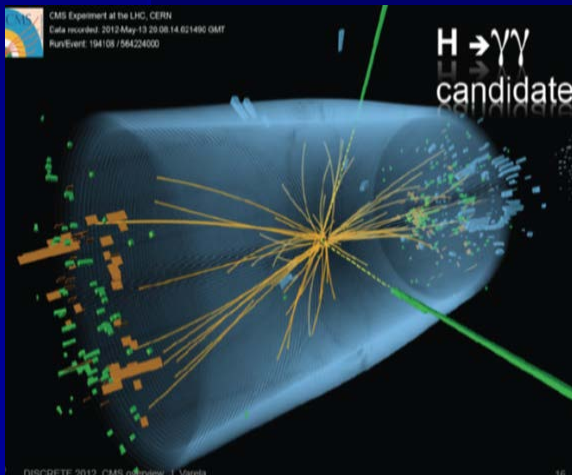


Wszechświat cząstek elementarnych (dla humanistów)

Maria Krawczyk i A. Filip Żarnecki

Instytut Fizyki Teoretycznej Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki UW



Odkrycie cząstki Higgsa w LHC (CERN)
- 4 lipca 2012

Nagroda Nobla 2013: F. Englert, P.Higgs

Nowe odkrycia 2015 ?

2015: Międzynarodowy Rok Światła



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

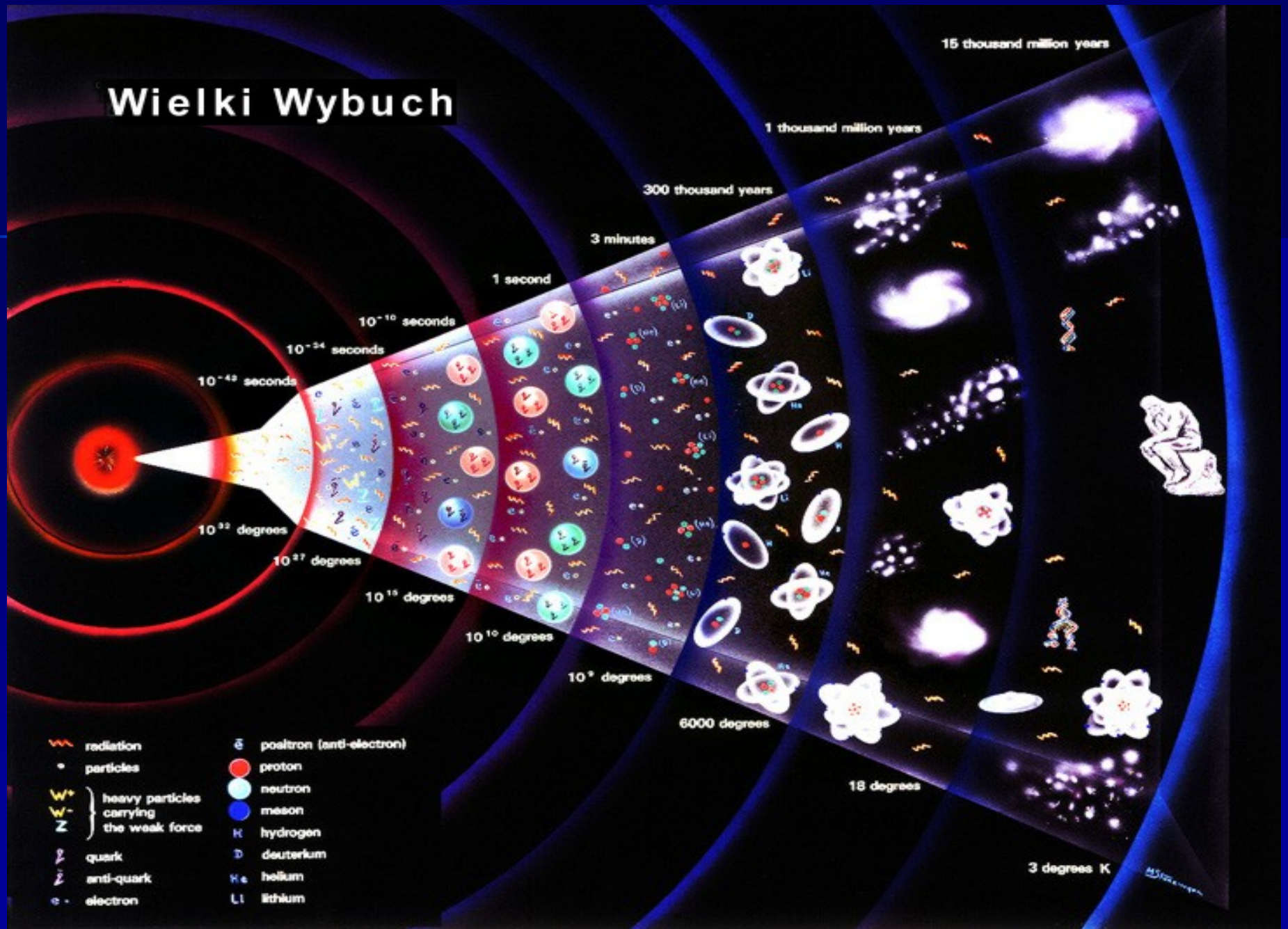
- Opisanie zasad optyki -Ibn Al Haythema 1015 r.
- Falowa natura światła - Fresnel 1815 r.
- Opis fal elektromagnetycznych – Maxwell 1865 r.
- Zjawisko fotoelektryczne (foton) -Einstein 1905r.
- Szczególna teoria względności (czasoprzestrzeń, prędkość światła) - Einstein 1915 r.
- Odkrycie mikrofalowego tła kosmicznego –
Penzias i Wilson -1965 r.
- Wykorzystanie światłowodów do celów telekomunikacyjnych – Kao 1965

