

Ciemna strona Wszechświata



prof. A.F.Żarnecki

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

Warszawa, 23 listopada 2010

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: **wszechświat** i cząstki

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: wszechświat i cząstki
- Grawitacja w **Ogólnej Teorii Względności**

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: **wszechświat** i **cząstki**
- Grawitacja w **Ogólnej Teorii Względności**
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i **Ewolucja Wszechświata**

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: **wszechświat** i cząstki
- 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: **wszechświat** i **cząstki**
- Grawitacja w **Ogólnej Teorii Względności**
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i **Ewolucja Wszechświata**
- Gęstość materii we Wszechświecie
Czy otacza nas ciemna materia?
- Skąd się bierze **ciemna materia** i jak jej szukać?

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: **wszechświat** i cząstki
- Grawitacja w **Ogólnej Teorii Względności**
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i **Ewolucja Wszechświata**
- Gęstość materii we Wszechświecie
Czy otacza nas ciemna materia?
- Skąd się bierze **ciemna materia** i jak jej szukać?
- Pierwsze wyniki z eksperymentów przy **LHC**

Ciemna Strona Wszechświata

- Wprowadzenie: **wszechświat** i **cząstki**
- Grawitacja w **Ogólnej Teorii Względności**
- Prawo Hubble'a, Wielki Wybuch i **Ewolucja Wszechświata**
- Gęstość materii we Wszechświecie
Czy otacza nas ciemna materia?
- Skąd się bierze **ciemna materia** i jak jej szukać?
- Pierwsze wyniki z eksperymentów przy **LHC**
- Perspektywy i podsumowanie

Wprowadzenie

Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła: $c \approx 300\,000\,000\text{ m/s} = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$
- rozmiar protonu: $r \sim 0.0000000000000001\text{ m} = 10^{-15}\text{ m}$
- masa Ziemi: $m_Z \approx 597200000000000000000000000000\text{ kg} \approx 6 \cdot 10^{24}\text{ kg}$

Wprowadzenie

Rozmiary Wszechświata

Ziemia

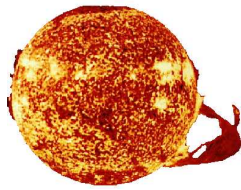


10^7 m

Wprowadzenie

Rozmiary Wszechświata

Słońce

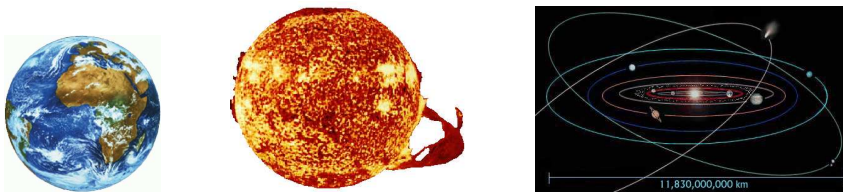


10^9 m

Wprowadzenie

Rozmiary Wszechświata

Układ słoneczny

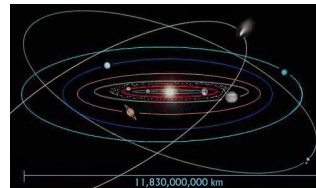
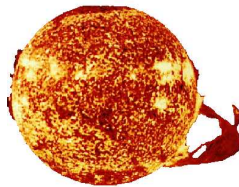


10^{13} m

Wprowadzenie

Rozmiary Wszechświata

Droga Mleczna

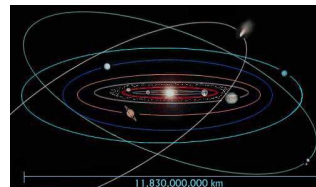
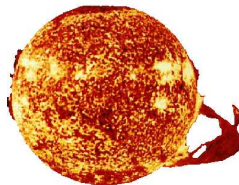


10^{21} m

Wprowadzenie

Rozmiary Wszechświata

Supergromada
galaktyk

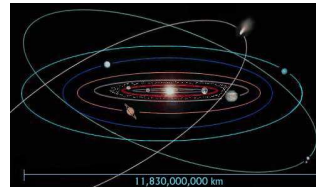
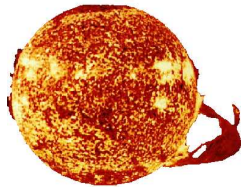


10^{24} m

Wprowadzenie

Rozmiary Wszechświata

horyzont

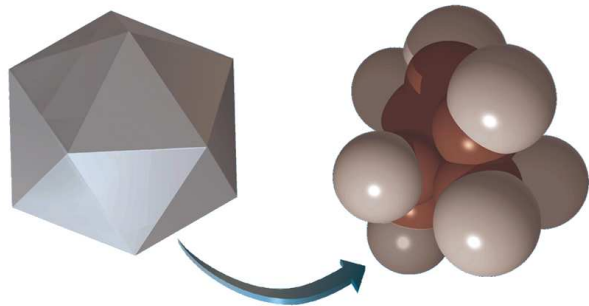


10^{26} m

Wprowadzenie

Budowa materii

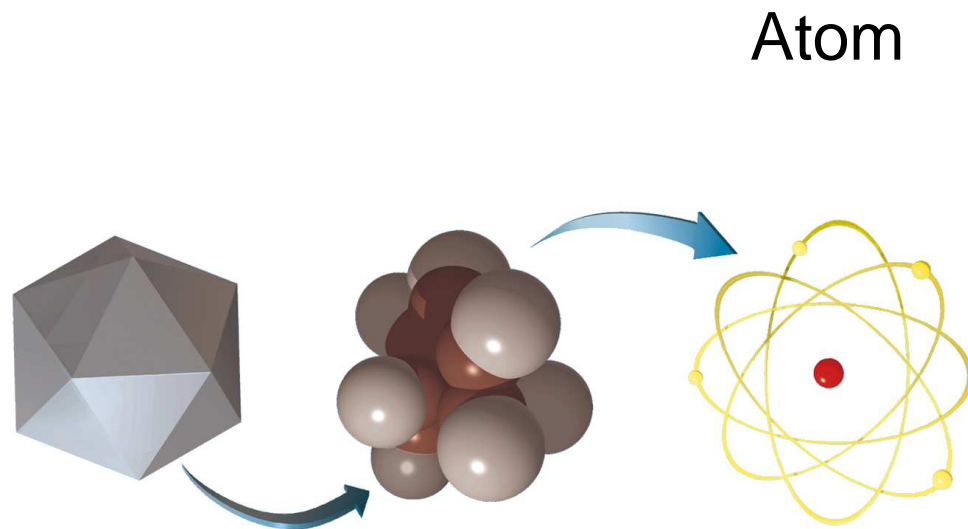
Cząsteczka



10^{-9} m

Wprowadzenie

Budowa materii

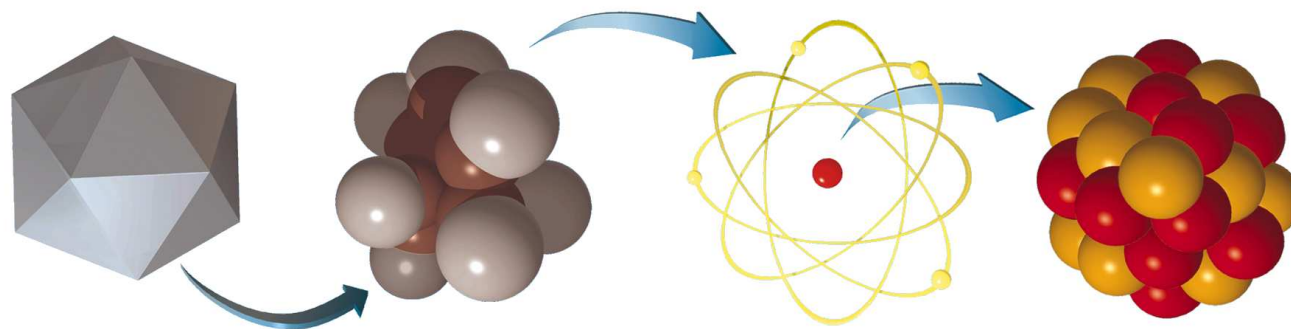


10^{-10} m

Wprowadzenie

Budowa materii

Jądro atomowe

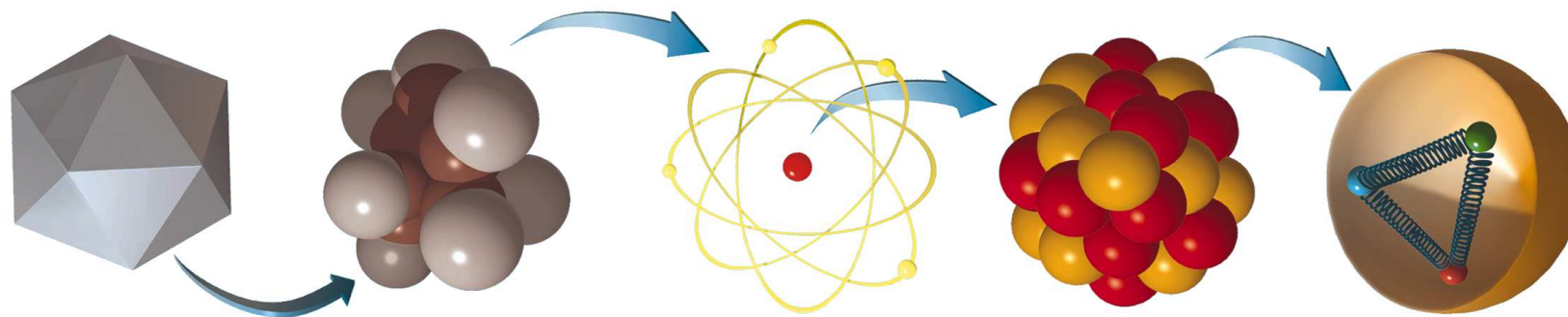


10^{-14} m

Wprowadzenie

Budowa materii

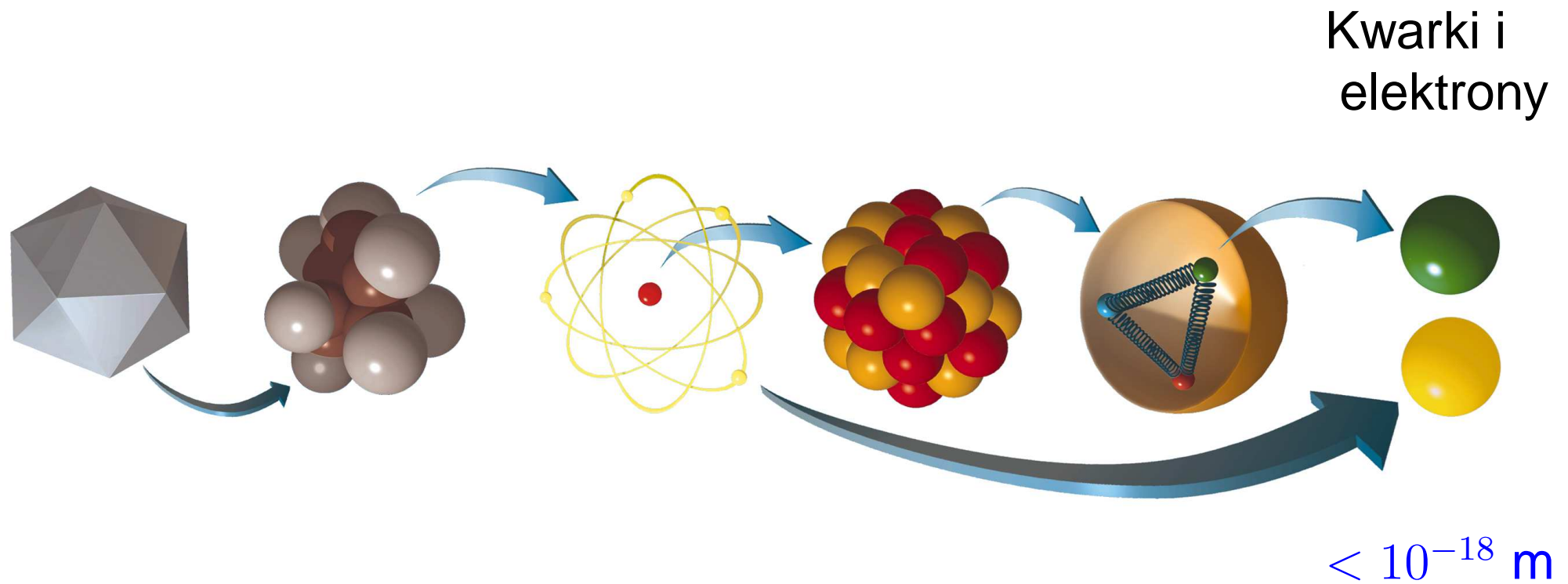
Nukleony



10^{-15} m

Wprowadzenie

Budowa materii



Wprowadzenie

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

Wprowadzenie

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

Wprowadzenie

Budowa materii

Świat “codzienny”: 3 “cegielki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*
 Fizyka cząstek \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegielek” 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

Wprowadzenie

Budowa materii

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

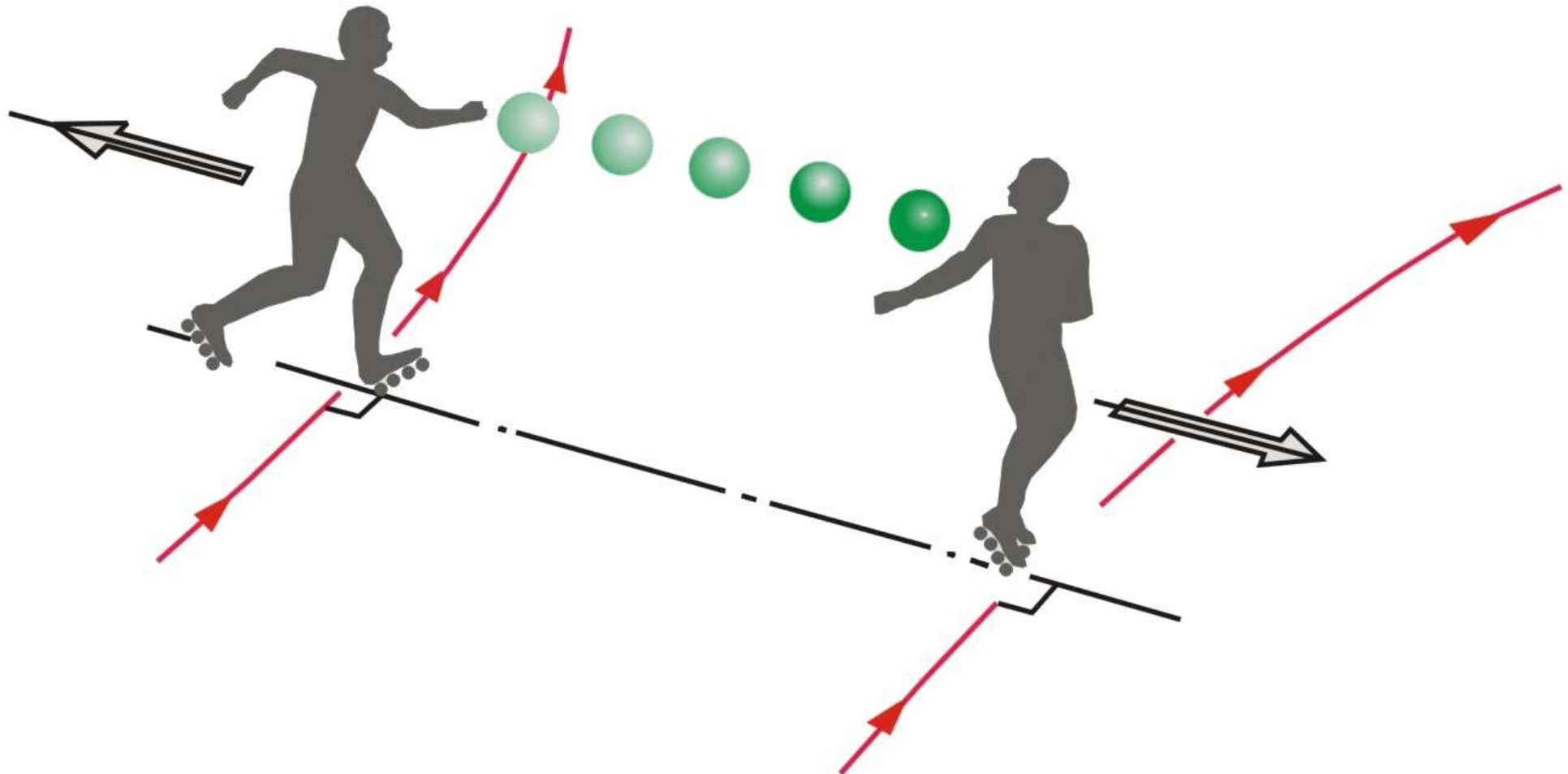
	leptony		kwarki	
pokolenie 1	e <i>elektron</i>	ν_e <i>neutrino el.</i>	d <i>down</i>	u <i>up</i>
pokolenie 2	μ <i>mion</i>	ν_μ <i>neutrino mionowe</i>	s <i>strange</i>	c <i>charm</i>
pokolenie 3	τ <i>taon</i>	ν_τ <i>neutrino taonowe</i>	b <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	t <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek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

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

Model Standardowy

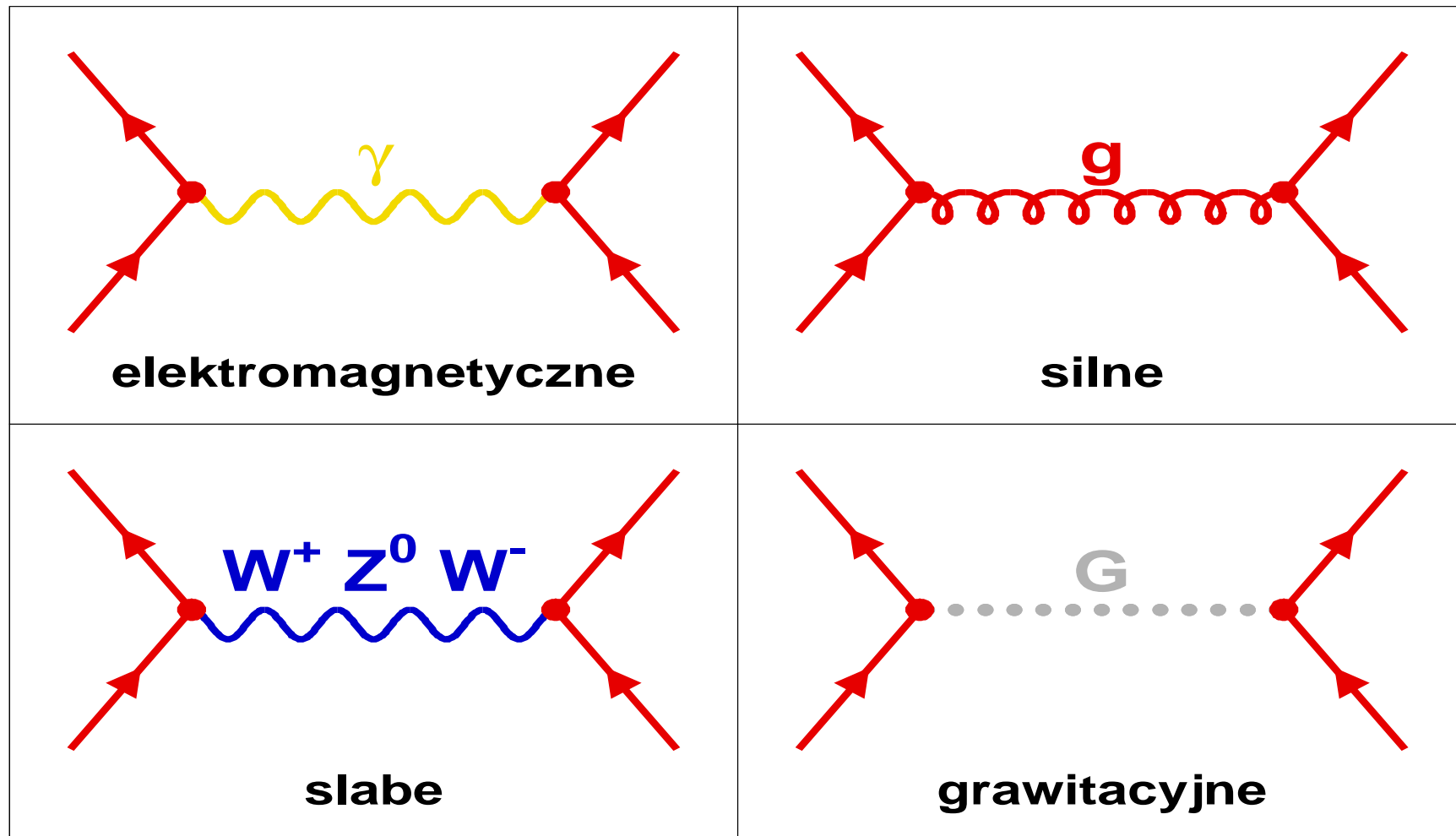
Oddziaływania

Opisujemy je jako wymianę cząstek - “nośników”



