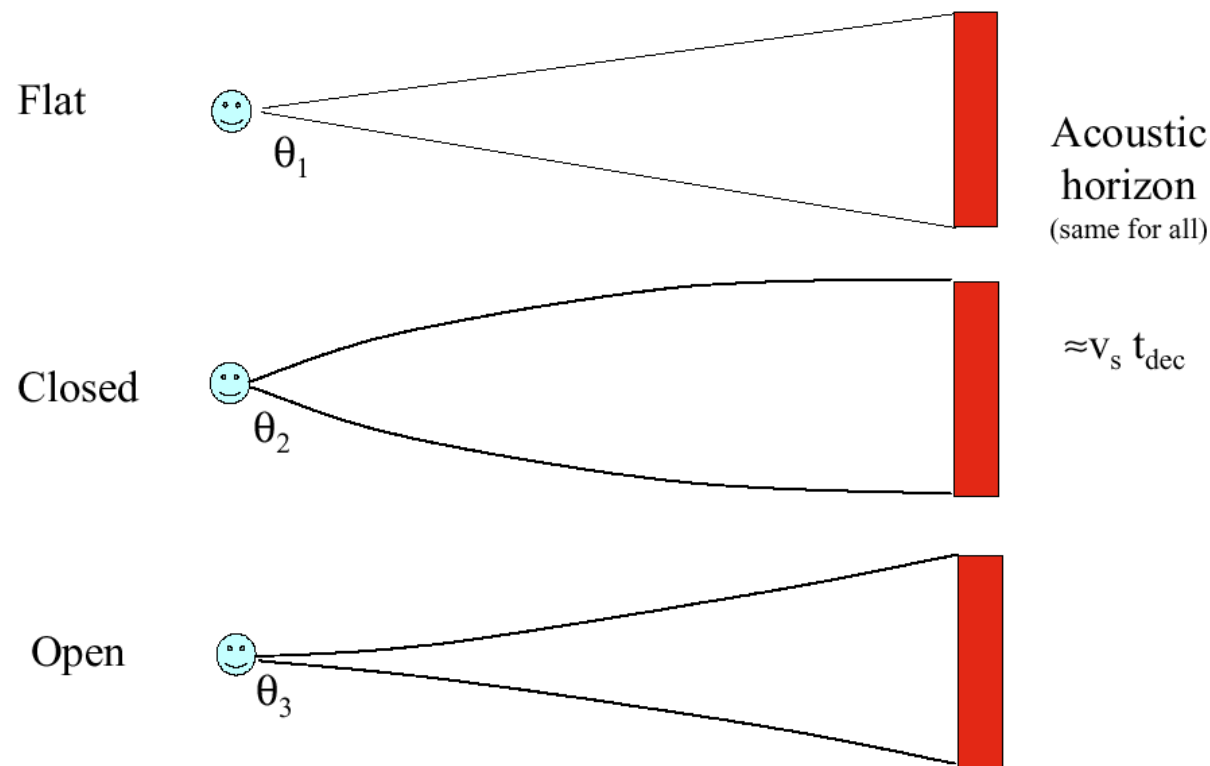
Promieniowanie tła



Promieniowanie tła

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

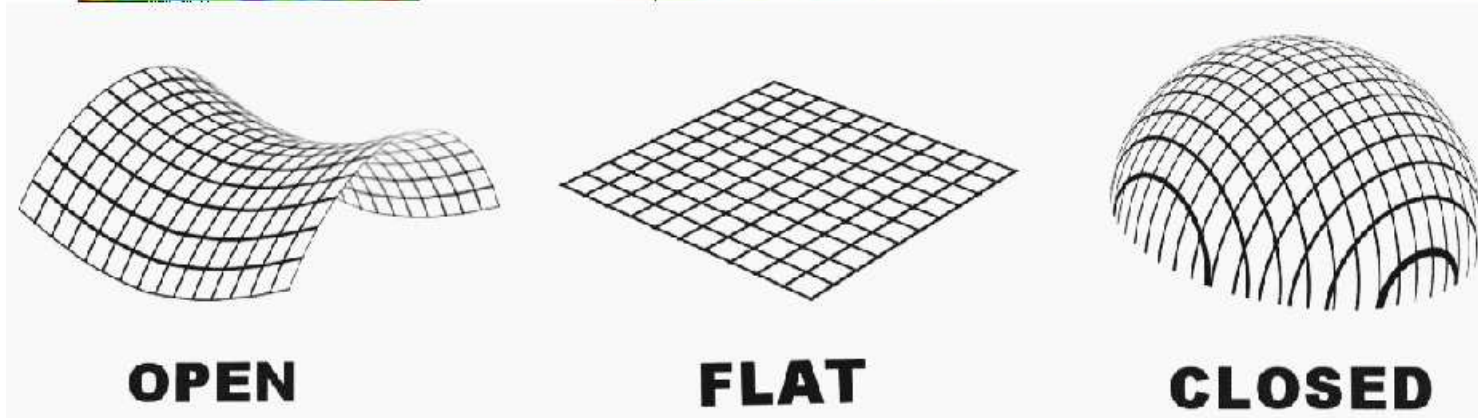
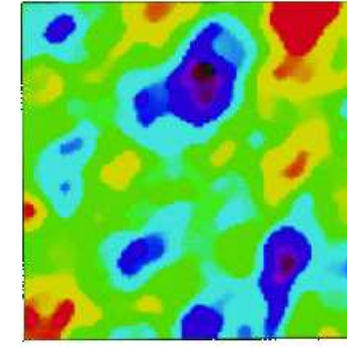
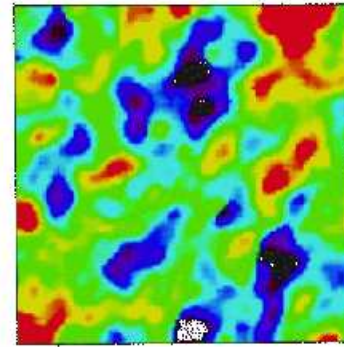
