

От какво е изграден светът?

Древните гърци

- ★ “Fundamental Elements” : air, earth, water, fire
- ★ 400 B.C : Democritus : concept of matter comprised of indivisible “atoms”.

Исак Нютон

- ★ 1704 : matter comprised of “primitive particles ... incomparably harder than any porous Bodies compounded of them, even so very hard, as never to wear out or break in pieces.”
- ★ A good definition - e.g. kinetic theory of gases.

Какво мисли химията:

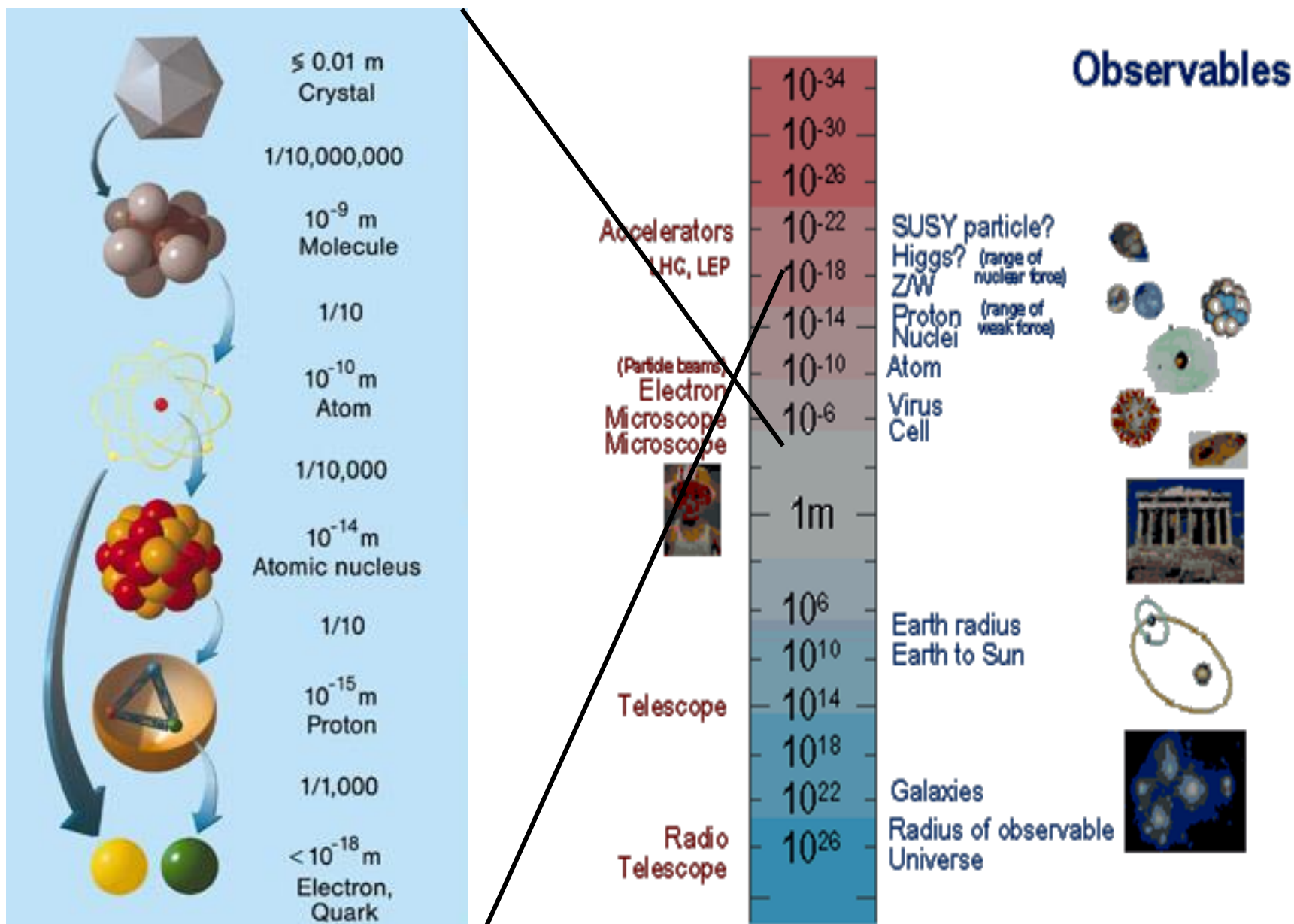
- ★ Fundamental particles : “elements”
- ★ Patterns 1869 Mendeleev’s Periodic Table → sub-structure
- ★ Explained by atomic shell model

Какво мисли атомната физика:

