

Časticová fyzika od A po Z

Juraj Tekel

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK
teoretická prednáška, #Masterclasses #Slovakia

4. 3. 2021

**Prečo je
časticová fyzika
dôležitá?**

Pravidlá pre základné stavebné kúsky určujú, ako sa bude správať celok.

Veľa sa o veciach vieme dozvedieť zo zákonov pre častice a interakcie medzi nimi.

**Fyzika malých vecí nám
vie toho veľa povedať o
veciach veľkých.**

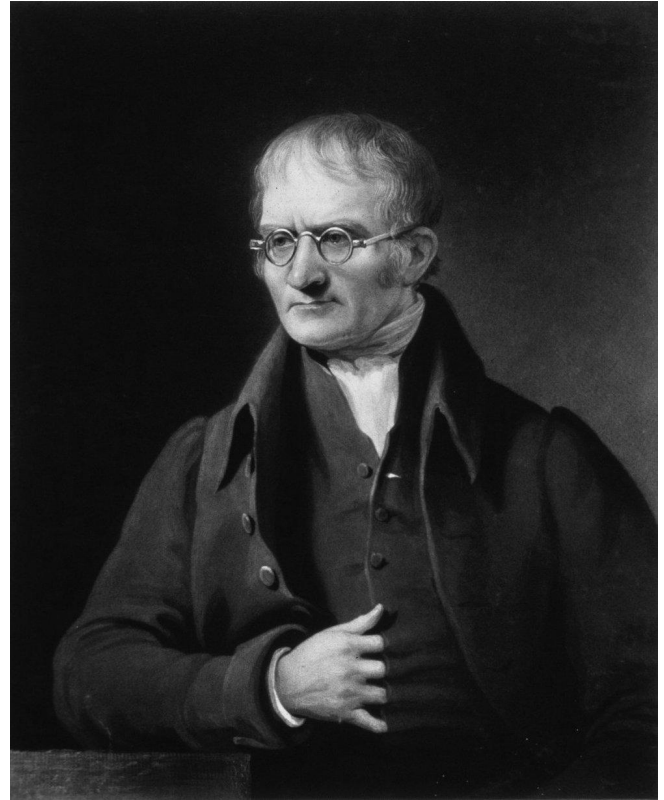


obr.: commons.wikimedia.org, Hennessy

**Z čoho sa
skladajú veci?**

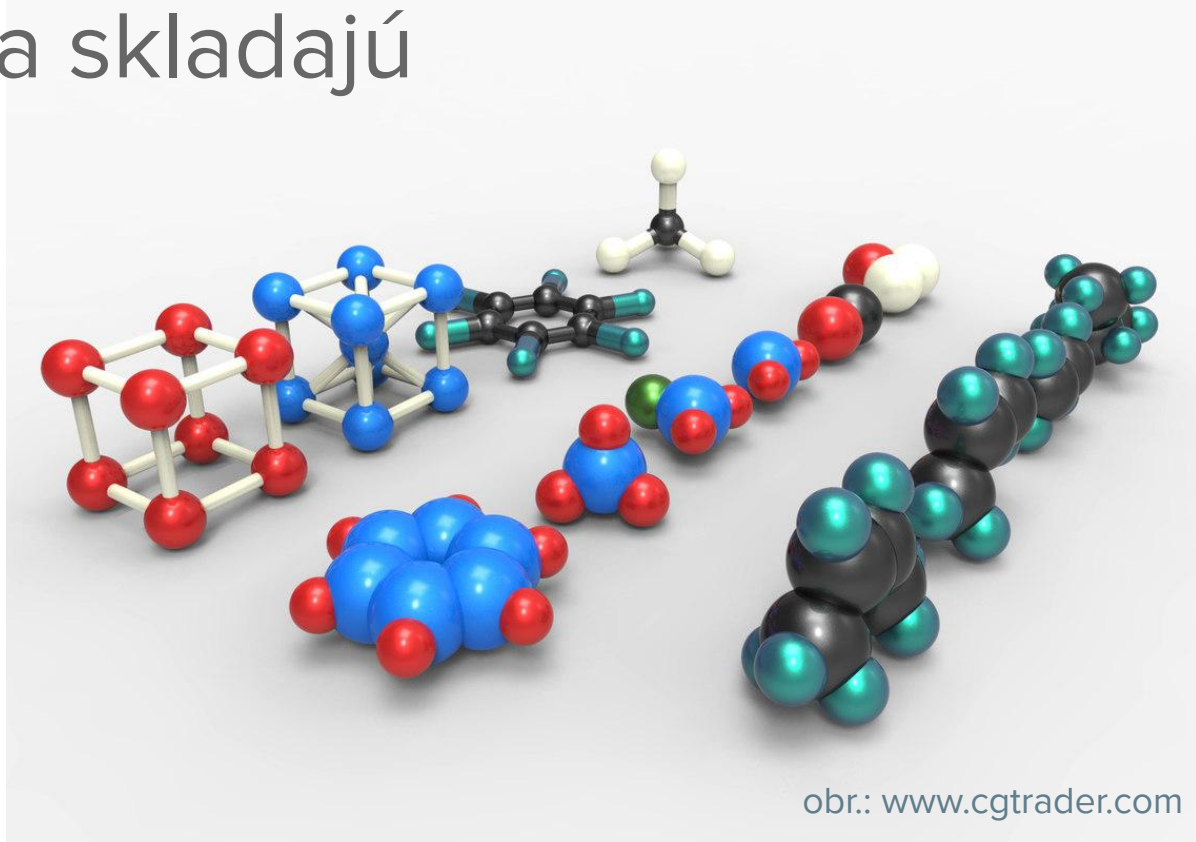
Veci sa skladajú z **molekúl**
a molekuly sa skladajú
z **atómov**.

Dalton (1805)



John Dalton
1766 – 1844

Veci sa skladajú z **molekúl**
a molekuly sa skladajú
z **atómov**.



Aj atóm má štruktúru.

Aj atóm má štruktúru.

Elektrón

Thompson (1897)



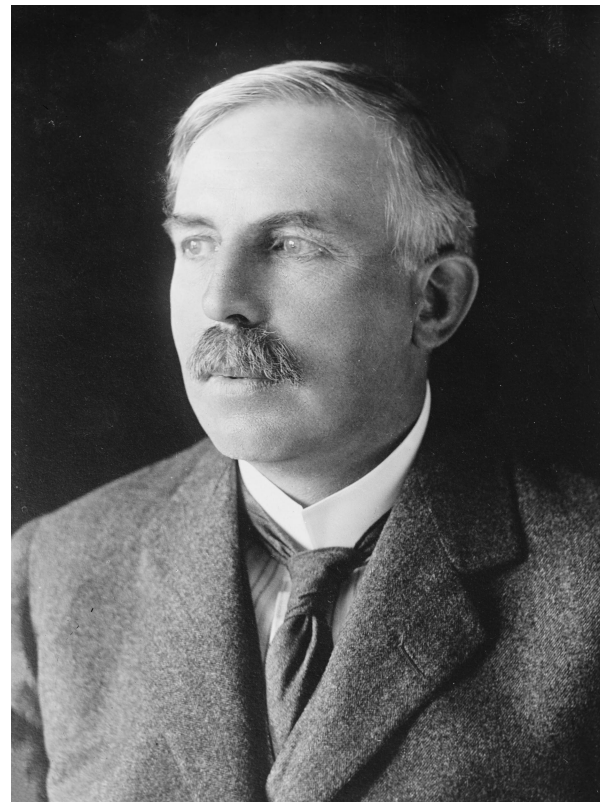
J. J. Thompson
1856 – 1940

Aj atóm má štruktúru.

Elektrón

Protón

Rutherford (1917)



Ernest Rutherford
1871 – 1937

Aj atóm má štruktúru.

Elektrón

Protón

Neutrón

Chadwick (1935)



James Chadwick
1891 – 1974

Atóm má veľkosť asi 10^{-10} m.

Jadro atómu asi 10^{-15} m.

