

# Wszechświat cząstek elementarnych

Maria Krawczyk

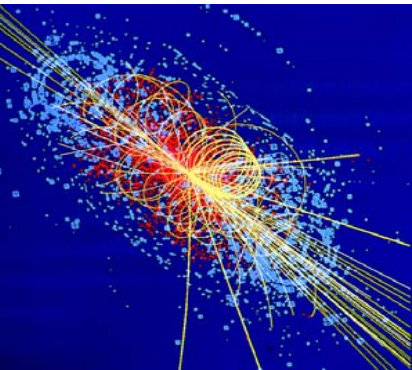
i

A. Filip Żarnecki

Instytut Fizyki Teoretycznej

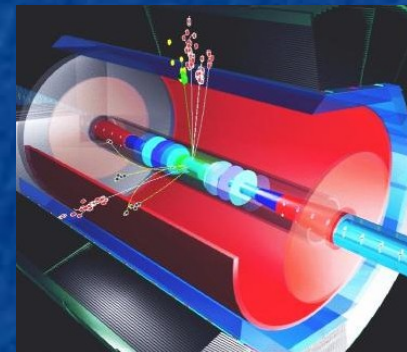
i

Instytut Fizyki Doświadczalnej



Wydział Fizyki UW  
semestr letni, rok akad. 2011/12

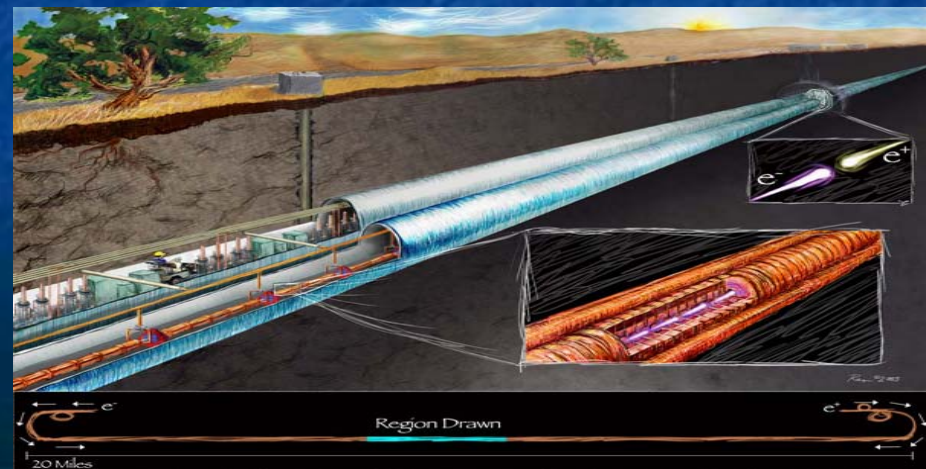
<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/wce.html>



## Large Hadron Collider



## International Linear Collider



# Program



1. Wprowadzenie  
Ogólne informacje o Modelu Standardowym
2. Detekcje cząstek. Przyspieszacze i zderzacze.  
Wielkie eksperymenty
3. Hadrony, kwarki i leptony
4. Teoria cząstek elementarnych
5. Poszukiwanie cząstki Higgsa
6. Rozszerzenie Modelu Standardowego
7. Powstanie i budowa Wszechświata
8. Ciemna materia, ciemna energia

# Materiały pomocnicze

- Wykłady będą zamieszczane na stronie

<http://www.fuw.edu.pl/~zarnecki/WCE/wce.html>

- **Literatura**

1. Martinus J.G. Veltman, Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics, World Scientific 2003
2. Frank Close, Kosmiczna Cebula - Kwarki i Wszechświat, PWN 1989
3. L. Lederman, D. Teresi, Boska cząstka, jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?, Prószyński i S-ka, Warszawa 2005
4. M. J. G. Veltman, The Higgs Boson, Scientific American 255:88-94, 1986 (Issue no 5).
5. Y. Nambu, A Matter of Symmetry, Scientific American, May 1992, str. 37

# Warunki zaliczenia :

## 1. obecność na wykładach

*dopuszczona jest nieobecność na dwóch wykładach, kolejne nieobecności obniżają ocenę*

## 2. 50% punktów z pisemnego egzaminu testowego

*30 pytań (max 1 zdanie odpowiedzi)*

*Terminy egzaminów będą zaproponowane w najbliższej przyszłości*

# Skąd ten tytuł wykładu?



**Wytłumaczenie dlaczego Wszechświat wygląda tak jak wygląda nie jest możliwe bez zrozumienia oddziaływań cząstek elementarnych.**

# Notacja naukowa

- W fizyce mamy często do czynienia z bardzo dużymi lub bardzo małymi wielkościami. Chcemy łatwiej się nimi posługiwać.

Przykład: odległość Ziemia-Słońce  $1 \text{ AU} = 150\,000\,000\,000 \text{ m}$

notacja naukowa:  $1 \text{ AU} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$  11 cyfr po 1

Przykład: atom wodoru – rozmiar  $1 \text{ \AA} = 0.000\,000\,000\,1 \text{ m}$

notacja naukowa:  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 1/10^{10} \text{ m}$  1 na 10 miejscu

# Notacja naukowa

Wykładnik potęgi 10 określa nam „rzęd wielkości”

1 rząd wielkości:  
różnica o czynnik 10



~1 m



~10 m

# Notacja naukowa

10 rzędów wielkości:  
różnica o czynnik  $10^{10} = 10\ 000\ 000\ 000$

Bardzo dużo !!!



$\sim 1\text{ mm} = 10^{-3}\text{ m}$



$\sim 10\ 000\text{ km} = 10^7\text{ m}$



# Notacja naukowa

Aby ułatwić zapis wprowadzamy dedykowane nazwy

Duże liczby

deka, hekto, **kilo**, **mega**, **giga**, **tera**, peta, exa, zetta, yotta

da	h	<b>k</b>	<b>M</b>	<b>G</b>	<b>T</b>	.....	$10^{24}$
$10$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$		