Model Standardowy

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



Wprowadzenie

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	<i>grawiton</i>	G	0
elektromag.	ładunek	foton	γ	0
silne	“kolor”	gluony	<i>g</i>	0
słabe	“ładunek słaby”	“bozony pośredniczące”	W^{\pm} Z^0	80 GeV 91 GeV

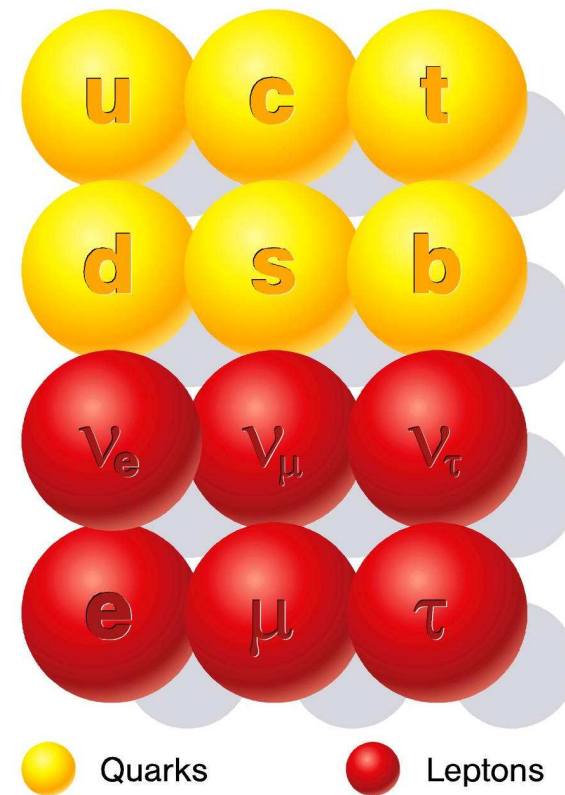
1 GeV = 1 000 000 000 eV \approx masa protonu

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

Wprowadzenie

Model Standardowy

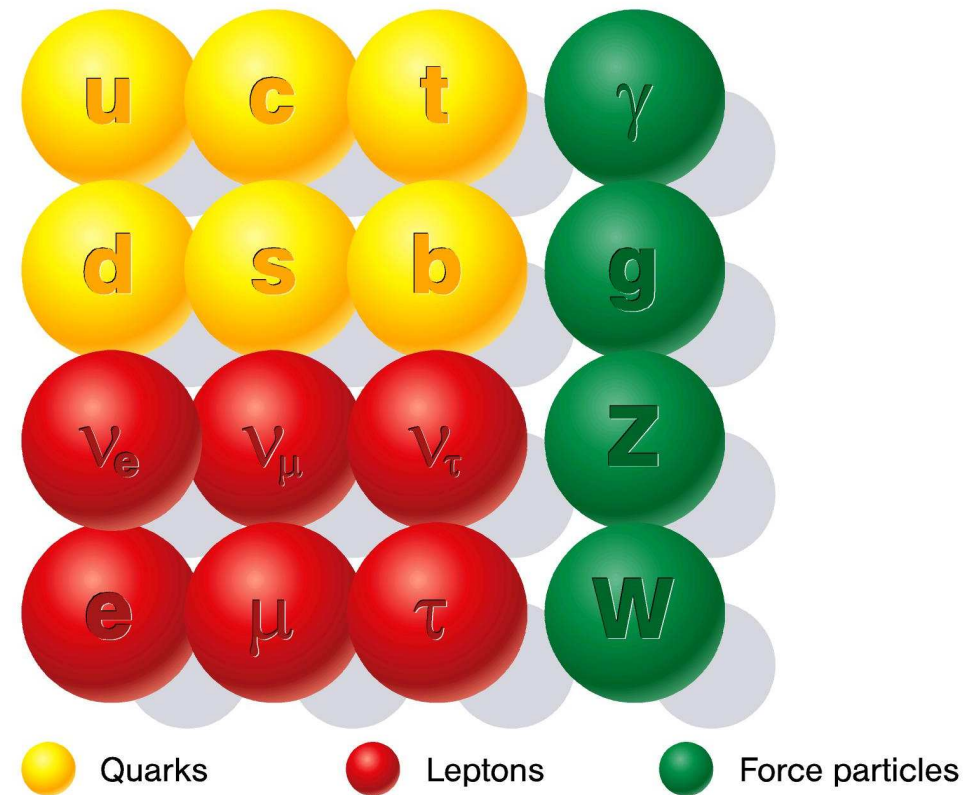
- cząstki materii
kwarki i leptony



Wprowadzenie

Model Standardowy

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

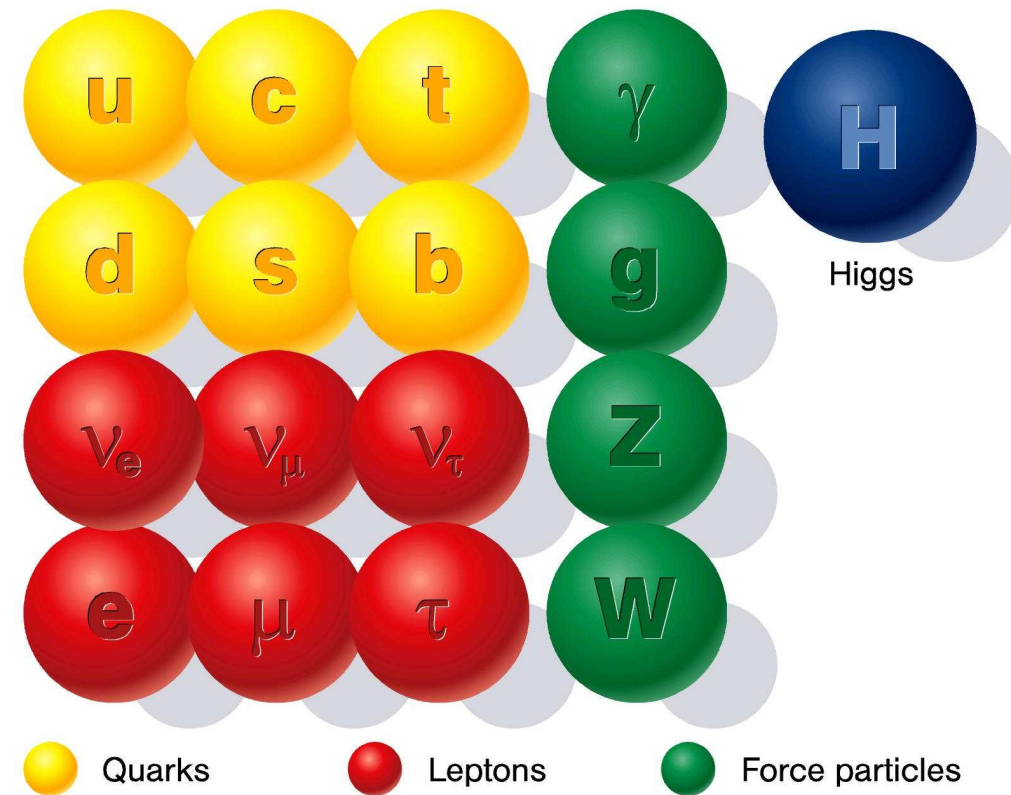


Wprowadzenie

Model Standardowy

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

“Nadaje masy”
wszystkim cząstkom

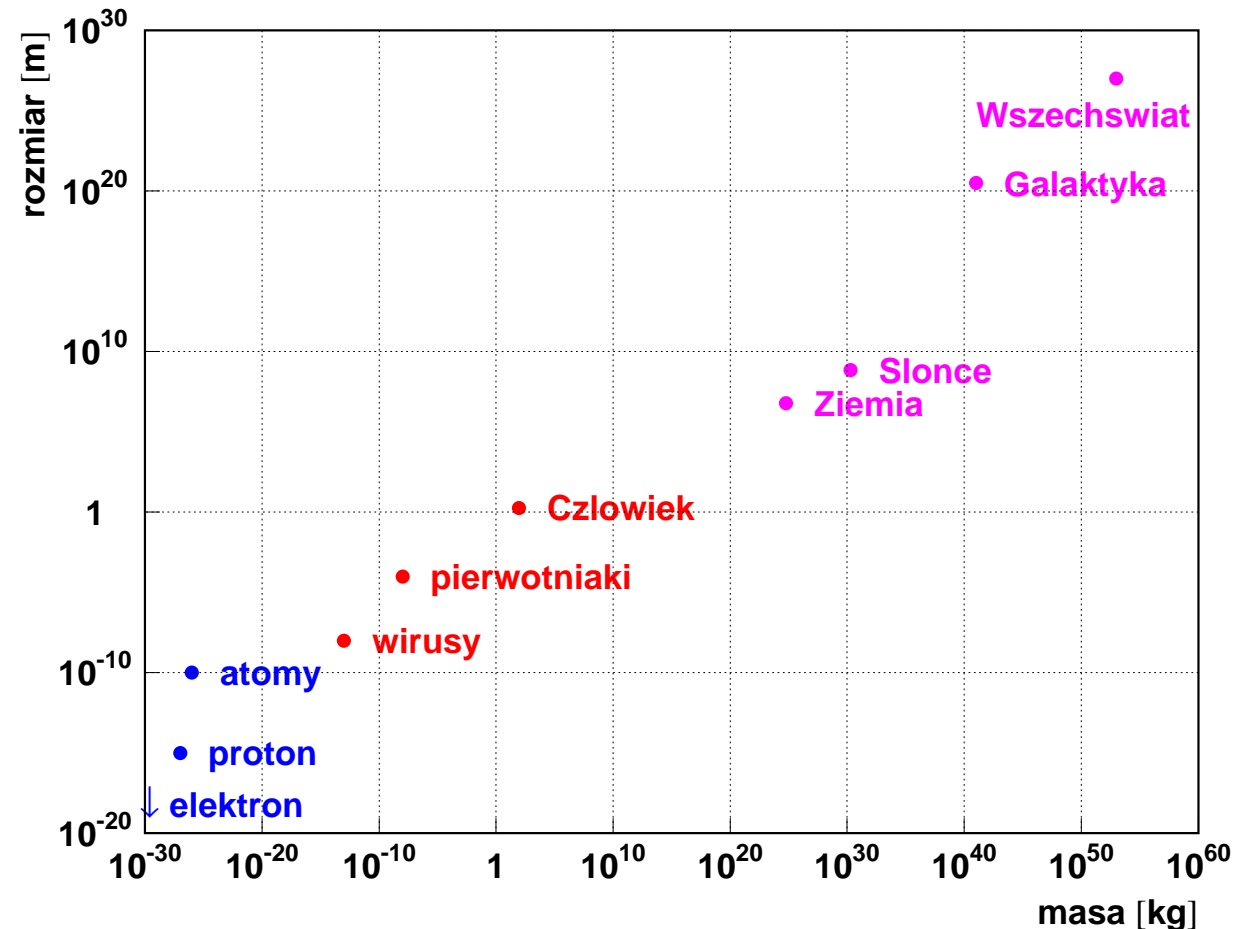


Wprowadzenie

Czym zajmuje się fizyka ?

Fizyka stara się zrozumieć zjawiska zachodzące na **najmniejszych** i **największych** odległościach.

Szuka praw opisujących zarówno zachowanie **najmniejszych cząstek elementarnych** jak i **ewolucję Wszechświata**...



Co może łączyć procesy zachodzące na tak różnych skalach?

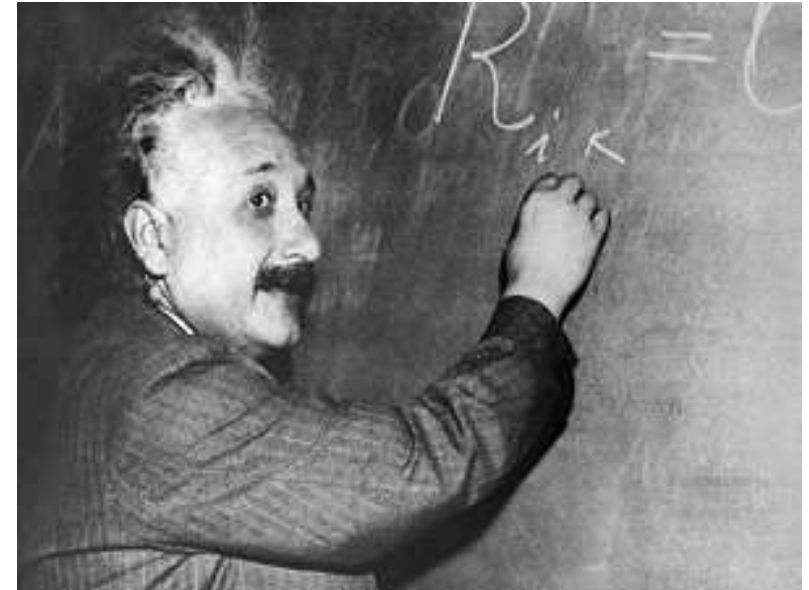


Grawitacja

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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

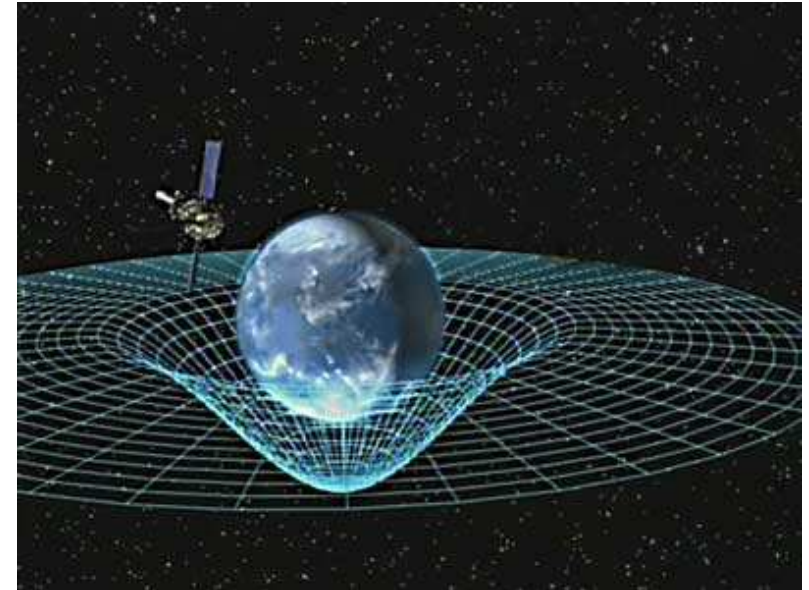


Grawitacja

Ogólna Teoria Względności

W 1916 Einstein zaproponował nowe podejście do opisu grawitacji.

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



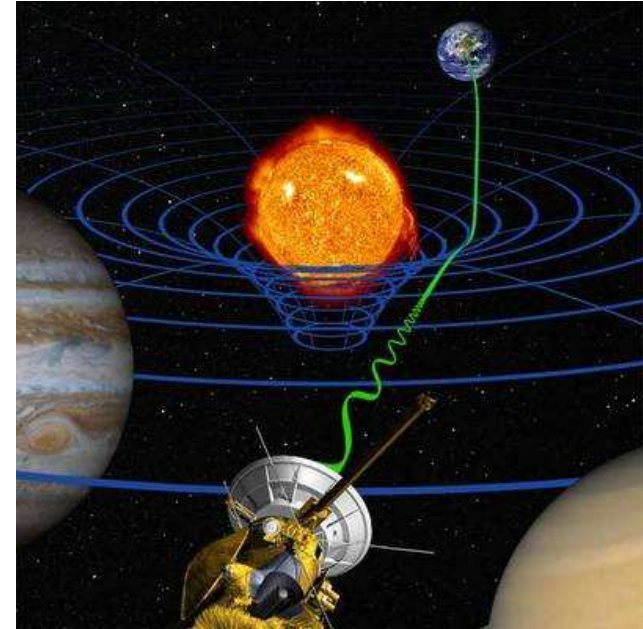
Materia powoduje zakrzywienie czasoprzestrzeni.
Zakrzywienie czasoprzestrzeni decyduje o ruchu materii.

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.

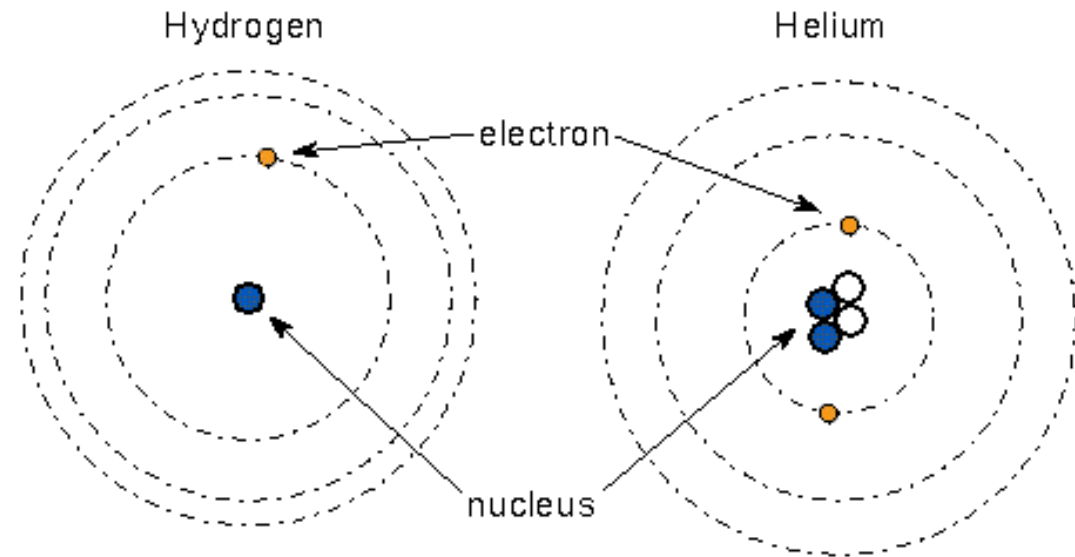
Problem teorii Einsteina: nie istniało statyczne rozwiązanie.

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

Linie widmowe

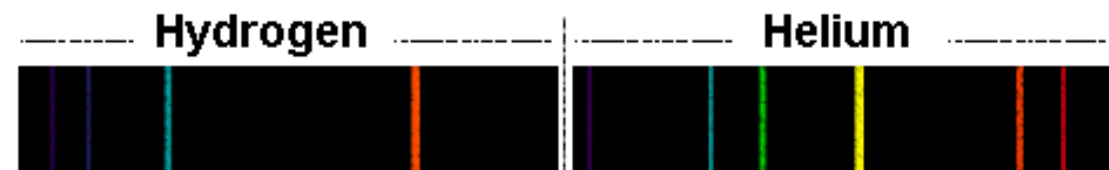
Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.



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

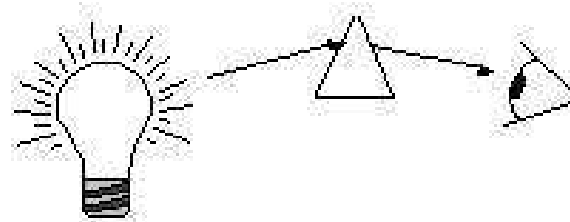
The structure of the atoms for the two most common elements in nature. Different elements have different number of **protons** and different layouts of their energy levels.