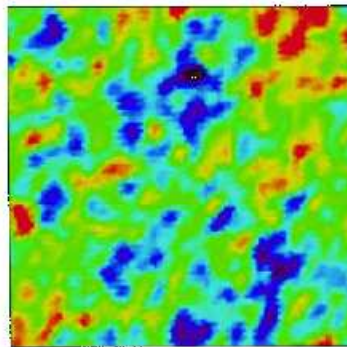
Rozmiary jakie **obecnie** obserwujemy zależą silnie od **krzywizny Wszechświata!**



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!**

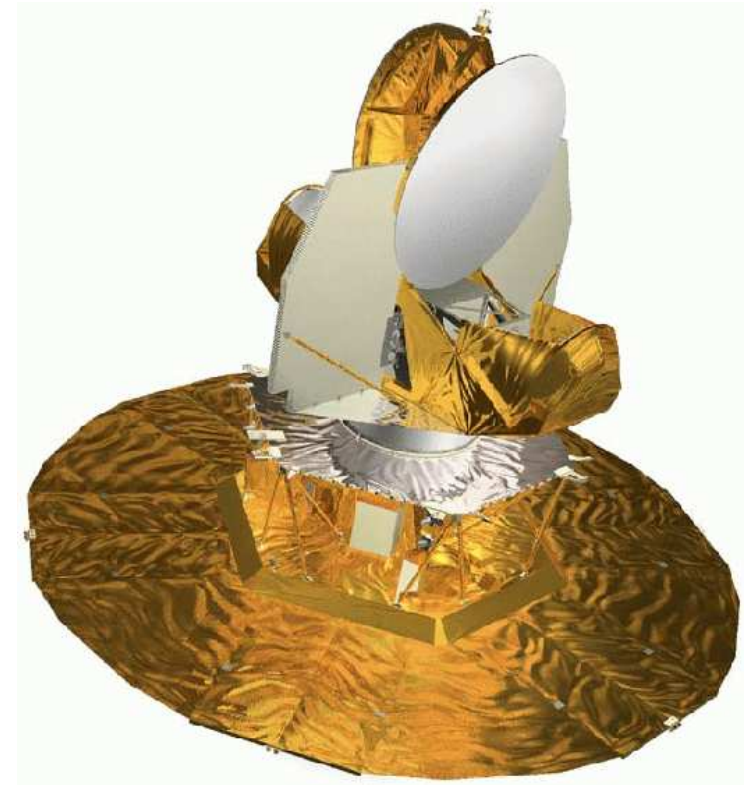


WMAP

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.