- ★ Bohr Model
- ★ Fundamental particles: electrons orbiting the atomic nucleus

Какво мисли физиката на елементарните частици:

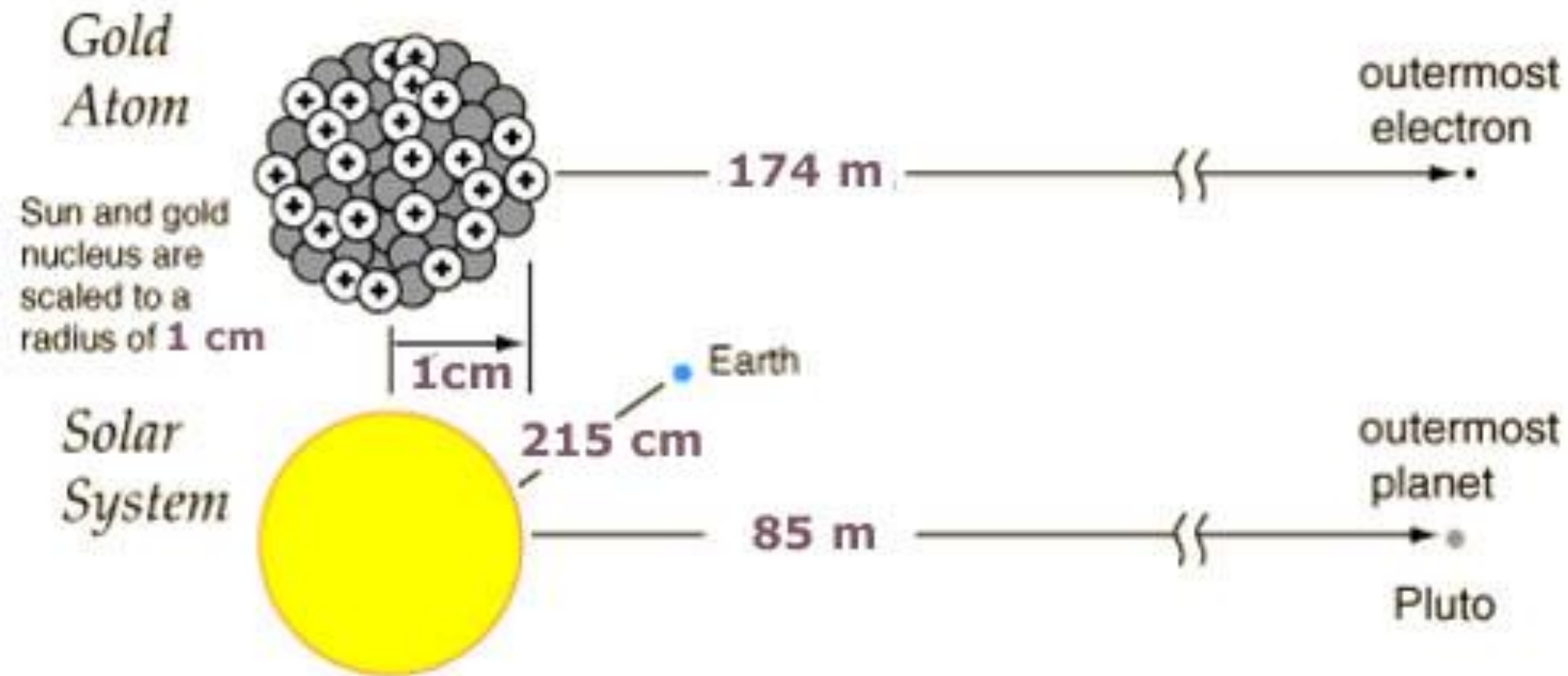
- ★ Fundamental particles: six quarks, six leptons and twelve interaction careers



Скала на разстоянията

Основни термини, величини и размерности в субатомната физика

Скала на размерите в микросвета



Ако приемем че дължината на футболен стадион (~100 м) е равна на диаметъра на атома, то диаметърът на ядрото е колкото костилка от череша (~6 мм)