Tytuł wykładu:

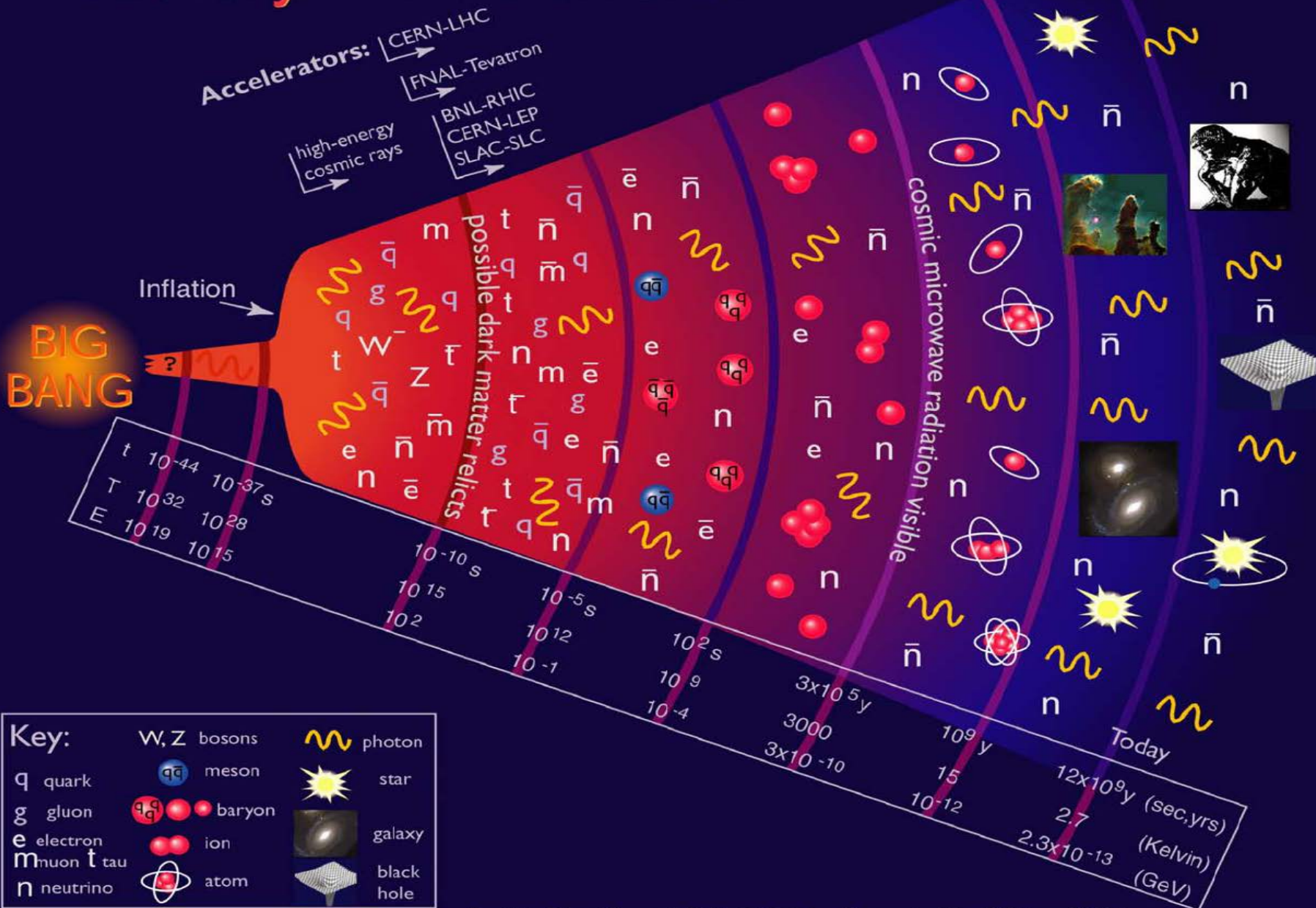
Wszechświat Cząstek Elementarnych

- świat cząstek bardzo różnorodny**
- opis Wszechświata nie jest możliwy bez zrozumienia oddziaływań cząstek elementarnych**

Wielki Wybuch



History of the Universe



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

Duże liczby

Deka, hekto, kilo, mega, giga, tera, peta, exa, zetta, yotta

da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y
10^1	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}			10^{24}

Małe liczby

Decy, centy, mili, mikro, nano, pico, femto, atto, zepto, yocto

d	c	m	μ	n	p	f	a	z	y
10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-24}

Przykład: $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ $1 \text{ TeV} = 10^3 \text{ GeV}$

Pomiar do $\text{am} = 10^{-18} \text{ m}$

(fizyka nanonano – tu kwarki i np.. elektron...)