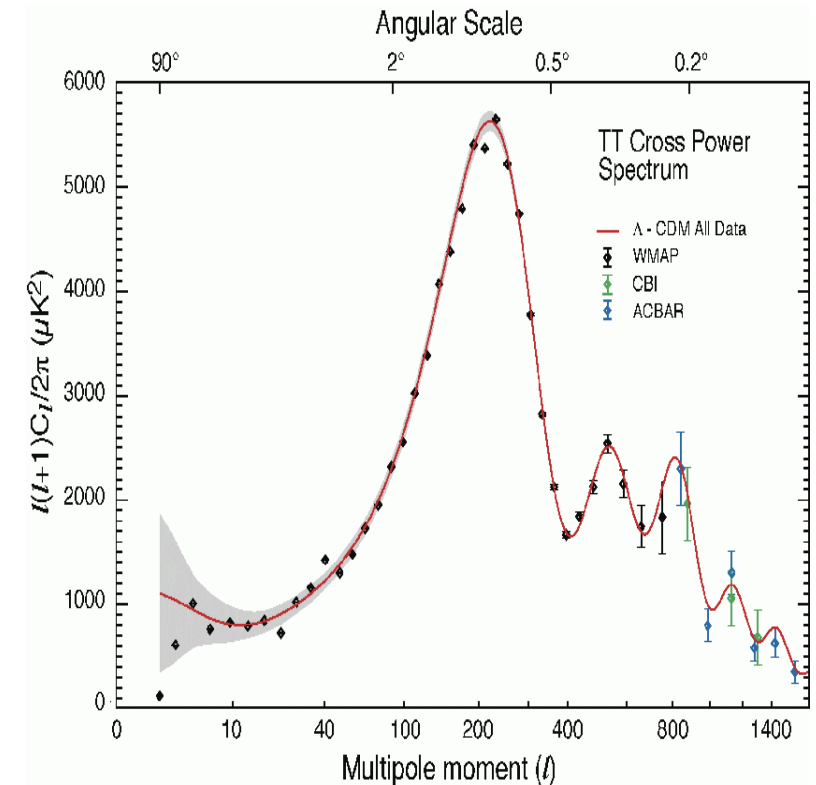
WMAP

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°



WMAP

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

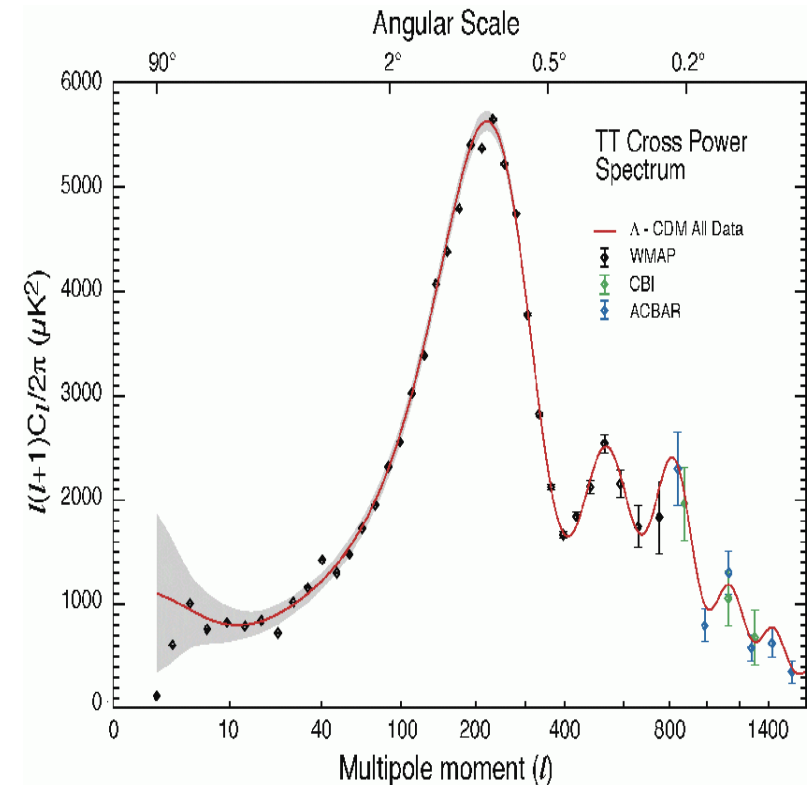
Sonda kosmiczna wystrzelona w 2001.
Pomiar promieniowania mikrofalowego w 5 przedziałach widma.