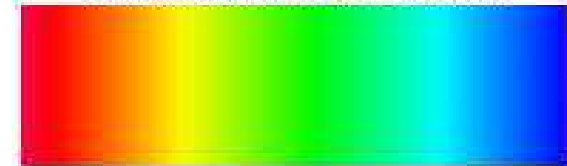
Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

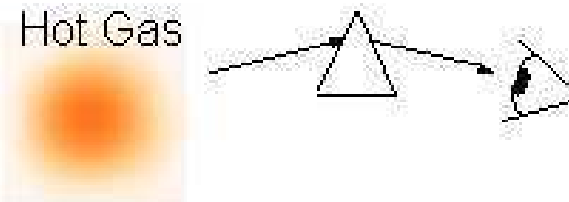


Continuum Spectrum

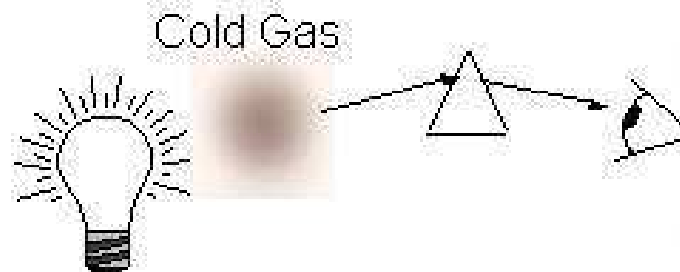
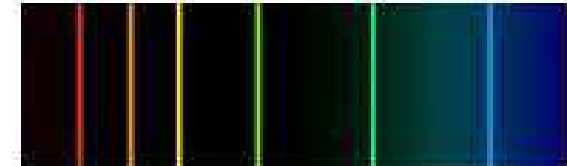


Linie absorpcyjne

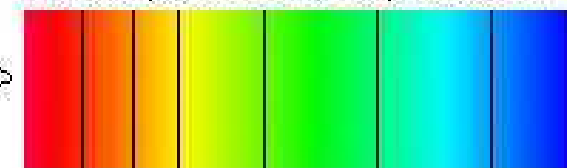
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



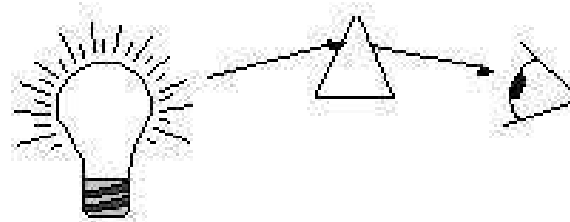
Absorption Line Spectrum



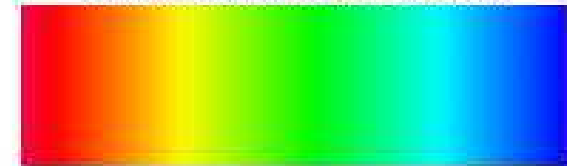
Linie widmowe

Linie emisyjne

Światło emitowane przez wzbudzone atomy.

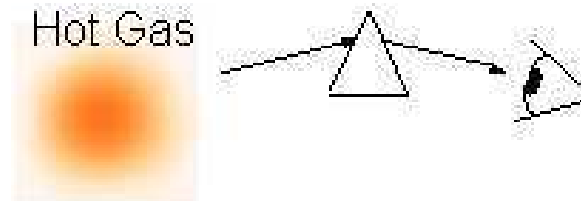


Continuum Spectrum

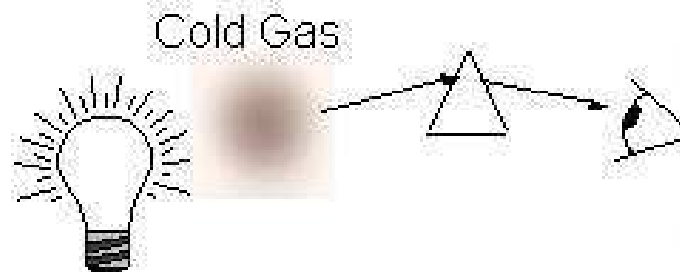
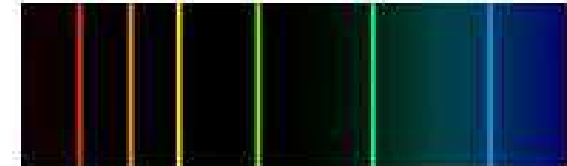


Linie absorpcyjne

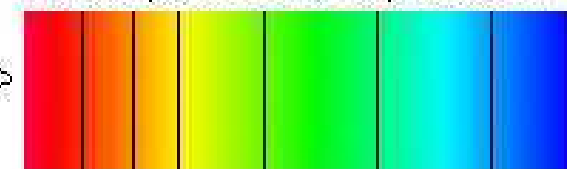
Widoczne w świetle przechodzącym przez gaz.



Emission Line Spectrum



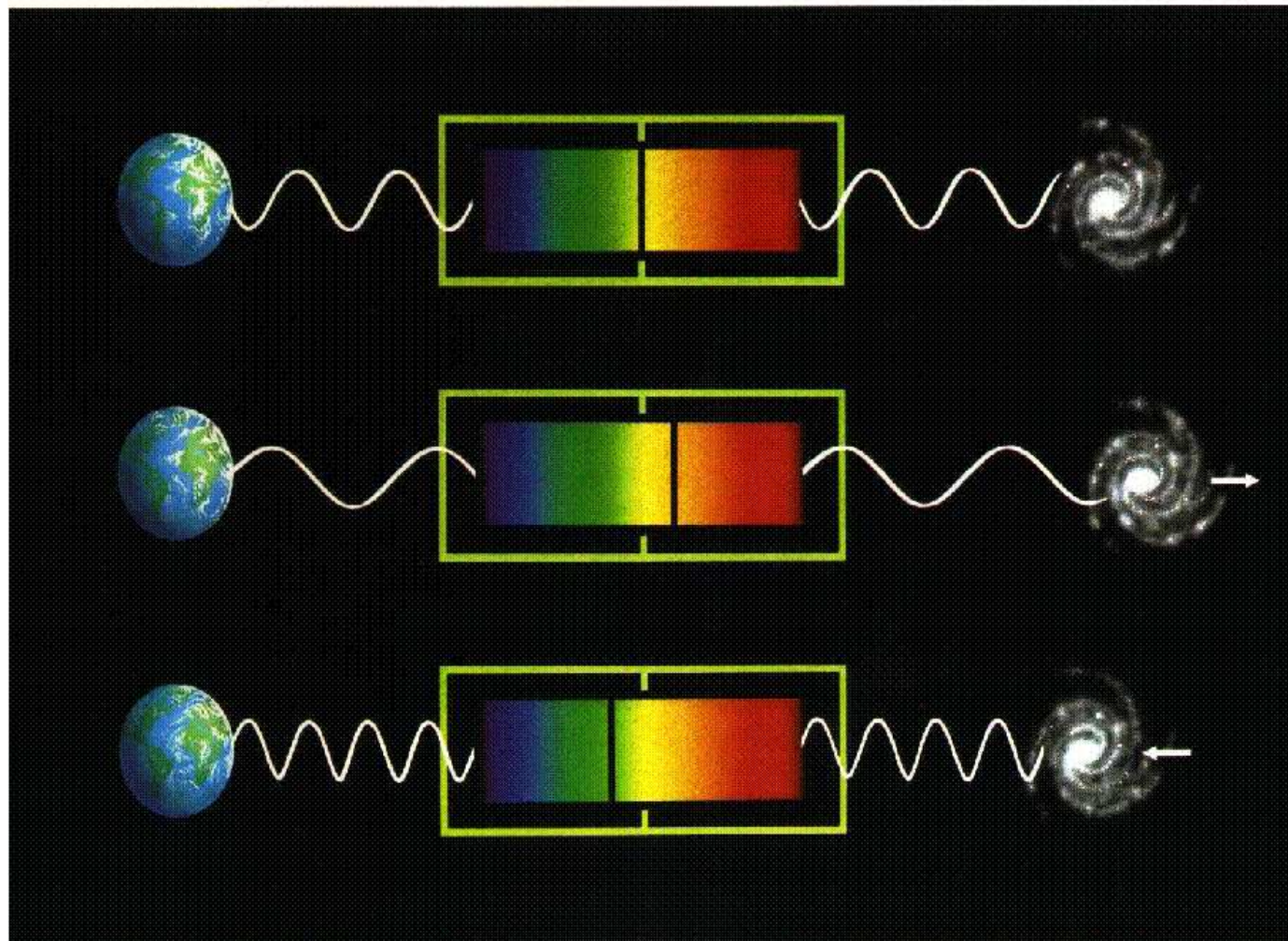
Absorption Line Spectrum



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

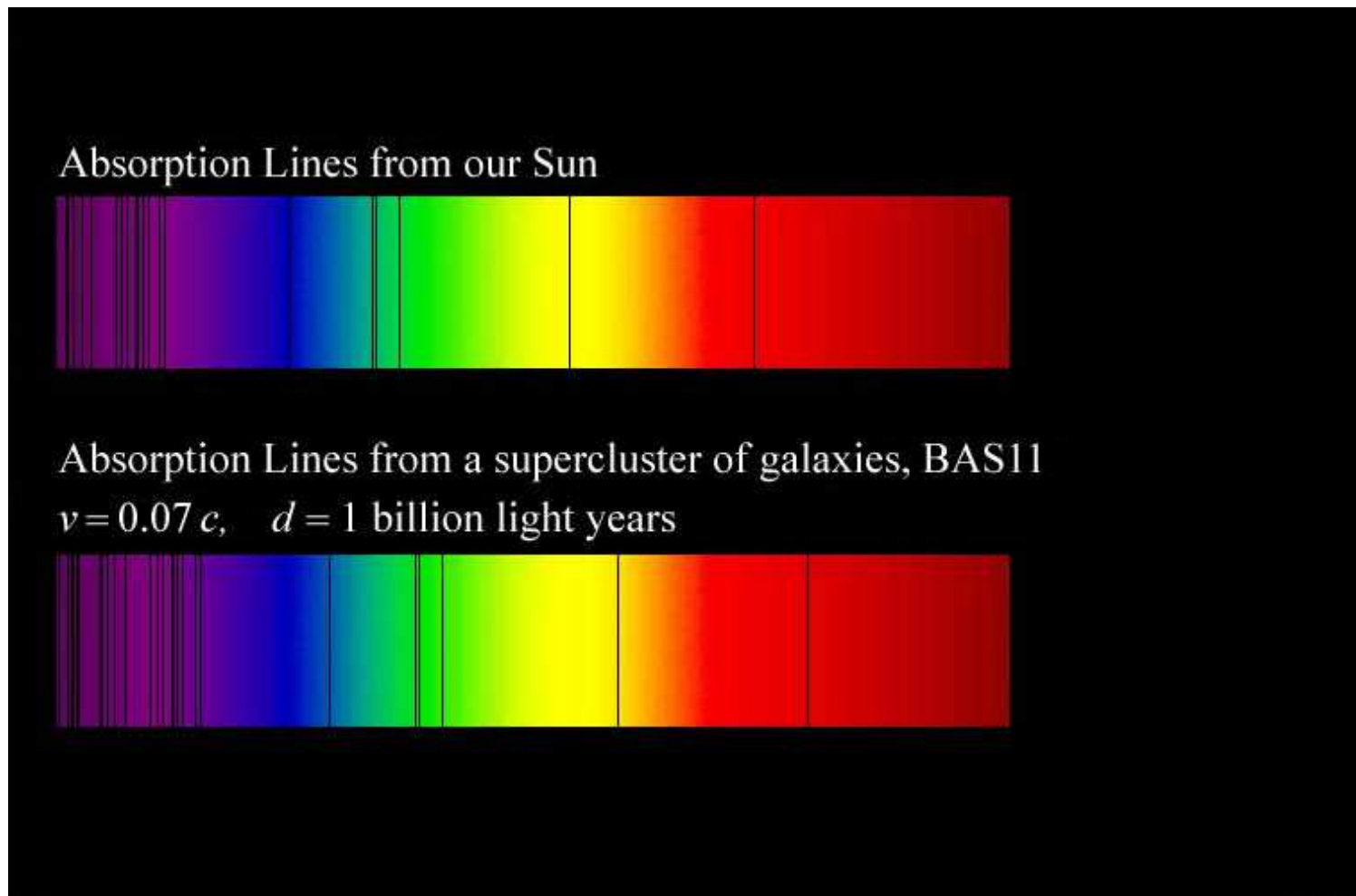
Efekt Dopplera dla światła

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**

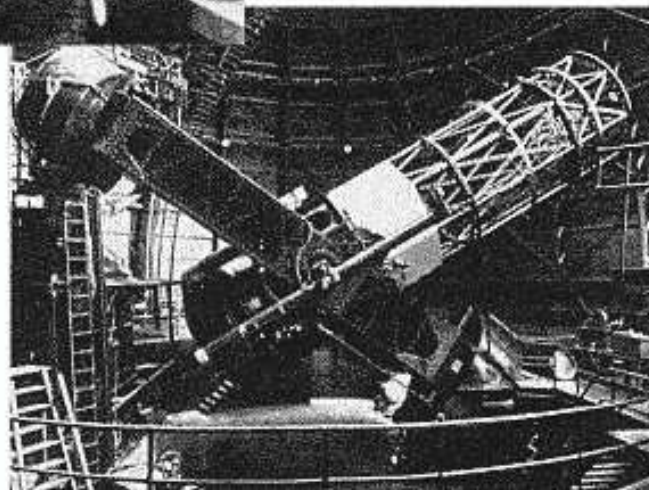
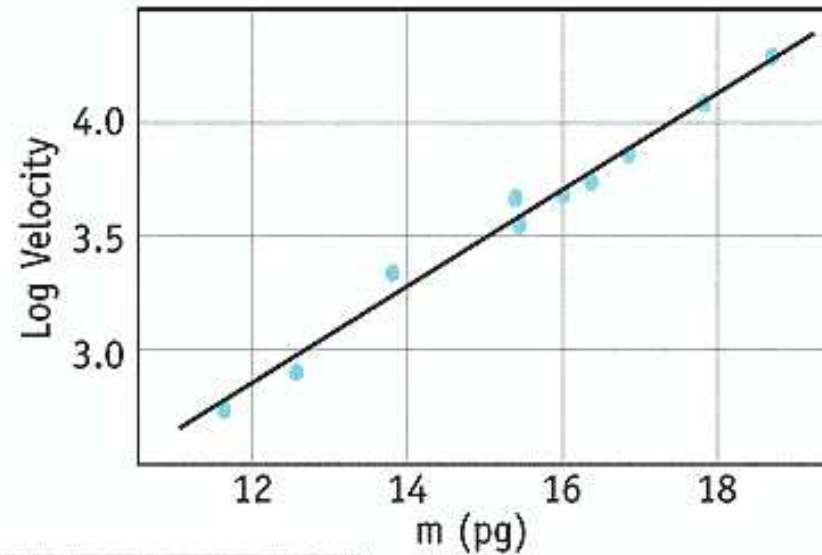


Prawo Hubble (1929)

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope



Prawo Hubble'a (1929)

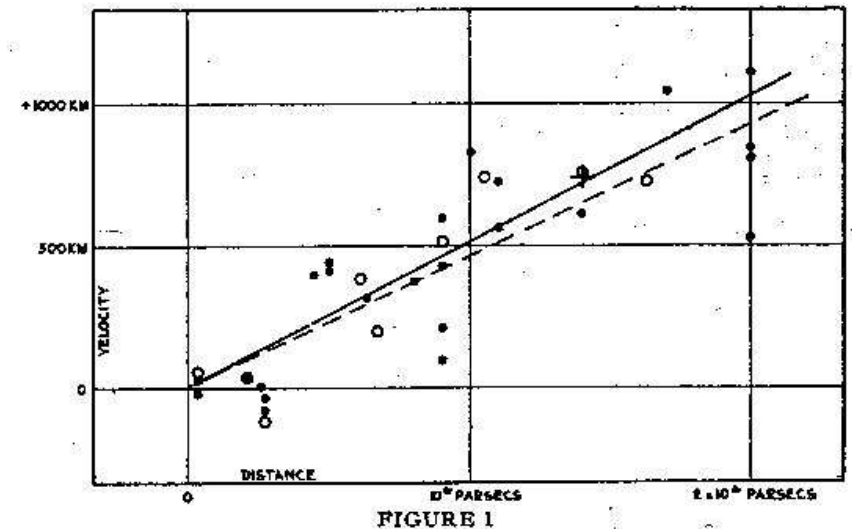
Edwin Hubble jako pierwszy powiązał obserwowane prędkości mgławic z ich odległością od Ziemi.

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:

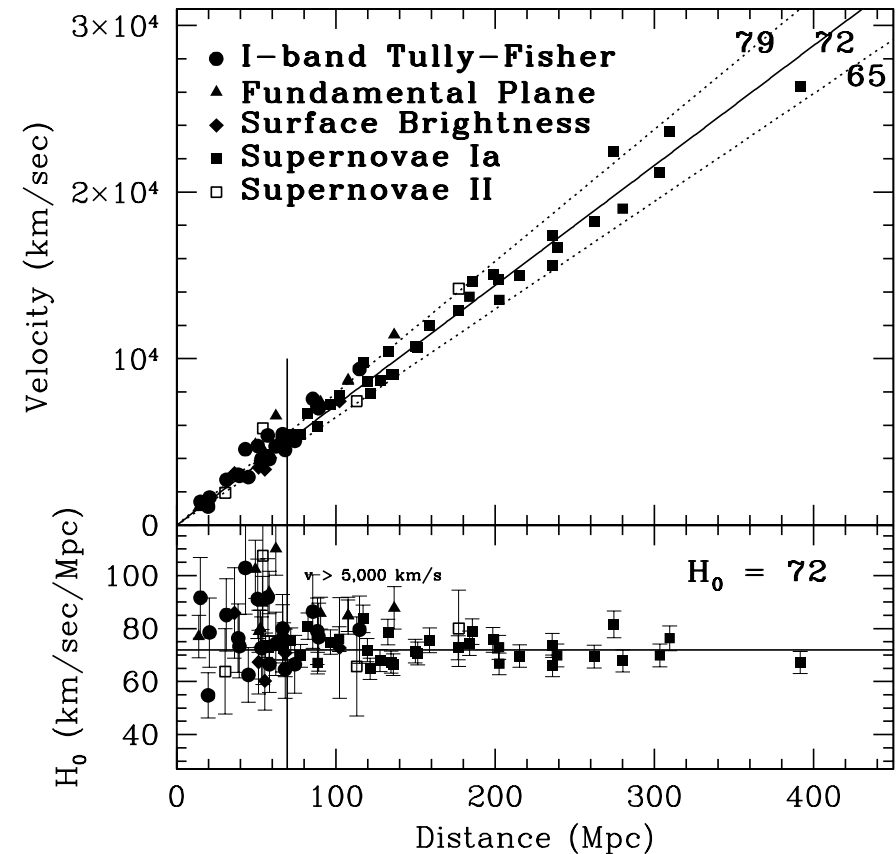
$$v = H \cdot r$$

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".