Physique des Particules

Cosmologie

Physique Nucleaire

Astrophysique

Materia

Physique du Solide

Astronomie

Chimie-Biologie

Geophysique

Mecanique

p



10^{-15} 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 1 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18} 10^{21} 10^{24}



fm pm nm μ m mm m km Mm Gm Tm Pm Em



← atto, zepto, yocto

peta, exa, zetta, yotta

Physique des Particules

Cosmologie

Physique Nucleaire

Astrophysique

Physique du Solide

Astronomie

Materia i Wszechświat



10^{-15} 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 1 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18} 10^{21} 10^{24}



fm pm nm μ m mm m km Mm Gm Tm Pm Em



← atto, zepto, yocto

peta, exa, zetta, yotta

W świecie cząstek elementarnych obowiązują:

1. teoria względności i prawa mechaniki kwantowej
2. niektóre znane z makroświata prawa zachowania
np. energii i pędu oraz ładunku elektrycznego

■ W mechanice kwantowej nowe pojęcia:

- porcja energii,
 - nieoznaczoność Heisenberga (nie można z dowolną dokładnością znać położenia i pędu (energii) cząstki)
- > im większy pęd cząstki tym mniejszy rozmiar

■ Teoria względności:

graniczna prędkość cząstek fiz. (prędkość światła c),
czaso-przestrzeń
związek masy i energii $E = mc^2$

Fizyka Cząstek Elementarnych = Fizyka Wysokich Energii

- W badaniu struktury materii stosowane są **coraz większe energie**:
zasada nieoznaczoności Heisenberga →
większa energia umożliwia dotarcie do coraz
mniejszych struktur
- Związek $E = mc^2$ → większa energia
umożliwia produkcję nowych bardziej
masywnych cząstek

Uwaga: stosujemy elektrowolt eV jako jednostkę energii E i masy m ,
gdyż E i m różnią się jedynie stałą prędkością światła c (formalnie
oznacza to przyjęcie $c = 1$)

Plan wykładu



1. O fizyce cząstek elementarnych
2. Detekcje cząstek. Przyspieszacz i zderzacz.
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

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
6. DELTA 5/2000

Pytania do poszczególnych wykładów

- każdemu wykładowi towarzyszyć będą pytania, które stanowić będą następnie podstawę egzaminu testowego

Warunki zaliczenia / zaliczenie na ocenę:

1. obecność na wykładach obowiązkowa
dopuszczona jest nieusprawiedliwiona nieobecność na dwóch wykładach, kolejne nieobecności obniżają ocenę
2. 50% punktów z egzaminu testowego
30 pytań (max 1 zdanie odpowiedzi)
Każdemu wykładowi towarzysza pytania, które są podstawą egzaminu testowego
3. egzamin – sobota 13 (?) czerwca 2015 r

Fizyka cząstek elementarnych

Fizyka XX wieku

Wiek XX – niezwykły rozwój fizyki,
pojawiły się fundamentalne idee:

- pierwsza połowa XXw :

teoria kwantów

teoria względności (szczególna teoria względności)

teoria grawitacji (ogólna teoria względności)

- druga połowa XXw :

fizyka cząstek elementarnych

(teoria cząstek elementarnych lata 70-e XX w.)

Cząsteczki, atomy, jądra atom. i cząstki elem.

- Materia składa się z cząsteczek (molekuły, drobiny)
np. woda H_2O , H=wodór, O=tlen
- Cząsteczki stany związane atomów (ok. 100 różnych atomów w naturze)
- Atomy = stany związane jąder atomowych i elektronów

Atomy są prawie puste- rozmiar atomu

1/100 000 000 cm, jądro 100 000 mniejsze

Rutherford ustalił to w 1911 bombardując

złoto ciężkimi cząstkami alfa (α)

nukleony

- Jądro = stany związane protonów i neutronów

Atomy i jądra atomowe

Nukleony

- proton p (ładunek elektryczny = +1)
(elektron e ma ładunek el. = -1)
- neutron n (ładunek elektryczny = 0)

Atomy i jony

- są neutralne elektrycznie: dodatnie jądro i ujemne elektrony
- jeśli oderwiemy jeden lub więcej elektronów powstają 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 e⁻e⁻ (→ ppnn = cząstka alfa α)

Fizyka jądrowa → badanie jąder atomowych

Zoo cząstek elementarnych

Definicja: cząstka elementarna to

'obserwowany' obiekt prostszy niż jądro atomowe (wyjątek stanowi najprostsze jądro H (wodór), czyli proton, który jest cząstką elementarną.)