Małe liczby

decy, centy, mili, mikro, nano, pico, **femto**, atto, zepto, yocto

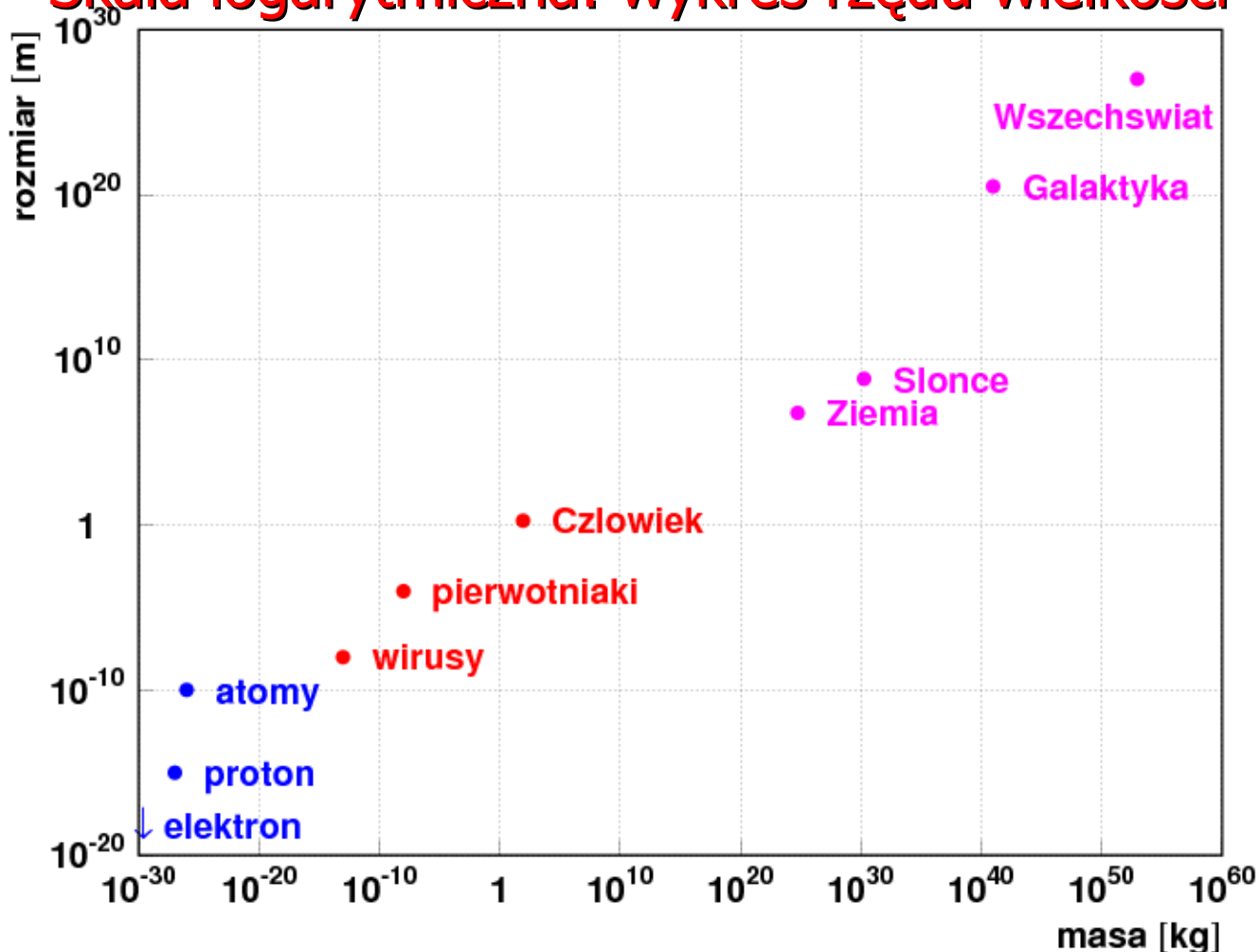
d	c	m	$\mu$	n	p	<b>f</b>	.....	$10^{-24}$
$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$	$10^{-15}$		

Przykład:  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$        $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

# Czym zajmuje się fizyka?

- Staramy się zrozumieć zjawiska zachodzące na najmniejszych i największych odległościach
- Szukamy praw opisujących zarówno zachowanie najmniejszych cząstek i ewolucję wszechświata

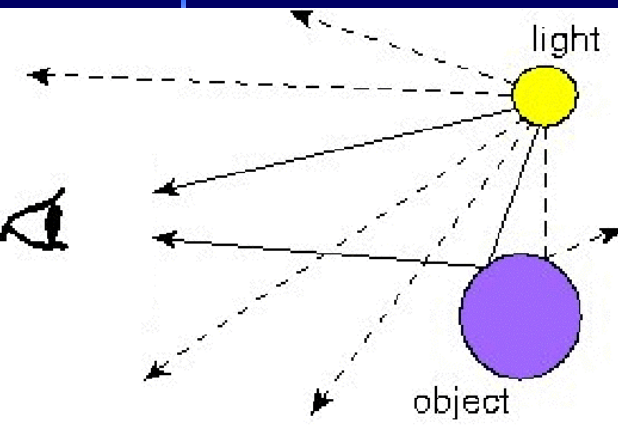
Skala logarytmiczna: wykres rzędu wielkości



# Czym zajmuje się fizyka?



# Jak badamy cząstki elementarne?



■ Przyglądamy się im...

*źródło „światła” → obiekt → detektor*

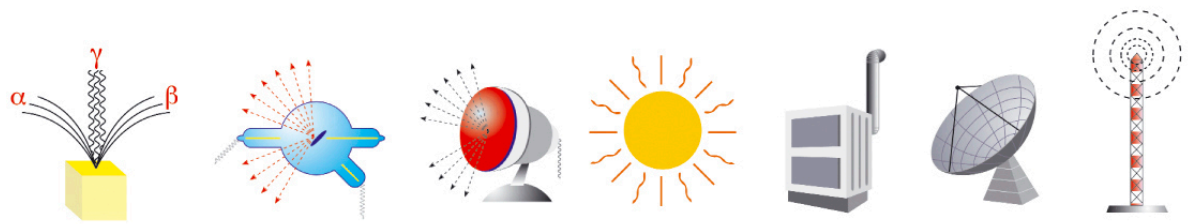
Niestety, cząstek nie możemy  
zwyczajnie zobaczyć – światło  
widzialne jest „za grube”

