WSTĘP DO FIZYKI CZĄSTEK

Julia Hoffman (NCU)

WSTĘP DO WSTĘPU

- W wykładzie zostały bardzo ogólnie przedstawione tylko niektóre zagadnienia z zakresu fizyki cząstek elementarnych.

- Sugestie, pytania, uwagi: mile widziane! (pomogą mi one ulepszyć/rozbudować/skrócić ten wykład).

NOTACJA

- W fizyce posługujemy się często BARDZO małymi, bądź BARDZO dużymi wielkościami:
  - Jednostka astronomiczna (odległość między Ziemią i Słońcem)

    $1\ \mathrm{AU} = 150\,000\,000\,000\ \mathrm{m} \Rightarrow 1.5 \times 10^{11}\ \mathrm{m}$
  - Rozmiar atomu wodoru - 1Å = 10^{-10} m.
  - Dostępna energia w zderzeniu w LHC - 8 000 000 000 000 eV $\Rightarrow 8 \times 10^{12}$ eV.
- Wykładnik potęgi określa rząd wielkości:
  - Samochód (~1 m) jest o 1 rząd wielkości mniejszy niż dom (~10 m).

  - Ziarnko piasku (~0.001 m) jest 10 rzędów wielkości mniejsze niż Ziemia (~10 000 000 m) .

NOTACJA

- Dedykowane przedrostki dla dużych liczb:

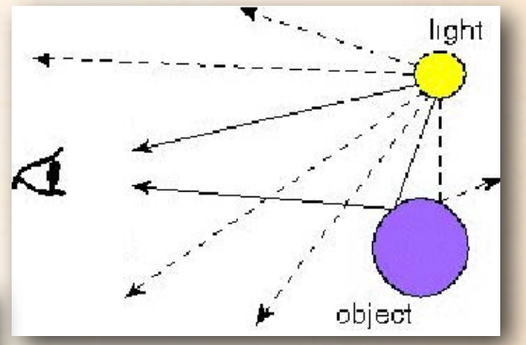
deka	hekto	kilo	mega	giga	tera	peta	exa	zetta	yotta
da	h	k	M	G	T	P	E	Z	Y
10	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}	10^{18}	10^{21}	10^{24}

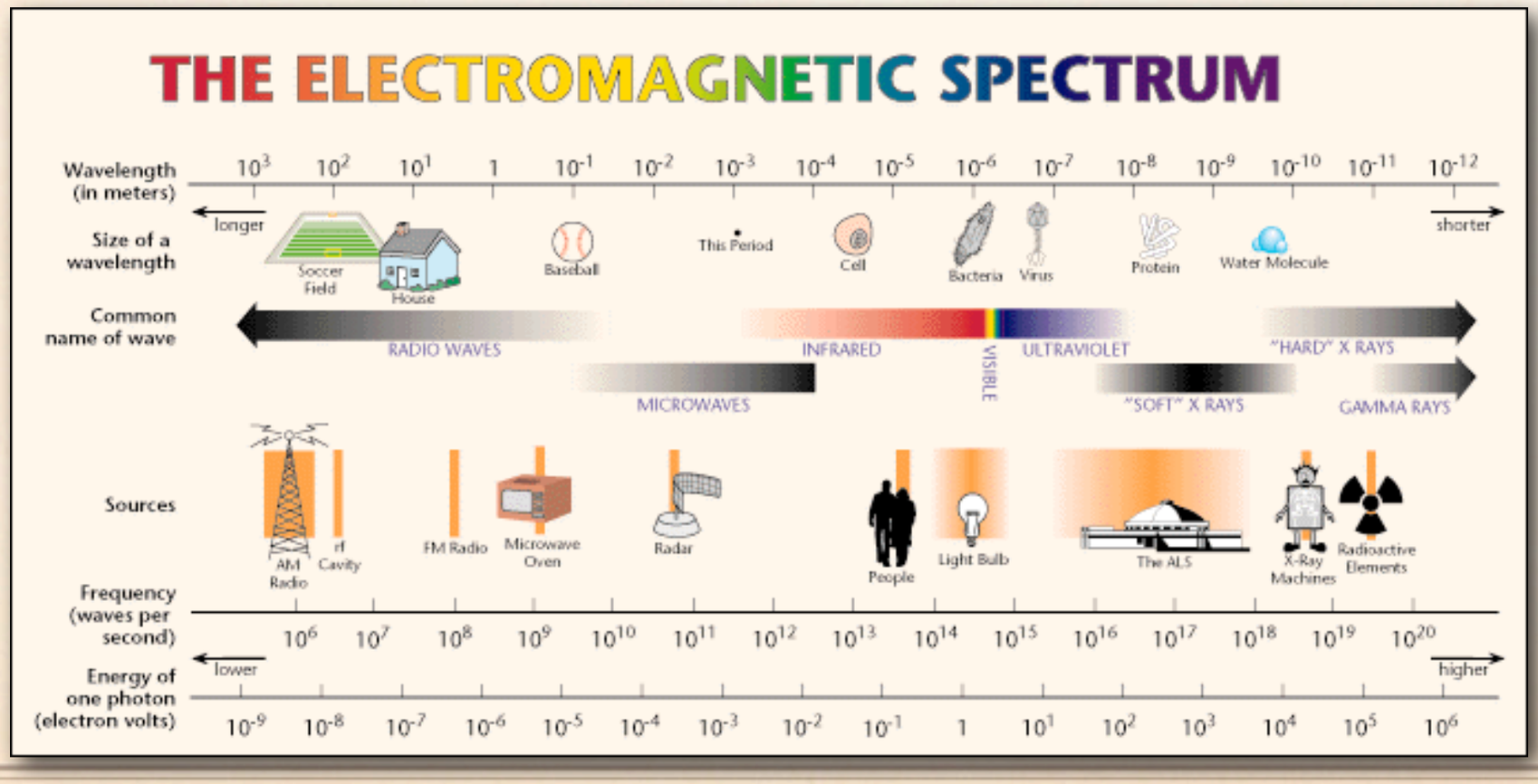
- Dedykowane przedrostki dla małych liczb:

decy	centy	mili	mikro	nano	pico	femto	atto	zepto	yotto
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^{-18}	10^{-21}	10^{-24}

JAK BADAĆ CZĄSTKI ELEMENTARNE?

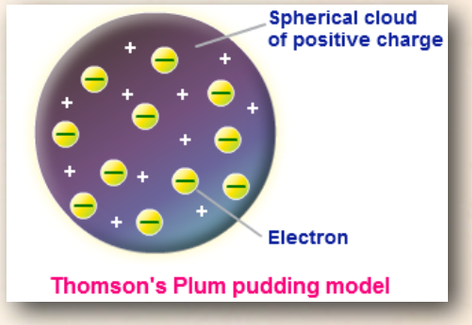
- Cząstki można “oglądać.
- Niestety, nie można zrobić tego “nieuzbrojonym” okiem, światło widzialne jest zbyt “grube”.
  - długość fali światła widzialnego: λ ~300-600 nm.
  - rozmiar atomu: ~0.1 nm.