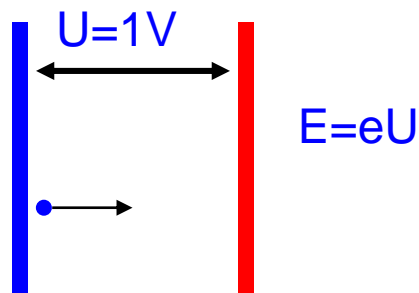
Единици

SI prefixes

| 1000^m | 10^n | Prefix | Symbol | Since ^[1] | Short scale | Long scale | Decimal |
|---------------|------------|--------|--------|----------------------|---------------|---------------|---|
| 1000^8 | 10^{24} | yotta- | Y | 1991 | Septillion | Quadrillion | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^7 | 10^{21} | zetta- | Z | 1991 | Sextillion | Trilliard | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^6 | 10^{18} | exa- | E | 1975 | Quintillion | Trillion | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^5 | 10^{15} | peta- | P | 1975 | Quadrillion | Billiard | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^4 | 10^{12} | tera- | T | 1960 | Trillion | Billion | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^3 | 10^9 | giga- | G | 1960 | Billion | Milliard | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^2 | 10^6 | mega- | M | 1960 | Million | | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^1 | 10^3 | kilo- | k | 1795 | Thousand | | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| $1000^{2/3}$ | 10^2 | hecto- | h | 1795 | Hundred | | 100 000 000 000 000 000 000 000 |
| $1000^{1/3}$ | 10^1 | deca- | da | 1795 | Ten | | 10 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^0 | 10^0 | (none) | (none) | NA | One | | 1 000 000 000 000 000 000 000 |
| $1000^{-1/3}$ | 10^{-1} | deci- | d | 1795 | Tenth | | 0.1 000 000 000 000 000 000 000 |
| $1000^{-2/3}$ | 10^{-2} | centi- | c | 1795 | Hundredth | | 0.01 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-1} | 10^{-3} | milli- | m | 1795 | Thousandth | | 0.001 000 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-2} | 10^{-6} | micro- | μ | 1960 ^[2] | Millionth | | 0.000 001 000 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-3} | 10^{-9} | nano- | n | 1960 | Billionth | Milliardth | 0.000 000 001 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-4} | 10^{-12} | pico- | p | 1960 | Trillionth | Billionth | 0.000 000 000 001 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-5} | 10^{-15} | femto- | f | 1964 | Quadrillionth | Billiardth | 0.000 000 000 000 001 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-6} | 10^{-18} | atto- | a | 1964 | Quintillionth | Trillionth | 0.000 000 000 000 000 001 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-7} | 10^{-21} | zepto- | z | 1991 | Sextillionth | Trilliardth | 0.000 000 000 000 000 000 001 000 000 000 000 000 |
| 1000^{-8} | 10^{-24} | yocto- | y | 1991 | Septillionth | Quadrillionth | 0.000 000 000 000 000 000 000 001 000 000 000 000 000 |

• Енергия; $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Типичните γ и β разпадания са $\sim 1 \text{ MeV}$



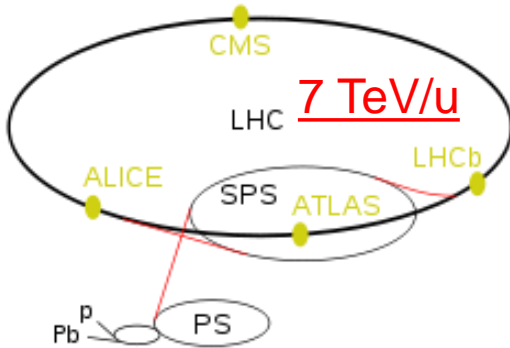
100 W ел. крушка, за 1 час ще излъчи:

$$E = P \cdot t = 100 \text{ W} (60 \times 60) \text{ s} = 360000 \text{ J} \\ = (3.6 \times 10^5 \text{ J}) / (1.602 \times 10^{-19} \text{ J / eV}) = 2.25 \times 10^{24} \text{ eV} \\ = 2.25 \text{ YeV}$$

Единици

Large Hadron Collider

протони до 7 TeV



$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol / g}$$

$$\# (\text{C}) = \frac{1 \text{ g}}{12} 6.022 \times 10^{23} \text{ mol / g} = 5 \times 10^{22}$$

$$\# (\text{p}) + \# (\text{n}) = (6 + 6) \times \# (\text{C}) = 5 \times 10^{23} \text{ u}$$

$$E / \text{нук} = 1.6 \times 10^{-9} \text{ eV / u}$$

Мравка тежаща 1 g се движи със скорост 5 cm/s

$$E = \frac{m v^2}{2} = \frac{(10^{-3} \text{ kg}) (5 \times 10^{-2} \text{ m / s})^2}{2} = 1.25 \times 10^{-6} \text{ J}$$

$$= \frac{1.25 \times 10^{-6} \text{ J}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J / eV}} = 0.78 \times 10^{13} \text{ eV} = 7.8 \text{ TeV}$$

Колко нуклеона има в една мравка (от C)?