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

⇒ w CMB dominują fluktuacje o rozmiarach kątowych rzędu 0.8°

⇒ Wszechświat jest **płaski** !

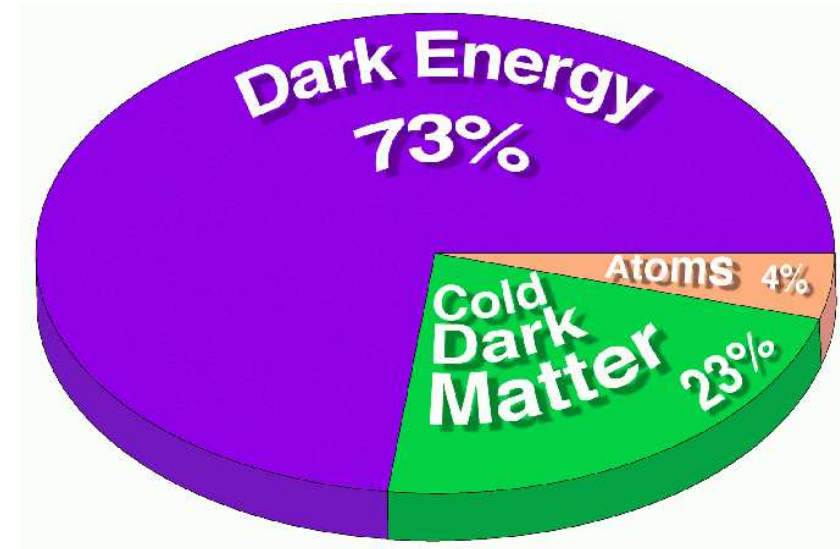
⇒ całkowita gęstość materii/energii: $\rho_{tot} = 1.02(\pm 0.02) \rho_c$
(w granicach błędu zgodna z gęstością krytyczną)



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 (Λ)



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 γ , ...

LHC

Large Hadron Collider

Zbudowany w CERN pod Genewą
ma obwód ok. 27 km.

Przeciwbieżne wiązki protonów o
energii do 7 TeV.

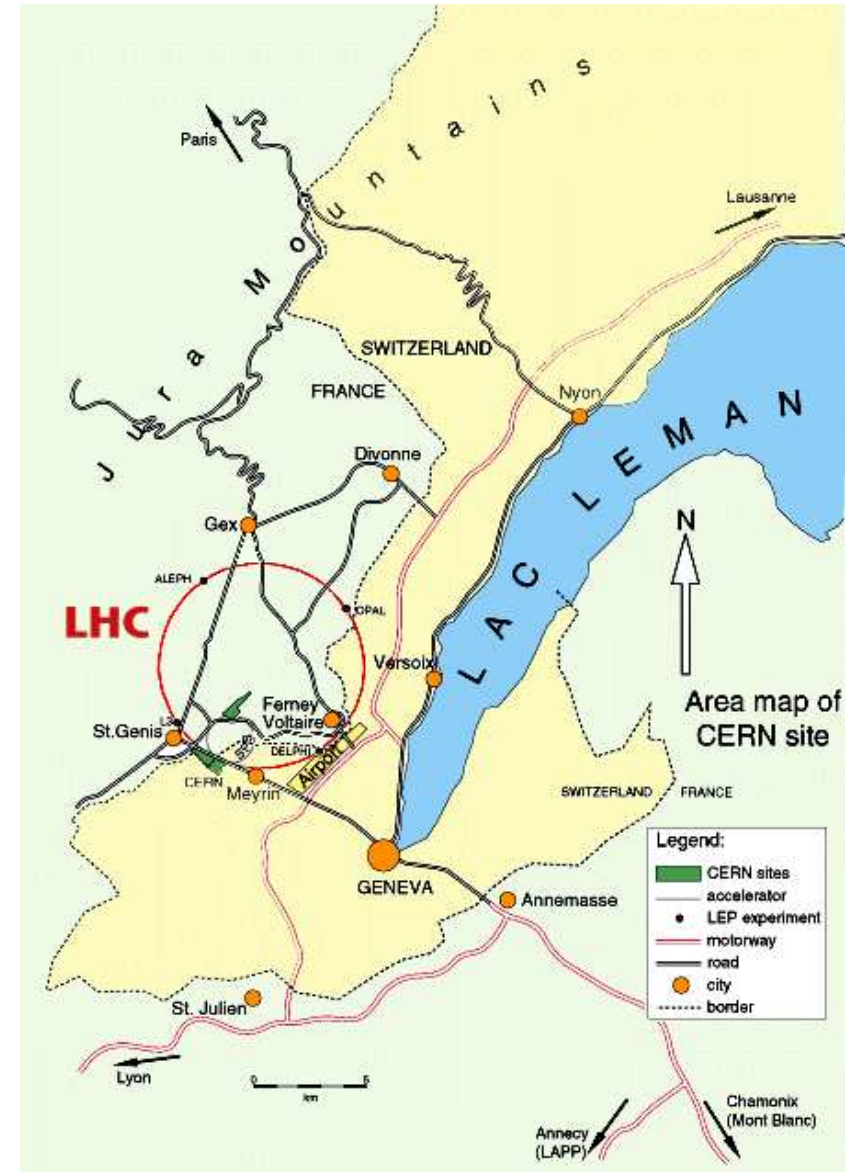
W każdej 2800 z "paczek" po 10^{11}
protonów.