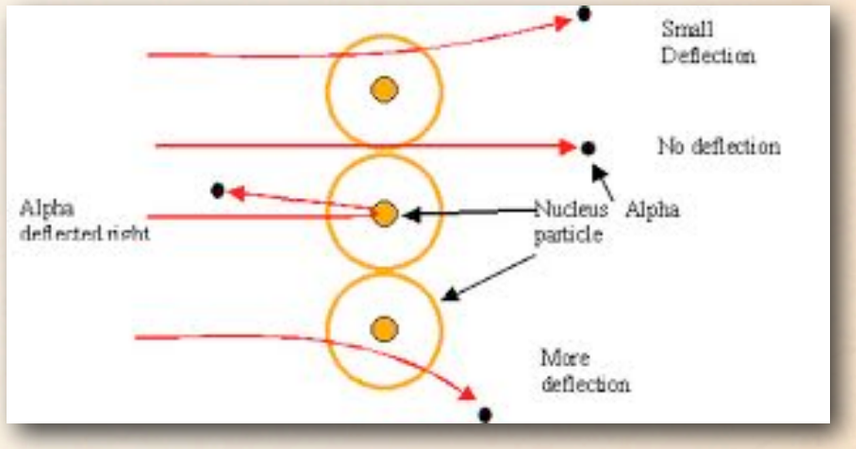




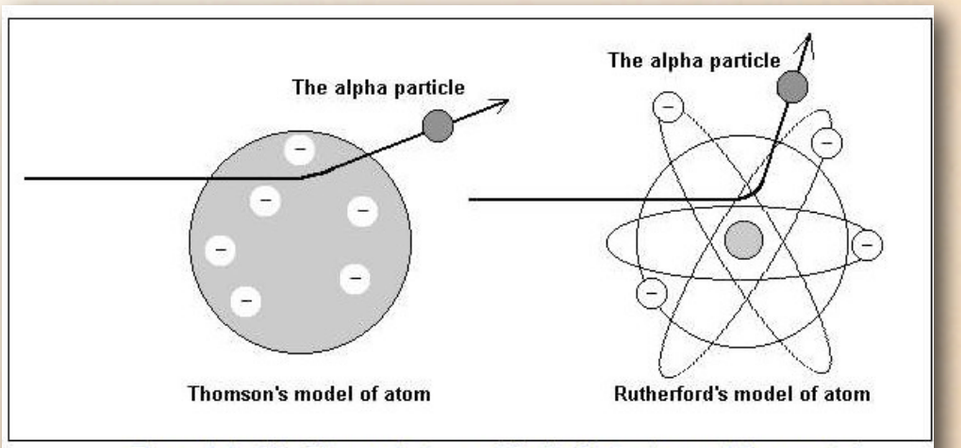
ODKRYCIE JĄDRA ATOMOWEGO

- Model atomu Thomsona:
  - Cała objętość atomu jest jednorodnie naładowana dodatnio, a wewnątrz “pływają” elektrony.





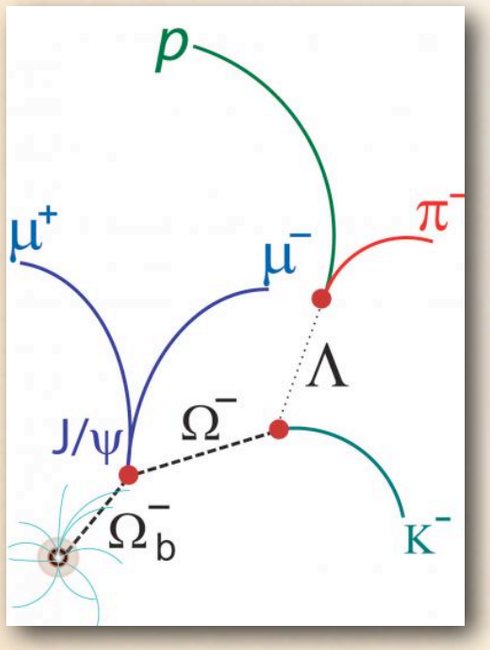
- Doświadczenie Rutherforda udowodniło, że ładunek dodatni skupiony jest w centrum atomu (10^{-10}m) (jądrze < 10^{-14} m).

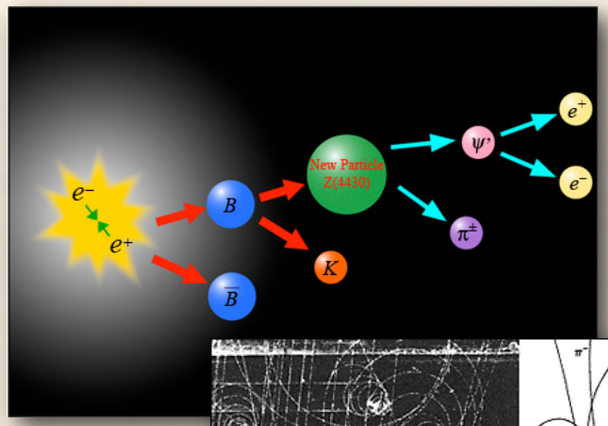


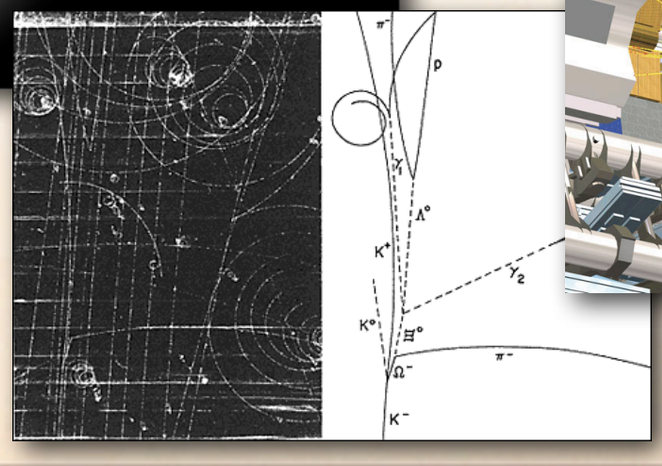
The models of the Thomson's atom and Rurtherford's atom; and the expected aberrations of alpha particle in both cases.

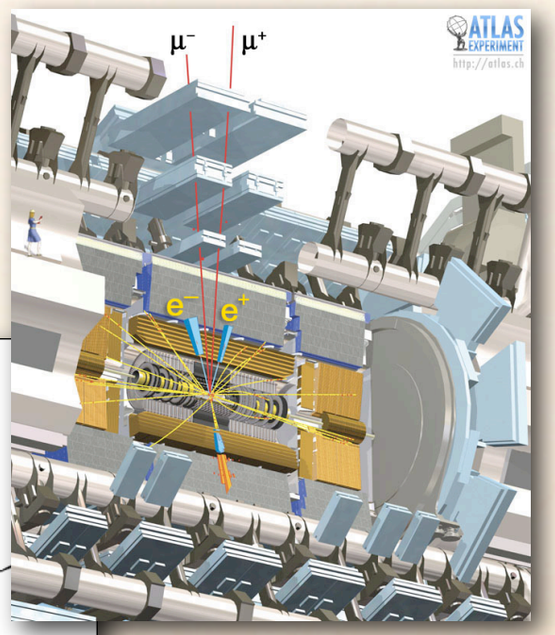
JAK BADAĆ CZĄSTKI ELEMENTARNE?

- Oglądamy cząstki:
  - źródło "promieni" ⇒ obiekt (cząstka) ⇒ detektor.
  - źródło: początkowo pierwiastki radioaktywne, promieniowanie kosmiczne, potem: akceleratory.
- Zderzamy/rozbijamy:
  - rejestrujemy produkty zderzenia i rozpadu nowopowstałych cząstek.