*długość fali  $\lambda \sim 300-600 \text{ nm}$*

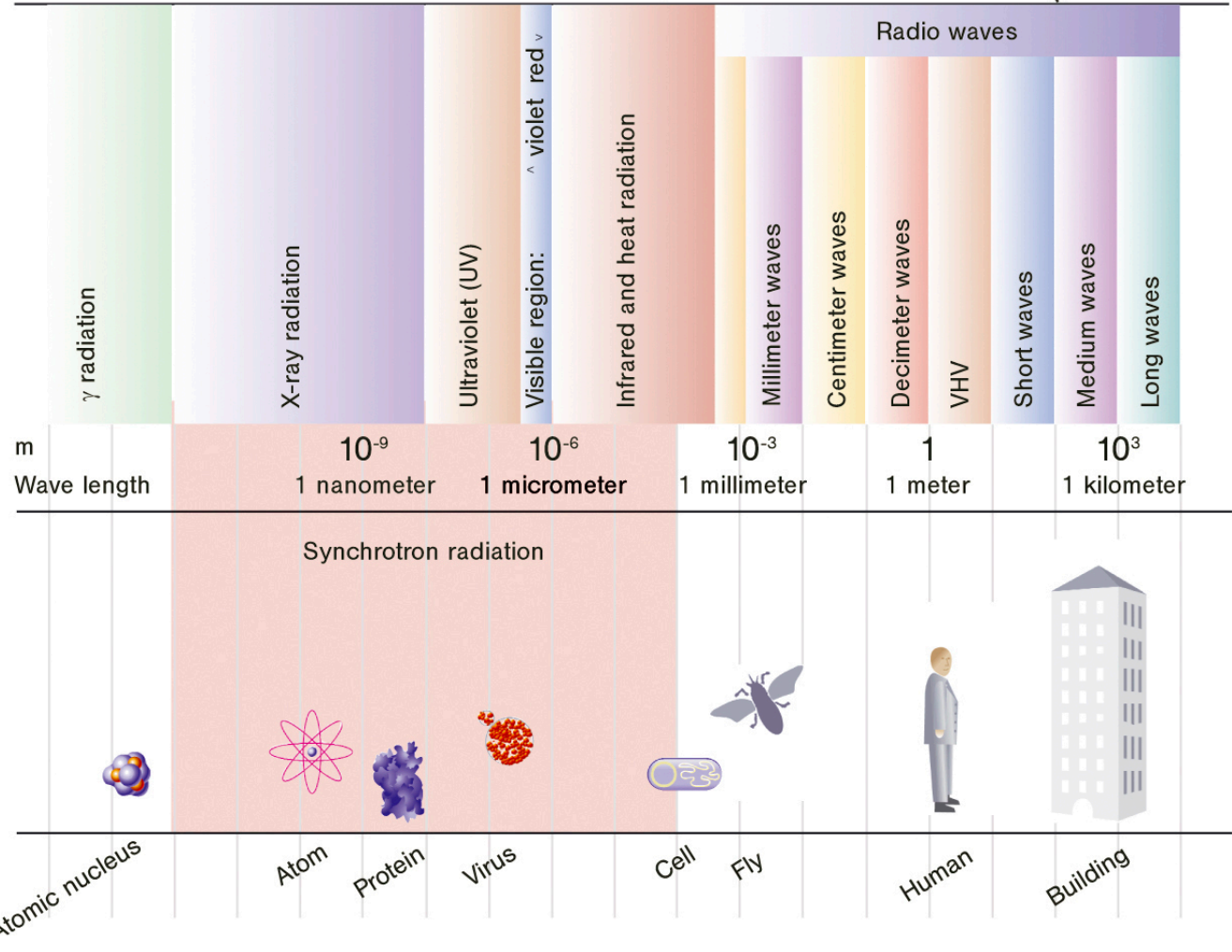
*rozmiar atomu  $\sim 0.1 \text{ nm}$*

Musimy szukać innych metod, innych  
„promieni” ...





Radioactive material    X-ray tube    UV lamp    The sun    Stove    Radio telescope    Transmitter



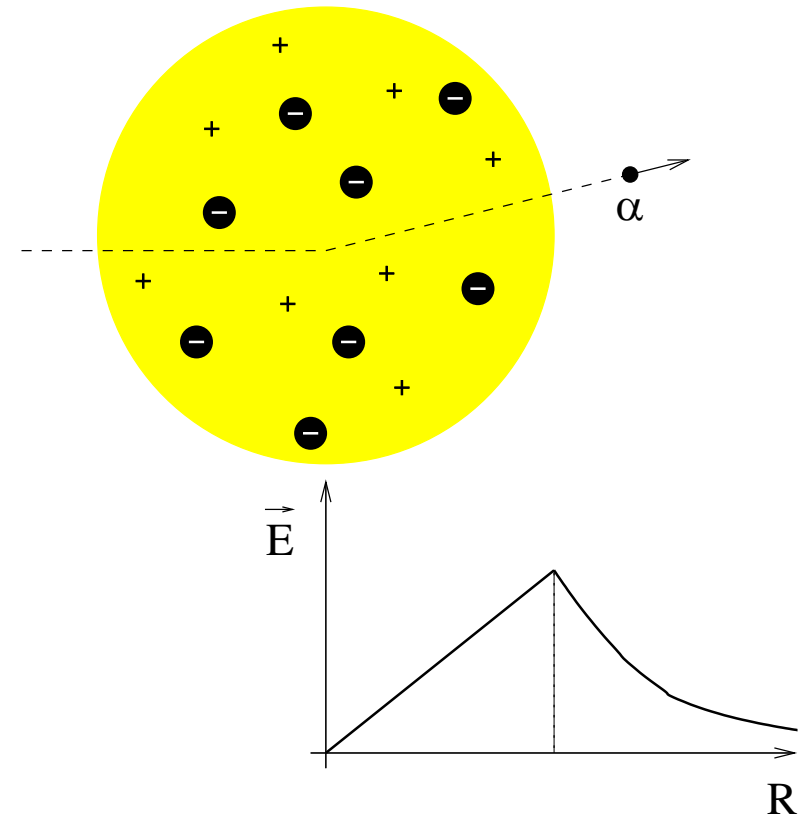
# Odkrycie jądra atomowego

## Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym



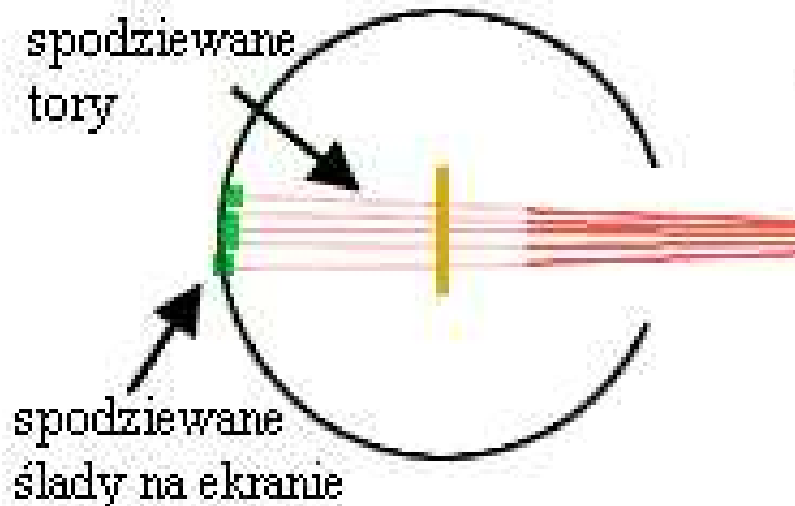
Model Thomsona: cała objętość atomu jednorodnie naładowana dodatnio ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" elektrony ("rodzynki").

# Odkrycie jądra atomowego

## Doświadczenie Rutherforda

Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez H.Geigera i E.Marsdena (1911):