Cząstki elementarne - dużo (1000) i różnorodne (Zoo):

aktualne dane <http://pdg.lbl.gov/>

różne masy,

różne czasy życia (mogą się rozpadać !),

różne ładunki elektryczne,

różne sposoby oddziaływań,

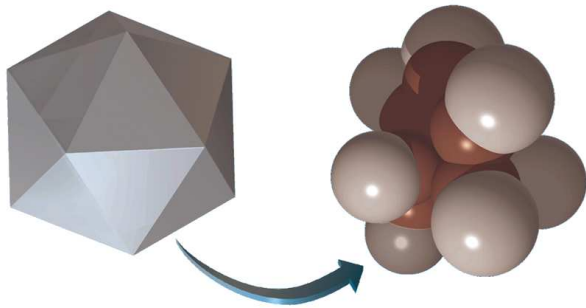
grupowanie się w różne układy (multiplety)

Cząstki elementarne mogą być złożone (proton) !

najmniejsze składniki → cząstki fundamentalne

Budowa materii

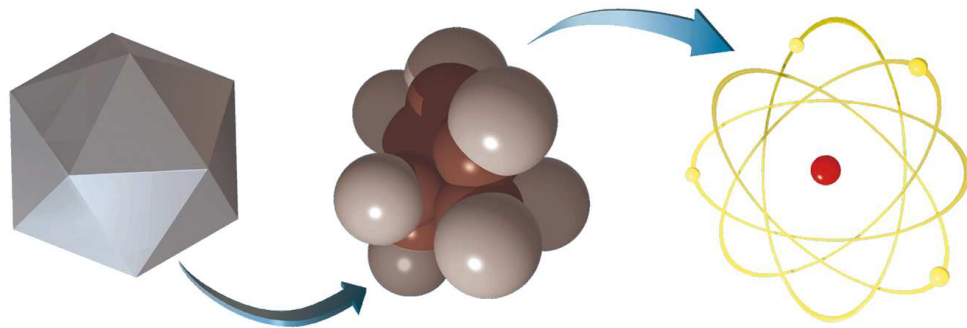
Cząsteczka



10^{-9} m

Budowa materii

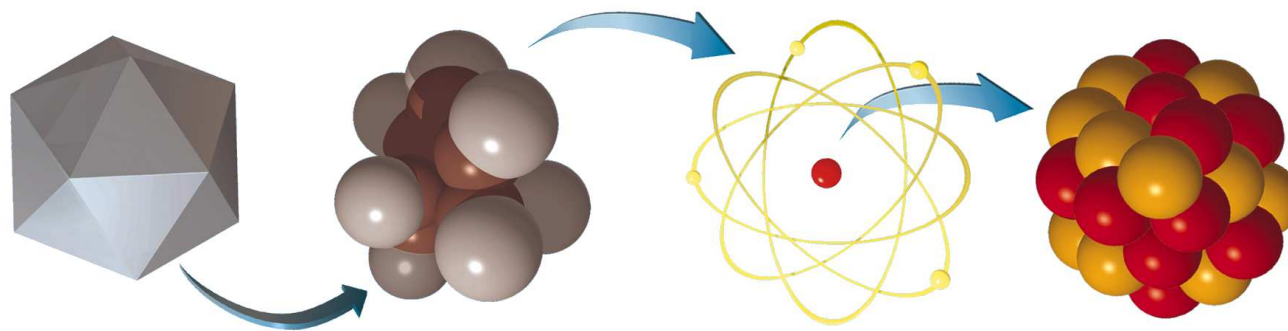
Atom



10^{-10} m

Budowa materii

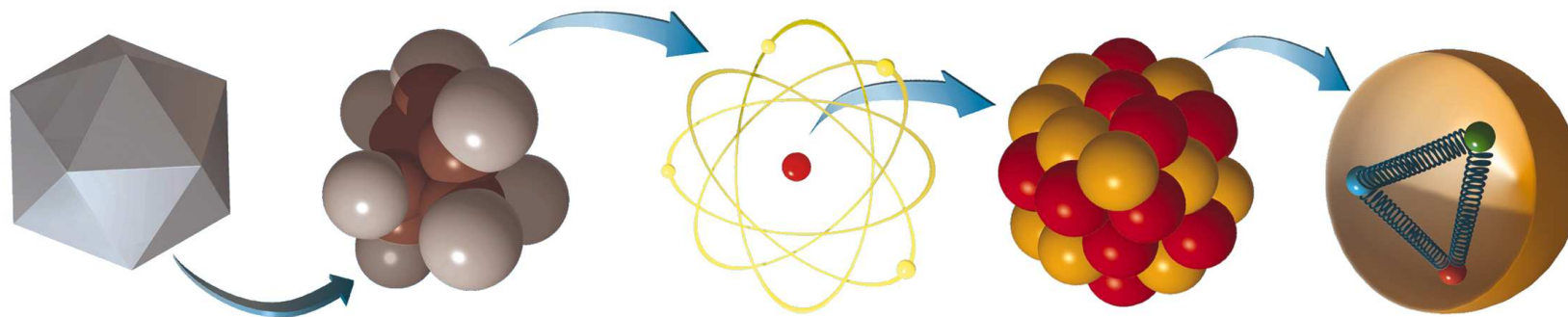
Jądro atomowe



10^{-14} m

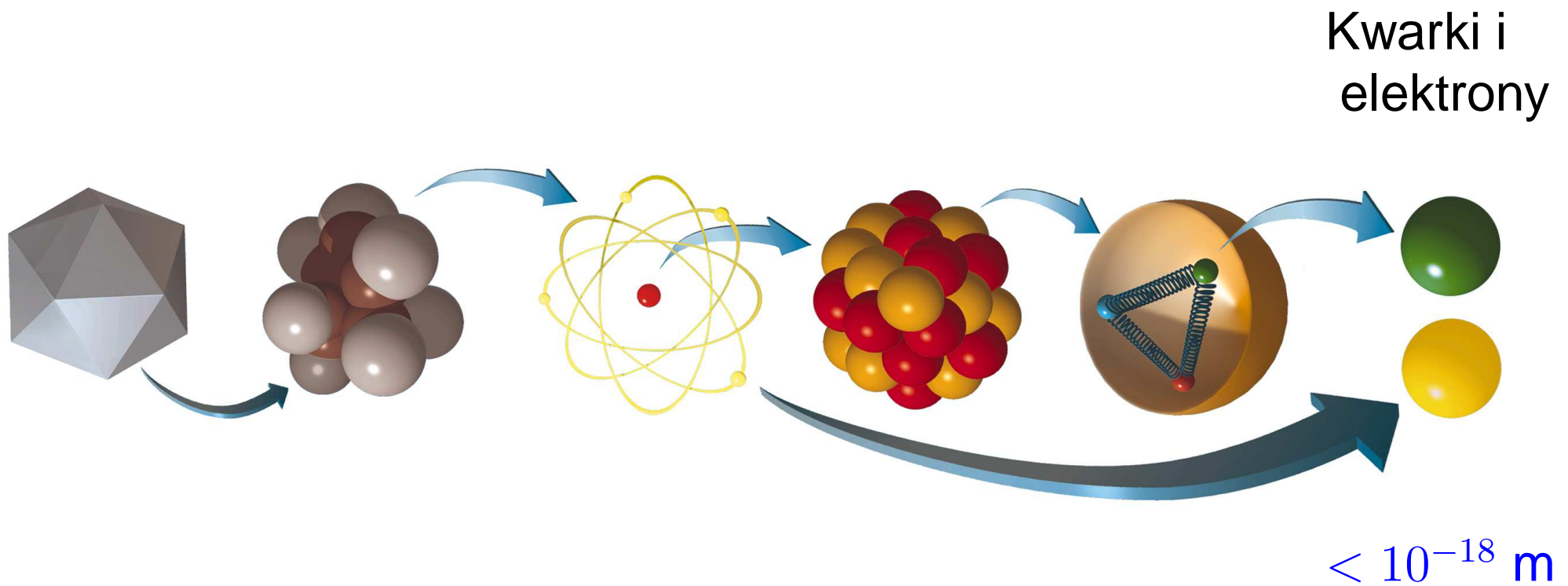
Budowa materii

Nukleony



10^{-15} m

Budowa materii



Cząstki elementarne i fundamentalne

- Cząstki takie jak proton p i neutron n to stany związane kwarków.

Cząstki fundamentalne (np. kwarki) – cząstki bez wewnętrznej struktury

- Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne to też cząstki fundamentalne
- Fizyka cząstek elementarnych zajmuje się obecnie poziomem fundamentalnym – cząstkami fundamentalnymi i ich oddziaływaniami

→ **Model Standardowy**

Antycząstki (antymateria)