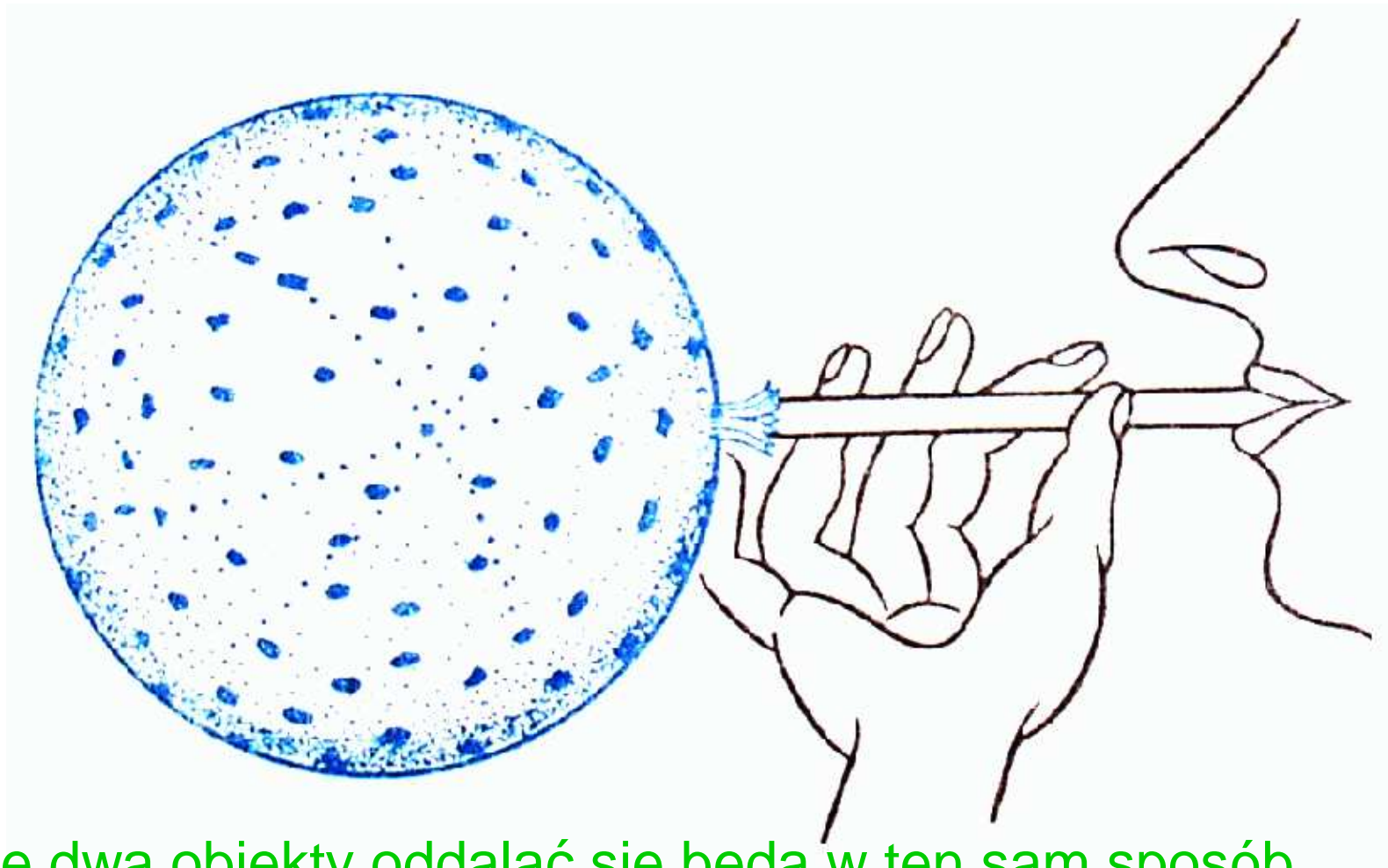
Najczęściej posługujemy się tzw. świecami standardowymi - obiektami, których bezwzględna jasność jest znana.

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



Prawo 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...

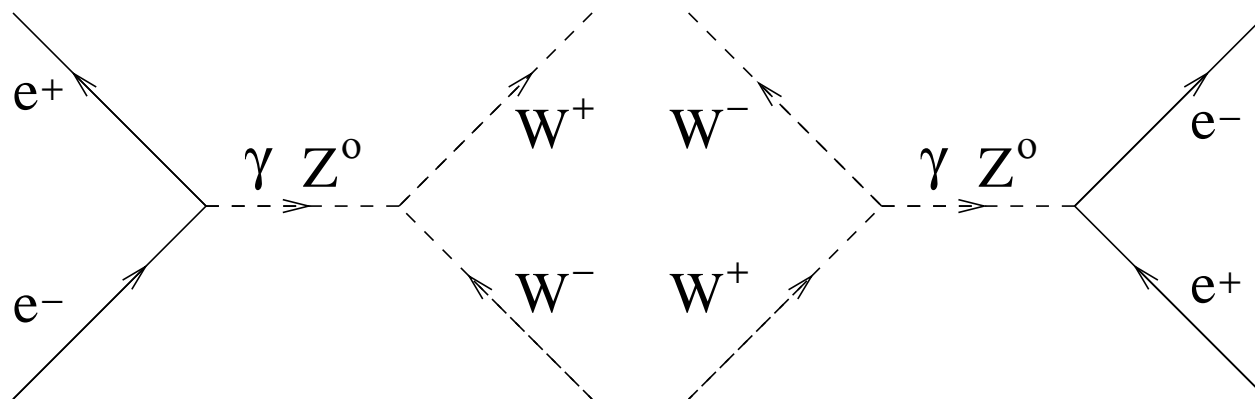
Ewolucja Wszechświata

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**.

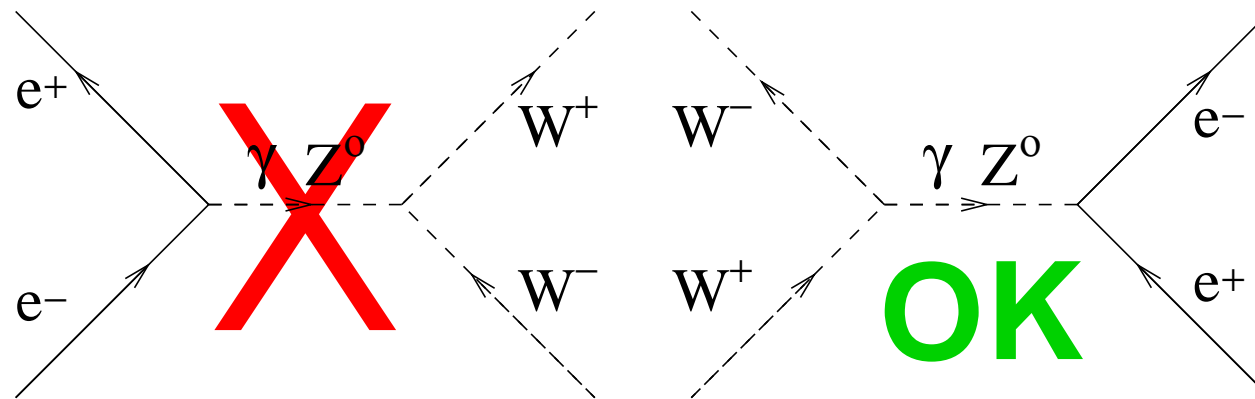


Jednak w miarę rozszerzania Wszechświata **energie cząstek malały...**



Ewolucja Wszechświata

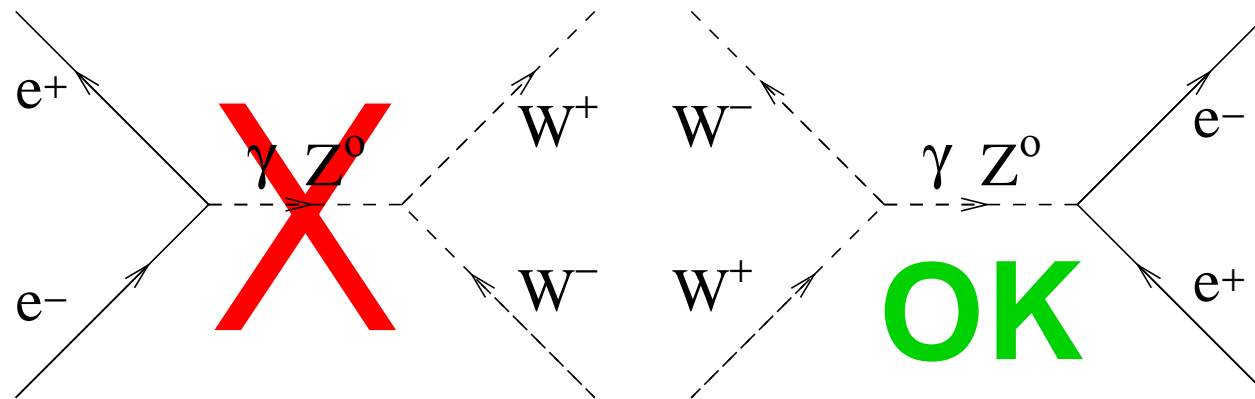
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

Ewolucja Wszechświata

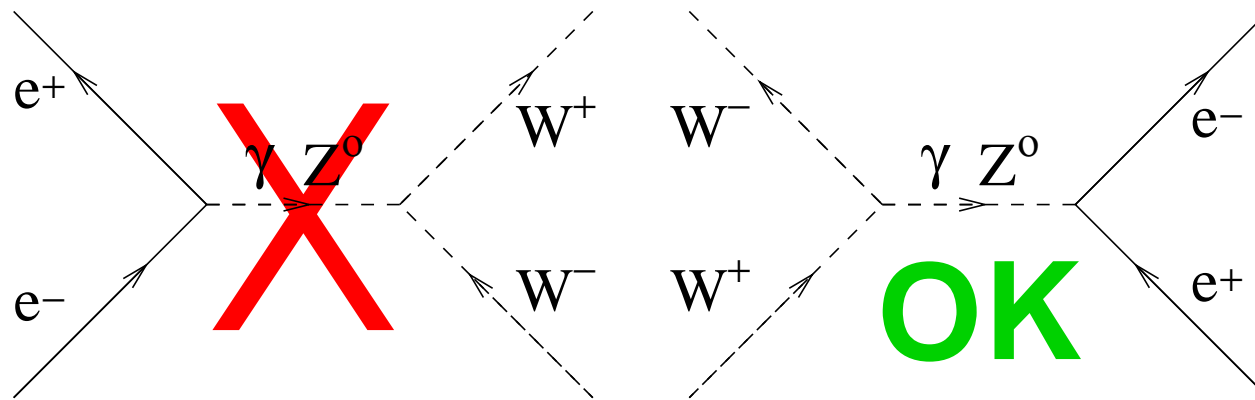
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



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

Ewolucja Wszechświata

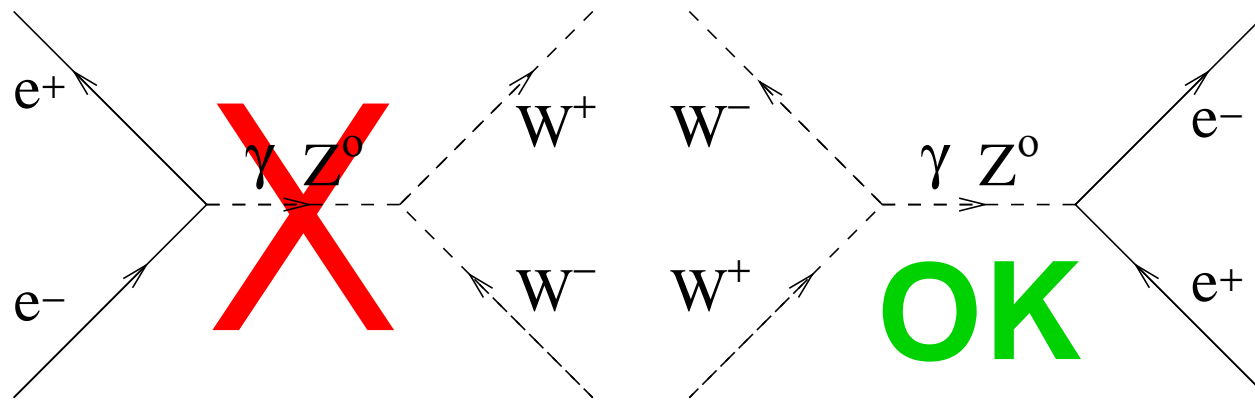
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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

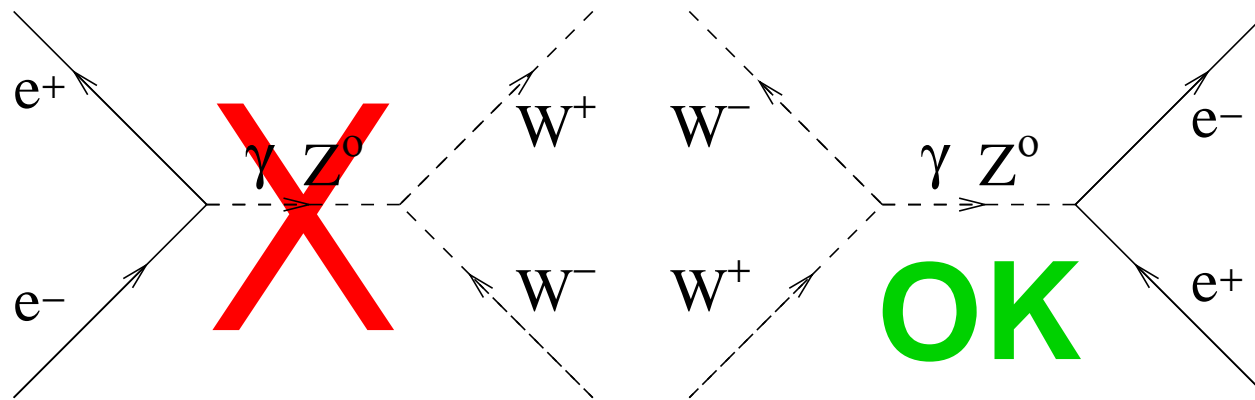
W miarę **rozszerzania** maleją energie zderzających się cząstek. Stopniowo przestają być produkowane i **zanikają najcięższe cząstki**, a zaczynają powstawać **stany związane**:



- 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)

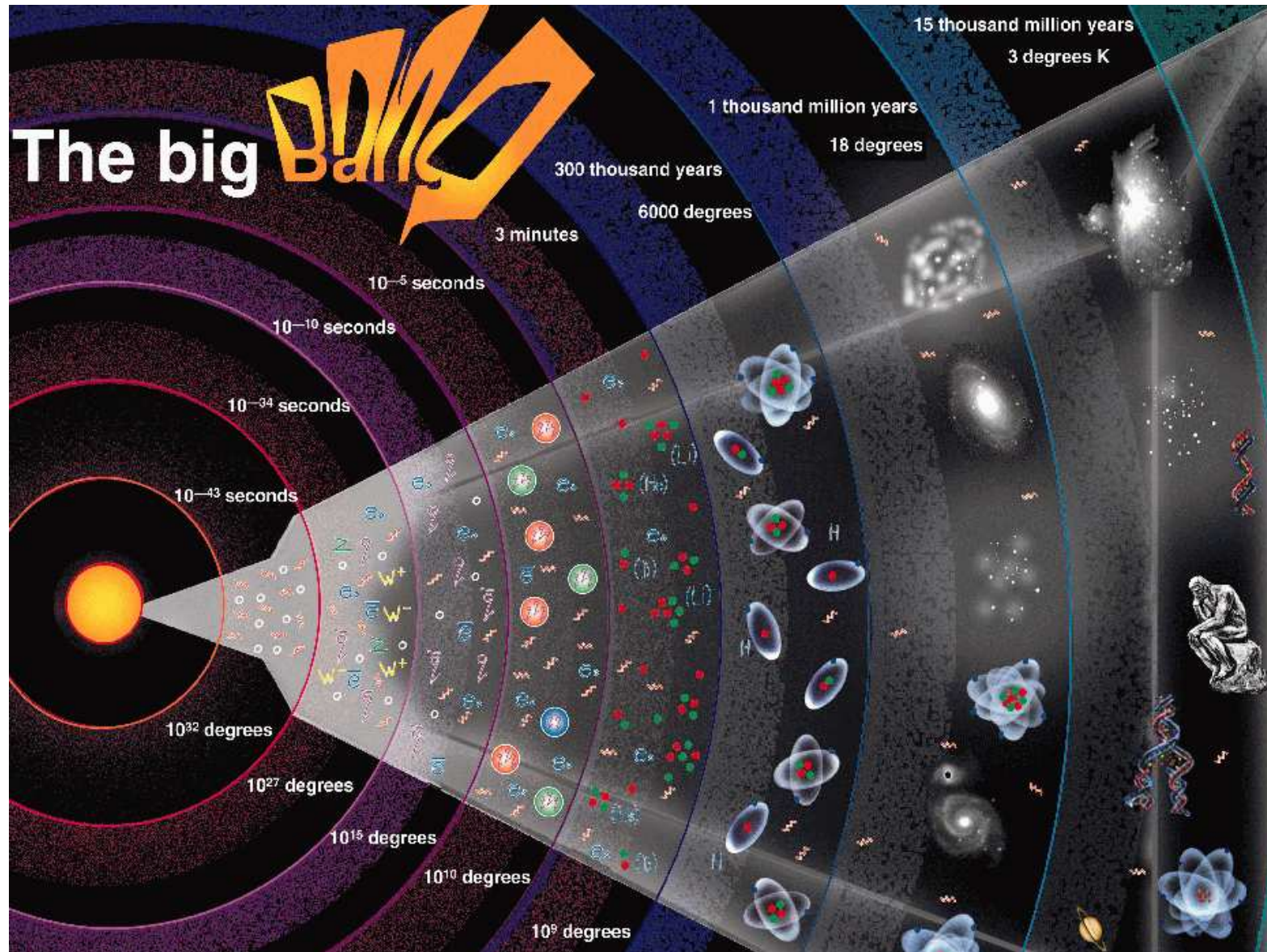
Ewolucja Wszechświata

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)
- formacja galaktyk, gwiazdy, synteza ciężkich pierwiastków (1 Gy)

Ewolucja Wszechświata



Ewolucja Wszechświata

Czy Wszechświat będzie się rozszerzał w nieskończoność ?

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

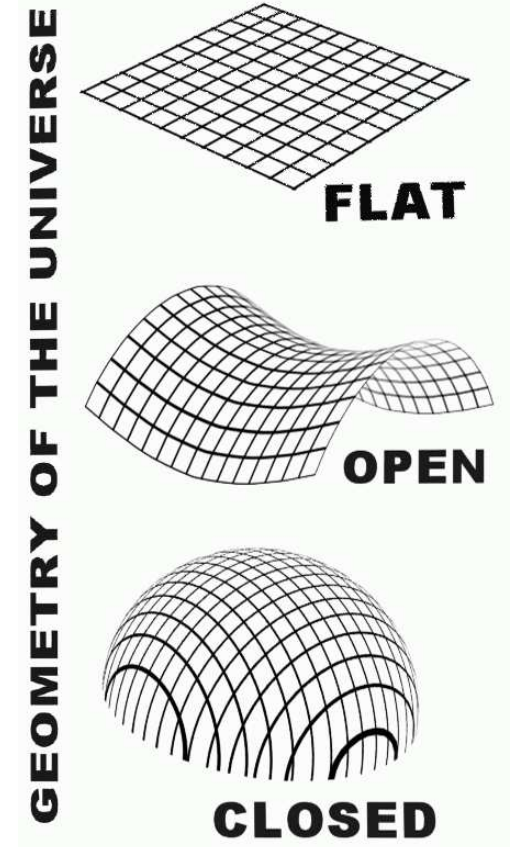
Gęstość krytyczna: $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \sim 10^{-26} \text{ kg/m}^3$

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

$\rho < \rho_c$ będzie zawsze rozszerzał się

$\rho > \rho_c$ kiedyś zacznie się zapadać

Pomijając wkład od stałej kosmologicznej!