• 45 GeV – средна енергия на продуктите на разпад на Z^0 -бозона

• 210 MeV – средната енергия отделяна при деленето едно ядро ^{239}Pu

• 200 MeV – средната енергия отделяна при деленето едно ядро ^{235}U

• 13.6 eV – йонизационната енергия на водородния атом

• 25 meV – средна енергия на топлинното движение при стайна температура

| | | |
|----------------|-----------------------------------|----------------------|
| $E=mc^2$ | $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ | speed of light |
| $E=kT$ | $k=10^{-4} \text{ eV K}^{-1}$ | Boltzmann's constant |
| $E=hc/\lambda$ | $h=4 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$ | Planck's constant |

| | |
|------------------|----------------------|
| Mass of electron | 0.5 million eV (MeV) |
| Mass of proton | 1 Giga eV (GeV) |

1 eV \sim 10,000 K 1 GeV \sim 1 femtometre (fm) = 10^{-15} m

General Relativity depends on c and G (Newton's constant), QM depends on \hbar . Natural unit of length is given by is called Planck length $\sim 10^{-35} \text{ m}$

$$\sqrt{\hbar G / c^3}$$

Фундаментални частици и взаимодействия

Физиката на елементарните частици изучава:

- ▶ фундаменталните съставлящи (constituents), които изграждат веществото (matter);
- ▶ фундаменталните взаимодействия (силите), които действат между тях

Нашето знание за тях е обединено в концепция (теория, модел), наречена

СТАНДАРТЕН МОДЕЛ НА ЧАСТИЦИТЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯТА

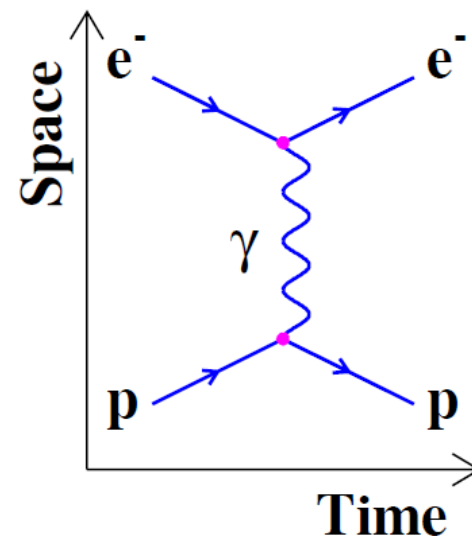
Той обяснява всички известни до сега експериментални факти.

Стандартен модел

- веществото е изградено от **ФЕРМИОНИ** (частици със спин $\frac{1}{2}$), които са два типа:
- **ЛЕПТОНИ**: напр. e^- , ν_e ;
- **КВАРКИ**: напр. горен (**u**) кварк и долен (**d**) кварк [протон: (**uud**)];
- всеки фундаментален фермион има своя анти-частица: напр. e^+ , анти-протон ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$).

Силите между кварките и лептоните
се дължат на обмен на
частици със спин 1 – т.нар калибровъчни бозони

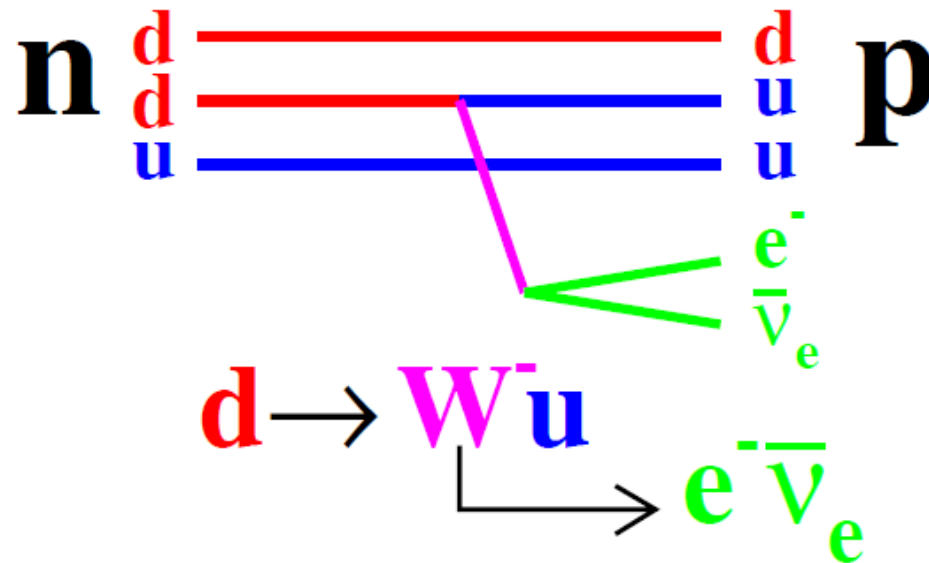
| | | Mass | Force |
|---------|-----------|----------|-----------------|
| Photon | γ | 0 | Electromagnetic |
| W-boson | W^{\pm} | 80.3 GeV | Weak (CC) |
| Z-boson | Z^0 | 91.2 GeV | Weak (NC) |
| Gluon | g | 0 | Strong (QCD) |