### Oczekiwane

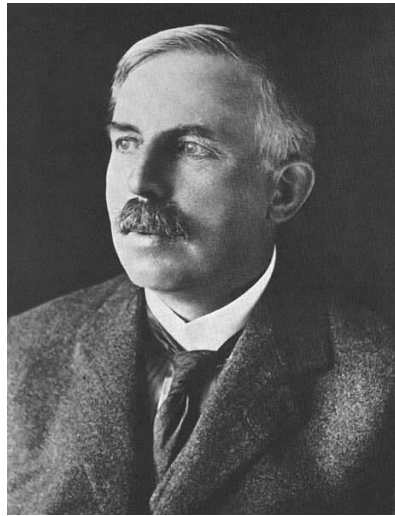


### Uzyskane



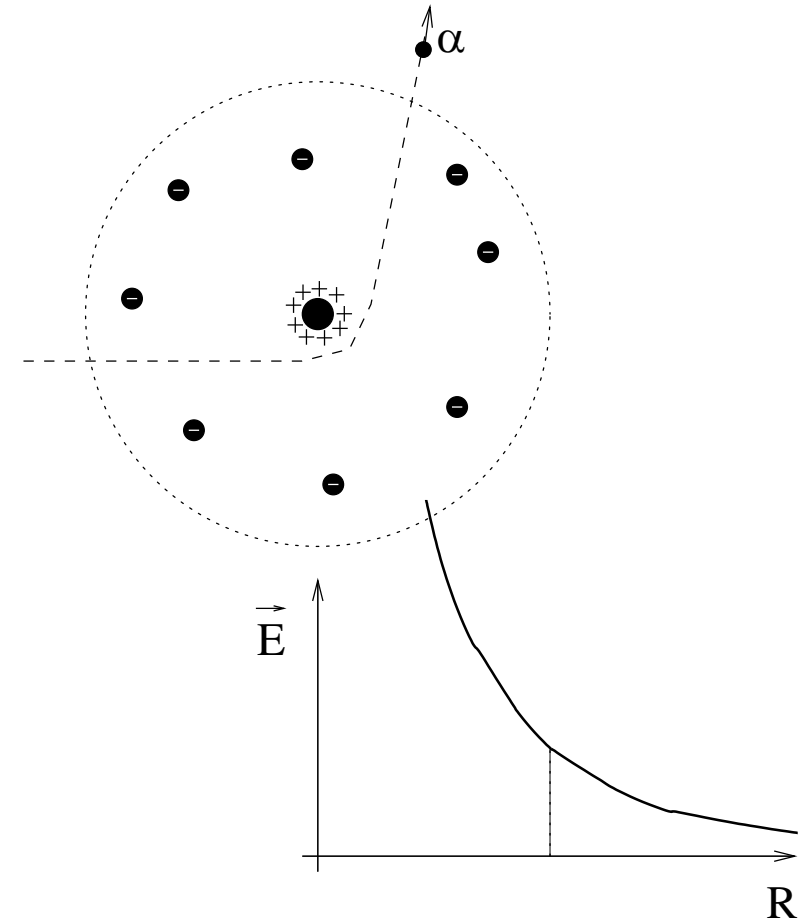
# Odkrycie jądra atomowego

## Model Rutherforda



Rutherford zaproponował  
jądrowy model atomu.

Cały dodatni ładunek atomu ( $10^{-10}$  m)  
skupiony jest w praktycznie **punktowym**  
( $10^{-14}$  m) **jądrze**



Cząstka  $\alpha$  zawsze czuje  
cały ładunek dodatni  $\Rightarrow$   
duże kąty rozproszenia





# Jak badamy cząstki elementarne?

- Przyglądamy się im...  
*źródło „światła” → obiekt → detektor*

- Rozbijamy je...  
*zderzając cząstka → ← cząstka*

Patrzymy jakie są produkty zderzenia



# Jak badamy cząstki elementarne?

- Przyglądamy się im...

*źródło „światła” → obiekt → detektor*

- Rozbijamy je...

*zderzając cząstka → ← cząstka*

Patrzemy jakie są produkty zderzenia

- „Podgrzewamy” ...

Dostarczamy dużej energii do układu wielu cząstek (np. w wyniku zderzenia)

*patrzemy co „się ugotuje”*

jakie cząstki powstaną na końcu



# Jak badamy cząstki elementarne?

- Rozdzielczość „promieni” o energii E

$$\Delta x \sim \lambda = hc/E$$

h – stała Plancka,  $h=6.626 \cdot 10^{-34}$  Js

c – prędkość światła

Aby badać materię na poziomie cząstek musimy używać fotonów (lub innych cząstek) o wysokich energiach...

- Energia odpowiadająca temperaturze T

$$E = k T$$

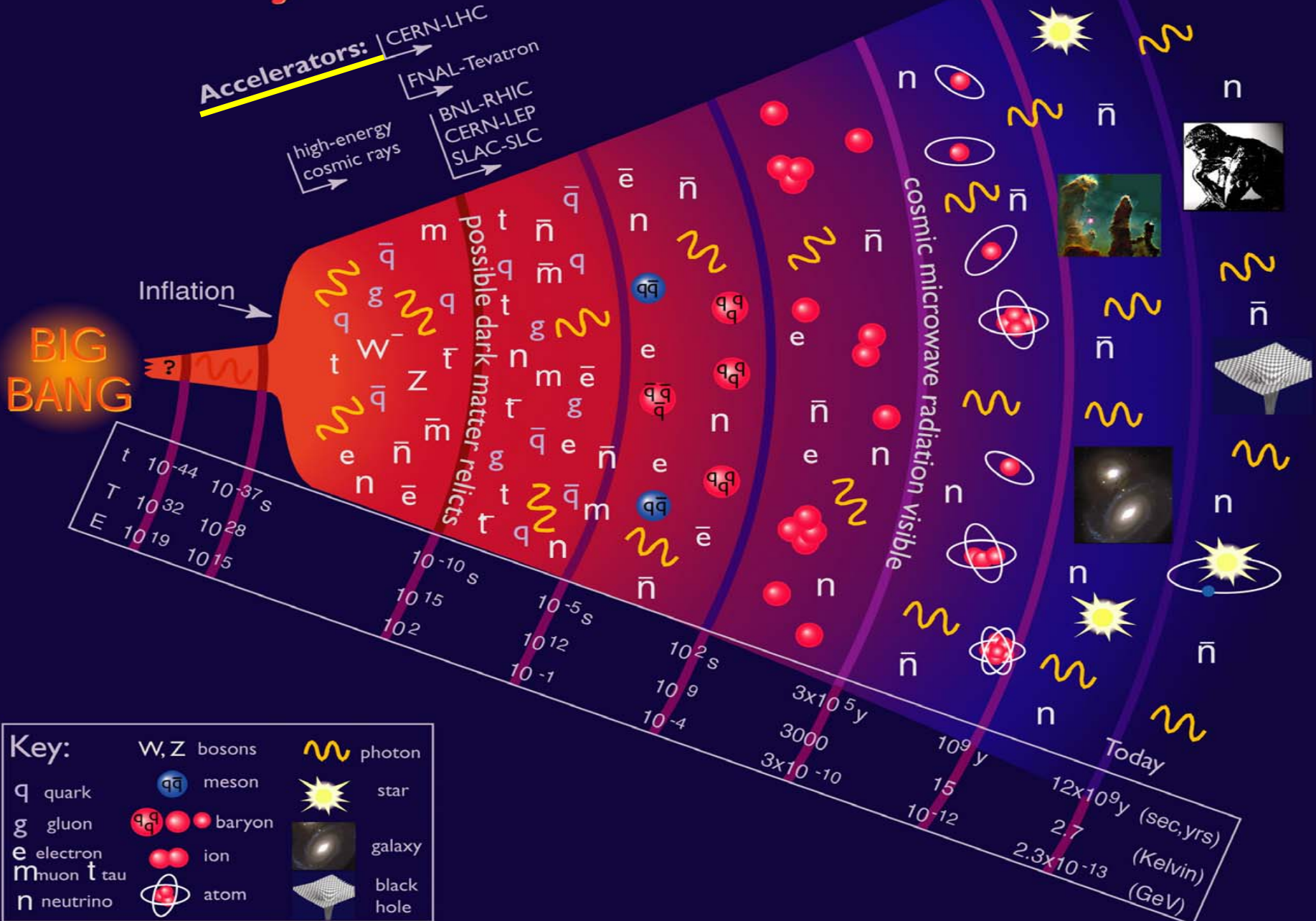
k – stała Boltzmana  $k=1.4 \cdot 10^{-23}$  J/K

- Skale rozdzielczości i energii i temperatury są równoważne...

# Jednostki energii

- Joule (J) jest jednostką „astronomiczną” w świecie cząstek, potrzebujemy bardziej praktycznej jednostki
- 1 eV (elektronowolt) = energia jaką elektron zyskuje w wyniku działania pola elektrycznego przy napięciu 1V
$$1 \text{ eV} = 1.6 * 10^{-19} \text{ J}$$
- Rozdzielczość: 1 eV ~ 1  $\mu\text{m}$
- Temperatura: 1 eV ~  $10^4 \text{ K}$
- Jednostki pochodne: 1 keV, 1 MeV, 1 GeV, 1 TeV...