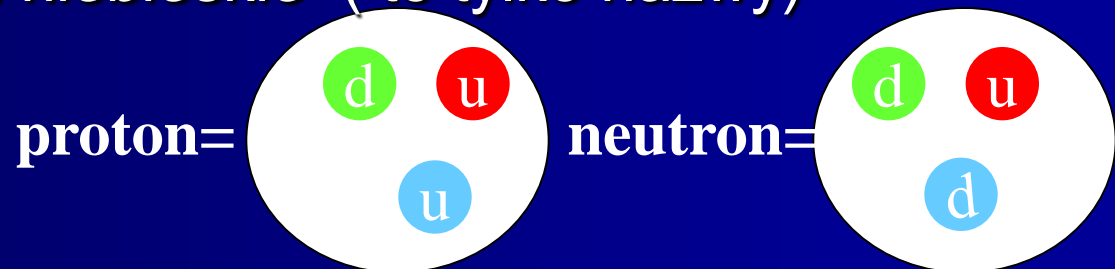
- Antycząstki to też cząstki, choć mogą się różnić od swoich „partnerów” pewnymi własnościami.
Cząstki i antycząstki mają tę samą masę i czas życia.
 - Elektron i pozyton – to para cząstka-antycząstka (ale która jest którą to sprawa umowy); różnią się znakiem ładunku elektrycznego (pozyton ma ładunek dodatni).
Elektron odkryto w 1897 a pozyton dopiero w 1932
 - Istnienie antycząstek wynika z prawa przyrody. Przewidywanie teoretyczne istnienia antycząstki
- P. Dirac' 1928 (*mylnie uważał proton za antycząstkę do elektronu, choć kłopot z masami..*)
 - Cząstka i antycząstka mogą oddziaływać b. gwałtownie – zniknąć (anihilacja) i pojawiać się w parach (kreacja)
 - Cząstka może być swoją antycząstką
 - We Wszechświecie nadwyżka materii nad antymaterią!
- Oznaczenie: kreska nad symbolem cząstki np. kwark u i antykwark \bar{u}

Nukleony i zwykłe kwarki (oraz klej czyli gluony)

Proton p i neutron n zbudowane są z 3 kwarków

Są to kwarki: u (*up*) i d (*down*) → *zwykłe kwarki*

Wszystkie kwarki występują w 3 stanach (*barwach, kolorach*)
- nowa liczba kwantowa
czerwone, zielone i niebieskie (to tylko nazwy)



Kwarki są fundamentalne..