Пример: слабо взаимодействие (β -разпадане на неутрона)

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

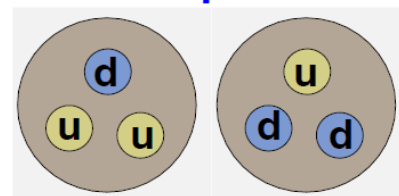


Веществото около нас
(и ние самите) **е съставено само от**
четири взаимодействащи си
фундаментални фермионни полета
(1-во поколение)

| particle | symbol | type | charge |
|------------|---------|--------|--------|
| Electron | e^- | lepton | -1 |
| Neutrino | ν_e | lepton | 0 |
| Up Quark | u | quark | +2/3 |
| Down Quark | d | quark | -1/3 |

★ Proton = (uud)

★ Neutron = (udd)



Съществуват **три поколения** фундаментални фермиони







| First Generation | | Second Generation | | Third Generation | |
|-------------------|---------|-------------------|-----------|------------------|------------|
| Electron | e^- | Muon | μ^- | Tau | τ^- |
| Electron Neutrino | ν_e | Muon Neutrino | ν_μ | Tau Neutrino | ν_τ |
| Up Quark | u | Charm Quark | c | Top Quark | t |
| Down Quark | d | Strange Quark | s | Bottom Quark | b |


- ❖ всяко поколение е точно копие на другото;
- ❖ разликата е само в масите на частиците – в първото поколение те са най-леки, в последното – най-тежки;

Наблюдава се очевидна *симетрия*.

Защо имаме **три поколения**?

Фундаментални частици (полета)

| Leptons | | | |
|-------------------|---|-----------------------|--|
| Tau |  | Electric Charge -1 | |
| Muon |  | -1 | |
| Electron |  | -1 | |
| | | | |
| Tau Neutrino |  | Electric Charge 0 | |
| Muon Neutrino |  | 0 | |
| Electron Neutrino |  | 0 | |

| Quarks | | | |
|--|---|---------------------------|--|
| Bottom |  | Electric Charge $-1/3$ | |
| Strange |  | $-1/3$ | |
| Down |  | $-1/3$ | |
| | | | |
| Top |  | Electric Charge $2/3$ | |
| Charm |  | $2/3$ | |
| Up |  | $2/3$ | |
| each quark:  R,  B,  G 3 colors | | | |

The particle drawings are simple artistic representations

ЛЕПТОНИ

- ❖ спин $\frac{1}{2}$
- ❖ 6 различни типа (“аромати, flavours”)
- ❖ 3 заредени;
- ❖ 3 неутрални;
- ❖ + съответните анти-лептони;
- ❖ не изпитват **СИЛНО** взаимодействие

| Gen. | flavour | | q | Approx. Mass |
|----------|-------------------|------------|-----|--------------------------|
| 1^{st} | Electron | e^{-} | -1 | $0.511 \text{ MeV}/c^2$ |
| 1^{st} | Electron neutrino | ν_e | 0 | massless ? |
| 2^{nd} | Muon | μ^{-} | -1 | $105.7 \text{ MeV}/c^2$ |
| 2^{nd} | Muon neutrino | ν_μ | 0 | massless ? |
| 3^{rd} | Tau | τ^{-} | -1 | $1777.0 \text{ MeV}/c^2$ |
| 3^{rd} | Tau neutrino | ν_τ | 0 | massless ? |

КВАРКИ

- ❖ спин $\frac{1}{2}$
- ❖ 6 различни типа (“аромати, flavours”)
- ❖ дробен заряд
- ❖ + съответните анти-кварки;
- ❖ участват във **ВСИЧКИ** взаимодействия

| Generation | flavour | | charge | Approx. Mass |
|------------|---------|----------|--------|-------------------------|
| 1^{st} | down | d | -1/3 | 0.35 GeV/c ² |
| 1^{st} | up | u | +2/3 | 0.35 GeV/c ² |
| 2^{nd} | strange | s | -1/3 | 0.5 GeV/c ² |
| 2^{nd} | charm | c | +2/3 | 1.5 GeV/c ² |
| 3^{rd} | bottom | b | -1/3 | 4.5 GeV/c ² |
| 3^{rd} | top | t | +2/3 | 175 GeV/c ² |

Всеки кварк от определен тип може да има

3 различни цвята: **RED**, **GREEN**, **BLUE** (\equiv “силен, цветен” заряд)

Основни характеристики на квантовите микробекти

❖ маса \equiv енергия на покой $= mc^2$;

единици: eV, keV, MeV, GeV

❖ спин (вътрешен момент на импулса);

единици: (полу) цяло число \hbar [MeV.s]

❖ време на живот;

единици: s, y (години)

❖ вътрешни адитивни квантови числа (заряди).