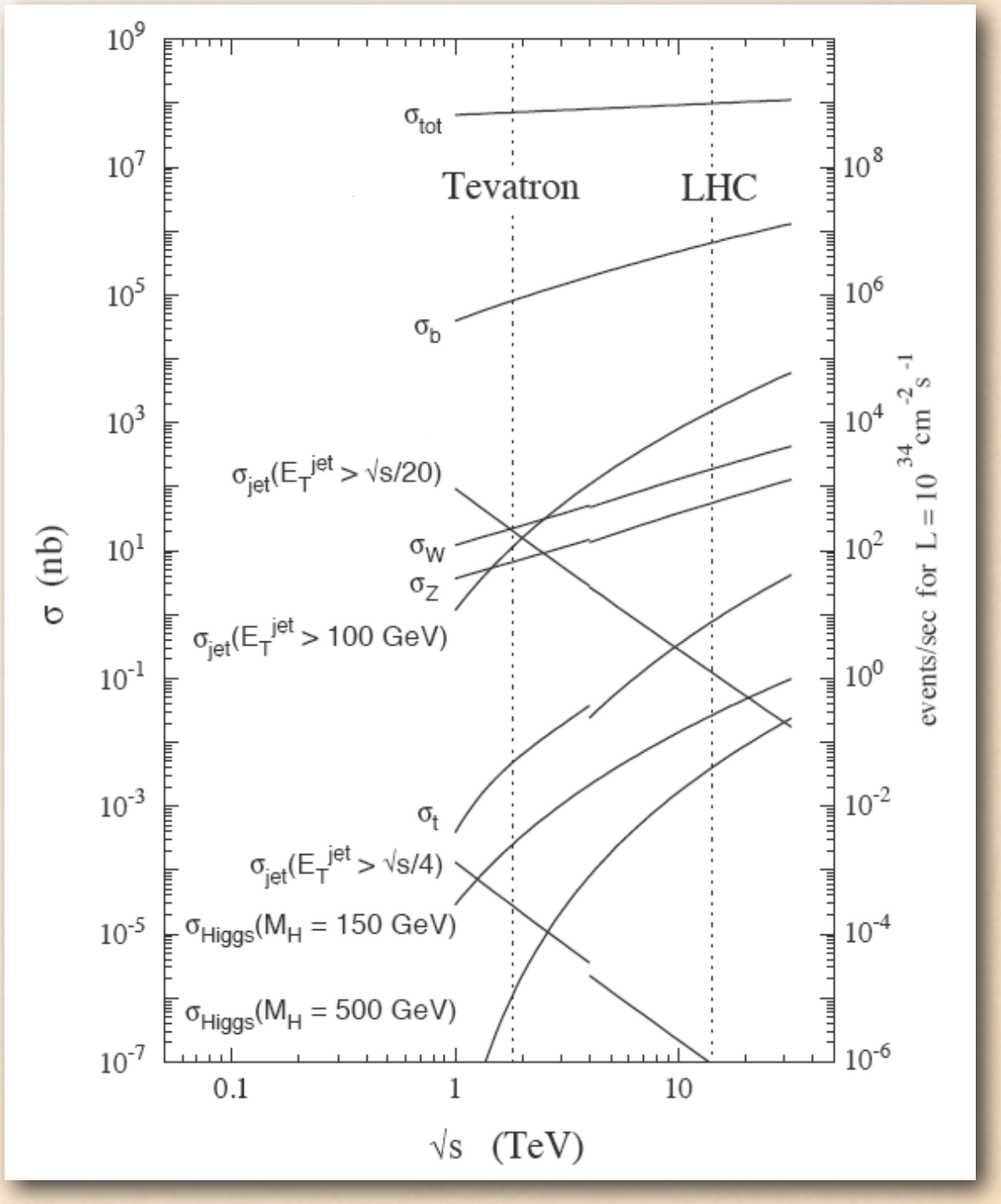






CZĄSTKI W ZDERZACZACH

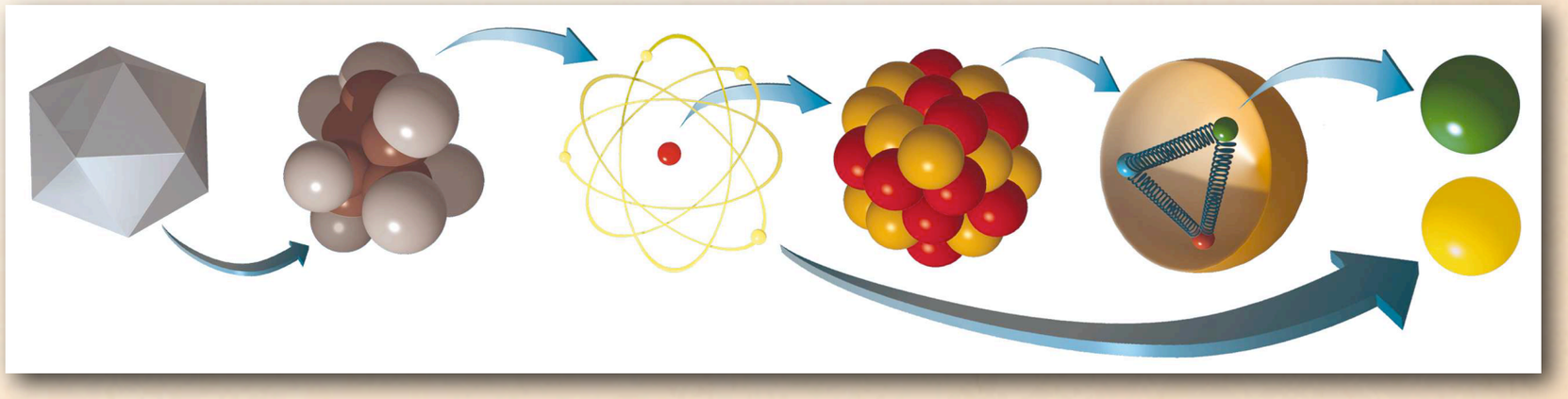
- W wyniku zderzenia dwóch cząstek może powstać jedna, lub więcej nowych cząstek.
- To, jakie cząstki powstaną, zależy od energii zderzenia i rodzaju zderzanych cząstek.
- Jeśli znamy własności cząstek, możemy obliczyć prawdopodobieństwo zajścia konkretnej reakcji.
- Barn (b): jednostka powierzchni i miara prawdopodobieństwa zajścia oddziaływania pomiędzy dwiema cząstkami. $1b = 10^{-28} m^2$



JAK BADAĆ CZĄSTKI ELEMENTARNE?

- Aby badać materię na poziomie cząstek elementarnych musimy użyć fotonów, lub innych cząstek, o wysokich energiach.
  - Rozdzielczość fali próbkującej o energii E: $\Delta x \sim \lambda = hc/E$.

    h - stała Plancka ($h = 6 \times 10^{-34}$ Js), C - prędkość światła
- Energia i jednostki:
  - Joul (J) w świecie cząstek elementarnych jest zbyt dużą jednostką, zatem stosujemy:
  - 1 eV (elektronowolt) - energia, jaką uzyskuje elektron w wyniku działania pola elektrycznego o napięciu 1V.
    - 1 eV ~ 1 μm
    - 1 eV ~ 10^4 K
    - 1 eV = 10^{-36} kg