Atóm má veľkosť asi 10^{-10} m.

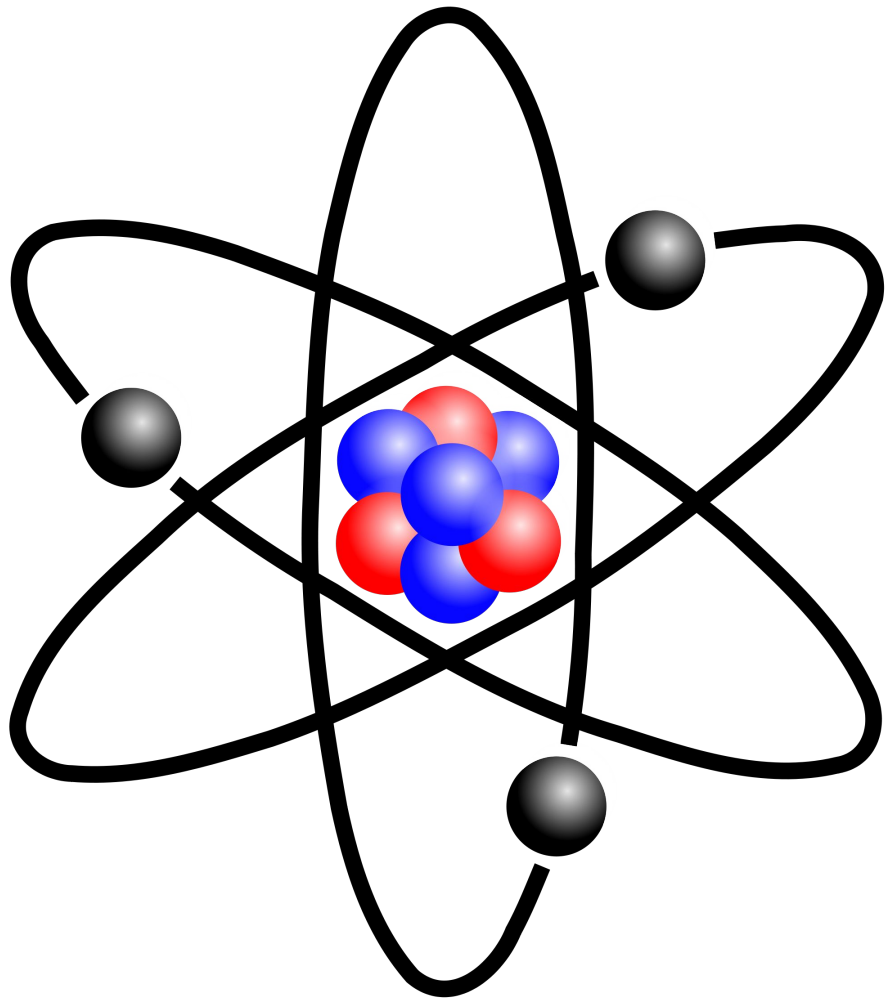
Jadro atómu asi 10^{-15} m.

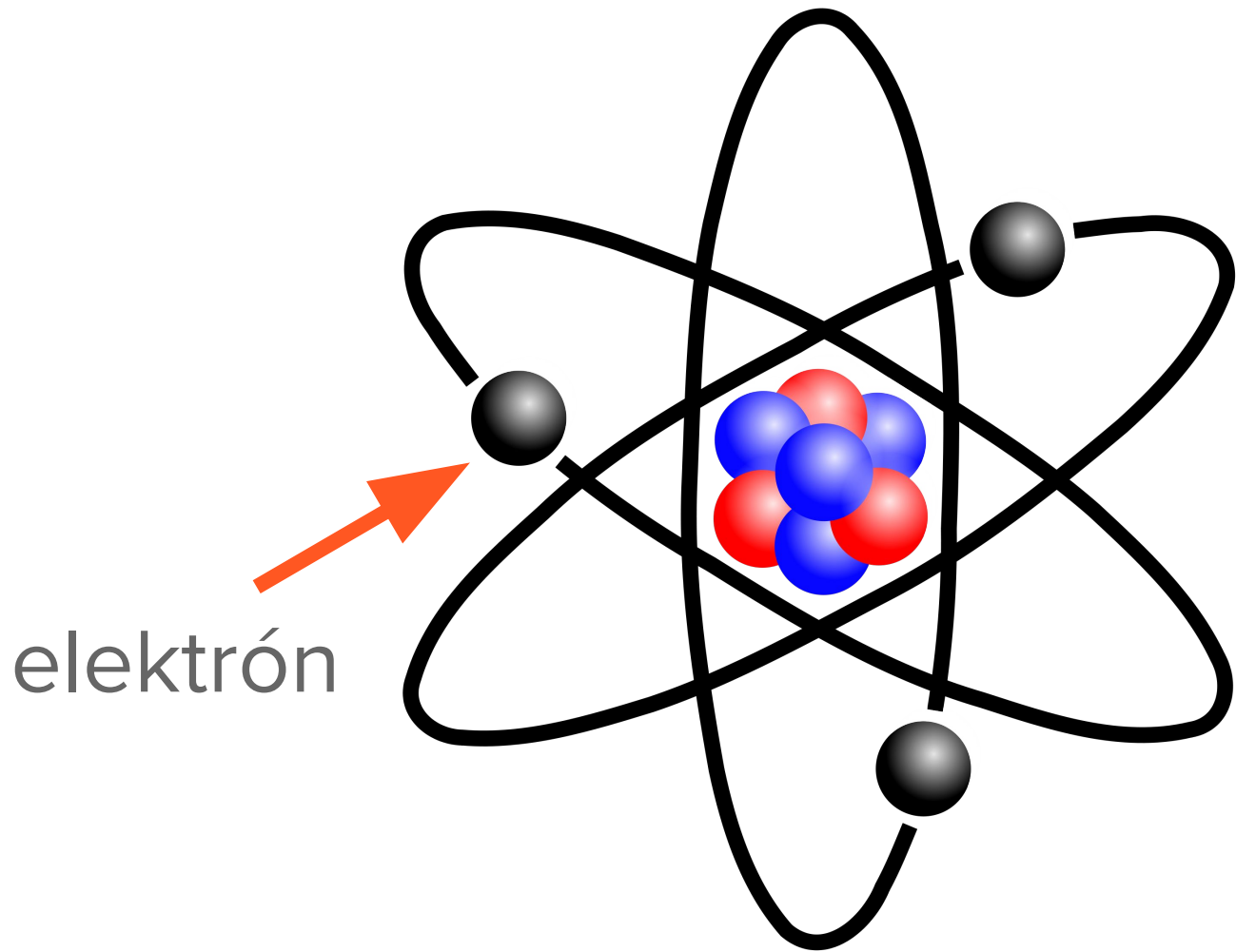
Ak by bolo jablko ako Zem, atóm by bol ako jablko.