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”

$$\Omega_b \sim 0.04$$

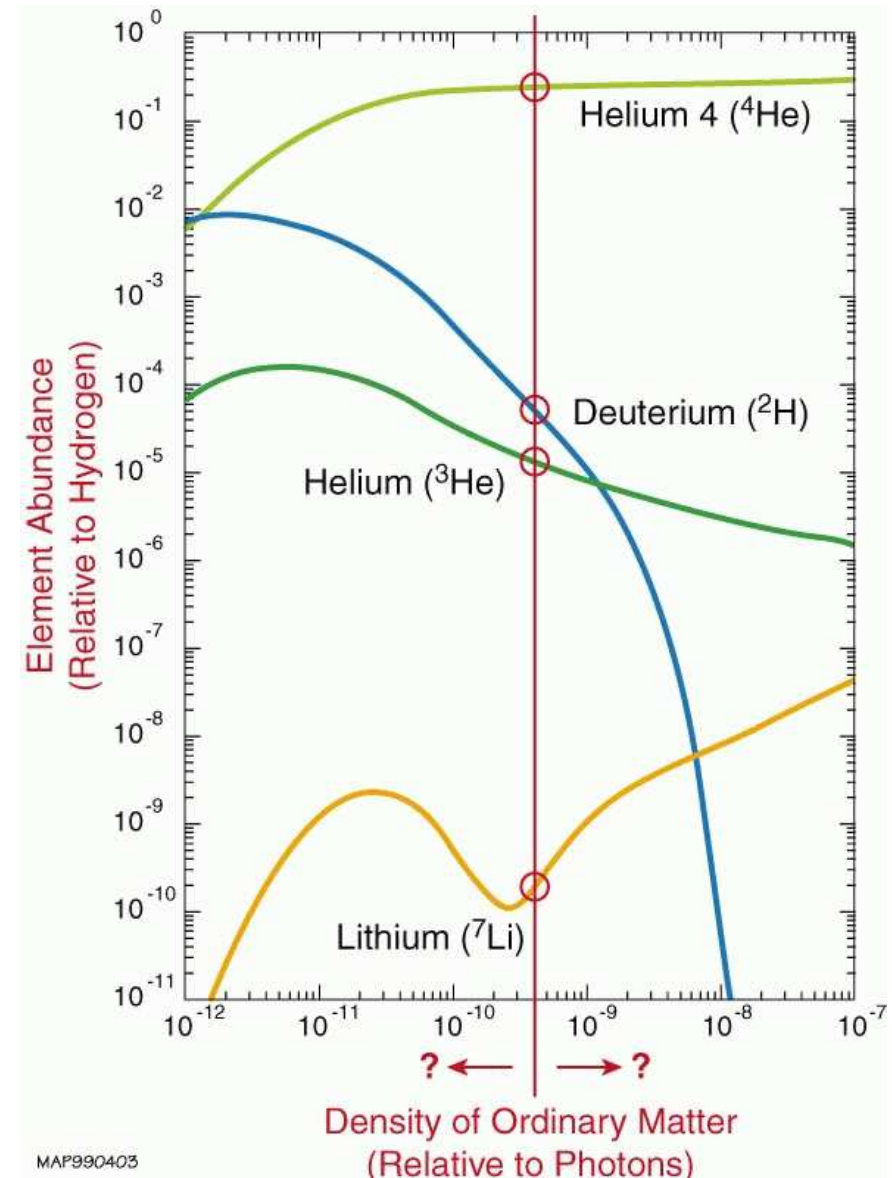
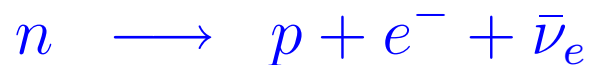
Pierwotna nukleosynteza

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

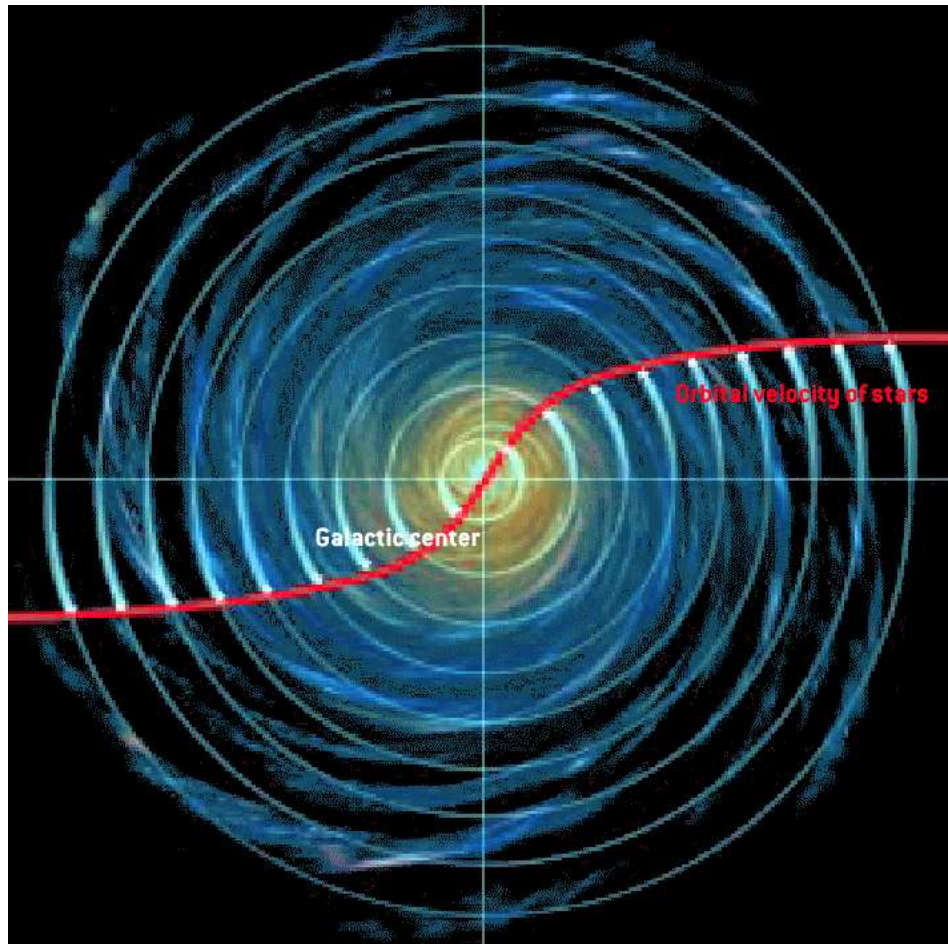
Produkcja deuteru:



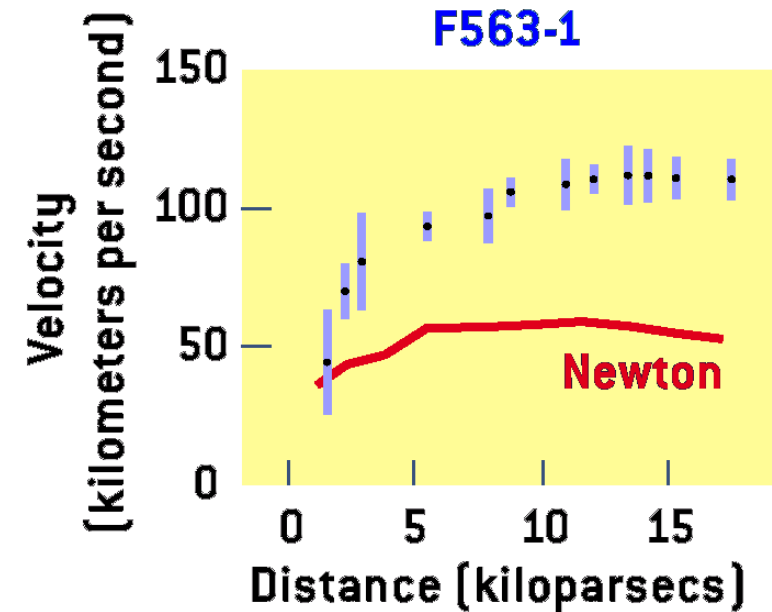
Konkurencyjny jest rozpad neutronu (zachodzi niezależnie od gęstości):



Oddziaływania grawitacyjne



Znane nam prawa dynamiki nie tłumaczą rotacji galaktyk.

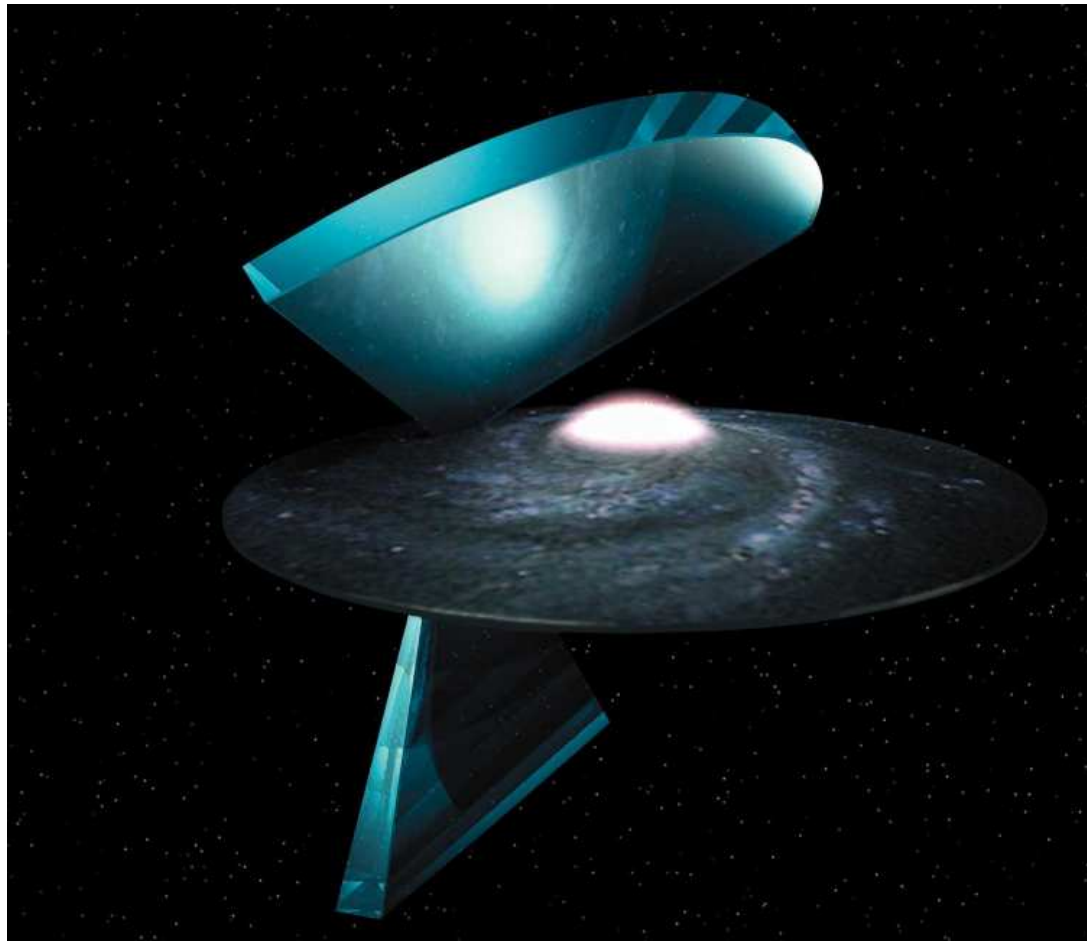


Ramiona wirują szybciej niż oczekivalibyśmy z praw grawitacji i dynamiki

Oddziaływania grawitacyjne

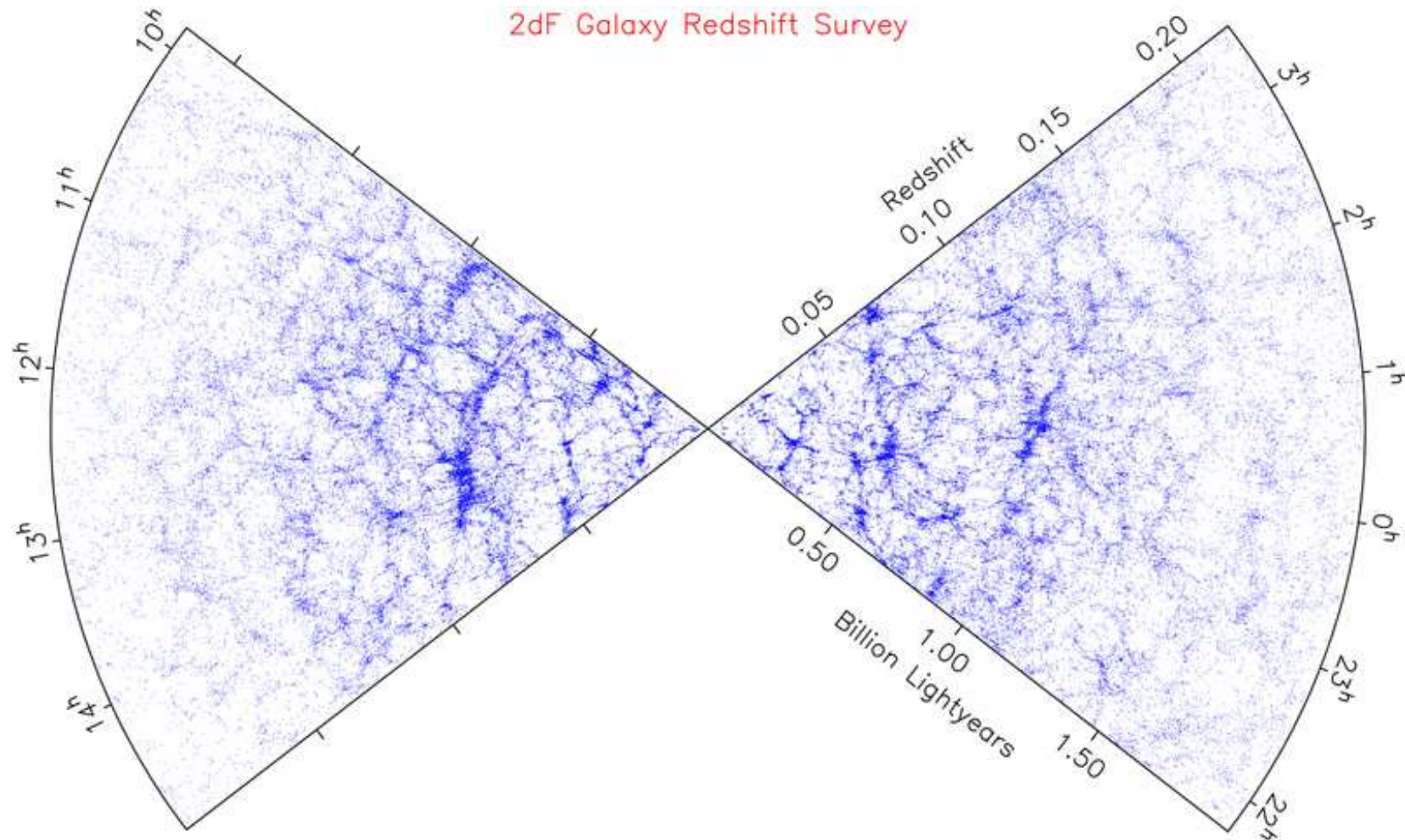
Projekt 2dF Galaxy Redshift Survey

Pomiar przesunięcia ku czerwieni dla około 250 000 galaktyk



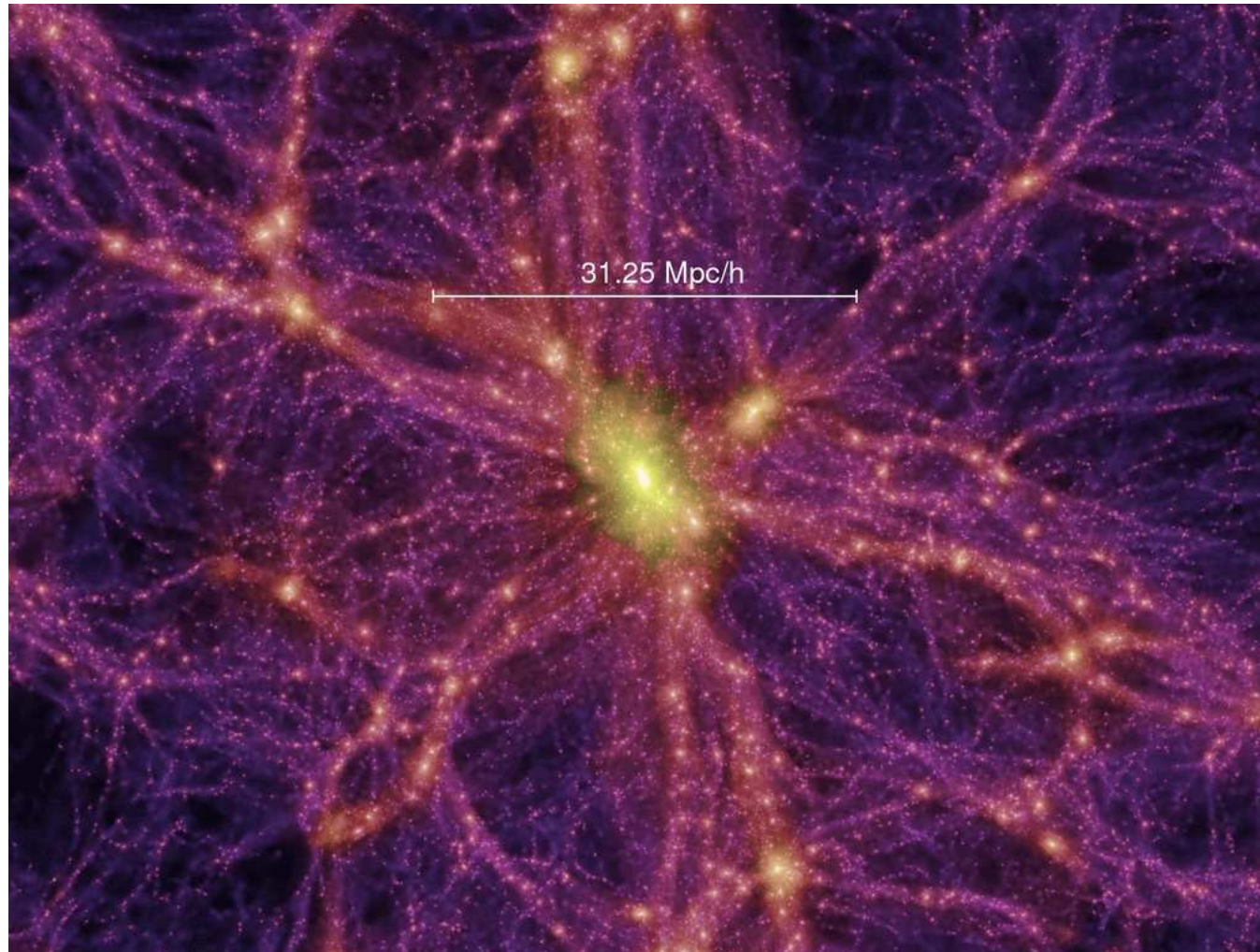
Oddziaływania grawitacyjne

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)

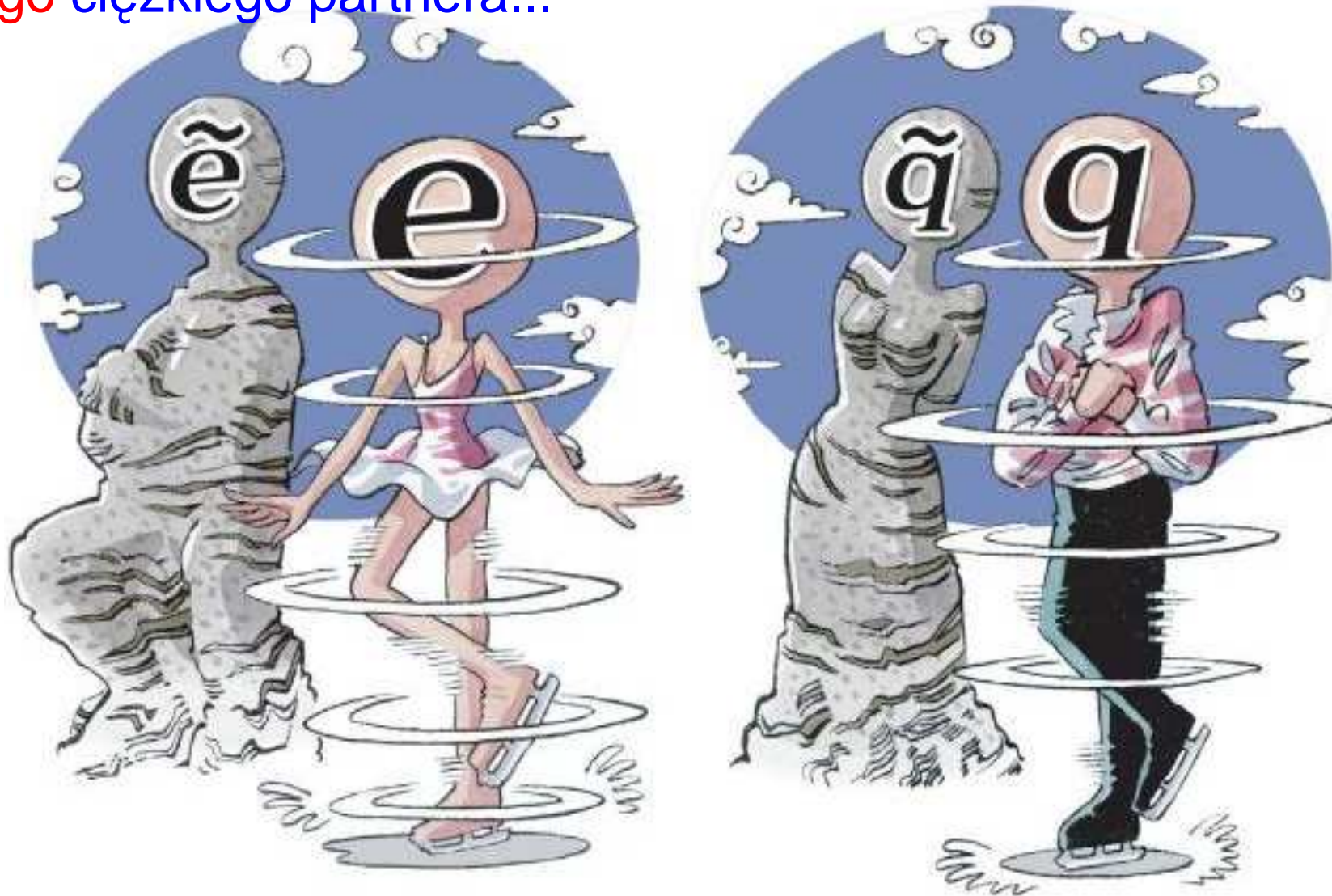
Nie wiemy:

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

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

Ciemna materia

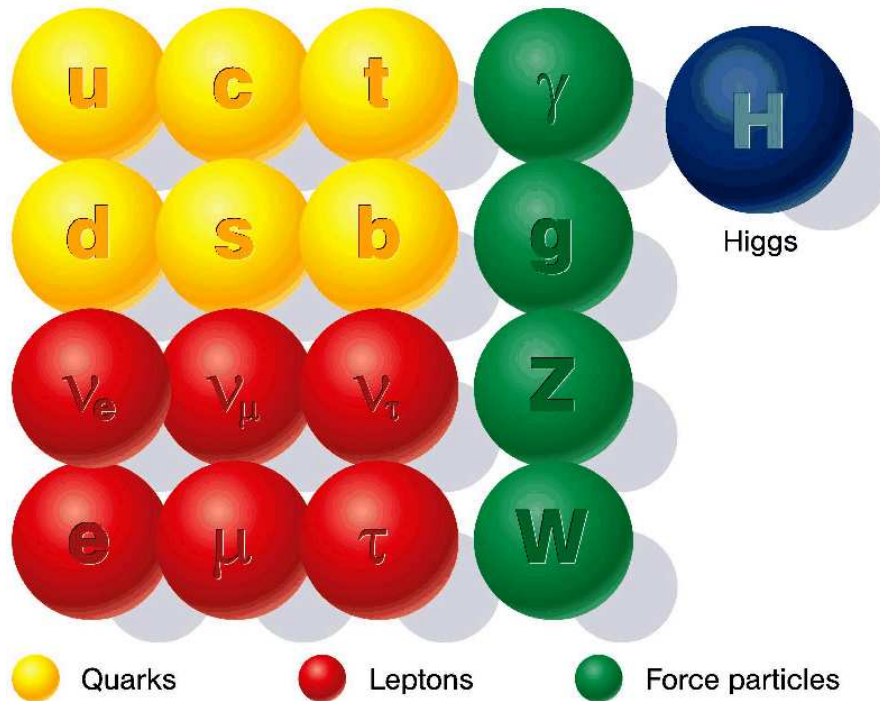
Supersymetria przewiduje, że każda z obecnie znanych cząstek ma swojego ciężkiego partnera...



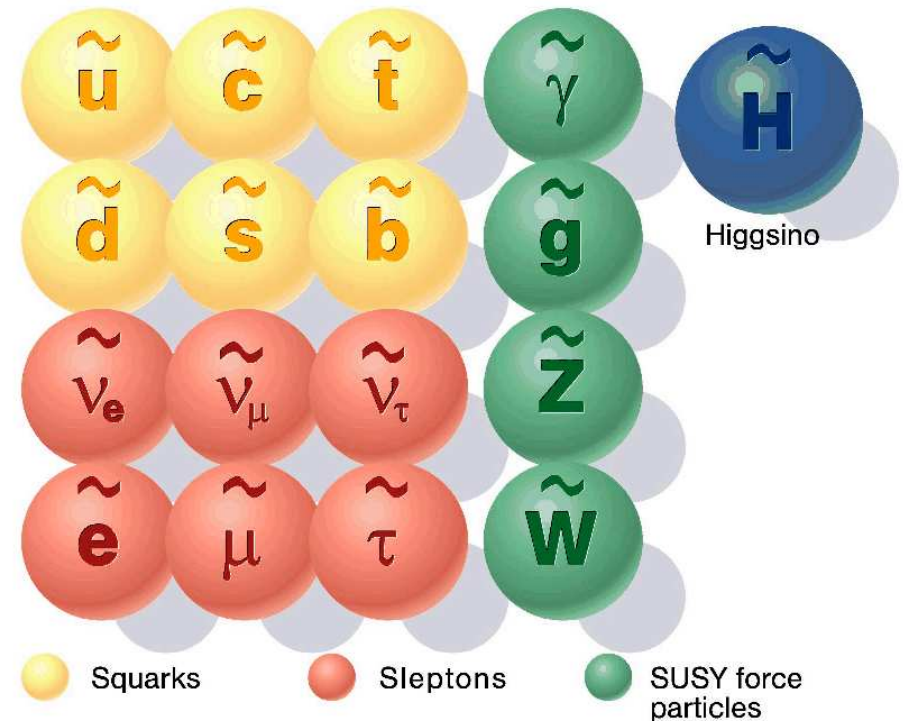
Ciemna materia

Supersymetria przewiduje, że każda z obecnie znanych cząstek ma swojego ciężkiego partnera...

Standard particles



SUSY particles



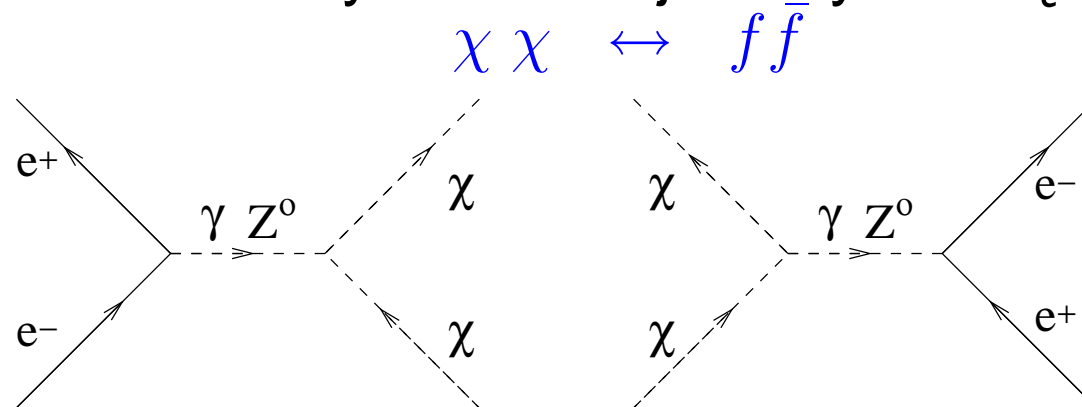
Najlżejsza cząstka supersymetryczna powinna być trwała!
(nie rozpada się)



Ciemna materia

Ale także inne modele “nowej fizyki” przewidują istnienie trwałej
WIMP - Weakly Interacting Massive Particle

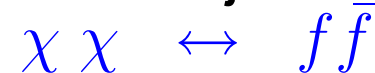
- Zaraz po Wielkim Wybuchu WIMP (np. ciężkie neutralino χ) jest w **równowadze** termodynamicznej z innymi cząstkami:



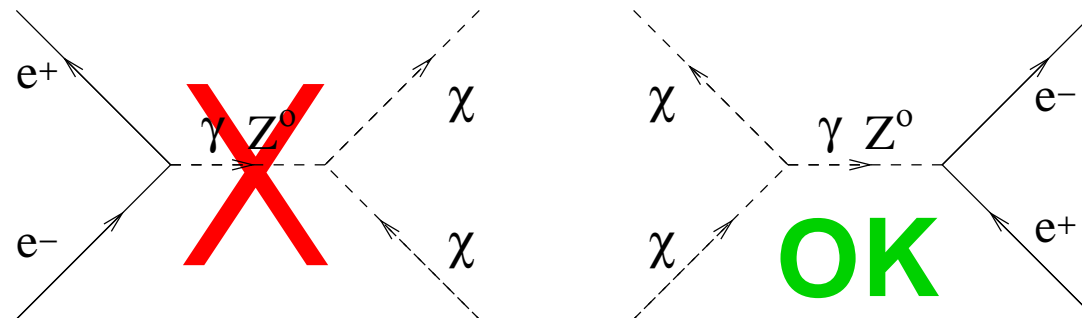
Ciemna materia

Ale także inne modele “nowej fizyki” przewidują istnienie trwałej
WIMP - Weakly Interacting Massive Particle

- Zaraz po Wielkim Wybuchu WIMP (np. ciężkie neutralino χ) jest w **równowadze** termodynamicznej z innymi cząstkami:



- Gdy Wszechświat się “oziębia” zaczyna przeważać **anihilacja**, ich gęstość szybko maleje



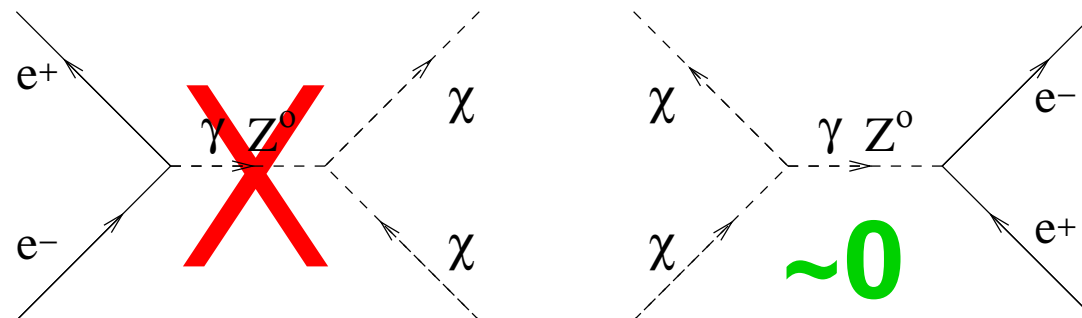
Ciemna materia

Ale także inne modele “nowej fizyki” przewidują istnienie trwałej **WIMP - Weakly Interacting Massive Particle**

- Zaraz po Wielkim Wybuchu WIMP (np. ciężkie neutralino χ) jest w **równowadze** termodynamicznej z innymi cząstkami:

$$\chi \chi \leftrightarrow f \bar{f}$$

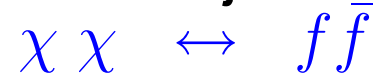
- Gdy Wszechświat się “oziębia” zaczyna przeważać **anihilacja**, ich gęstość szybko maleje
- Ale na skutek rozszerzania gęstość LSP staje się na tyle mała, że anihilacja przestaje efektywnie zachodzić - **“wymrożenie”**



Ciemna materia

Ale także inne modele “nowej fizyki” przewidują istnienie trwałej
WIMP - Weakly Interacting Massive Particle

- Zaraz po Wielkim Wybuchu WIMP (np. ciężkie neutralino χ) jest w **równowadze** termodynamicznej z innymi cząstkami:



- Gdy Wszechświat się “oziębia” zaczyna przeważać **anihilacja**, ich gęstość szybko maleje
- Ale na skutek rozszerzania gęstość LSP staje się na tyle mała, że anihilacja przestaje efektywnie zachodzić - **“wymrożenie”**

Obecna gęstość WIMP we Wszechświecie silnie zależy od masy tej cząstki oraz od przekroju czynnego na jej produkcję i anihilację.

LHC

Large Hadron Collider

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

Przeciwbieżne wiązki protonów o
energii 3.5 TeV (docelowo 7 TeV).

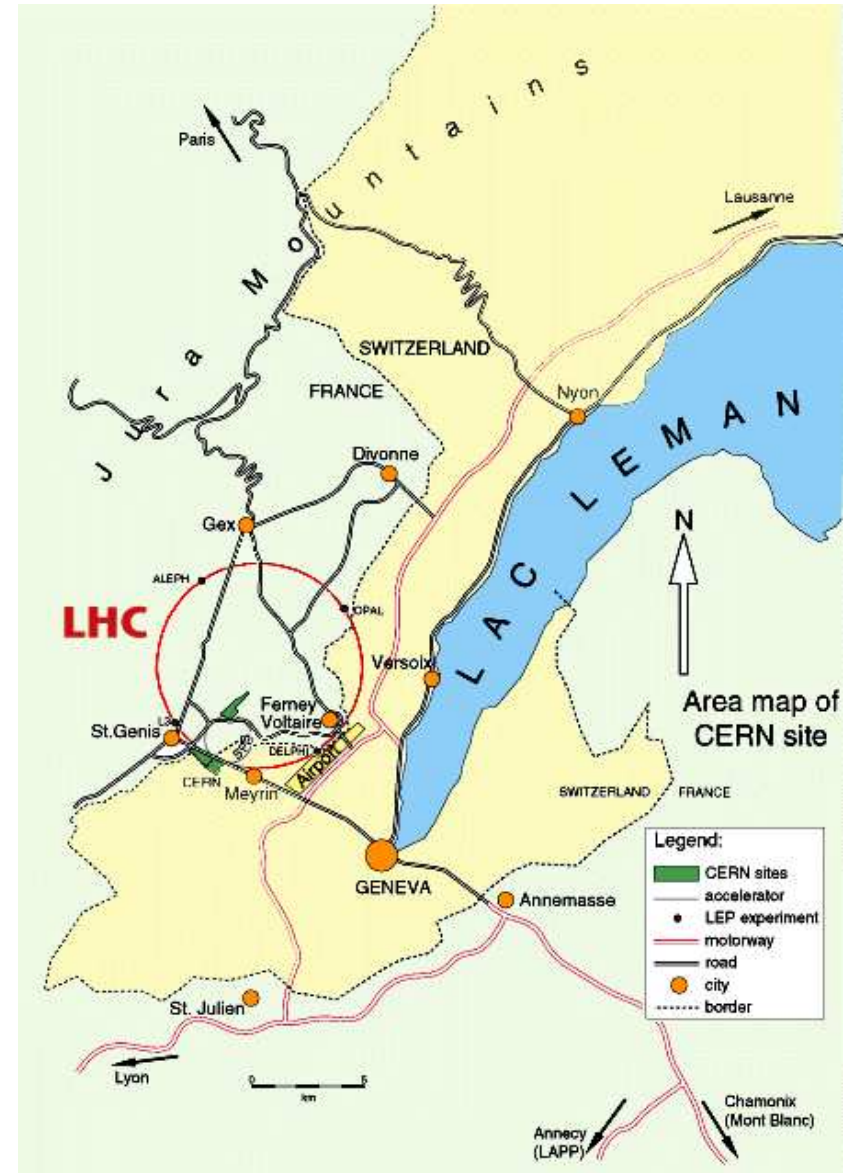
W wiązce docelowo 2800 "paczek"
po 10^{11} protonów.

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

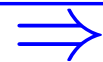
Samochód osobowy ok. 60 km/h

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

Zderzenia paczek co 25 ns
(40 milionów na sekundę)



LHC



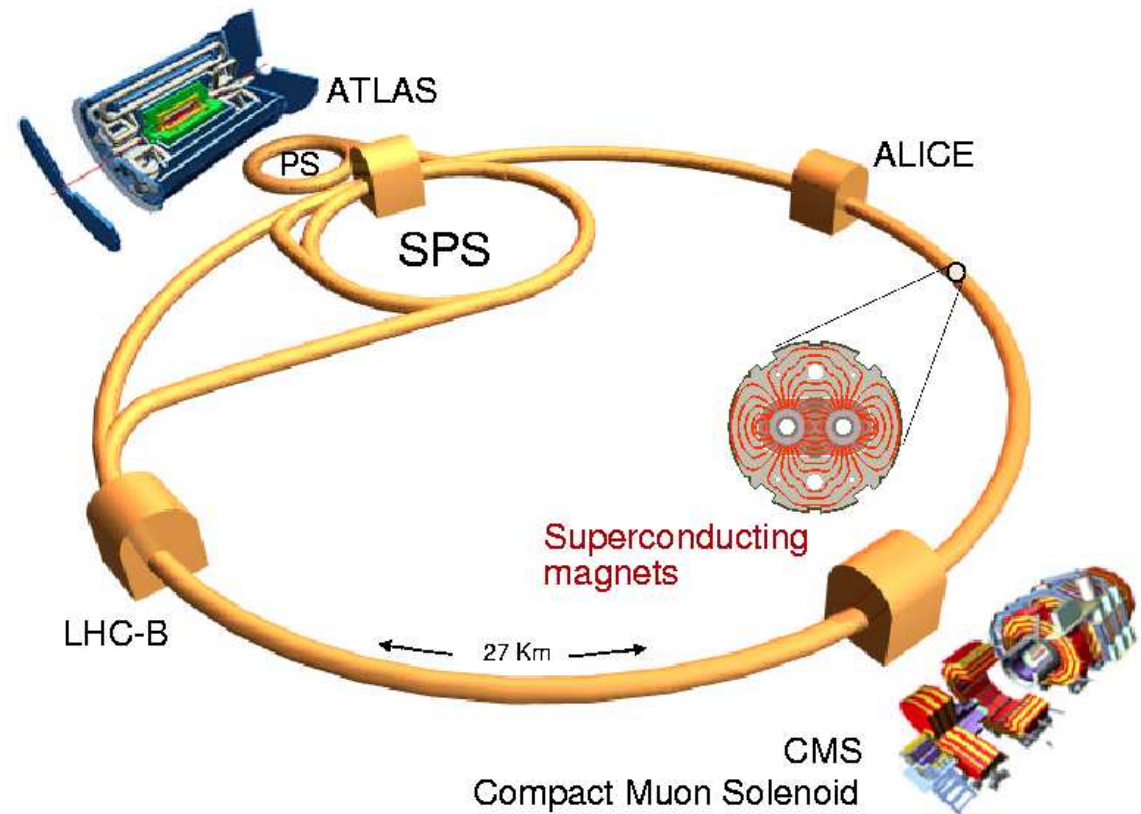
LHC

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

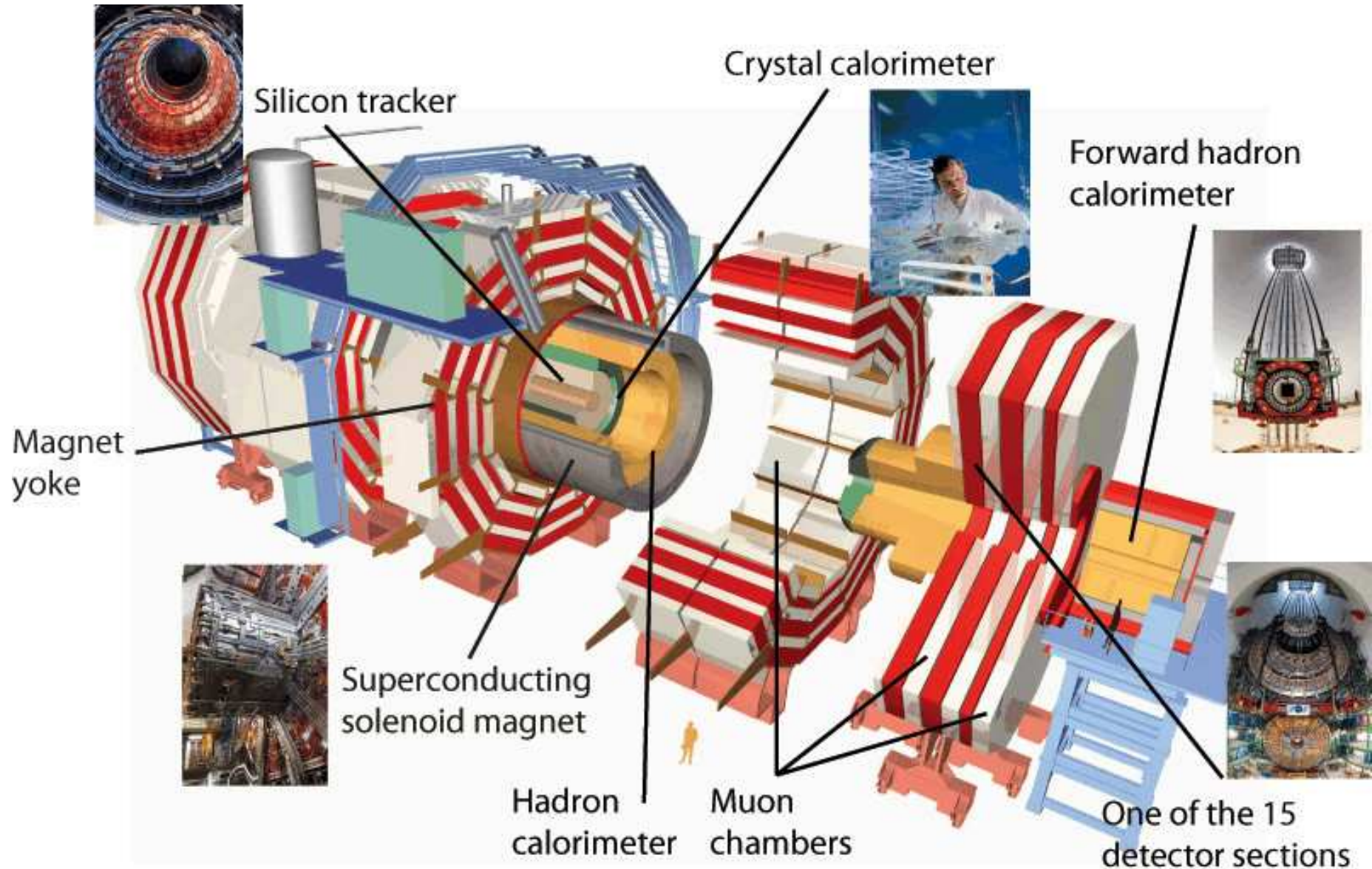
Docelowo intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do 1000 nowych, ciężkich cząstek (np. cząstek supersymetrycznych) na godzinę!