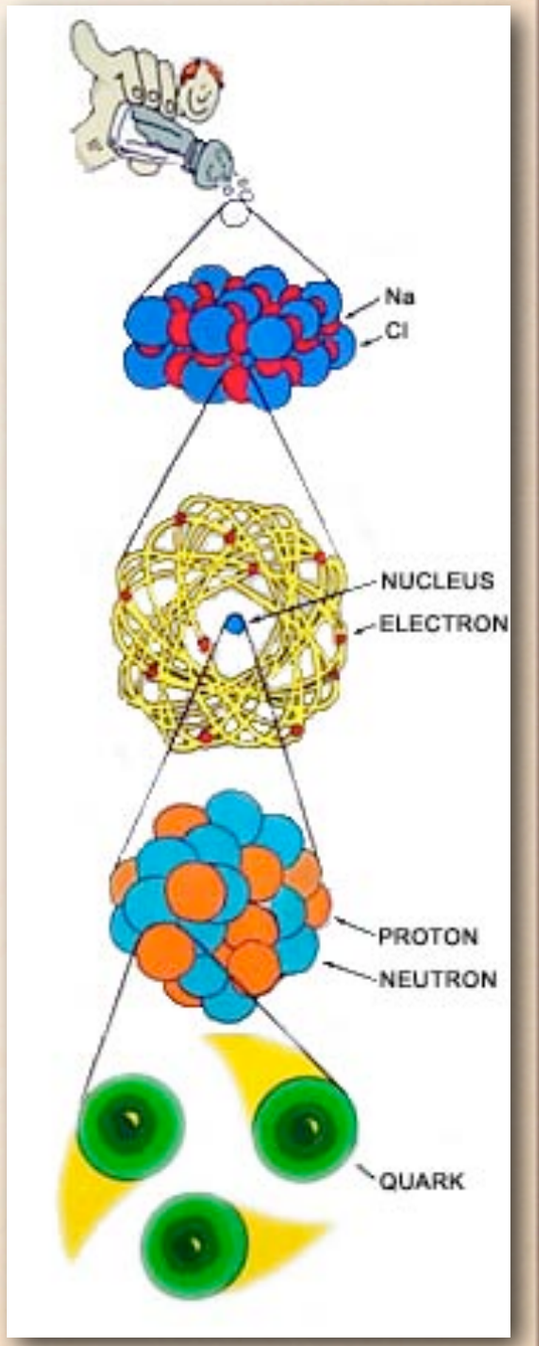


ŚWIAT CZĄSTEK ELEMENTARNYCH I FUNDAMENTALNYCH

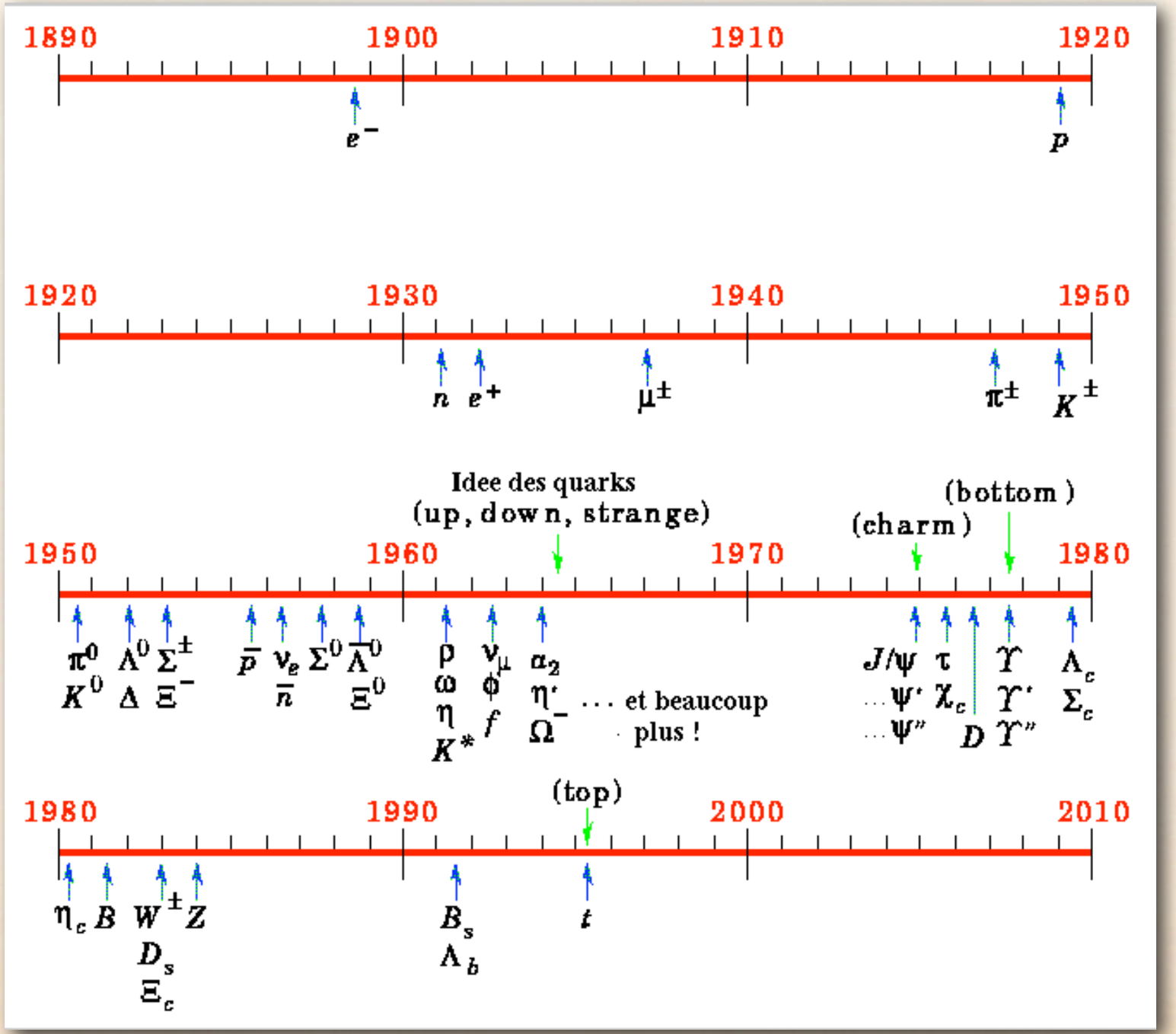
- Cząstka elementarna: Obiekt prostszy niż jądro atomowe (wyjątek: wodór). Cząstki elementarne mogą być złożone (np. proton).
- Cząstka fundamentalna: podstawowy składnik materii, bez struktury.
- Cząstki przenoszące oddziaływania fundamentalne są też fundamentalne.

BUDOWA MATERII

- Świat, który nas otacza:
  - proton/neutron = 3 kwarki (u, d),
  - elektron (+ neutrino),
  - foton.

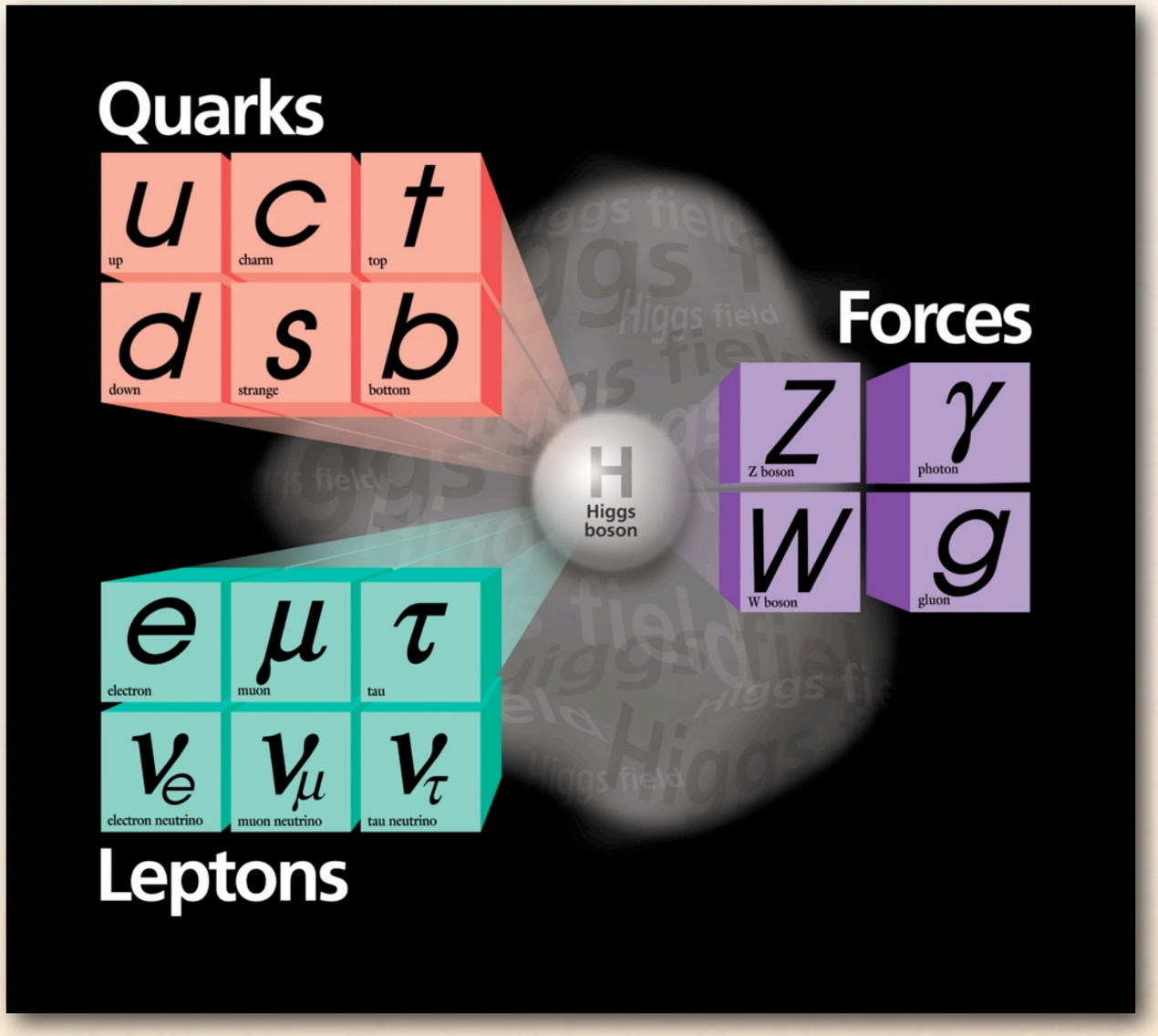


ŚWIAT CZĄSTEK ELEMENTARNYCH I FUNDAMENTALNYCH



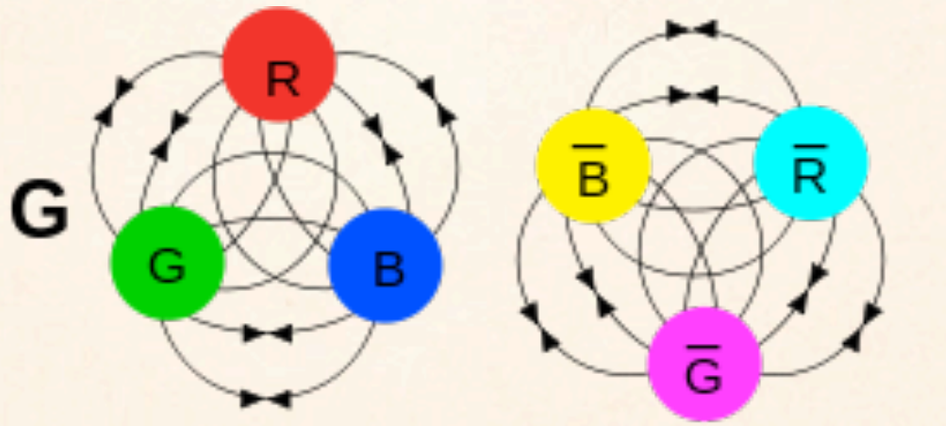
BUDOWA MATERII

- Świat fizyki cząstek:

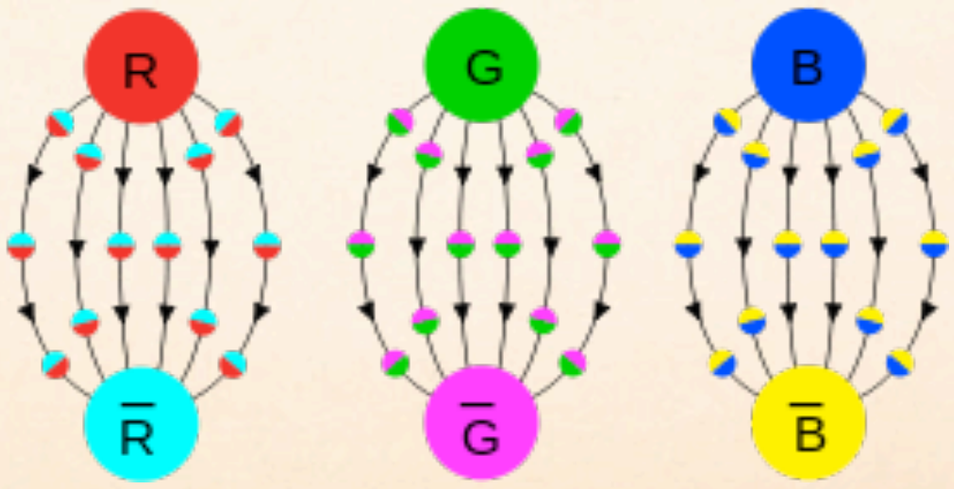


ELEKTROSTATYKA I CHROMOSTATYKA

- Elektrostatyka: dwa typy ładunków: + i -.
- Chromostatyka: trzy rodzaje ładunków (tzw. ładunki kolorowe), każdy typu "+" i "-".



bariony



mezony

BUDOWA MATERII

Fermions

Leptons (spin 1/2)

Electron (Charge -1)	e^-	Electron Neutrino (Charge 0)	ν_e
Tau (Charge -1)	T	Tau Neutrino (Charge 0)	T_e
Muon (Charge -1)	μ	Muon Neutrino (Charge 0)	ν_μ

Quarks (spin 1/2)

Bottom Quark (Charge -1/3)	b	Up Quark (Charge 2/3)	U
Down Quark (Charge -1/3)	d	Top Quark (Charge 2/3)	t
Strange Quark (Charge -1/3)	s	Charm Quark (Charge 2/3)	c

Baryons (spin 1/2 2/3)

Proton (Charge +1)	P^+
Anti Proton (Charge -1)	$\bar{P}^-$
Neutron (Charge 0)	N^0
Lamda (Charge 0)	Λ^0
Omega (Charge -1)	Ω^-

Measons (spin 0,1)

Pion (Charge +1)	π^+
Kaon (Charge -1)	K^-
Rho (Charge +1)	ρ^+
B-zero (Charge 0)	B^0
Eta-c (Charge 0)	η_c

- Any member of a group of subatomic particles having odd half-integral angular momentum (spin 1/2, 3/2).
- Fermions obey the Pauli exclusion principle, which forbids more than one particle of this type from occupying a single quantum state.
- Fermions include nuclei of odd mass number.

Bosons (spin 1)

Photon (Charge 0)	γ
W^- Boson (Charge -1)	W^-
W^+ Boson (Charge 1)	W^+
Z^0 Boson (Charge 0)	Z^0
Gluon? (Charge 0)	g

- Subatomic particle with integral spin (i.e., angular momentum in quantum-mechanical units of 0, 1, etc.)
- Bosons (force carriers) differ significantly from fermions in that there is no limit to the number that can occupy the same quantum state.

2nd September 2009

Standard Model of

FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0
e electron	0.000511	–1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	–1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	–1

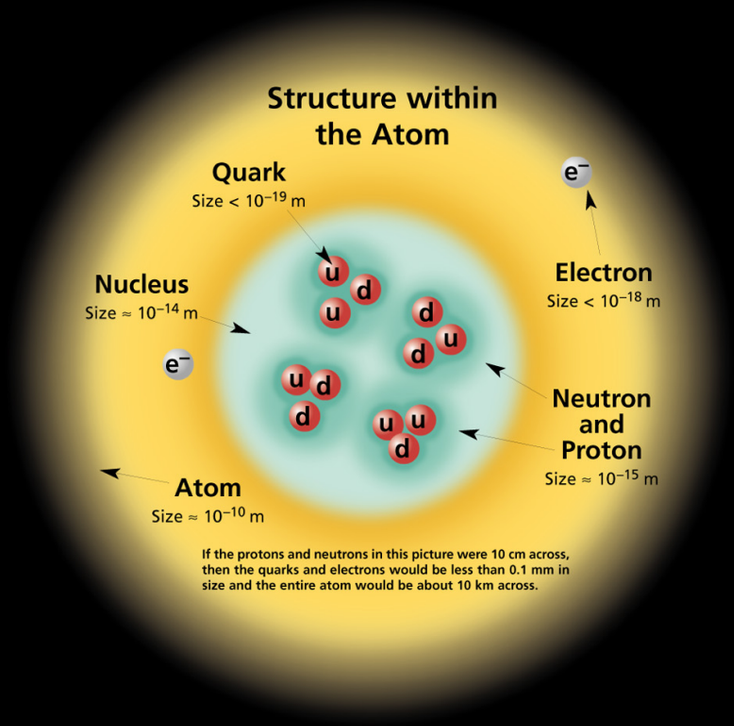
Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	–1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	–1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	–1/3

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of ħ, which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58\times10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c^2 (remember $E = mc^2$), where 1 GeV = 10^9 eV = 1.60×10^{-10} joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c^2 = 1.67×10^{-27} kg.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	–1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge

Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and ***W*** and ***Z*** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq.

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic (Electroweak)	Strong: Fundamental	Strong: Residual
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at: 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
Strength relative to electromag for two u quarks at: 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$
Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	–1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	–1	1.672	3/2

Mesons $q\bar{q}$
Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

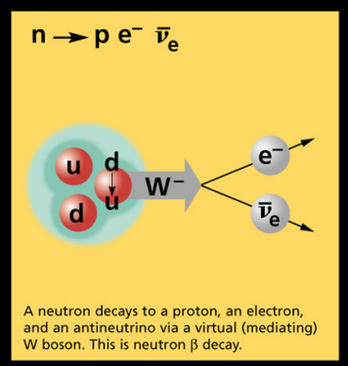
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	–1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2 .980	0

Matter and Antimatter

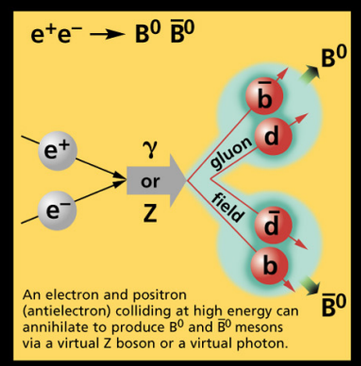
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or – charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0, γ, and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

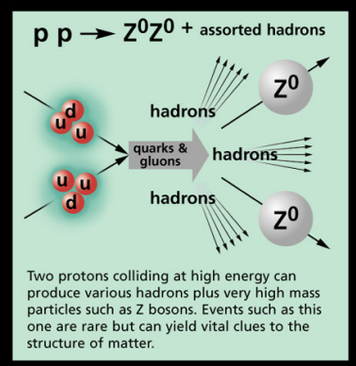
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are ***not*** exact and have ***no*** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β decay.



An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and $\bar{B}^0$ mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.



Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at
http://ParticleAdventure.org

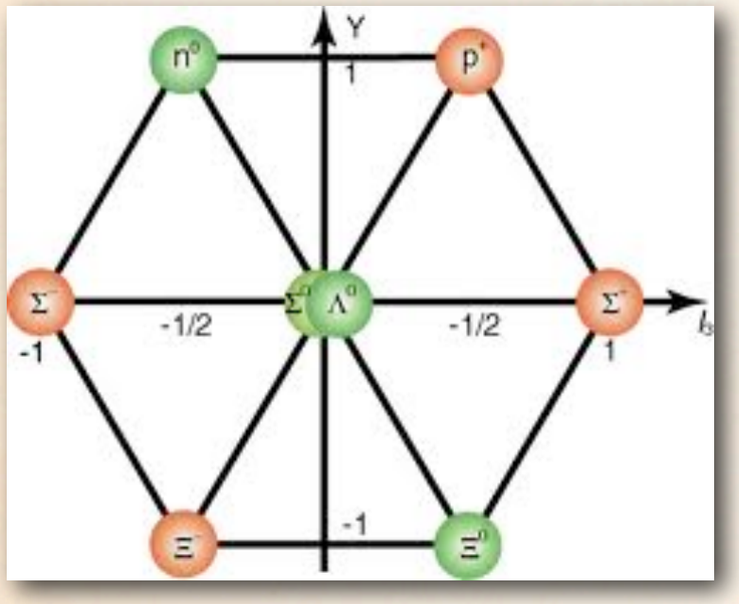
This chart has been made possible by the generous support of:

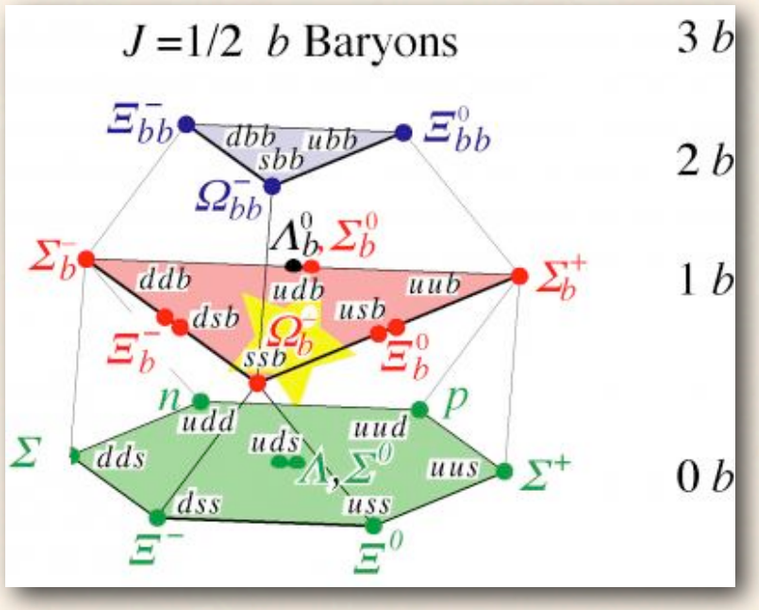
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

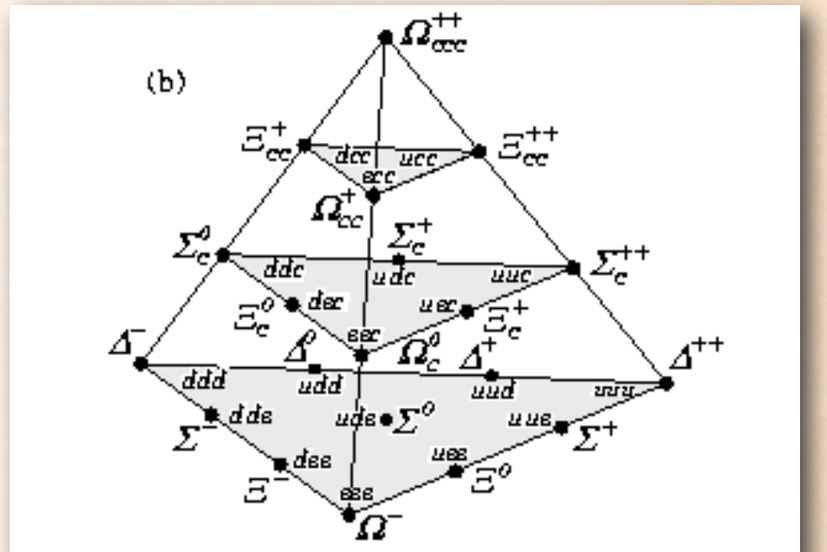
©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