единици: безразмерни (с изкл. на ел. заряд)

Напомняне от квантовата механика

На всяка физична величина се съпоставя линеен ермитов оператор. Стойностите, които физичните величини могат имат, са собствените стойности на съответните им оператори. Между тези операторите съществуват същите съотношения и тъждества, както между физическите величини в класическата механика.

$$\hat{A}\psi(r,t) = a\psi(r,t); \quad a - \text{квантово число}$$

$$\hat{A} = r, p, L, S, H, Q, B, Z, \dots$$

Кваркови заряди

(вътрешни адитивни квантови числа)

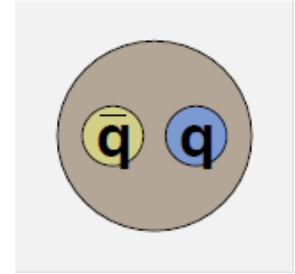
| Property \ Quark | d | u | s | c | b | t |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Q – electric charge | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{2}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{2}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $+\frac{2}{3}$ |
| I – isospin | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| I_z – isospin z -component | $-\frac{1}{2}$ | $+\frac{1}{2}$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S – strangeness | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| C – charm | 0 | 0 | 0 | +1 | 0 | 0 |
| B – bottomness | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 |
| T – topness | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +1 |

$$Q = I_z + \frac{B + S + C + B + T}{2}$$

АДРОНИ

- кварки в свободно състояние не се наблюдават;
- ние наблюдаваме само свързани безцветни (“бели”) състояния, наречени **адрони**;
- адроните са свързани състояния на кварк и анти-кварк \rightarrow **мезони** или на три кварка \rightarrow **бариони**.

Мезони = $q\bar{q}$



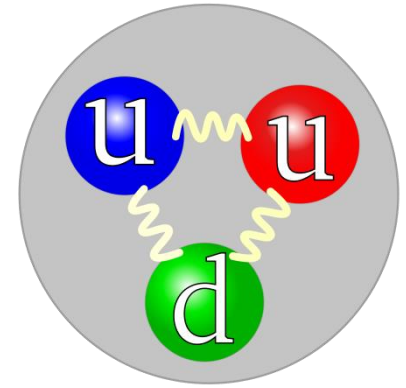
- ❖ свързани състояния на кварк и анти-кварк;
- ❖ имат цял спин 0, 1, 2, ...
- ❖ пример π^+ ($u\bar{d}$)

$$Q_{\pi^+} = Q_u + Q_{\bar{d}} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$$

$\pi^+(140 \text{ MeV})$ е основно състояние ($J=0$) на $u\bar{d}$.

Пример за възбудено състояние ($J=1$) е ρ^+ (770 MeV).

Бариони = qqq



- ❖ свързани състояния на три кварка
- ❖ или три анти-кварка;
- ❖ имат полу-цял спин $1/2$, $3/2$,...
- ❖ примери

протон: p (uud);

неутрон n (udd);

анти-протон \bar{p} ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$);

ламбда Λ (uds)

делта-резонанси Δ^{++} (uuu) Δ^{+} (uud) Δ^{0} (udd) Δ^{-} (ddd)

Взаимодействия

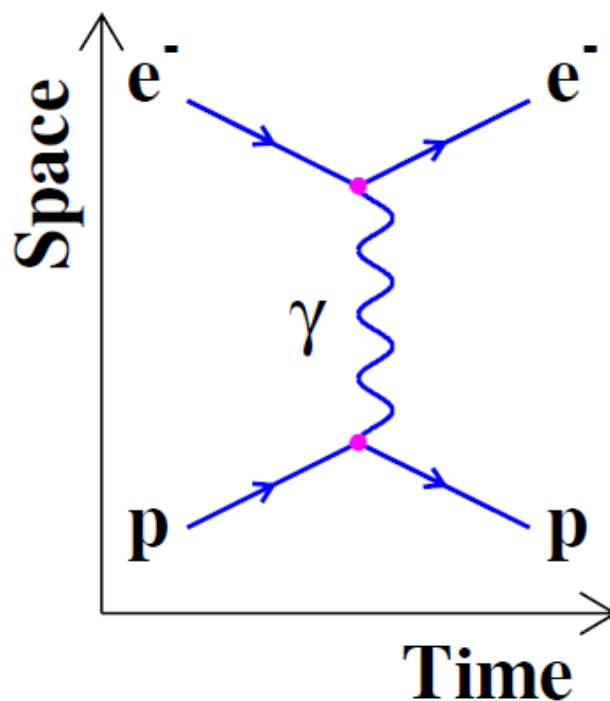
Класическа картина на електромагнитното взаимодействие при разсейване *напр. на електрони от протони:*