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

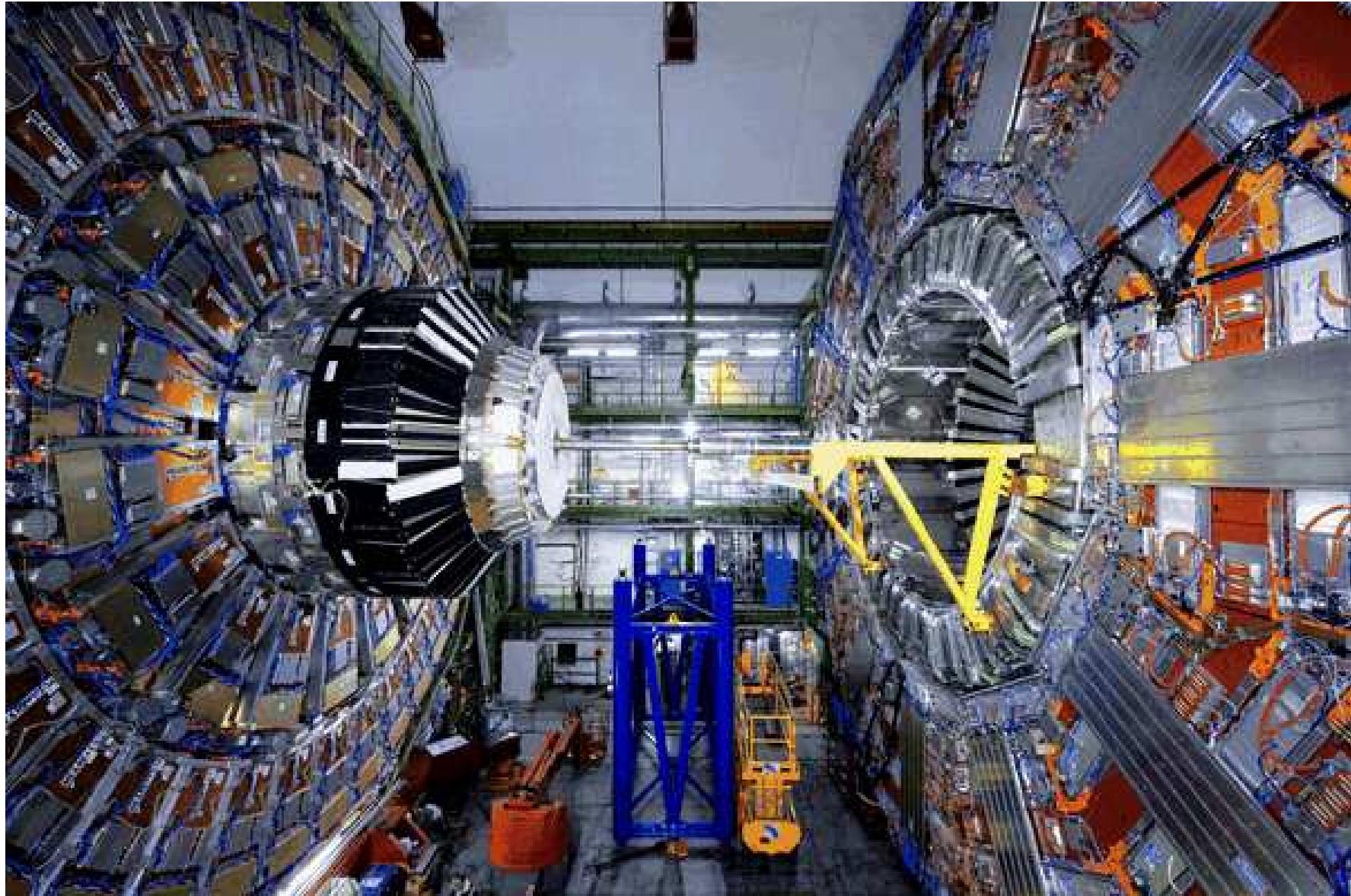
The Large Hadron Collider (LHC)



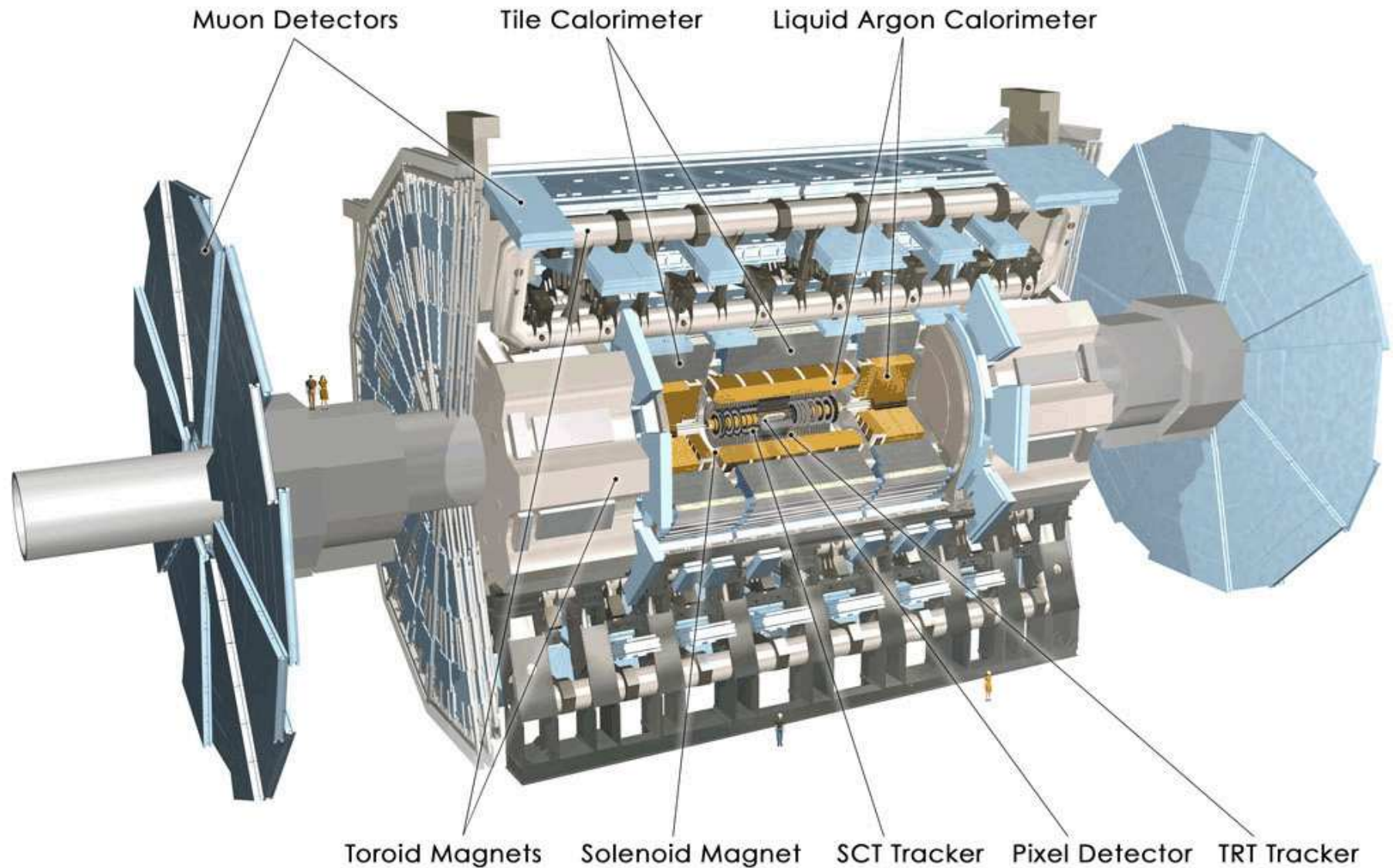
Eksperyment CMS



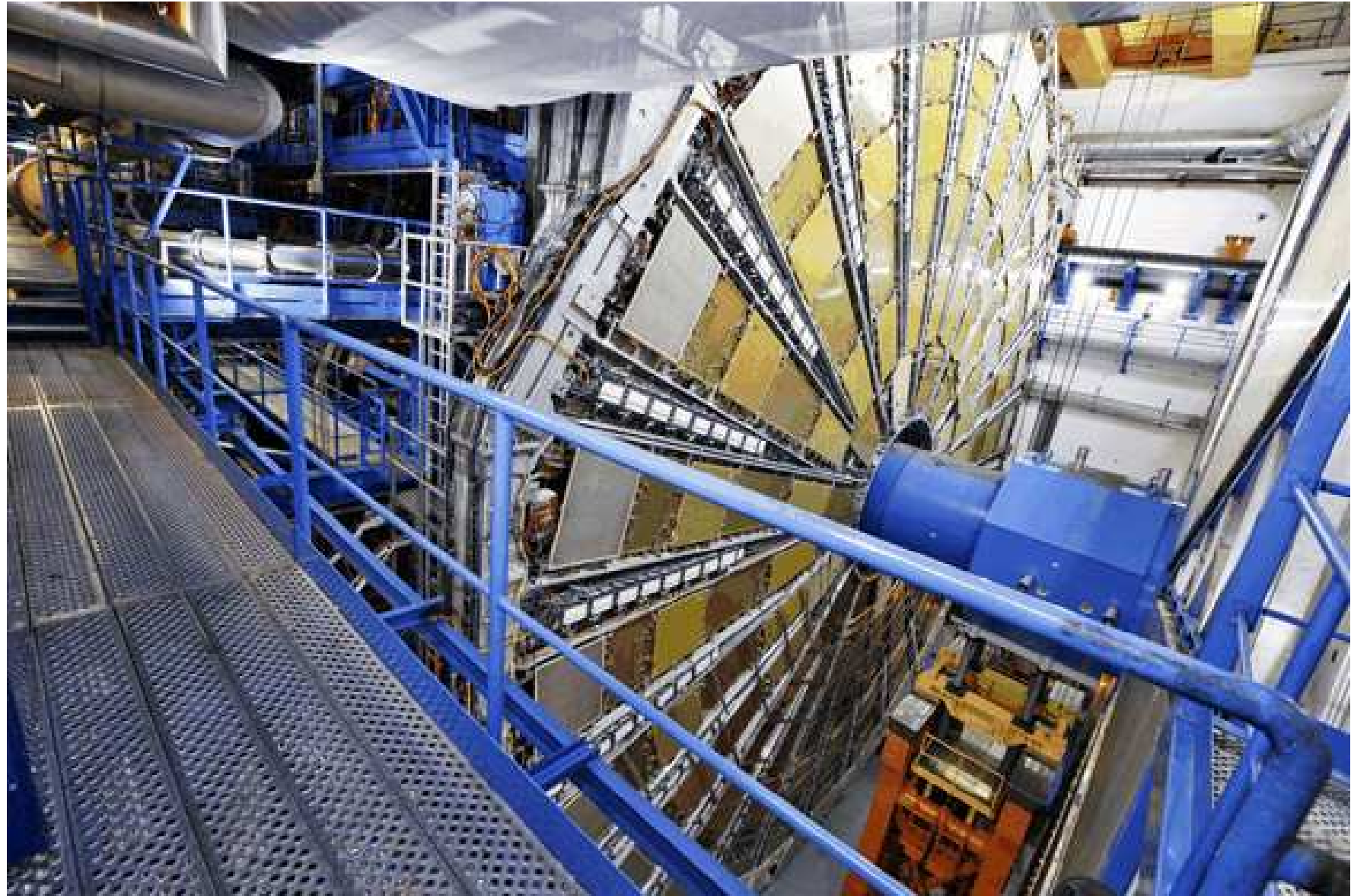
Eksperyment CMS



Eksperyment ATLAS



Eksperyment ATLAS



Pierwsze wyniki

Akcelerator LHC ruszył ponownie na jesieni 2009.
Od marca 2010 zderza wiązki protonów o energii 3.5 TeV.

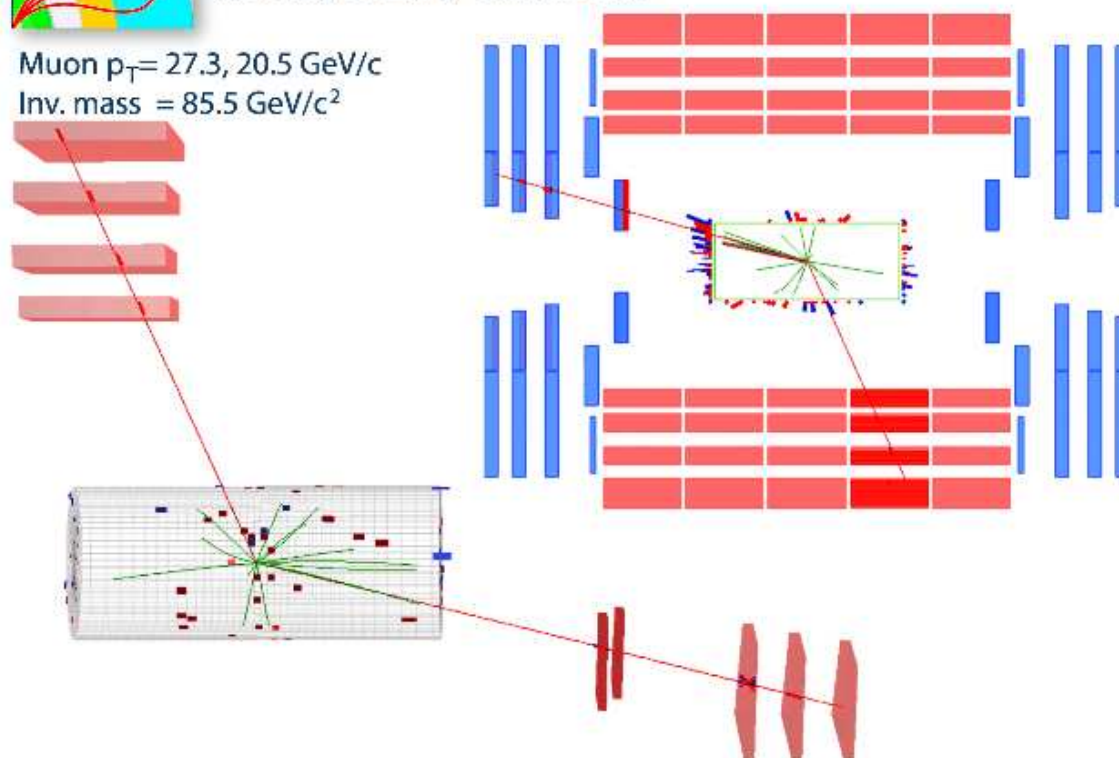
Przypadek produkcji
bozonu Z^0 w CMS

$$Z^0 \rightarrow \mu\mu$$



CMS Experiment at LHC, CERN
Run 136087 Event 39967482
Lumi section: 314
Mon May 24 2010, 15:31:58 CEST

Muon $p_T = 27.3, 20.5$ GeV/c
Inv. mass = 85.5 GeV/c²

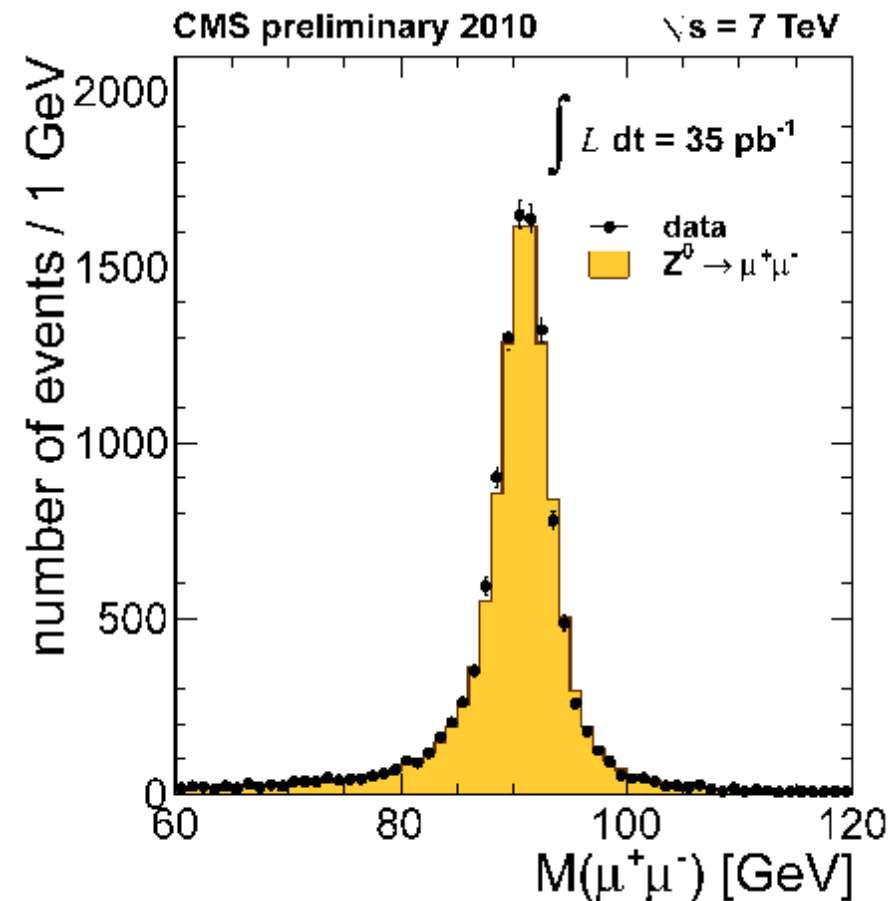


Pierwsze wyniki

Akcelerator LHC ruszył ponownie na jesieni 2009.
Od marca 2010 zderza wiązki protonów o energii 3.5 TeV.