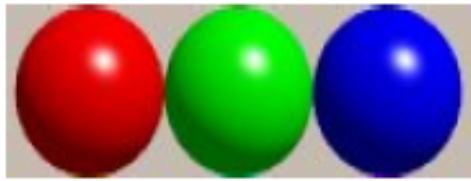
Ale nie występują jako cząstki swobodne – a proton i neutron tak.

W nukleonach są **gluony** **sklejające całość**

(w atomie tę rolę pełnią fotony, nośniki sił elektromagnetycznych (e-m))

Kolor

Każdy z kwarków obdarzony jest ładunkiem kolorowym: R, G lub B.



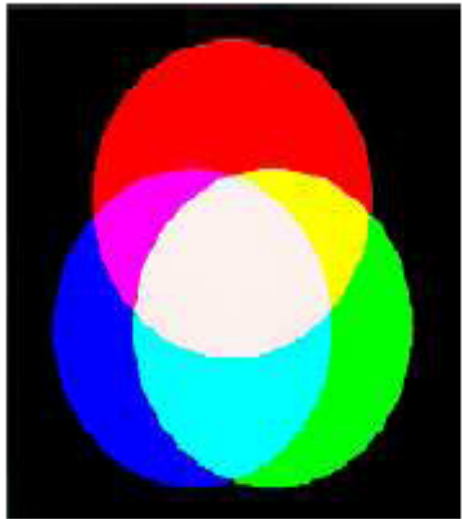
Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory "ujemne"): \bar{R} , \bar{G} , \bar{B} .



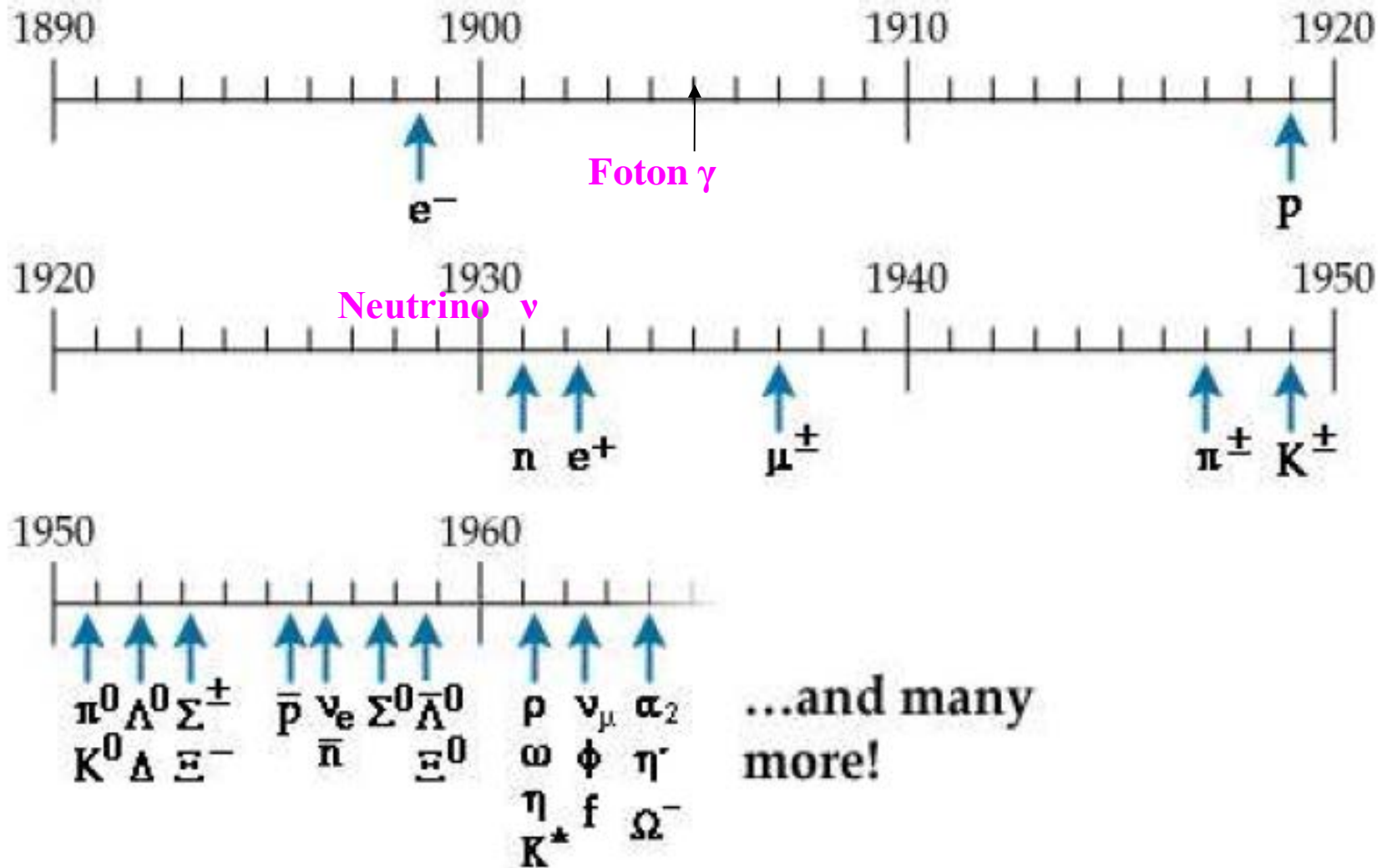
Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące netto ładunku kolorowego (cząstki "białe"):