електроните се разсейват от електростатичен потенциал

$$V(r) \propto -\frac{1}{r}$$

NEWTON : “...that one body can act upon another at a distance, through a vacuum, without the mediation of anything else,..., is to me a great absurdity”

Съвременно разбиране: частиците
взаимодействат чрез обмен на други
частици, наречени преносители на
взаимодействието
(калибровъчни бозони)



Всички известни процеси (реакции, разпадания и т.н.)
могат да се обяснят с 4 фундаментални взаимодействия:

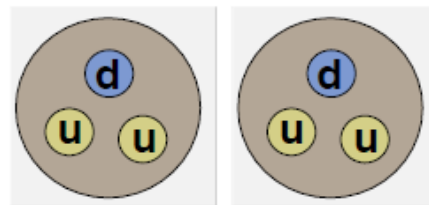
❖ силно

❖ електромагнитно

❖ слабо

❖ гравитационно

Относителна големина на силата
между два протона
в контакт един с друг (1 fm)



| | |
|-----------------|------------|
| Strong | 1 |
| Electromagnetic | 10^{-2} |
| Weak | 10^{-7} |
| Gravity | 10^{-39} |

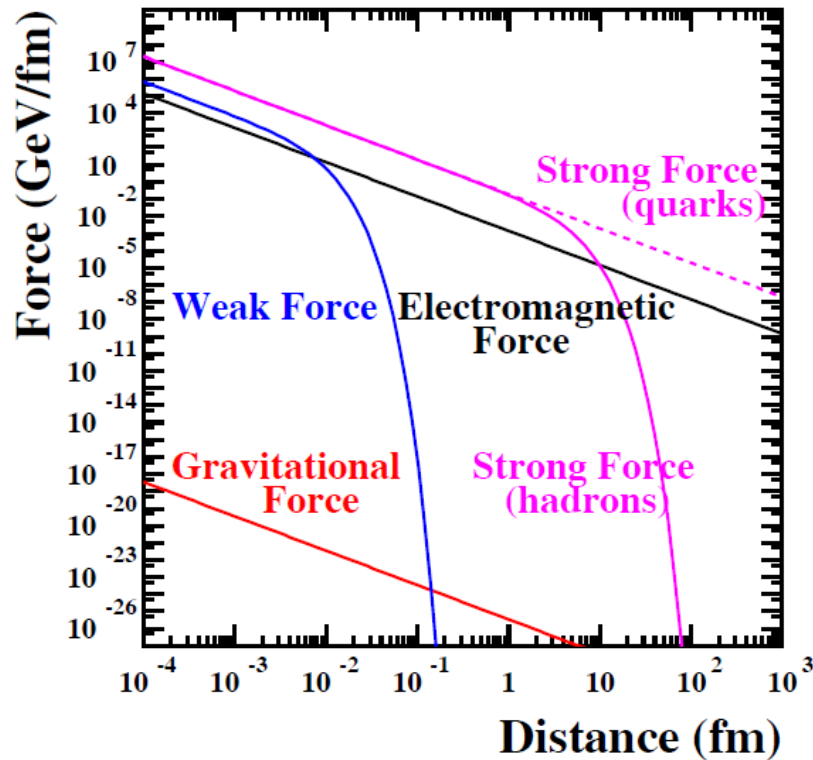
Константа на връзката (взаимодействието) *coupling constant*

❖ **електромагнитно:** $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) \approx 1/137$

❖ **силно:** $g^2/4\pi \approx 1$

❖ **слабо:** $G_F \approx 1.4 \times 10^{-62} \text{ J.m}^3 \approx 9 \times 10^{-5} \text{ MeV.fm}^3 \approx$
 $1.166 \times 10^{-5} (\hbar c)^3 \text{ GeV}^{-2}$

❖ **гравитационно:** $G_N \approx 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg.s}^2) \approx$
 $6.71 \times 10^{-39} (\hbar c) (\text{GeV}/c^2)^{-2}$