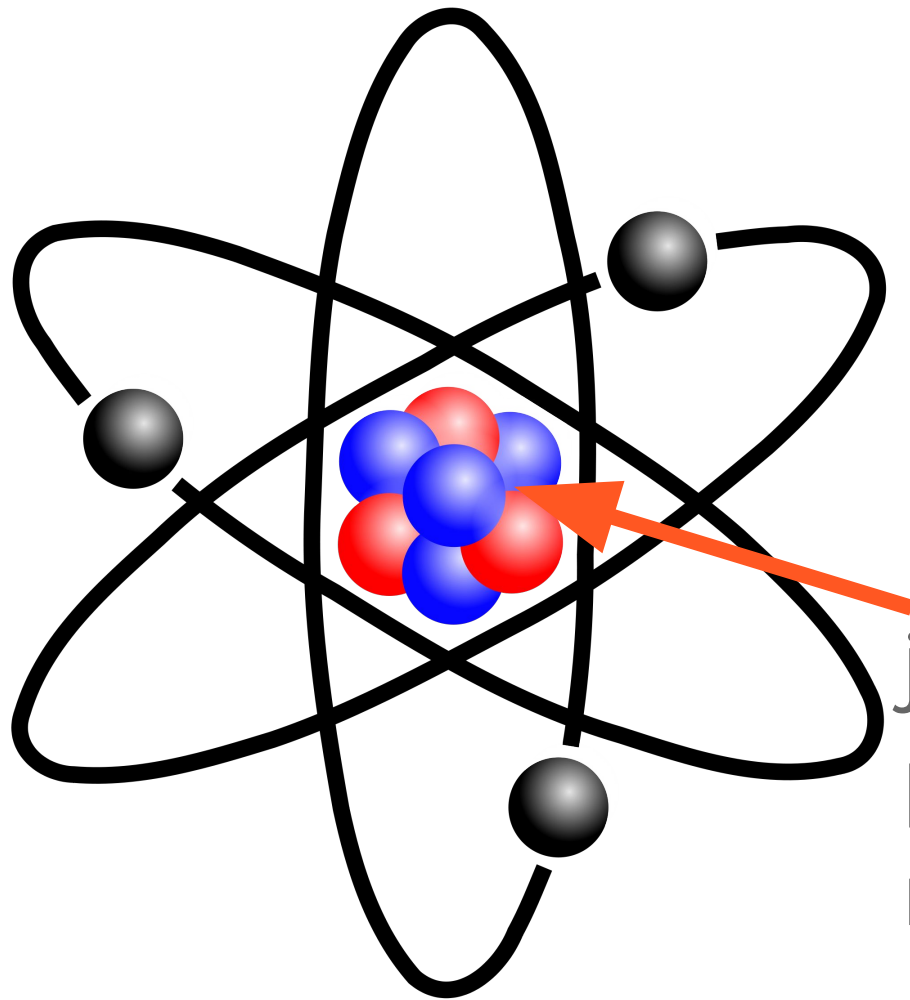
Atóm má veľkosť asi 10^{-10} m.

Jadro atómu asi 10^{-15} m.

Ak by bol atóm ako Zem, jadro by bolo ako budova.





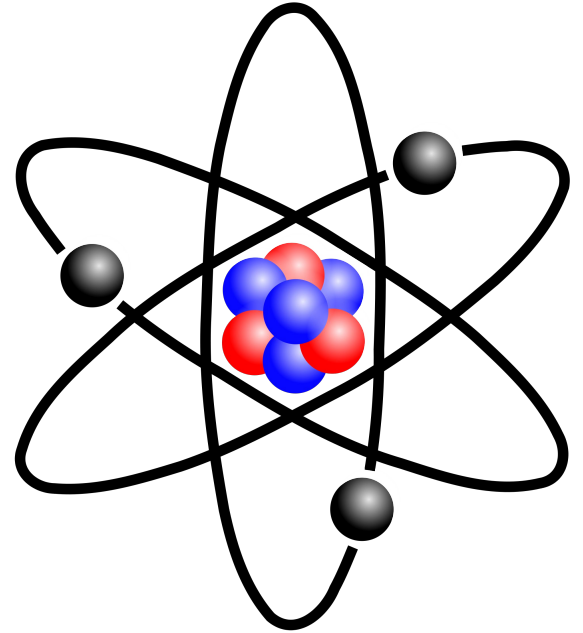


jadro z
protónov a
neutrónov

Jadro je oveľa menšie.

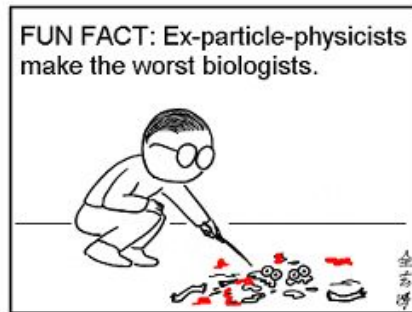
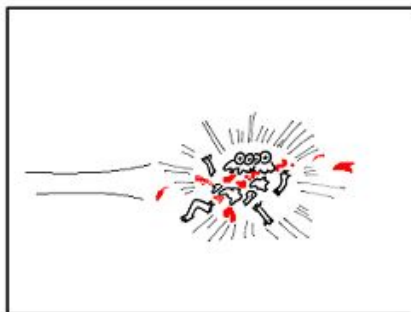
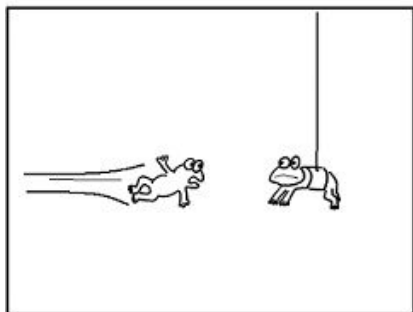
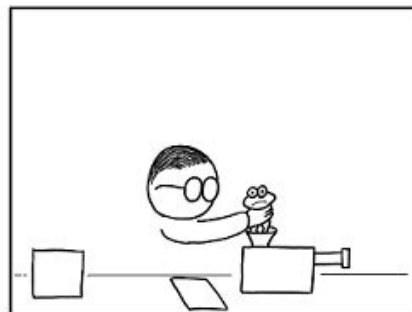
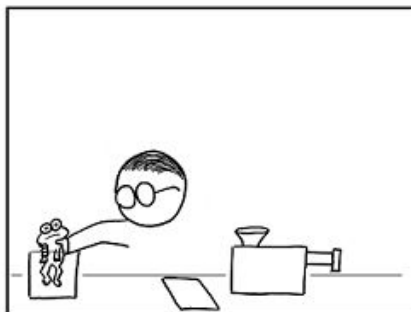
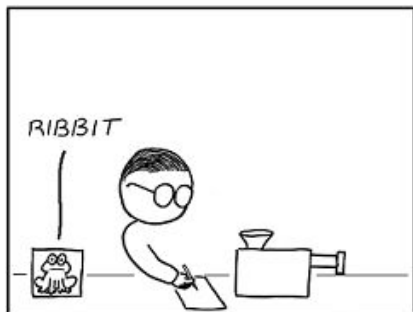
Elektróny sú bodové.

Celé to riadi
kvantová mechanika.



Elektrónmi, protónmi a neutrónmi
sa ale možnosti v mikrosvete
nekoničia.

**Zrážaním
ľahších častíc
vieme dostať
ťažšie častice**



Zrážaním častíc sa vieme čosi
dozvedieť o ich vnútornej
štruktúre.

Zrážaním častíc sa vieme čosi dozvedieť o ich **vnútornej štruktúre**.

Pri dostatočnej energii vieme **vytvoriť nové častice**, ktoré sú ťažšie ako tie pôvodné.

Zrážaním častíc sa vieme čosi dozvedieť o ich vnútornej štruktúre.

Pri dostatočnej energii vieme vytvoriť nové častice, ktoré sú ťažšie ako tie pôvodné.

Zrážaním častíc sa vieme čosi dozvedieť o ich vnútornej štruktúre.

Pri dostatočnej energii vieme vytvoriť nové častice, ktoré sú ťažšie ako tie pôvodné.

$$E = m c^2$$

V polovici dvadsiateho storočia
bolo takto objavených **niekoľko
stoviek** “elementárnych” častíc.

Všetky nové sa **veľmi rýchlo
rozpadajú**.

V polovici dvadsiateho storočia
bolo takto objavených **niekoľko
stoviek** “elementárnych” častíc.

Dávali im rôzne mená ako **K, π , Λ ,
 Σ , E** a podobne.

Veríme, že to na elementárnej úrovni musí byť jednoduchšie.

Riešenie: častice ako protón, neutrón a stovky bratrancov a sesterníc sa z niečoho skladú.

Až toto niečo je skutočne elementárne.