Energia jednej paczki: $\sim 10^5$ J

Samochód osobowy ok. 60 km/h

Całkowita zgromadzona energia:
 $\sim 6 \cdot 10^8$ J

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



LHC



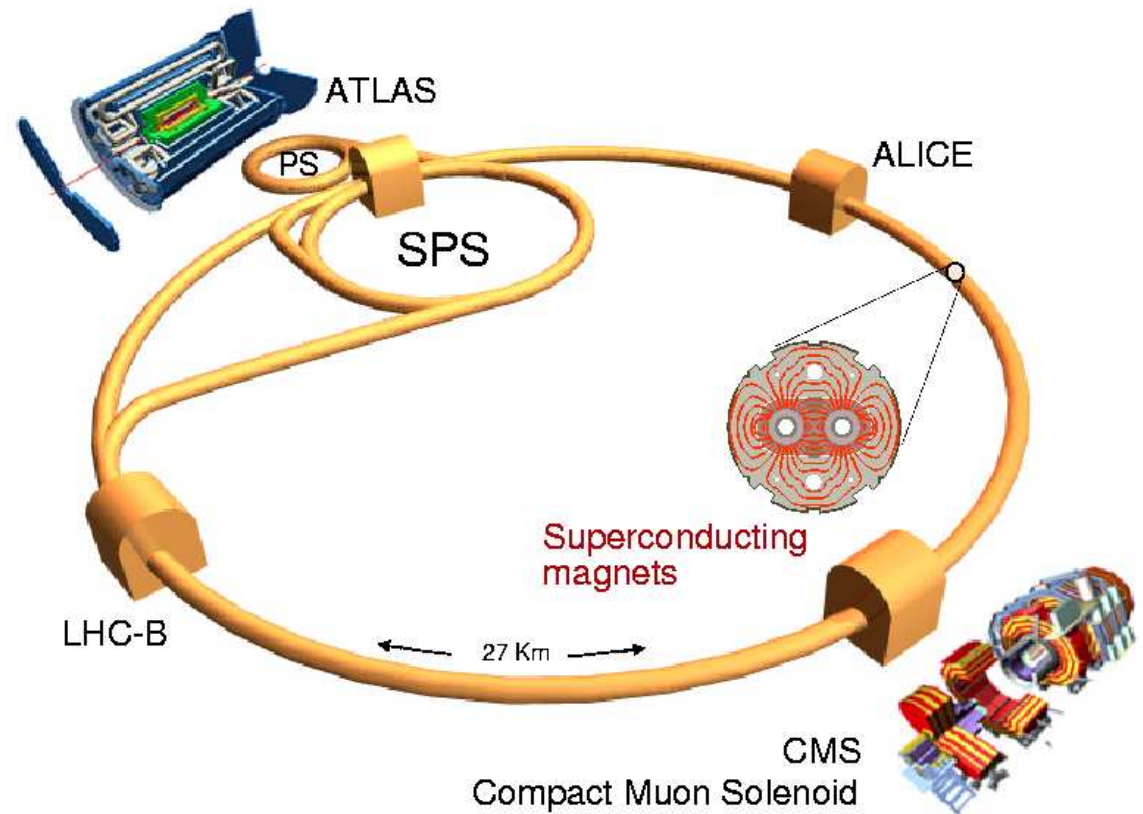
LHC

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

Docelowo 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)



Perspektywy

Uruchomienie LHC otwiera **nowy rozdział** w **fizyce** cząstek elementarnych i **astrofizyce cząstek**.