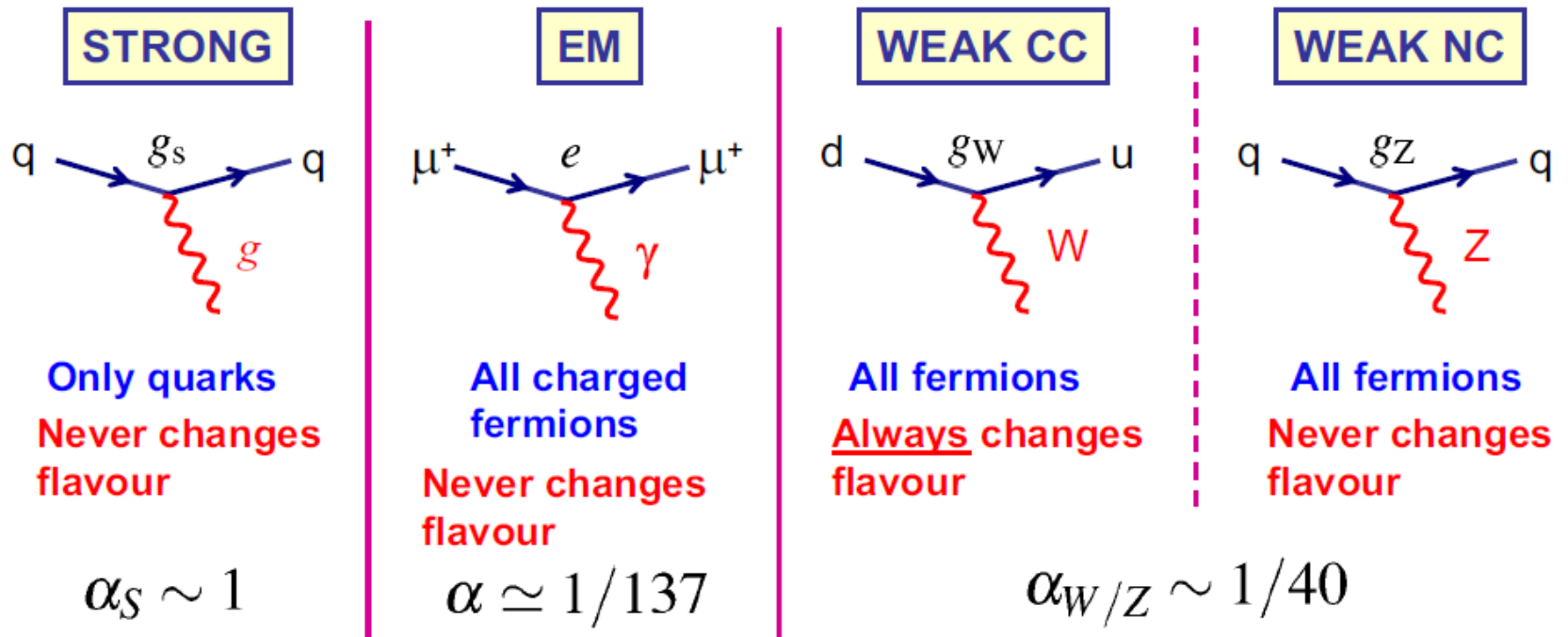


| | | Mass | Force | Range (m) |
|---------|-----------|----------|-----------------|-------------------|
| Photon | γ | 0 | Electromagnetic | ∞ |
| W-boson | W^{\pm} | 80.4 GeV | Weak (CC) | 10^{-17} |
| Z-boson | Z^0 | 91.2 GeV | Weak (NC) | $\infty/10^{-15}$ |
| Gluon | g | 0 | Strong (QCD) | $\infty/10^{-15}$ |

Типични стойности на измеряемите величини

| | сечения | времена на живот |
|--------------------|-----------------------|----------------------|
| ❖ силно: | 10 mb | 10^{-23} s |
| ❖ електромагнитно: | 10^{-2} mb | 10^{-20} s |
| ❖ слабо: | 10^{-13} mb | 10^{-8} s |

Файнманови диаграми



Резюме

Three Generations of Matter (Fermions)

| | I | II | III | |
|---------|--|--|--|---|
| mass→ | 2.4 MeV | 1.27 GeV | 171.2 GeV | 0 |
| charge→ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 |
| spin→ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| name→ | u up | c charm | t top | γ photon |
| Quarks | 4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down | 104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange | 4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom | 0 0 1 g gluon |
| | <2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino | <0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino | <15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino | 91.2 GeV 0 1 Z ⁰ weak force |
| | 0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron | 105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon | 1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau | 80.4 GeV ± 1 1 W [±] weak force |
| | Leptons | | | Bosons (Forces) |