Částice štandardného modelu

Štandardný model je teória ozaj
elementárnych častíc.

hmotnosť
náboj
spin

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$

$\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$

u

up

$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$

$\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$

c

charm

$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$

$\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$

t

top

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$

$-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$

d

down

$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$

$-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$

s

strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$

$-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$

b

bottom

KVARKY

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$

-1
 $\frac{1}{2}$

e

elektrón

$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$

-1
 $\frac{1}{2}$

μ

muón

$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$

-1
 $\frac{1}{2}$

τ

tau

LEPTÓNY

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$

0
 $\frac{1}{2}$

ν_e

elektrónové
neutríno

$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$

0
 $\frac{1}{2}$

ν_μ

muónové
neutríno

$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$

0
 $\frac{1}{2}$

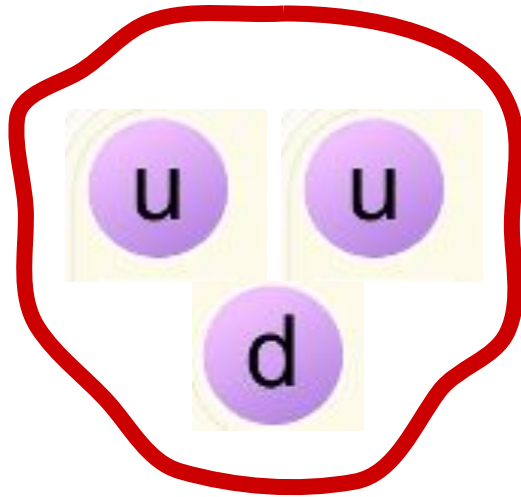
ν_τ

tau
neutríno

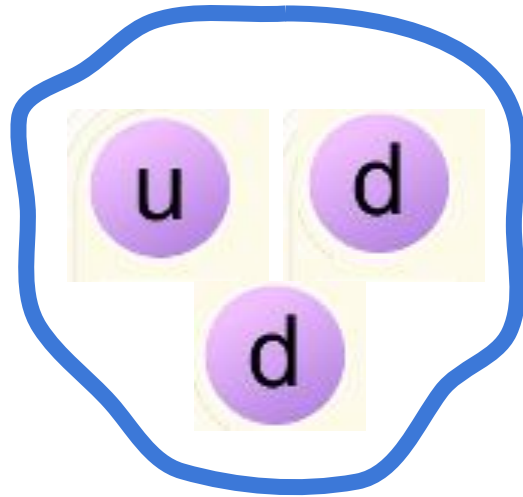


Murray Gell-Mann
1929 – 2019

Protón je zložený z dvoch **u**
kvarkov a jedného **d** kvarku.



Neutrón je zložený z jedného **u** kvarku a dvoch **d** kvarkov.



hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
---	---	--

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
--	--	---

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektrón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muón	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
--	--	--

LEPTÓNY

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e elektrónové neutríno	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muónové neutríno	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutríno
--	--	---

hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
---	---	--

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
--	--	---

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektrón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muón	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
--	--	--

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e elektrónové neutríno	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muónové neutríno	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutríno
--	--	---

LEPTÓNY

Ku každej častici existuje antičastica.

	KVARKY			LEPTÓNY		
hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	-1	-1	-1
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u up	c charm	t top	e elektrón	μ muón	τ tau
	d down	s strange	b bottom	ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno
	q up	q charm	q top	e elektrón	μ muón	τ tau
	d down	s strange	b bottom	ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno

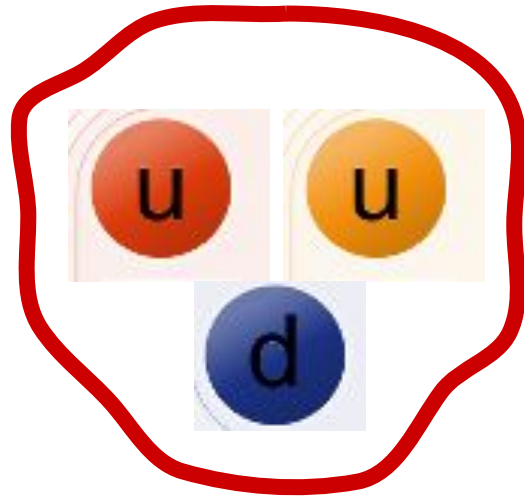
Kvarky existujú v troch rôznych farbách - červená, modrá, zelená.

hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u	c	t
	up	charm	top
KVARKY			
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d	s	b
	down	strange	bottom

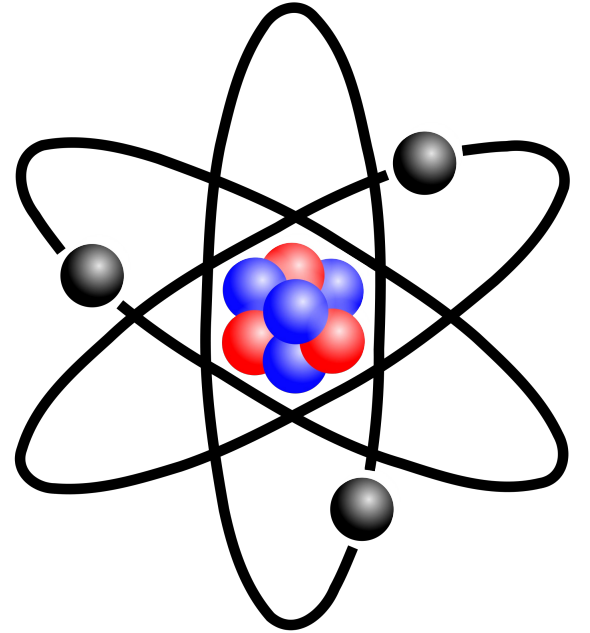
hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u	c	t
	up	charm	top
KVARKY			
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d	s	b
	down	strange	bottom

hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u	c	t
	up	charm	top
KVARKY			
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d	s	b
	down	strange	bottom

Kvarky existujú v troch rôznych farbách - červená, modrá, zelená. Zložené častice sú biele.