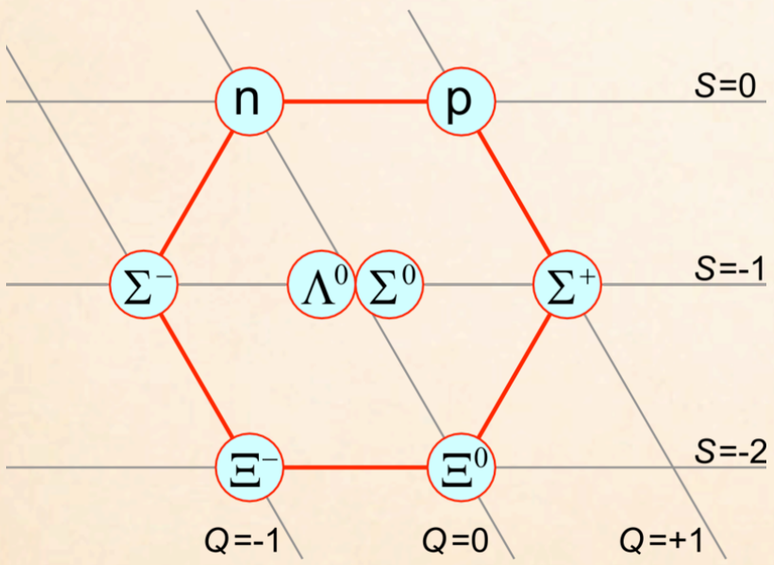
http://CPEPweb.org

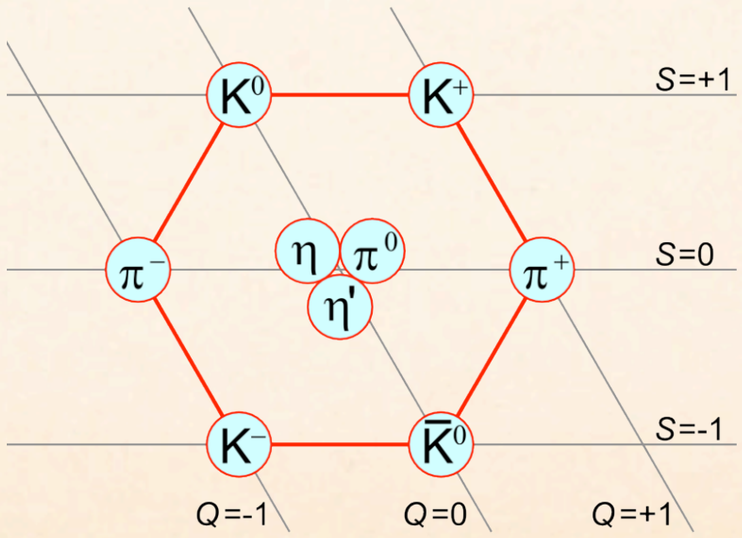
MODEL KWARKOWY

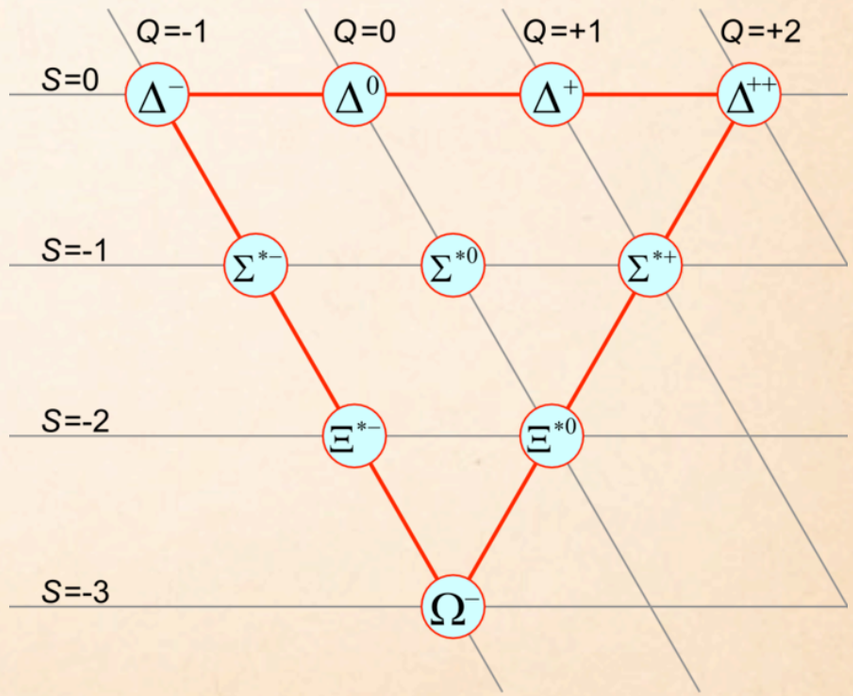




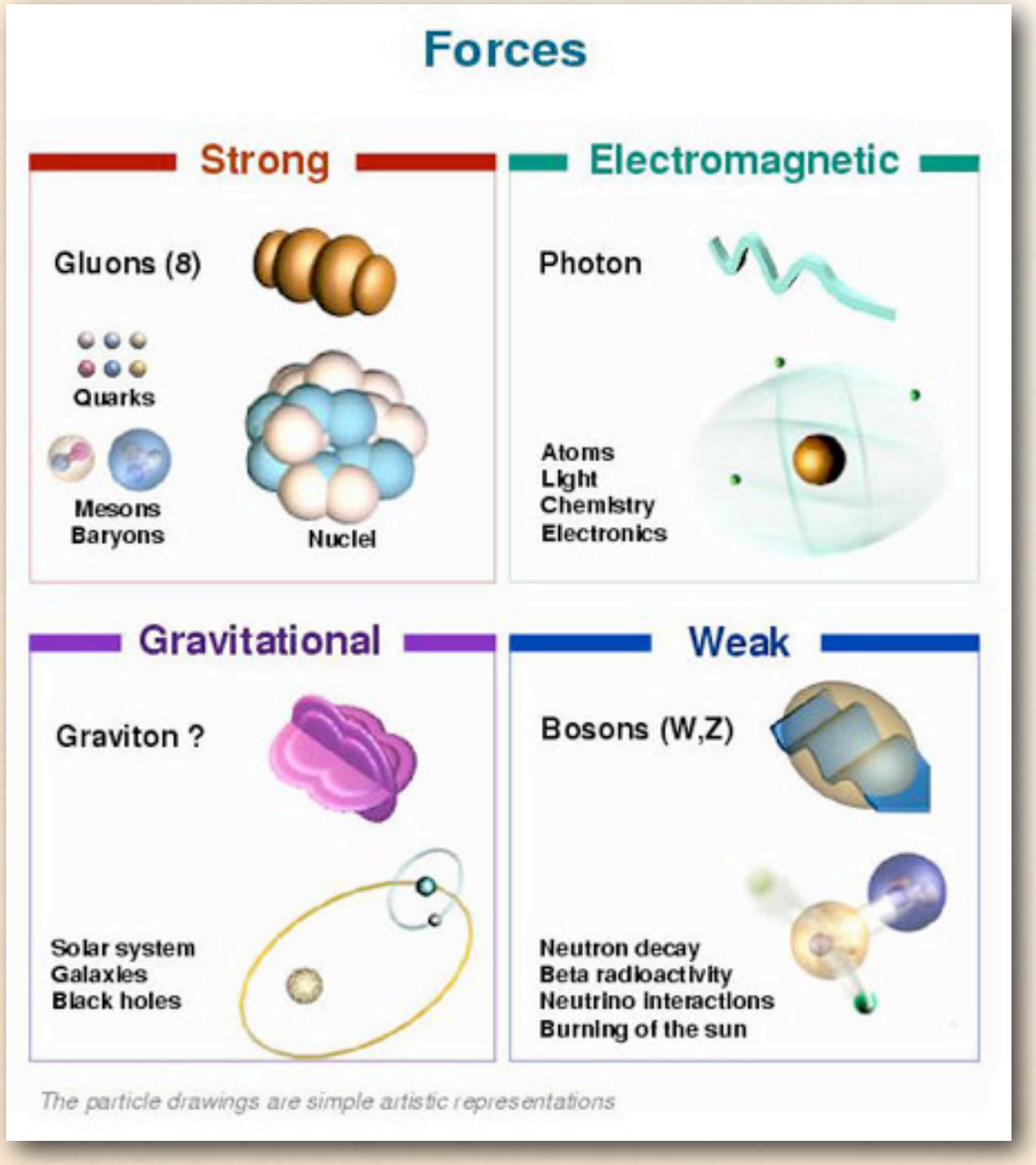






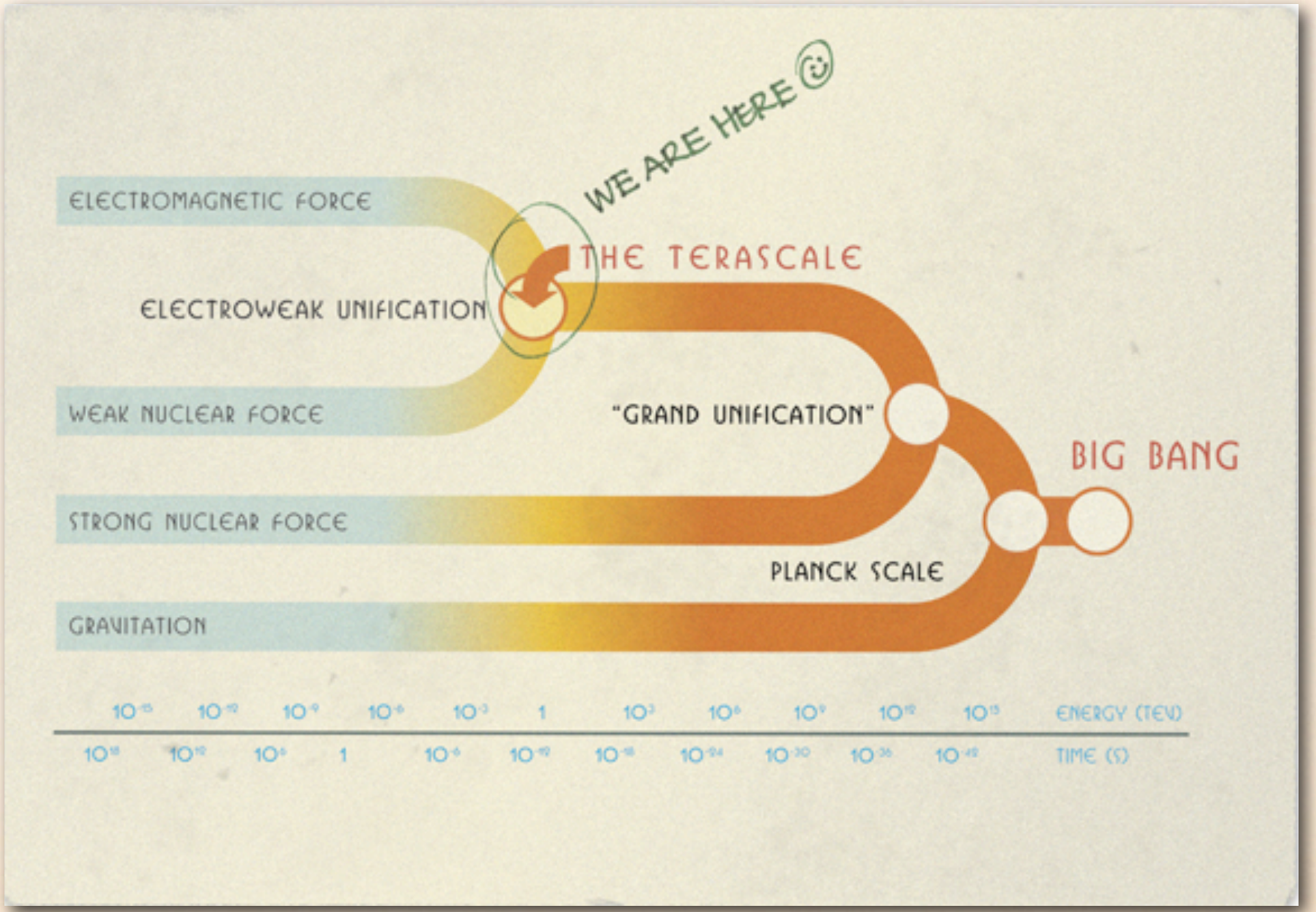


ODDZIAŁYWANIA



- Cztery rodzaje oddziaływań:
  - **<u>Silne</u>**
    Wiazania pomiędzy kwarkami,
    Zasięg: 10^{-15}m,
    Najsilniejsze z oddziaływań.
  - **<u>Elektromagnetyczne</u>**
    Wiążą jądro z elektronami, odpowiedzialne za wiązania między atomami i cząstkami,
    Zasięg: nieskończony,
    Siła: 1/137 siły oddz. silnych.
  - **<u>Słabe</u>**
    Odpowiedzialne m.in. za rozpad beta,
    Związane z radioaktywnością,
    Zasięg: 10^{-18}m,
    Siłą: 10^{-13} siły oddz. silnych.
  - **<u>Grawitacyjne</u>**
    Formowanie materii w skali kosmicznej,
    Zasięg: nieskończony,
    Siła: 10-40 siły oddz. silnych (najsłabsze z oddz.).

ODDZIAŁYWANIA



MASA I ENERGIA

- W eksperymentach wysokich energii cząstki poruszają się zwykle z prędkościami bliskimi c.
  - elektrony w LEP v = 0.999 999 999 995 × c (E = 100 GeV).
  - protony w LHC v = 0.999 999 995 × c (E = 8 TeV).
- Prędkość przestaje być wygodnym parametrem do opisu procesów.
- Znacznie wygodniejsze staje się użycie energii i pędu:
  - Energia spoczynkowa cząstki $E_o = mc^2$
  - Energia całkowita $E^2 = E_o^2 + (pc)^2$
  - Energia kinetyczne $E_k = E - E_o$
  - masa jest równoważna energii ⇒ dzięki tej zasadzie “łatwo” produkować nowe cząstki i badać ich własności.