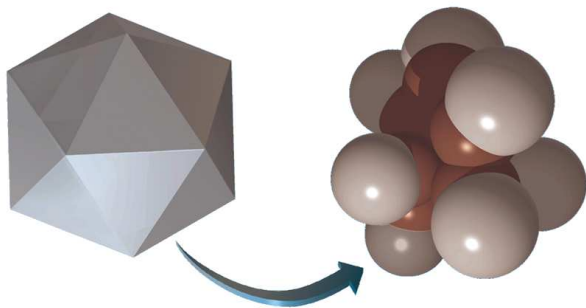
# History of the Universe



# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

Cząsteczka

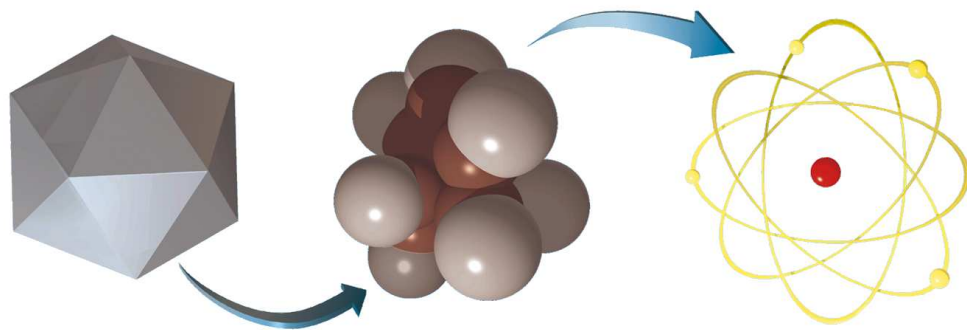


$10^{-9}$  m

# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

Atom

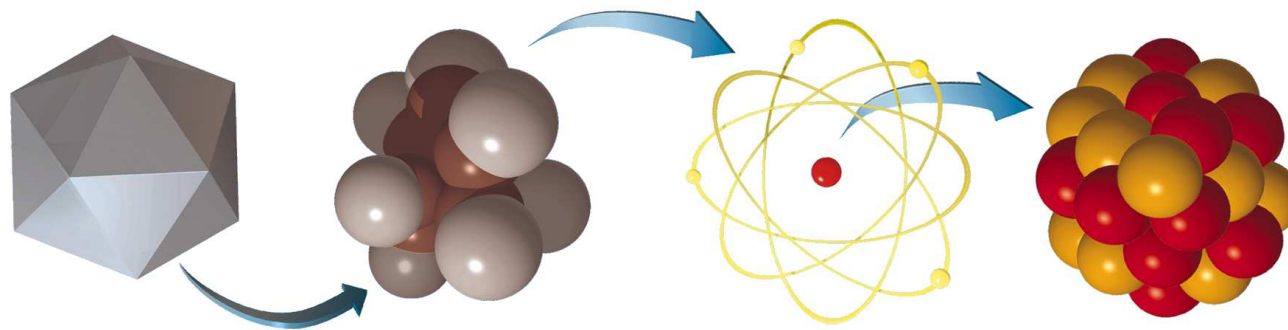


$10^{-10}$  m

# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

Jądro atomowe



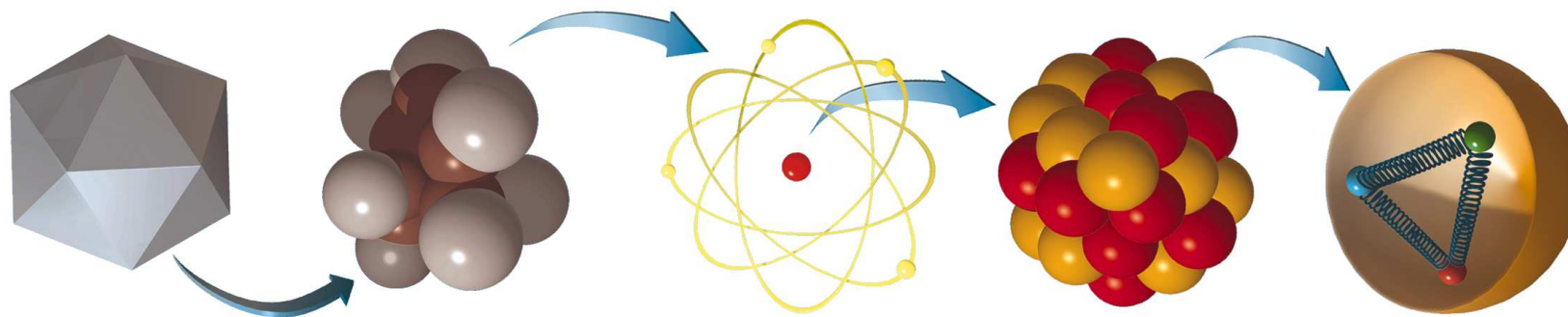
$10^{-14}$  m



# Wprowadzenie

## *Budowa materii*

Nukleony



$10^{-15}$  m

# Jądro atomowe = stan związany nukleonów

## Nukleony

->protony (ładunek elektryczny= +1)  
(elektron ma ładunek el. = -1)

->neutrony (ładunek el. =0)

**Atomy** są neutralne elektrycznie

Jeśli oderwiemy jeden lub więcej elektronów

-> jony (ładunek el. dodatni). Jonizacja.

Przykłady atomów:

Wodór  $H=p+e$  - najlżejszy atom

Deuter  $D=pn +e$  - ciężki wodór (-> ciężka woda)