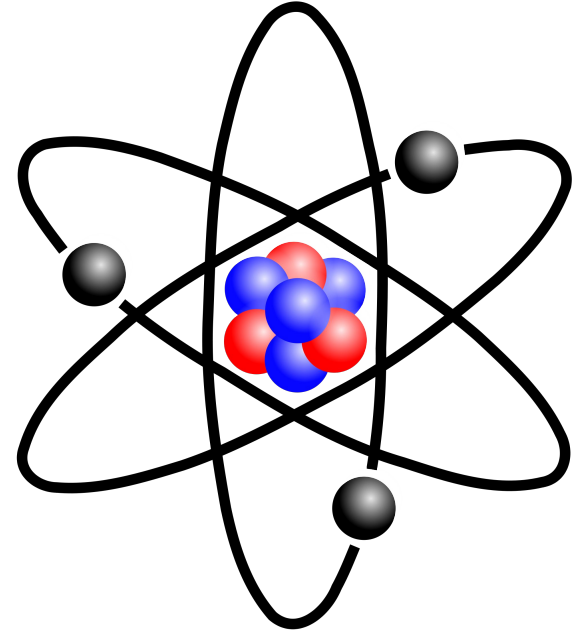


Interakcie částic **(nové částice)**



Interakcie medzi časticami

Elektromagnetická



hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
---	---	--

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
--	--	---

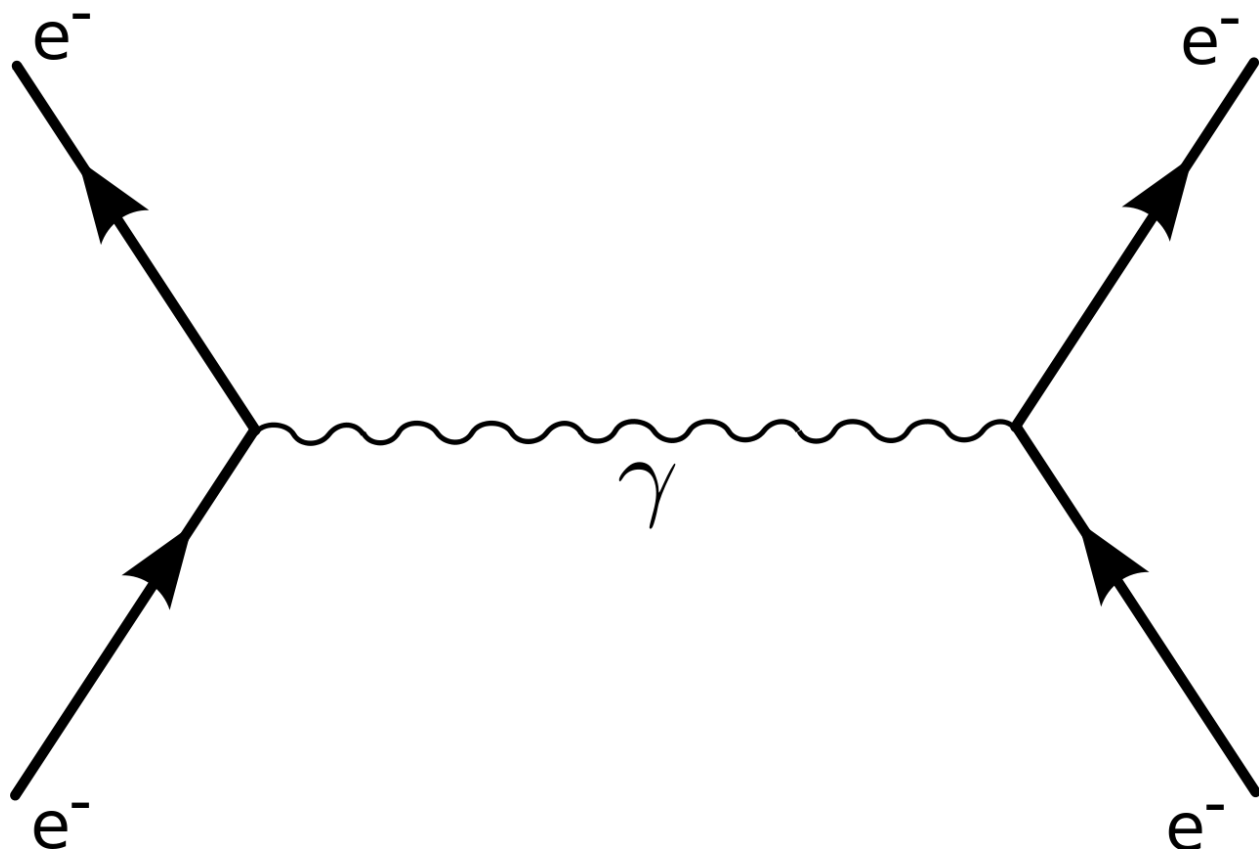
0 0 1 γ fotón
--

LEPTÓNY

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elektrón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muón	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
--	--	--

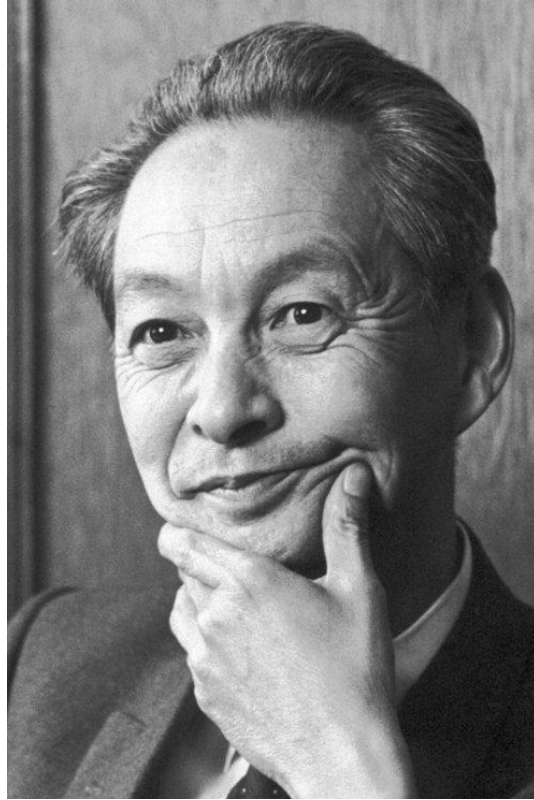
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e elektrónové neutríno	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muónové neutríno	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutríno
--	--	---

BOZÓNY





Julian Schwinger
1918 – 1994



Shin'ichirō Tomonaga
1906 – 1979

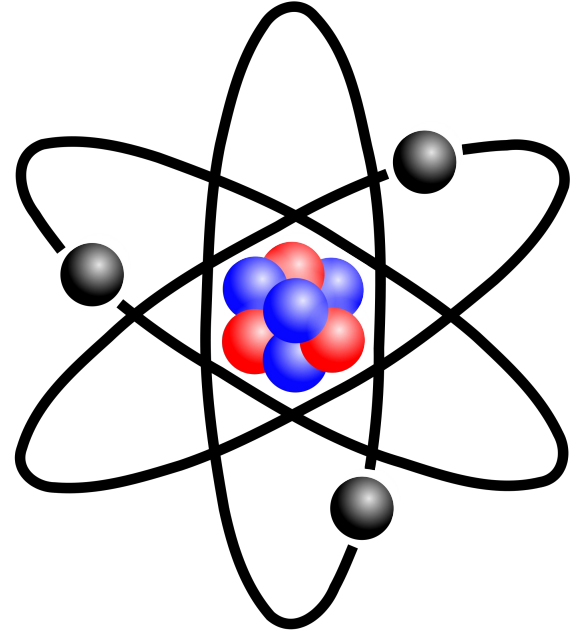


Richard Feynman
1918 – 1988

Interakcie medzi časticami

Elektromagnetická

Silná



hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
u
up

$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
c
charm

$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
t
top

0
0
1
g
gluón

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
d
down

$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
s
strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
b
bottom