Mierzony rozkład masy
bozonu Z^0 w CMS

$$M_Z = 91.2 \text{ GeV}$$



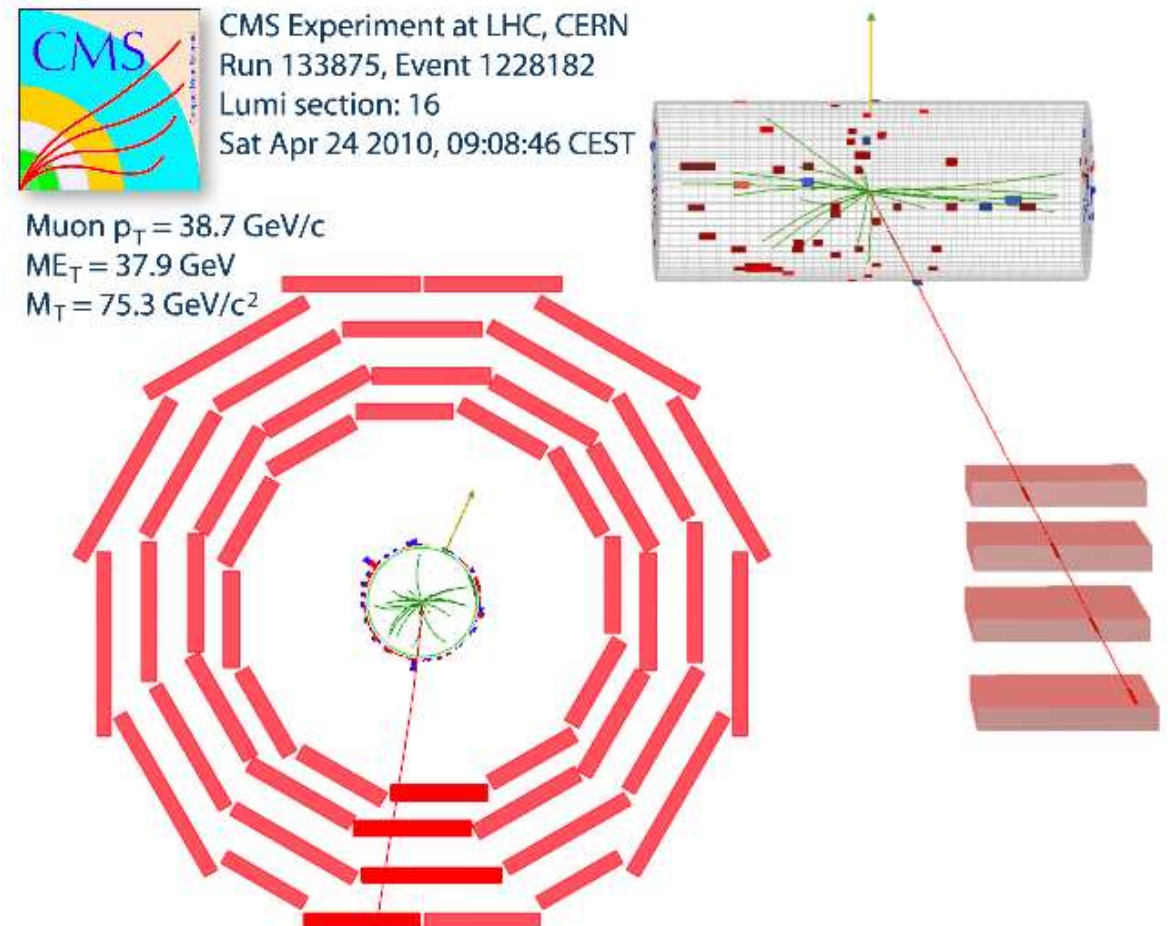
Pierwsze wyniki

Akcelerator LHC ruszył ponownie na jesieni 2009.
Od marca 2010 zderza wiązki protonów o energii 3.5 TeV.

Przypadek produkcji
bozonu W^\pm w CMS

$$W \rightarrow \mu\nu$$

strzałka pokazuje rekonstruowany kierunek emisji
neutrino z rozpadu W

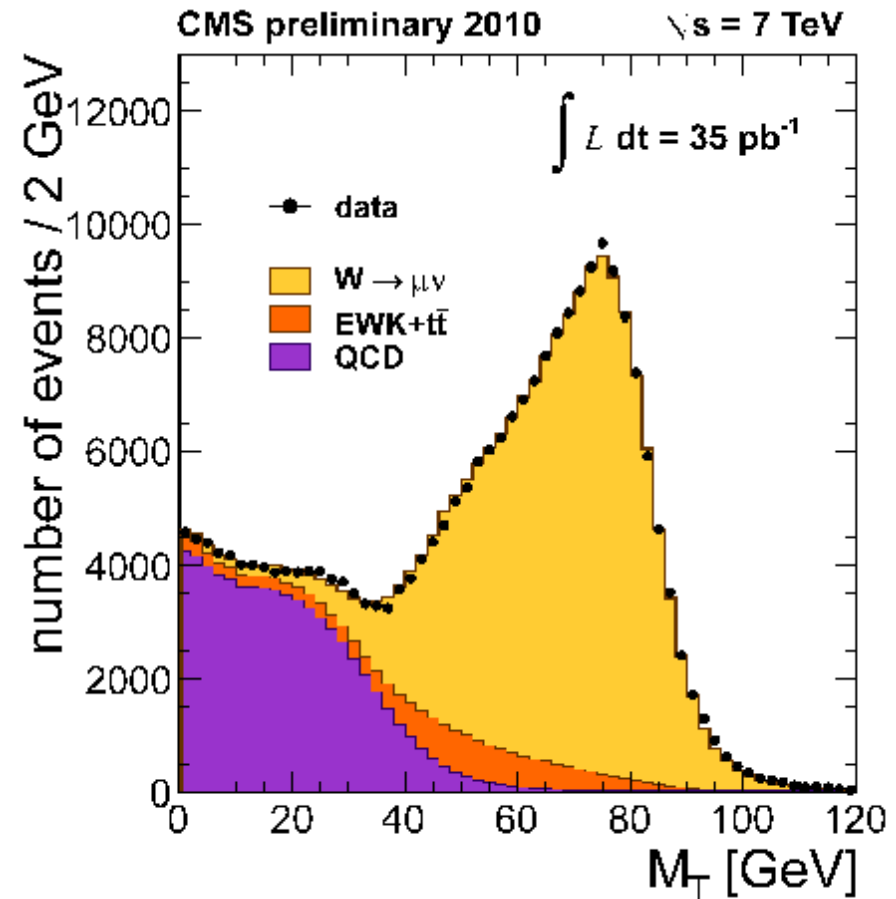


Pierwsze wyniki

Akcelerator LHC ruszył ponownie na jesieni 2009.
Od marca 2010 zderza wiązki protonów o energii 3.5 TeV.

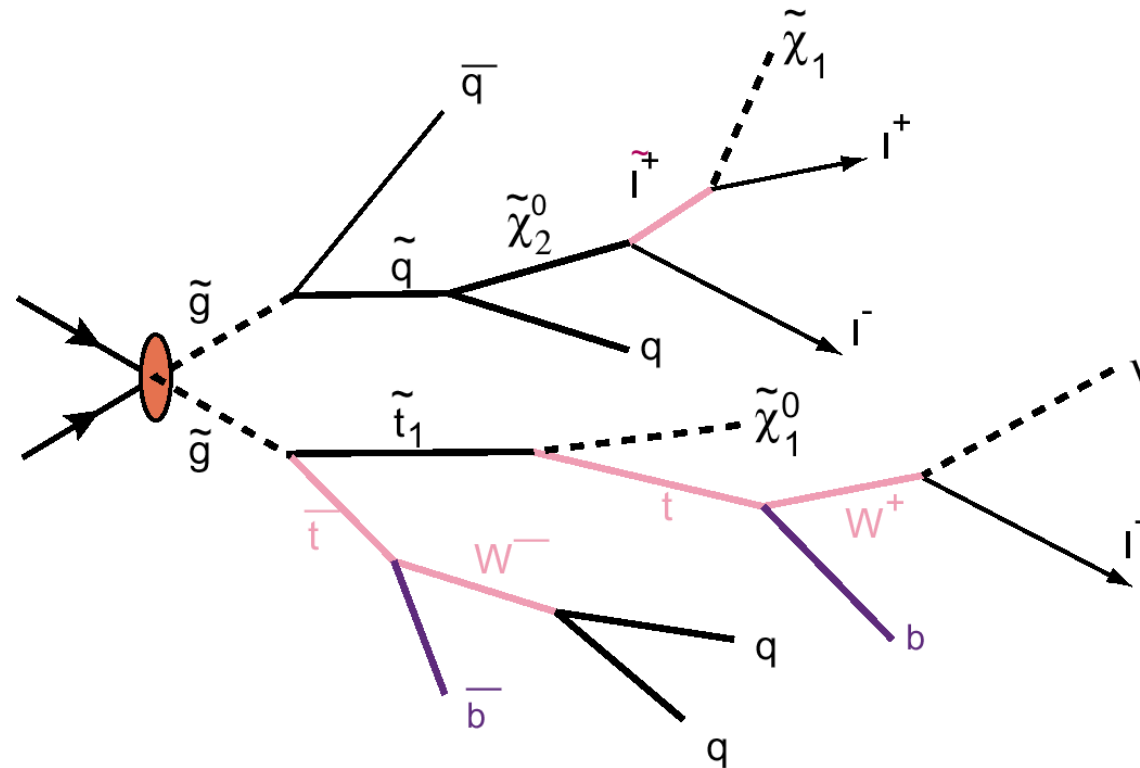
Mierzony rozkład tzw.
masy poprzecznej pro-
duktów rozpadu bozonu
 W^\pm

$$M_W = 80.4 \text{ GeV}$$



Poszukiwanie ciemnej materii

Najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP) pojawia się w rozpadach cięższych cząstek supersymetrycznych i ucieka z detektora...



Tak jak neutrino w rozpadach W^\pm ...

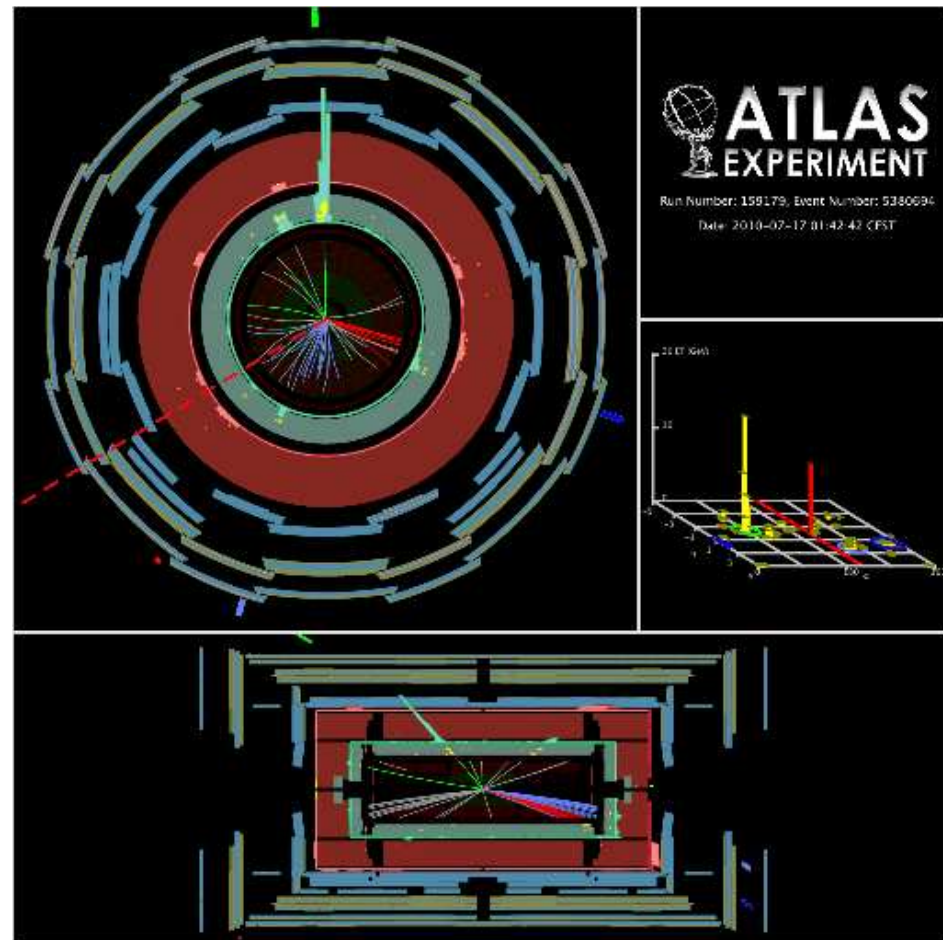
Poszukiwanie ciemnej materii

Najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP) pojawia się w rozpadach cięższych cząstek supersymetrycznych i ucieka z detektora...

Przypadek ATLAS z

$$E_T^{miss} \approx 30 \text{ GeV}$$

$$M_{eff} \approx 200 \text{ GeV}$$



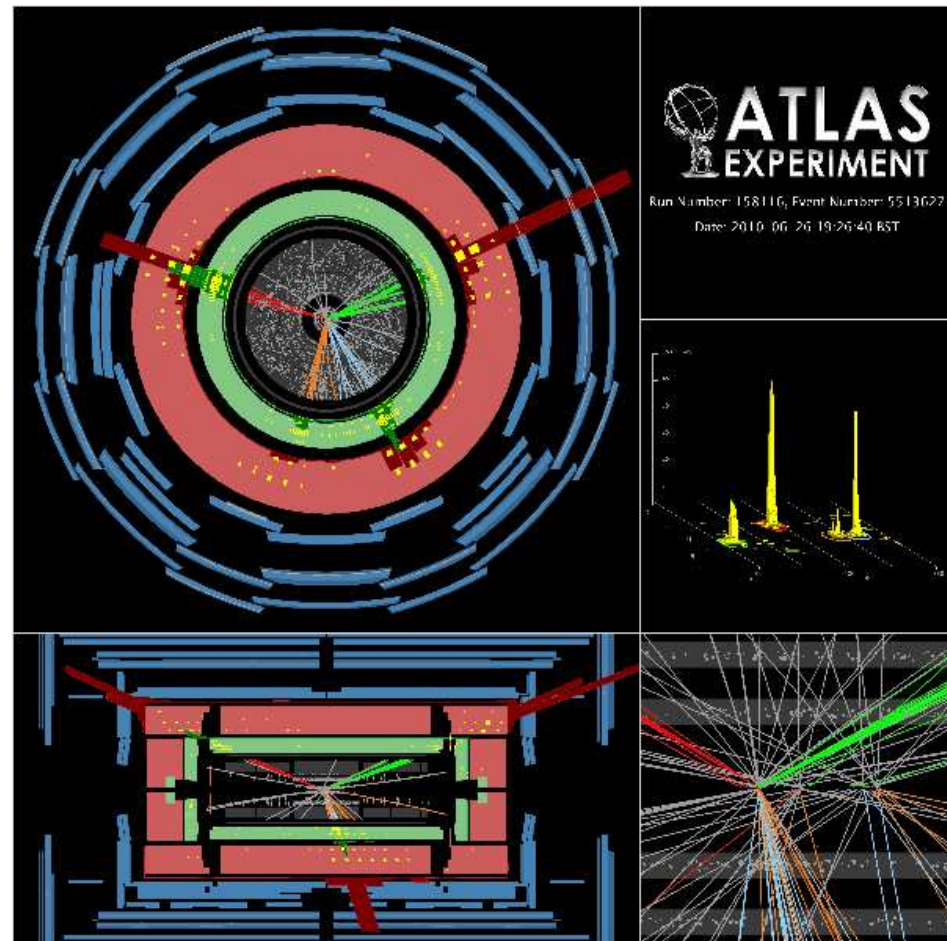
Poszukiwanie ciemnej materii

Najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP) pojawia się w rozpadach cięższych cząstek supersymetrycznych i ucieka z detektora...

Przypadek ATLAS z

$$E_T^{miss} \approx 100 \text{ GeV}$$

$$M_{eff} \approx 1500 \text{ GeV}$$

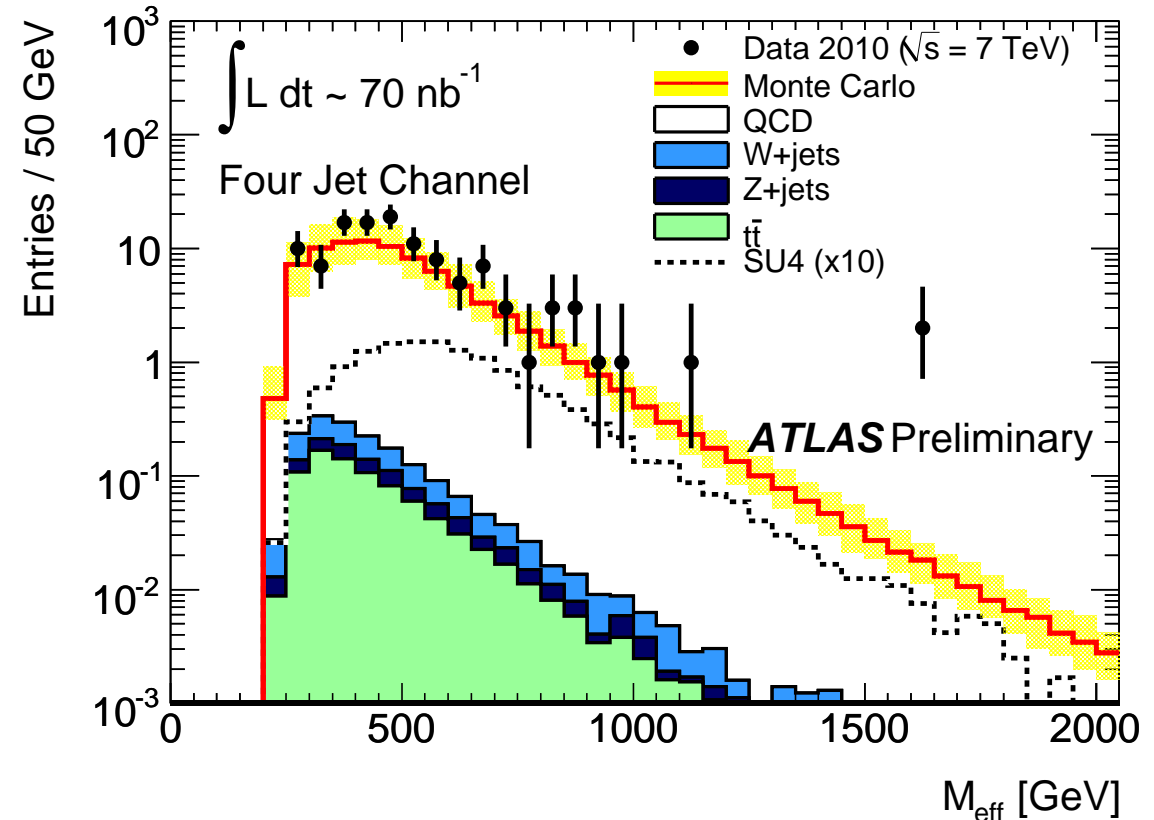


Poszukiwanie ciemnej materii

Najlżejsza cząstka supersymetryczna (LSP) pojawia się w rozpadach cięższych cząstek supersymetrycznych i ucieka z detektora...

Rozkład rekonstruowanej masy dla wybranych przypadków

Statystyka wciąż zbyt mała
ale LHC "rozpędza się"



Perspektywy

Od marca 2010 LHC zderza protony przy energii 3.5 TeV

Ale intensywności wiązek są stale zwiększane!

Co miesiąc częstości zderzeń rosły prawie o czynnik 10!

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

Mamy nadzieję, że już wkrótce zaczniemy rozpoznawać pierwsze jej ślady...

Od 2013 LHC ma zwiększyć energię wiązek do 7 TeV

Podsumowanie

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**)

Podsumowanie

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...

Podsumowanie

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...

Podsumowanie

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 , ...

Astroparticle physics