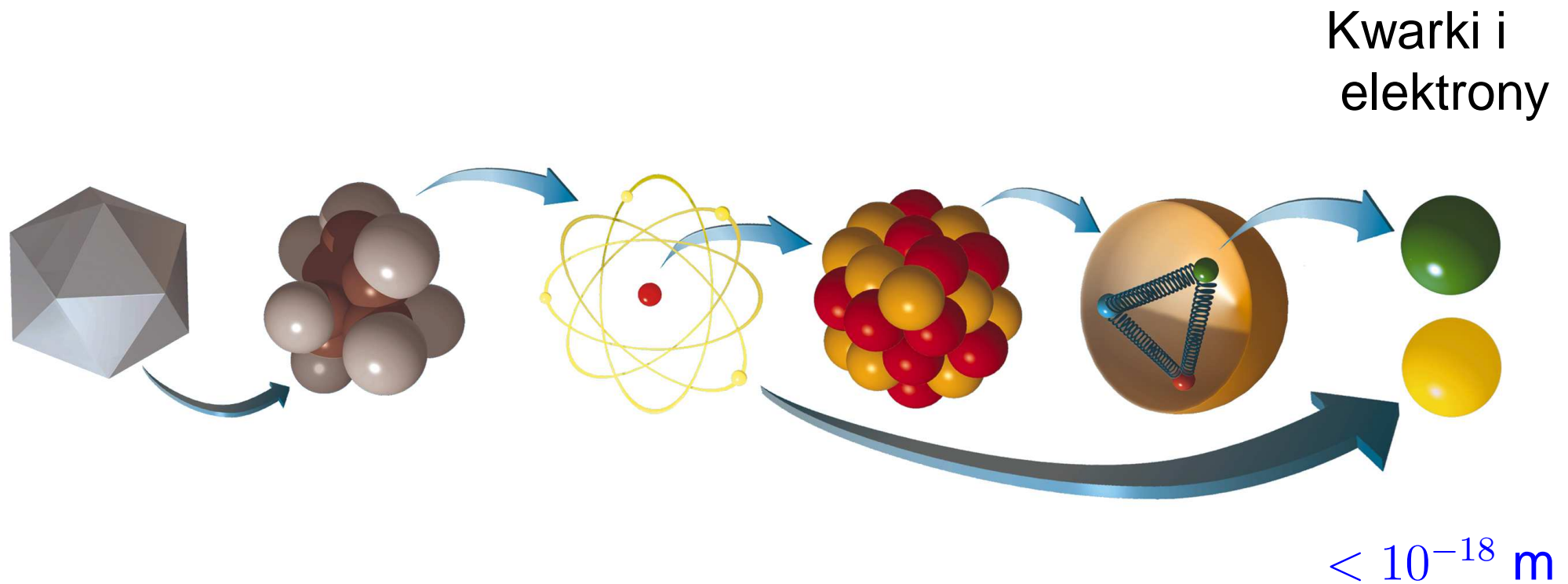
Tryt  $T =pnn +e$

Hel  $He=ppnn +ee$

**Fizyka jądrowa -> badanie jąder atomowych**

# Wprowadzenie

## Budowa materii



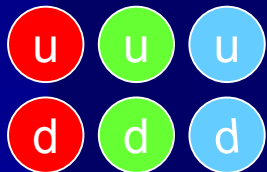
# Nukleony i kwarki (oraz gluony)

Proton i neutron = 3 kwarki

(różne typy kwarków i ich nazwy...)

kwarki *u* (*up*) i *d* (*down*)

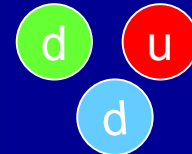
kwarki występują w 3 stanach (*barwach, kolorach*)  
*czerwone, zielone i niebieskie* – to tylko nazwy



proton



neutron



Kwarki nie mają struktury! Są fundamentalne..

Ale nie występują jako cząstki swobodne – p i n tak

W nukleonach są gluony – sklejjące całość (w atomie ->siły e-m, fotony)

# Model Standardowy

## ***Budowa materii***

Świat “codzienny”: 3 “cegielki” (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>	$\nu_e$ <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>	$\nu_e$ <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

# 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>	$\nu_e$ <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

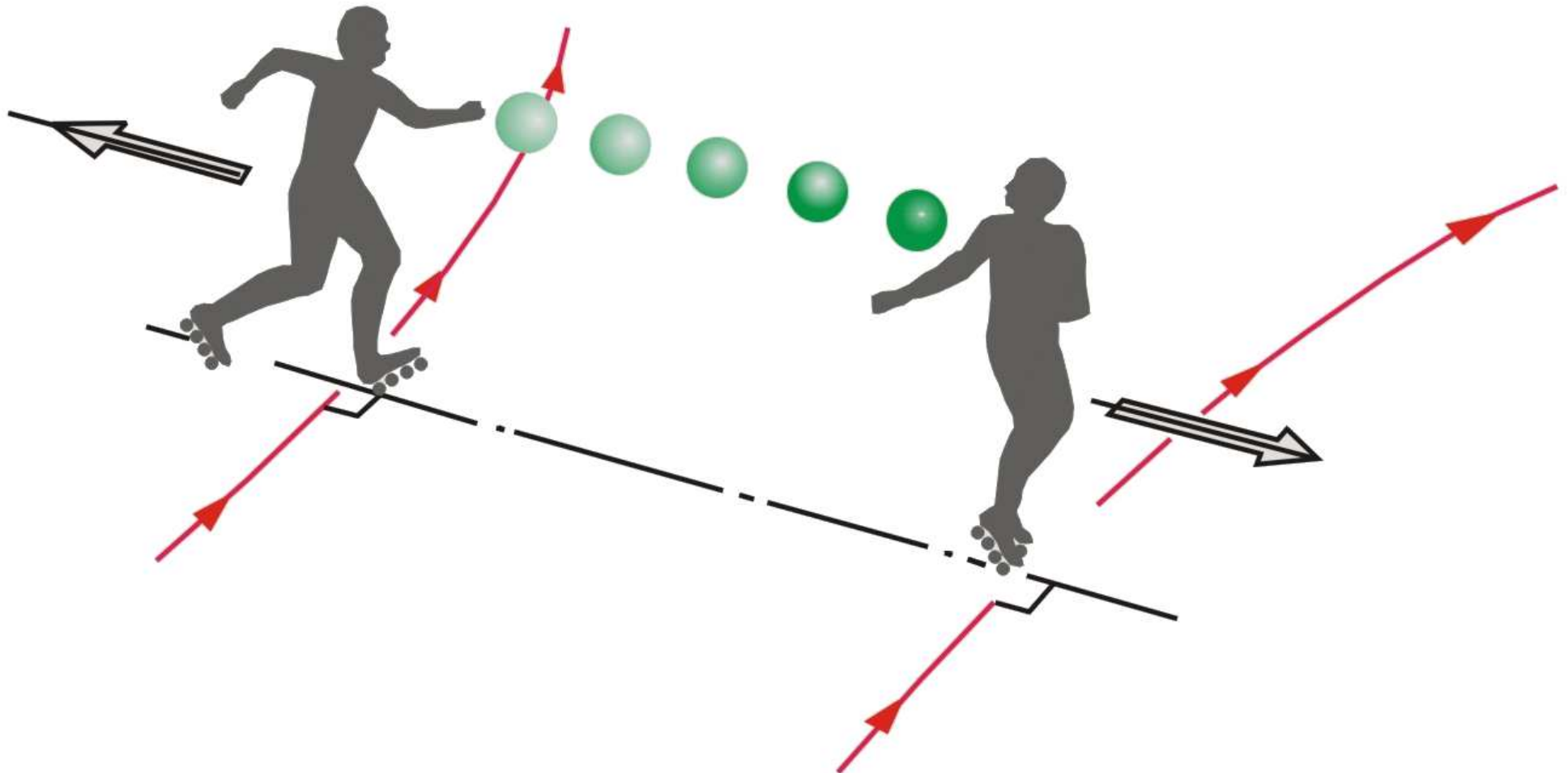
+ **anty-fermiony** (kolejnych 12)