0
0
1
 γ
fotón

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
e
elektrón

$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 μ
muón

$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 τ
tau

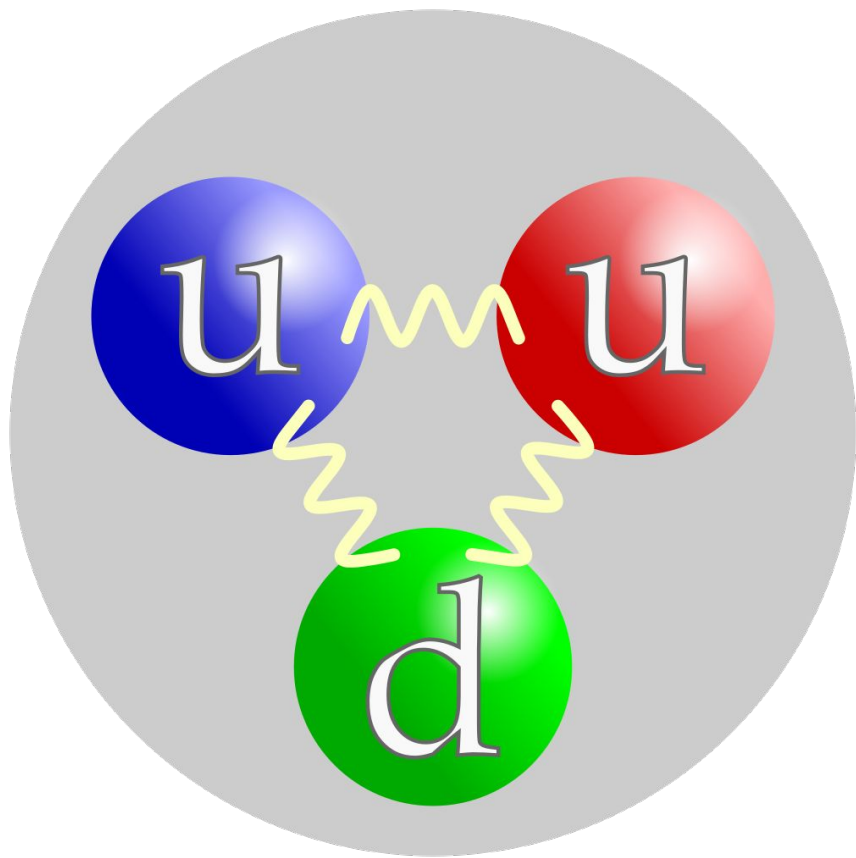
LEPTÓNY

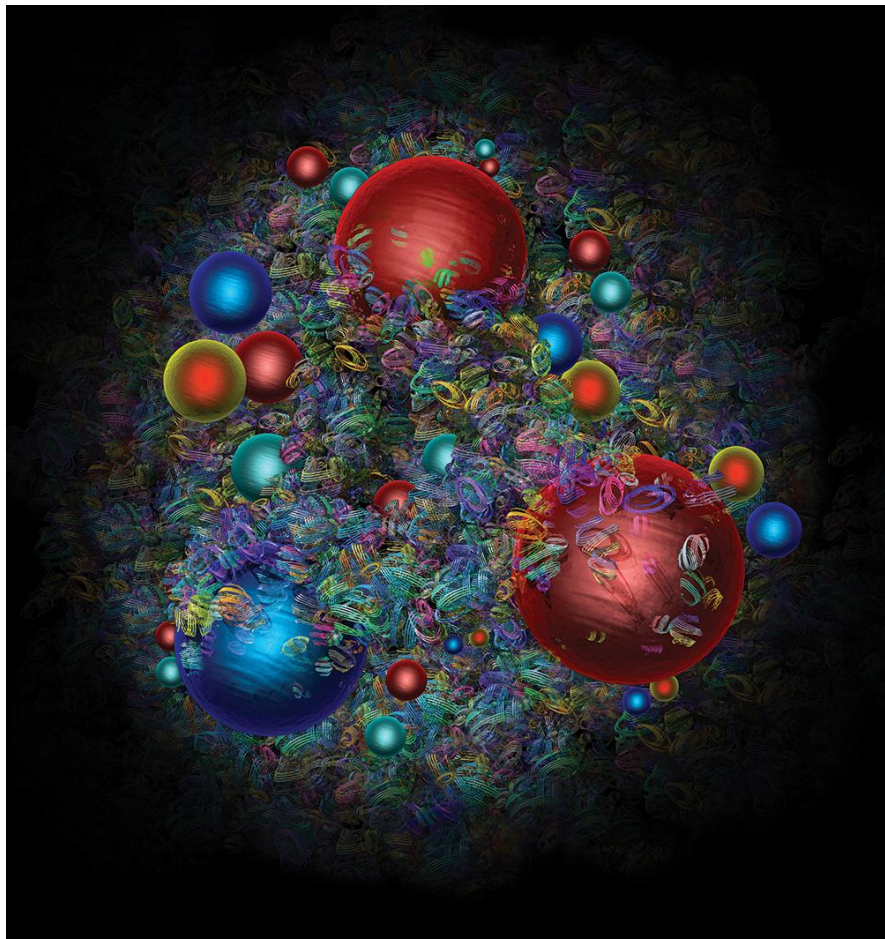
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_e
elektrónové
neutríno

$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muónové
neutríno

$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
tau
neutríno

BOZÓNY

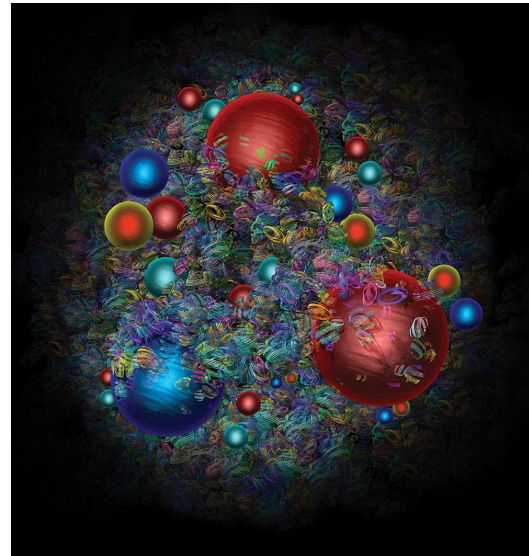




Môžeme vidieť osamotený kvark?

Môžeme vidieť osamotený kvark?

Nie! Sila silnej sily rastie so vzdialenosťou.