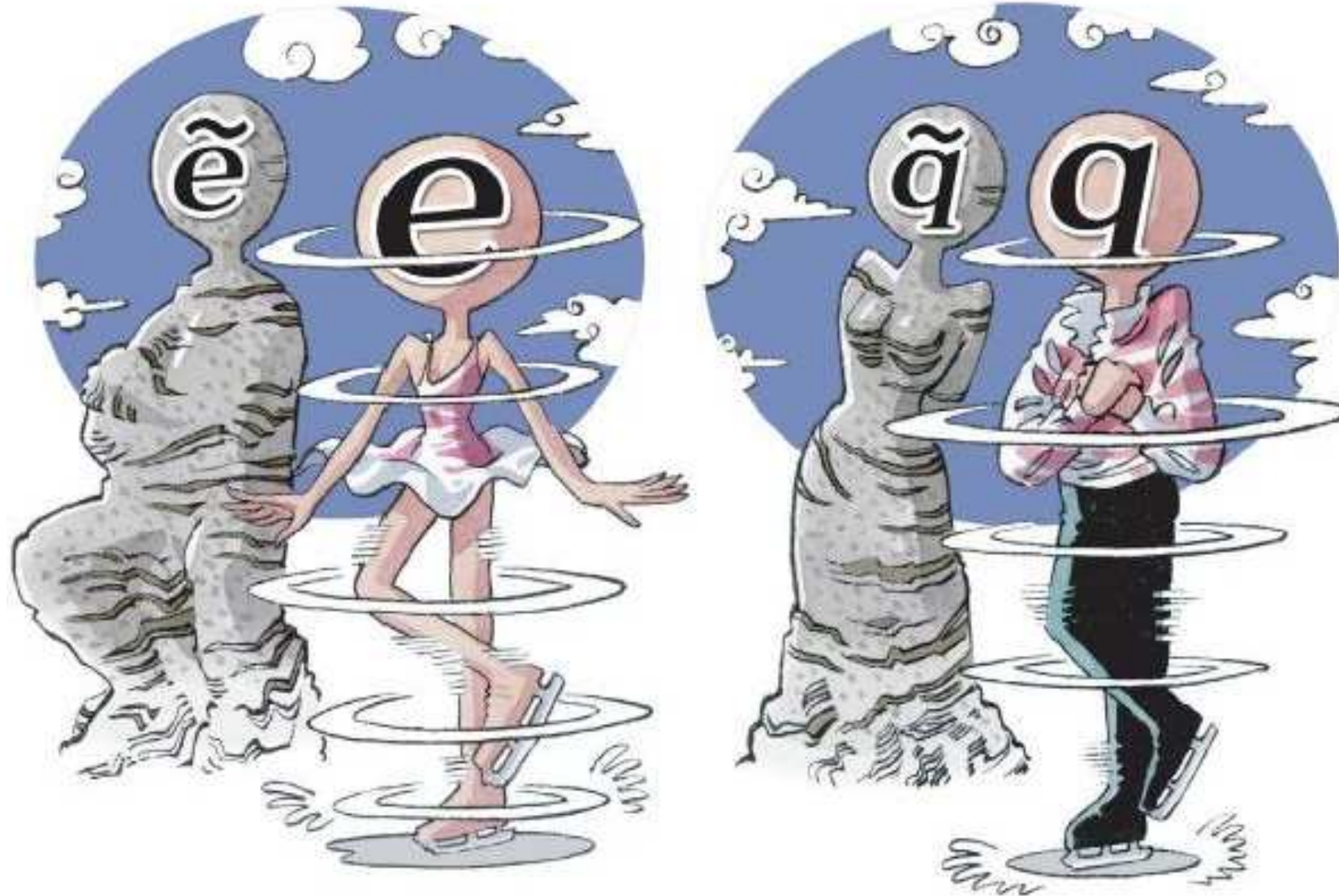
Wyniki wszystkich wcześniejszych eksperymentów mogą być dobrze opisane w ramach **Modelu Standardowego**.

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”...