# Model Standardowy

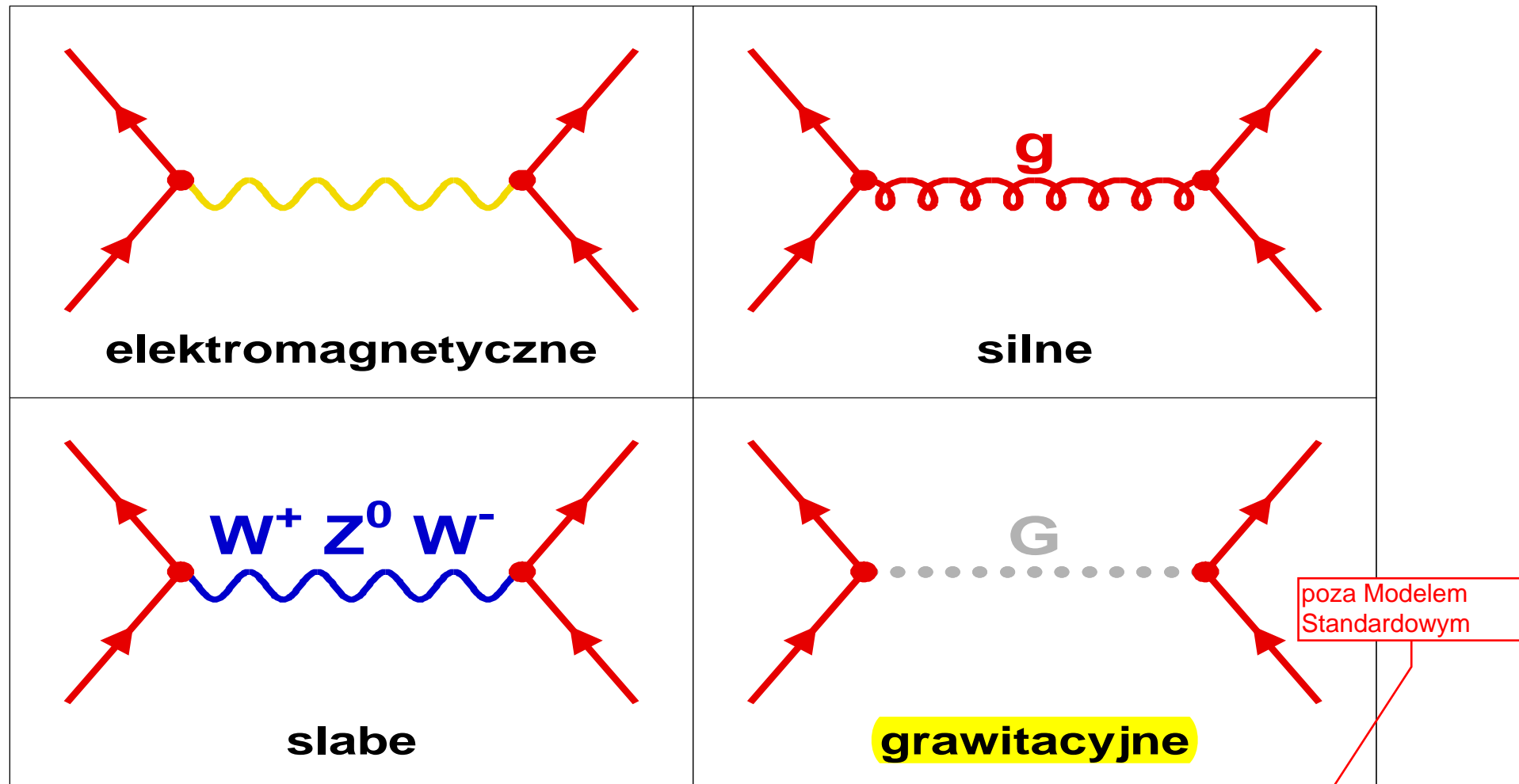
## *Oddziaływania*

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	grawiton	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...

# Fizyka cząstek elementarnych

- Wiek XX – niezwykły rozwój fizyki, nowe, fundamentalne idee:
  - pierwsza połowa XX: teoria względności, teoria grawitacji i teoria kwantów
  - druga połowa: fizyka cząstek elementarnych, opis cząstek i oddziaływań w tzw. kwantowej teorii pola

Współczesna teoria cząstek opiera się na „fundamentach” teorii względności i mechaniki kwantowej !

# Masa i energia

W fizyce cząstek praktycznie zawsze musimy uwzględniać teorię względności!  
Cząstki na ogół poruszają się z prędkościami bliskimi  $c$ .

Prędkość przestaje być wygodnym parametrem do opisu procesów.

*Przykład: elektrony w LEP  $v=0.999\ 999\ 999\ 995*c$  ( $E=100\ GeV$ ),  
protony w LHC  $v=0.999\ 999\ 995*c$  ( $E=7\ TeV$ )*

Znacznie wygodniejsza do opisu ruchu cząstki jest energia i pęd

Energia w teorii względności :

- Energia spoczynkowa  $E_0 = mc^2$  **wprowadzona przez Einsteina**
- Energia całkowita  $E^2 = E_0^2 + (pc)^2$   **$p$  – pęd ciała**
- Energia kinetyczna  $E_k = E - E_0$

Masa jest równoważna energii !

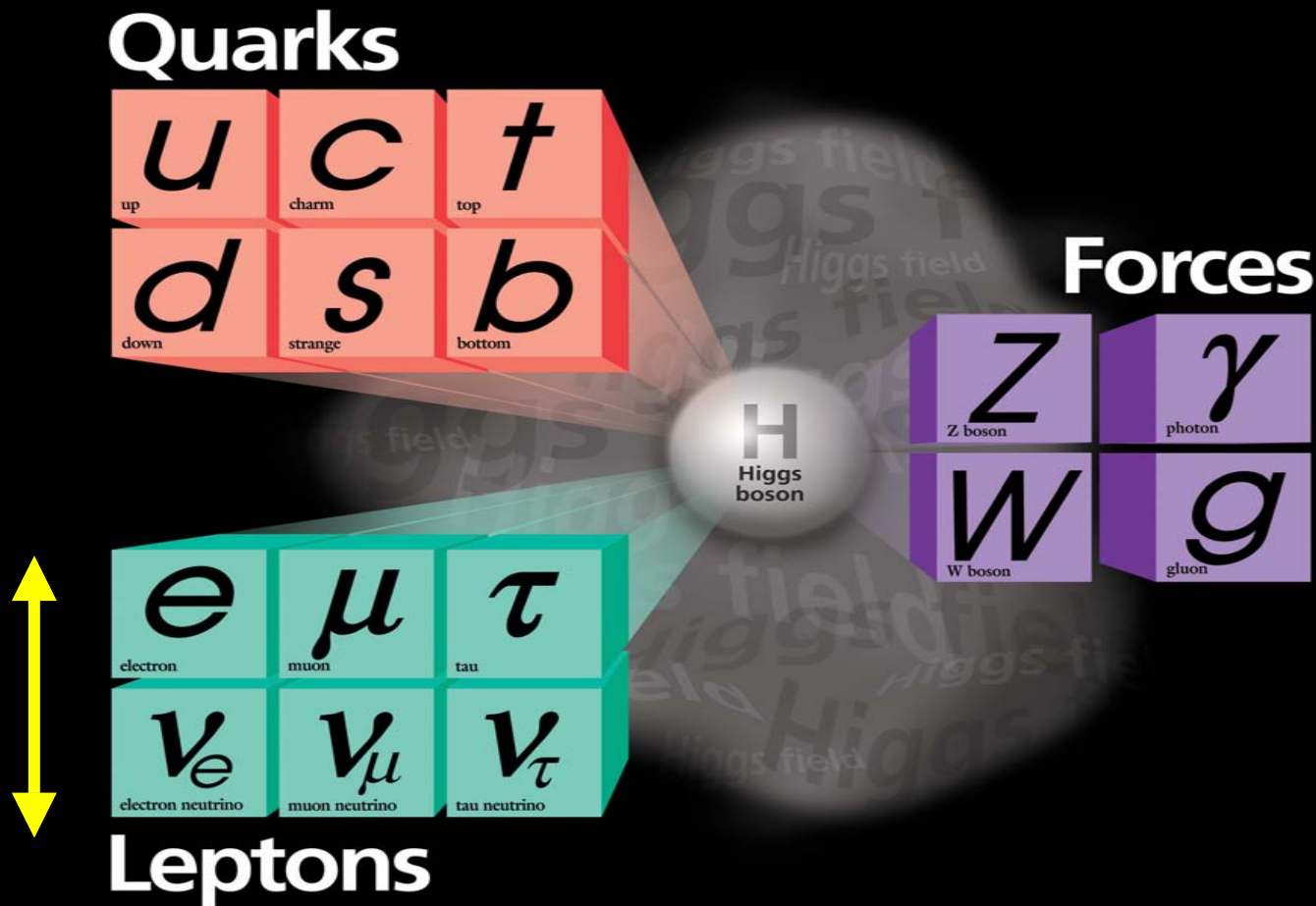
To nie jest „konwencja”. Zachowana jest tylko energia całkowita, energia kinetyczna może się zamieniać w masę, masa w energię kinetyczną !