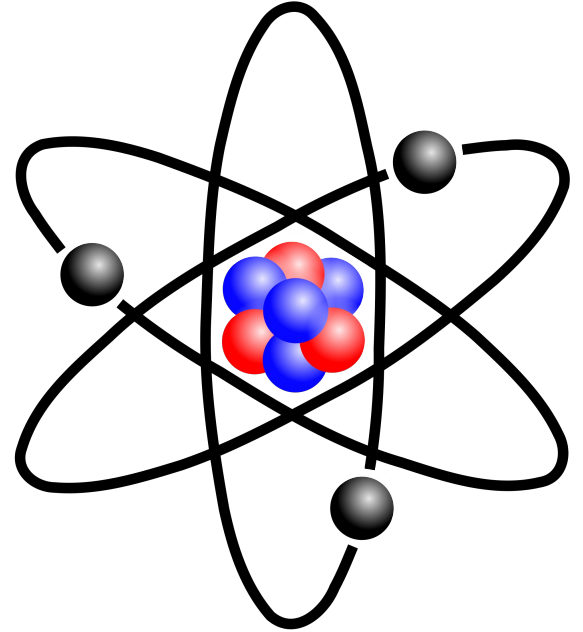


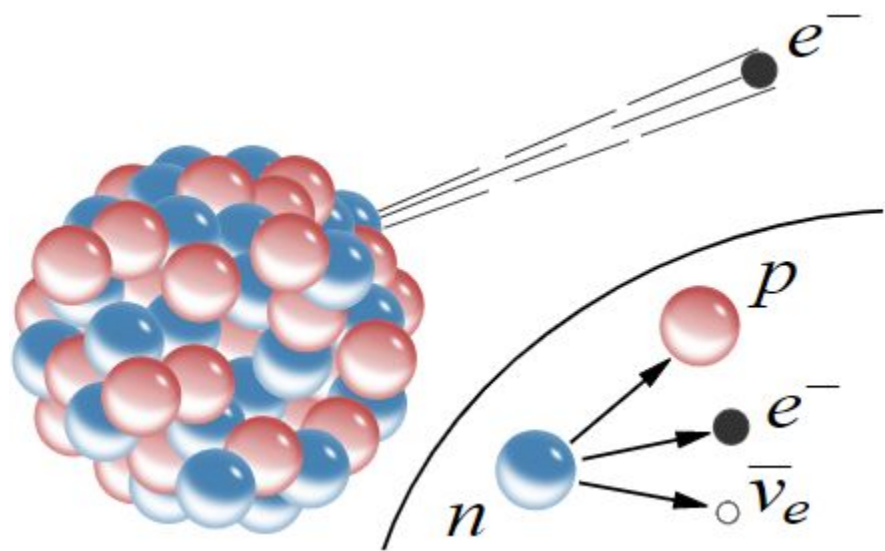
Interakcie medzi časticami

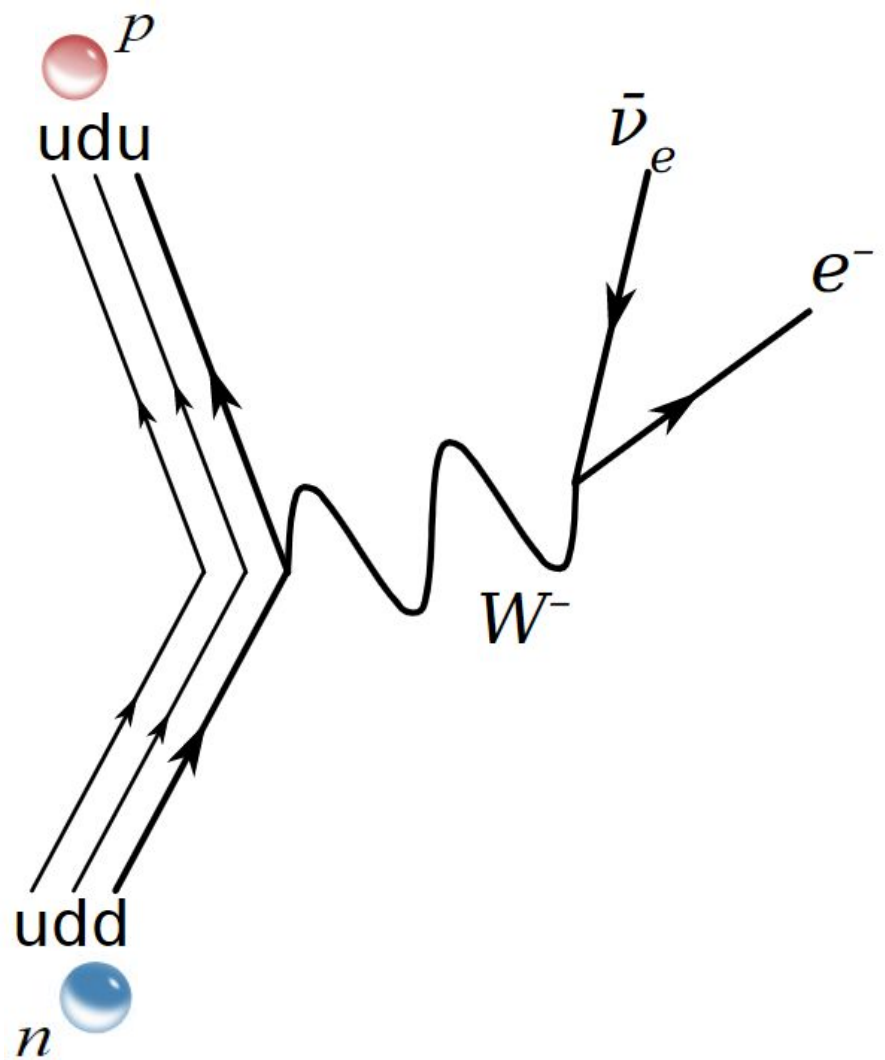
Elektromagnetická

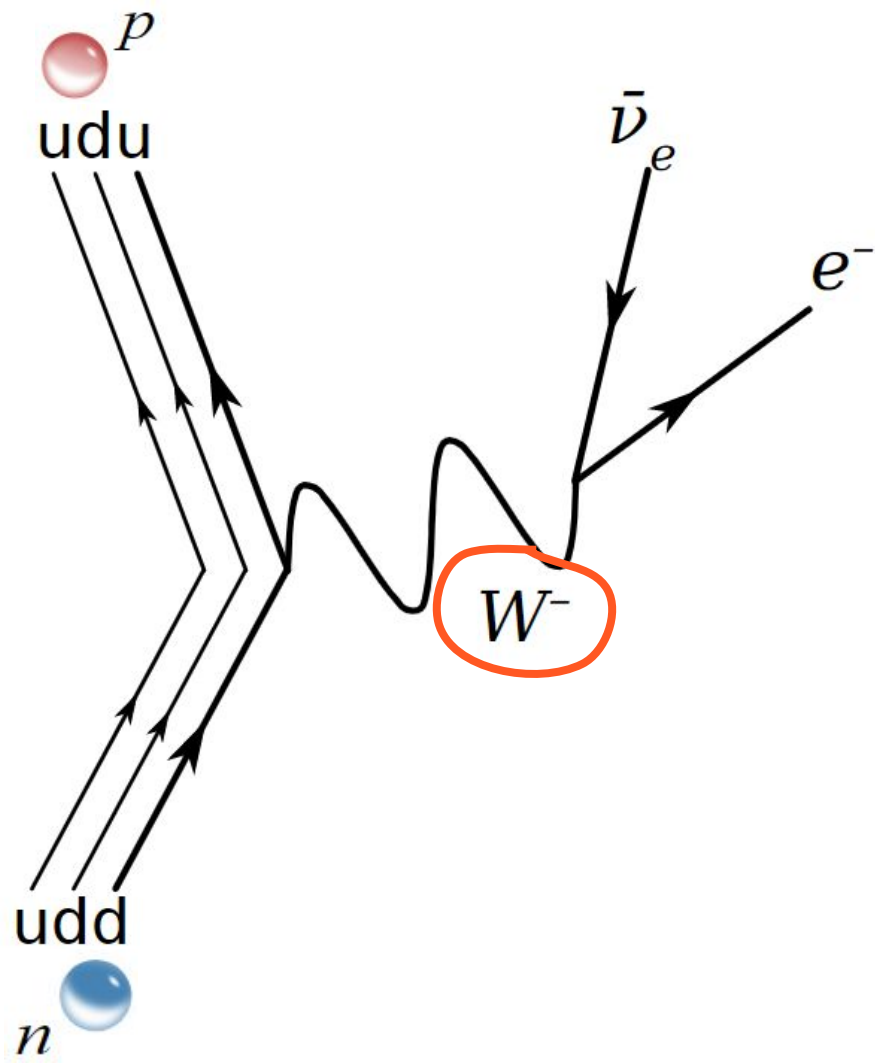
Silná

Slabá









hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
u
up

$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
c
charm

$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
t
top

0
0
1
g
gluón

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
d
down

$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
s
strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
b
bottom

0
0
1
 γ
fotón

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
e
elektrón

$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 μ
muón

$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 τ
tau

0
0
1
 ± 1
1
W
W bozón

LEPTÓNY

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_e
elektrónové
neutríno

$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muónové
neutríno

$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
tau
neutríno

BOZÓNY



Steven Weinberg
1933

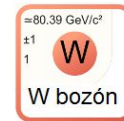
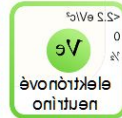
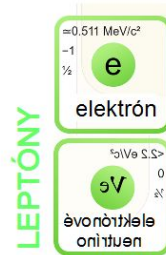
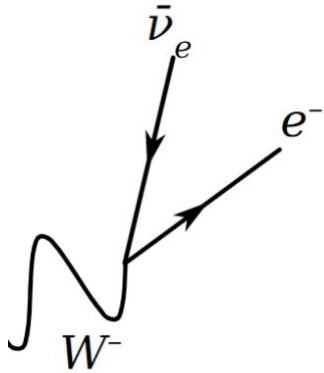


Abdus Salam
1926 – 1996



Sheldon Glashow
1918

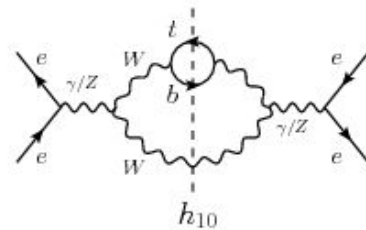
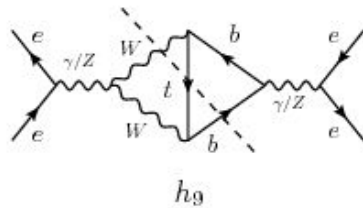
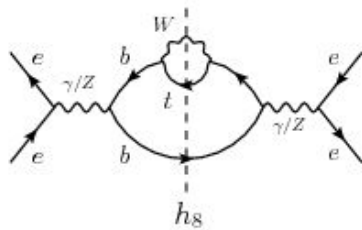
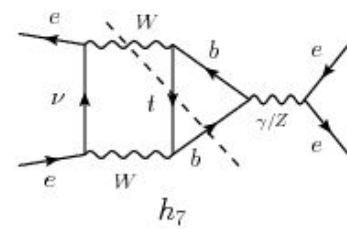
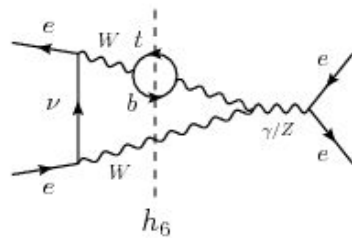
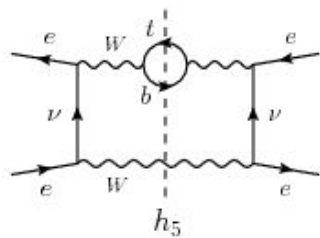
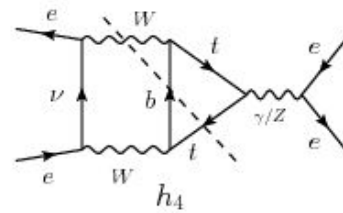
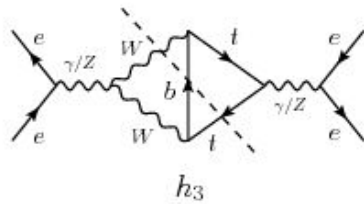
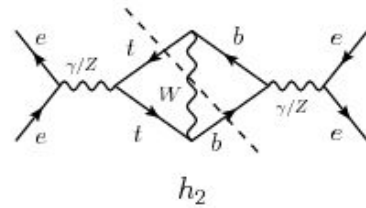
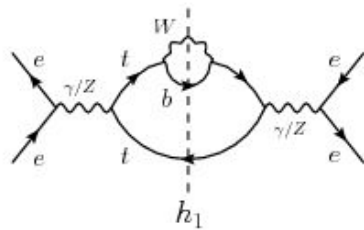
V štandardnom modeli sú interakcie medzi časticami charakterizované vrcholmi.