$$R + G + B = 0$$

$$R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} = 0$$



Odkrycia cząstek elementarnych 'potop' w latach 50-60 XX w



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
$$1 \text{ eV} = 1.6 * 10^{-19} \text{ J}$$

- Jednostki pochodne: 1 keV, 1 MeV, 1 GeV, 1 TeV

Dla mas stosujemy te same jednostki, np. masa protonu $\sim 1 \text{ GeV}$

Masa i energia: efekty relatywistyczne

W fizyce cząstek praktycznie zawsze musimy uwzględniać efekty relatywistyczne. Cząstki na ogół poruszają się z prędkościami bliskimi c (prędkość światła).

Prędkość przestaje być wygodnym parametrem do opisu procesów.

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

Znacznie wygodniejsza do opisu ruchu cząstki jest energia i pęd

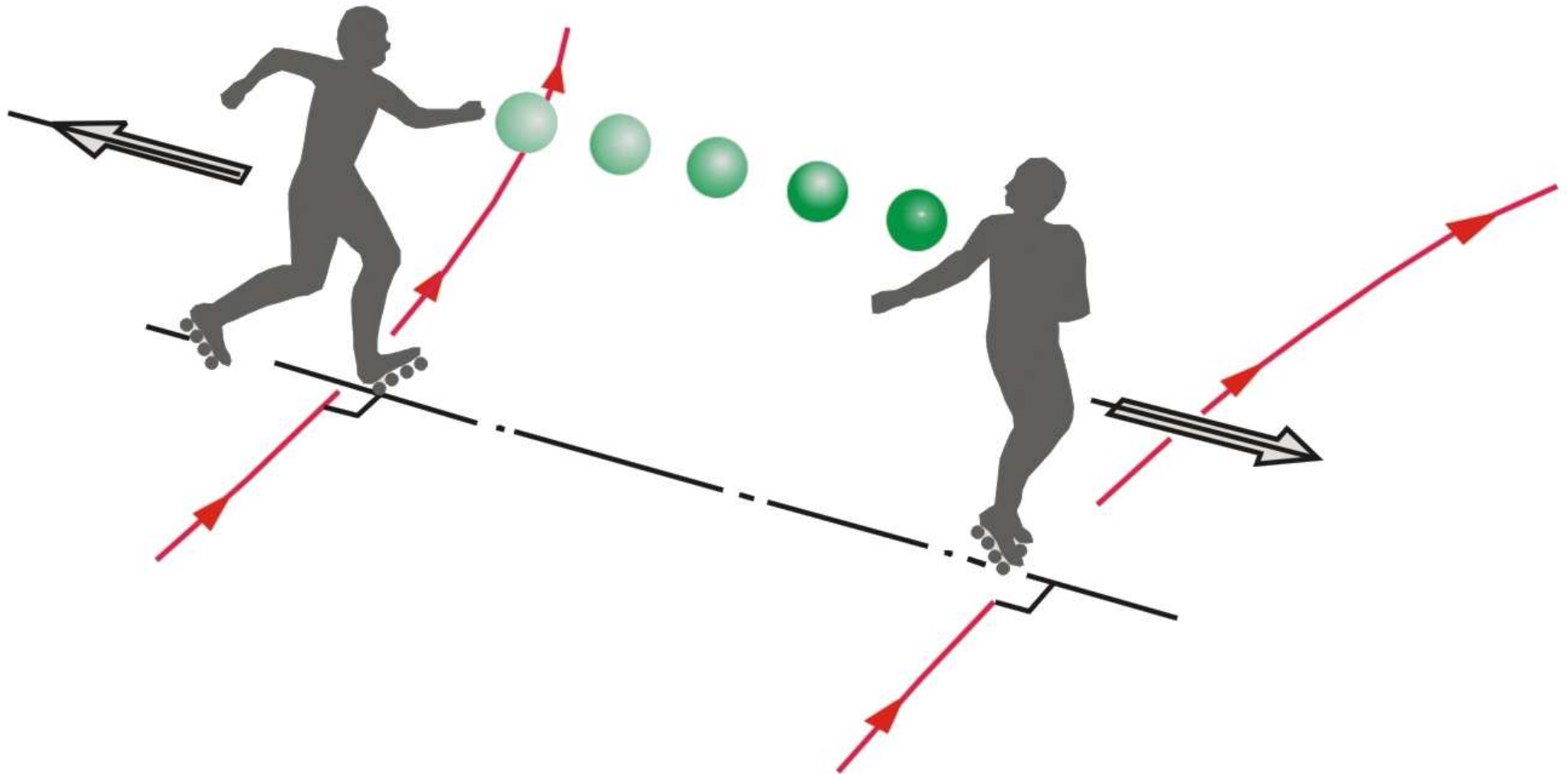
Energia w teorii względności :