⇒ Dzięki temu możemy produkować nowe cząstki i badać ich własności!

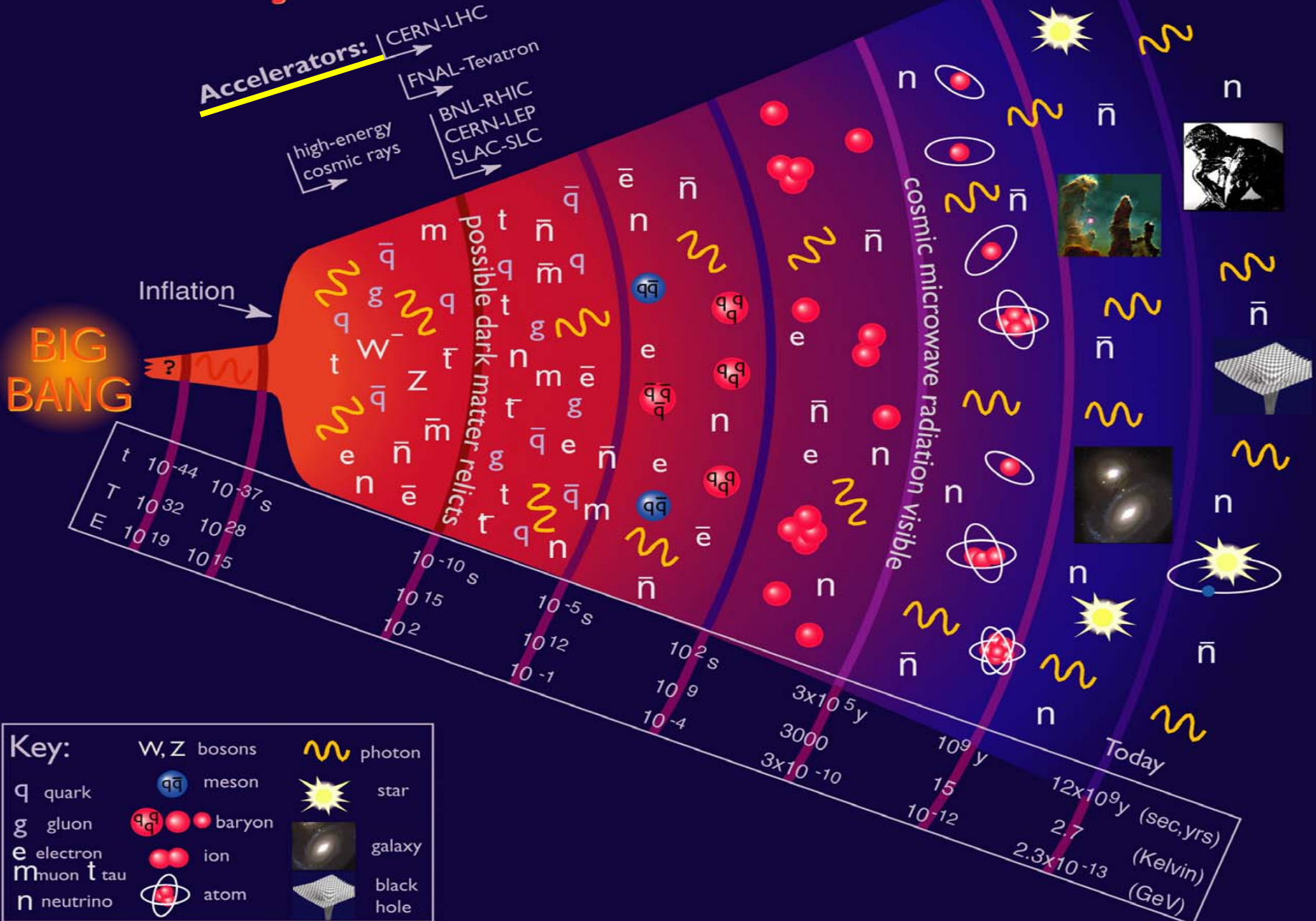
# Cząstki elementarne i cząstki fundamentalne

- Cząstki typu  $p$ ,  $n$  to stany związane kwarków
- Cząstki fundamentalne - punktowe cząstki bez struktury
- Termin cząstki elementarne obszerniejszy i obejmuje wszystkie obiekty prostsze od jądra atomowego (wyjątek proton)
- Fizyka cząstek elementarnych zajmuje się obecnie poziomem fundamentalnym – cząstkami fundamentalnymi i ich oddziaływaniami
- Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne – to też cząstki fundamentalne

# Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym



# History of the Universe





## Pytania do wykładu 1/3

- Femtometr to ile milimetrów?
- MeV ile to elektronowoltów?
- Co oznacza zapis  $10^6$ ?
- Czy cząstka elementarna to to samo co cząsteczka?
- Czym różni się cząstka elementarna od fundamentalnej?
- Co to jest nukleon?
- Kiedy odkryto pierwszą cząstkę elementarną? Jaka to była cząstka?
- Kiedy odkryto proton, kiedy pozyton?
- Czym różnią się hipoteza Plancka i hipoteza Einsteina?
- Na czym polegało doświadczenie Comptona?
- Za co Einstein dostał nagrodę Nobla?
- Co to jest zjawisko fotoelektryczne?
- Porównaj rozmiary cząsteczki, atomu i kwarku
- Z czego zbudowane jest jądro atomowe?
- Z czego składa się proton?
- Podaj przykłady cząstek antymaterii
- Dlaczego do badania struktury materii potrzeba coraz większych energii?

## Pytania do wykładu 1/3

- Ile wynosi masa protonu a ile neutronu?
- Czy teoria względności stosuje się w fizyce cząstek elementarnych?
- Na co rozpada się neutron?
- Czy obserwuje się naruszenie zasady zachowania energii?
- Jaka zasada zabrania rozpaść się protonowi na elektron i pozyton?
- Czy gluony mają kolor?
- Który kwark ma większą masę: kwark u czy d?
- Jaki kolor ma proton?
- Co to są hadrony??
- Wymień wszystkie leptony (wraz z antycząstkami).
- Podaj 3 przykłady liczb kwantowych.
- Czy neutrino jest naładowane elektrycznie?
- Czy leptony są lżejsze od protonu?
- Na jakie grupy dzielimy hadrony?
- Podaj ładunek elektryczny i liczbę barionową antykwarku u.
- Wymień wszystkie zapachy kwarków