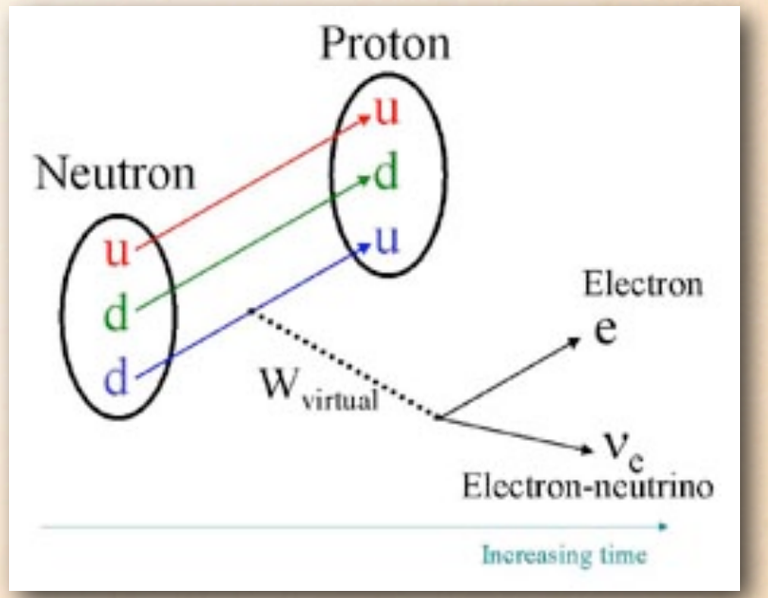
MASY CZĄSTEK ELEMENTARNYCH

$E=mc^2 \Rightarrow$ jednostka masy = eV/c^2 (zwykle pomijamy c^2)

- Neutrino: kilka eV - ~30 MeV,
- Elektron: 511 keV,
- Pion: 140 MeV,
- Proton, neutron: ~1 GeV,
- Kwarki: 3 MeV - 172 GeV,
- Odpowiedzialny za masy cząstek : bozon Higgsa (osobny wykład).

CZAS ŻYCIA CZĄSTKI

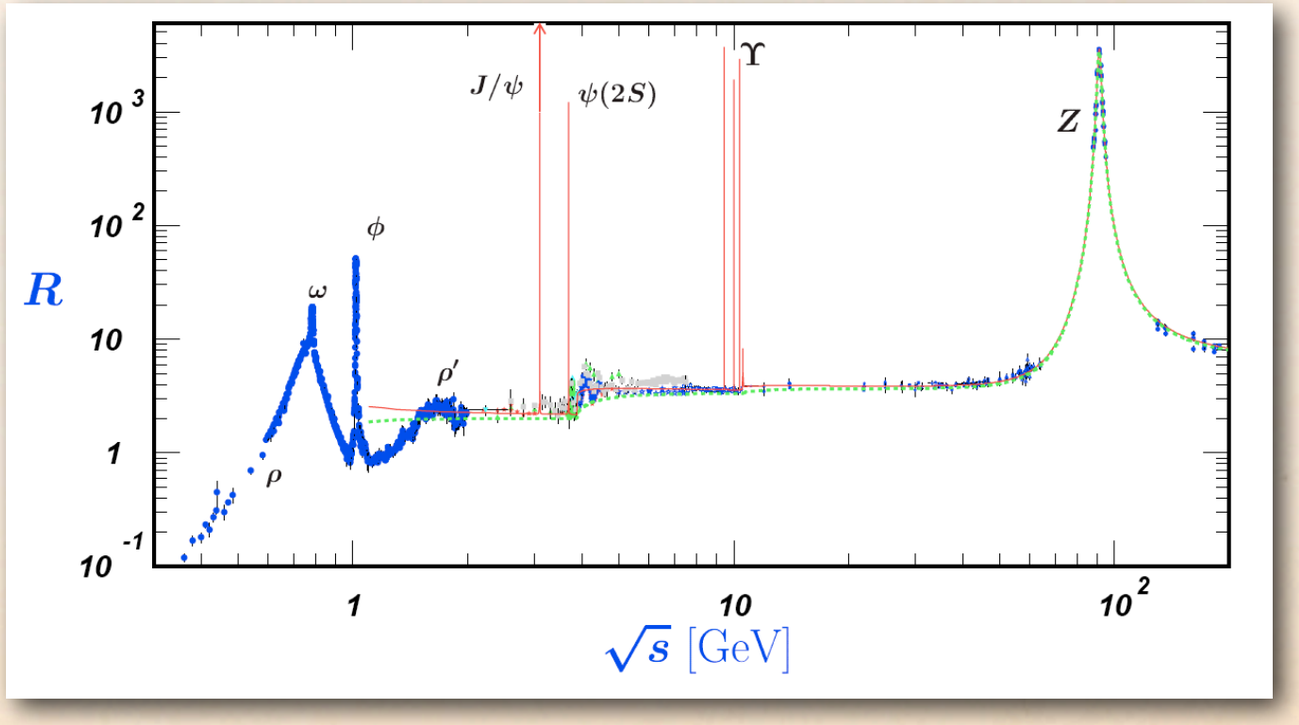
- Czas połowicznego zaniku: czas, po którym połowa cząstek danego typu przestaje istnieć.
- Średni czas życia cząstki: czas, po którym średnio pozostaje 1/e początkowej liczby cząstek.
- Czasy życia cząstek elementarnych:
  elektron > 4.6×10^{26} lat,
  proton > 4.6×10^{30} lat,
  cząstki rozpadające się szybko (bozon Z, kwark t,...) ~10^{-24} s,
  cząstki rozpadające się powoli (mion, pion...) ~10^{-6} - 10^{-8} s.
- Rozpad cząstki to przejście do innego stanu (nie jest to rozpad na składniki cząstki złożonej, ale raczej na przeorganizowanie składu).
  - rozpad neutronu (rozpad β):
    neutron (ddu) → proton (uud) + elektron + neutrino.



PRODUKCJA CZĄSTEK ELEMENTARNYCH

- Cząstki “produkujemy” zderzając inne cząstki ze soba, bądź z “tarczą”.
  - w takim zderzeniu może nastąpić produkcja 1, 2, 3, ..., N cząstek.
  - produkcja zawsze następuje z zasadą zachowania energii i pędu.
- Energia zderzenia może zamienić się na energię spoczynkową (masę) jednej nowej cząstki ⇒ produkcja rezonansowa.

szerokość linii rezonansowej Γ~ 1/τ



ZASADA ZACHOWANIA ENERGII

- W każdej reakcji (zderzeniu, rozpadzie)
  Energia końcowa = energia początkowa.
- Każda cząstka o masie m ma związana z nią energię $E = mc^2$
  zatem możliwy jest rozpad tylko na cząstki o mniejszej masie.
- Zasada zachowania energii jest ściśle przestrzegana przez Naturę.
  Bilans masy dla rozpadu neutronu:
  (939.5 - [938.3 + 0.511 + "0"] = 0.80) MeV/c^2 (energia kinetyczna produktów rozpadu).

CZĄSTKI I ANTYCZĄSTKI: ZASADY ZACHOWANIA

- Cząstki i antycząstki mają taką samą masę i spin; pozostałe cechy (liczby) kwantowe (addytywne) mają tę samą wartość z przeciwnym znakiem.
- Dotychczasowe obserwacje produkcji i rozpadów cząstek pozwalają sklasyfikować zachowanie liczb kwantowych w poszczególnych oddziaływaniach:

silne	elektromagnetyczne	słabe
Zachowują: - energię i pęd - ładunek elektryczny - parzystość CP - izospin - liczbę barionową, leptonową - dziwność - ...	**Zachowują:** - energię i pęd - ładunek elektryczny - liczbę barionową, leptonową - dziwność **Nie zachowują:** - izospin całkowity	**Zachowują:** - energię i pęd - ładunek elektryczny - liczbę barionową, leptonową **Nie zachowują:** - liczby zapachu (dziwność) - izospin I, I_3 - parzystość P

PODSUMOWANIE

- W czasie 45-minutowego wykładu nie da się, nawet najbardziej ogólnie, przedstawić całej wiedzy w zakresie fizyki cząstek elementarnych.

- Zapraszam do dyskusji w czasie sesji Q/A.