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

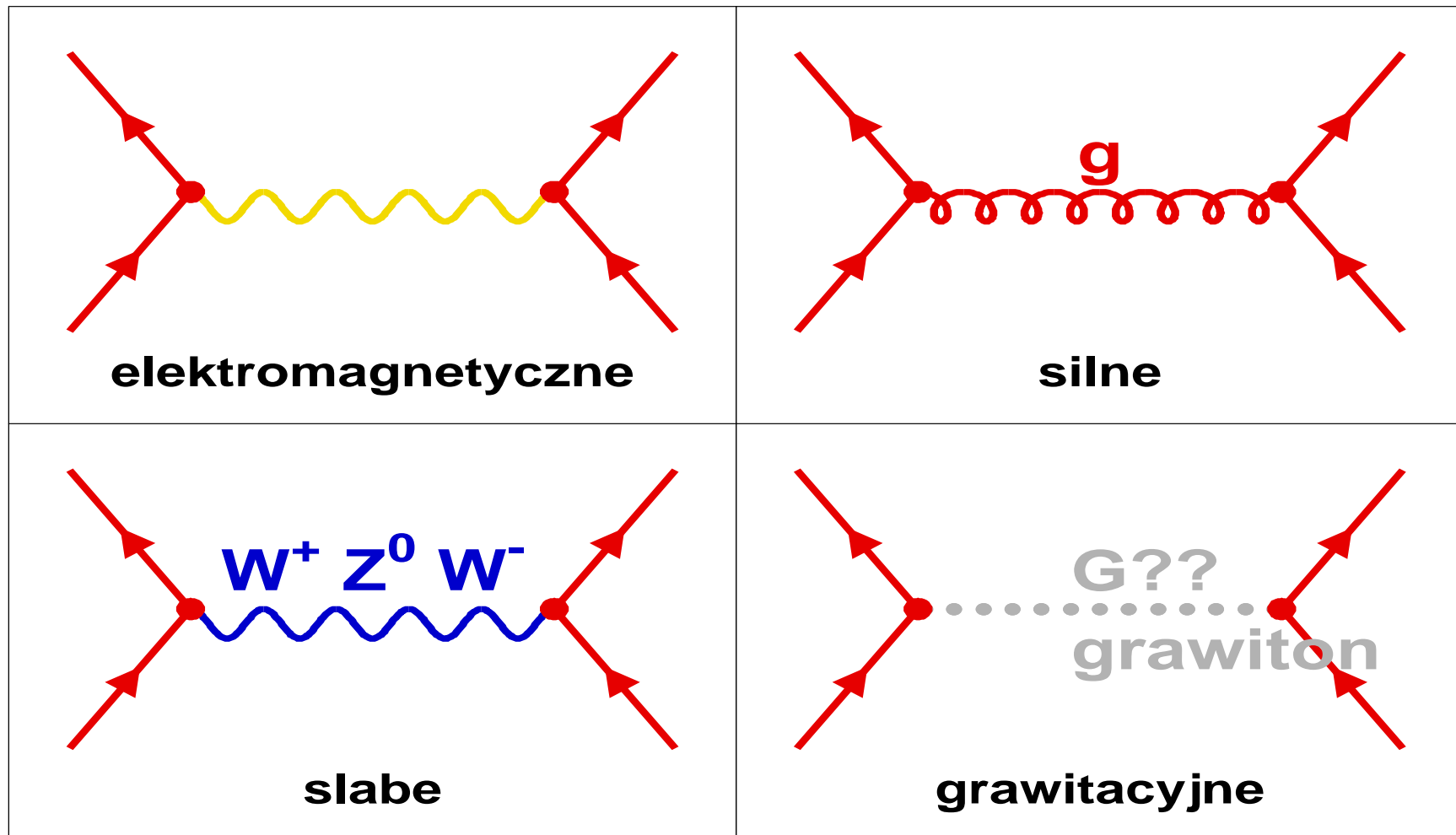
Zachowana jest tylko energia całkowita, -
energia kinetyczna może się zamieniać w masę, masa w energię kinetyczną

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

**Oddziaływania na poziomie elementarnym
i fundamentalnym** opisujemy jako wymianę cząstek - “nośników”



Fundamentalne oddziaływania i fundamentalne **nośniki**-
 grawitacja nieistotna w mikroswiecie (grawiton - to jedynie hipoteza)



Oddziaływania fundamentalne (stan obecny)

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

<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>	<i>masa</i>
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
($c=1$)

Kwarki-wszystkie oddziaływania, leptony (np.elektron)-bez oddz. silnych

Budowa materii (stan obecny)

Świat “codzienny”: 3 “cegielełki” (elektron oraz kwarki u i d) + *neutrino*
 \Rightarrow 12 fundamentalnych “cegielełek” materii, masy od 0 do 173 GeV

	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)

Cząstki fundamentalne w Modelu Standardowym