BOZÓN

V štandardnom modeli sú interakcie medzi časticami charakterizované **vrcholmi**.

Spájaním vrcholov vznikajú komplikované procesy.



Vrcholy nie sú hocijaké. Musia v nich platiť **zákony zachovania** a je v nich veľmi **prísna štruktúra**.

Tak isto je prísna štruktúra aj **medzi časticami**.

**Predposledné
okienko -
Higgsov bozón**

hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

LEPTÓNY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
u
up

$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
c
charm

$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
t
top

0
0
1
g
gluón

$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
0
0
H
higgs

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
d
down

$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
s
strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
b
bottom

0
0
1
 γ
fotón

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
e
elektrón

$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 μ
muón

$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 τ
tau

Gray box

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_e
elektrónové
neutríno

$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muónové
neutríno

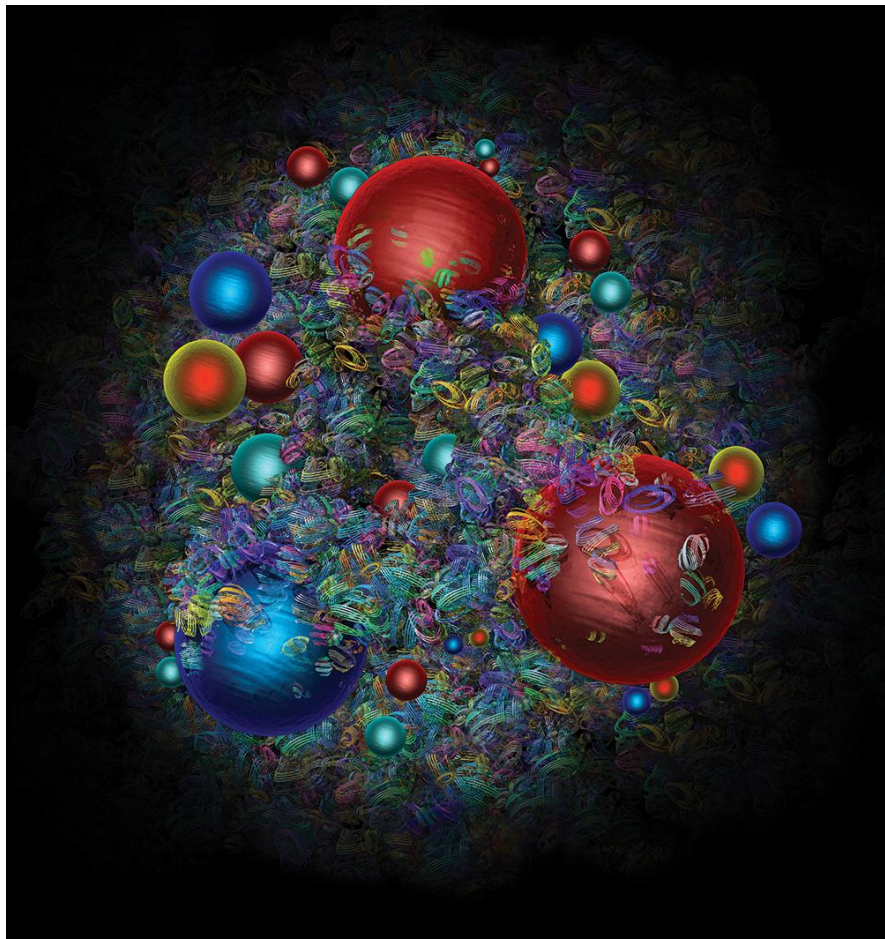
$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
tau
neutríno

$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$
 ± 1
1
W
W bozón

BOZÓNY

Častice v štandardnom modeli sú
všetky **nehmotné!**

Hmotnosť získavajú až **interakciou s
Higgsovimi bozónmi.**





Peter Higgs
1929



François Englert
1932

hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
u
up

$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
c
charm

$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
t
top

0
0
1
g
gluón

$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
0
0
0
H
higgs

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
d
down

$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
s
strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
b
bottom

0
0
1
 γ
fotón

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
e
elektrón

$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 μ
muón

$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 τ
tau

Grey box

LEPTÓNY

$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_e
elektrónové neutríno

$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muónové neutríno

$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
tau neutríno

$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$
 ± 1
1
W
W bozón

BOZÓNY

**Posledné
okienko -
Z bozón**

hmotnosť
náboj
spin

KVARKY

LEPTÓNY

$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
u
up

$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
c
charm

$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
t
top

0
0
1
g
gluón

$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
0
0
0
H
higgs

$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
d
down

$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
s
strange

$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
b
bottom

0
0
1
 γ
fotón

$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
e
elektrón

$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 μ
muón

$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
-1
 $\frac{1}{2}$
 τ
tau

$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
0
1
Z
Z bozón

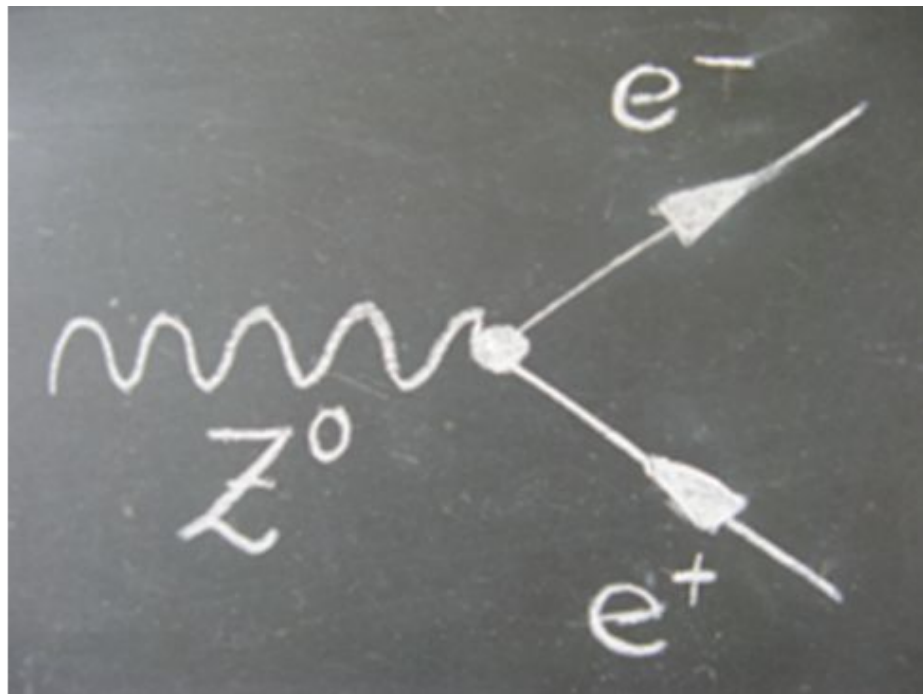
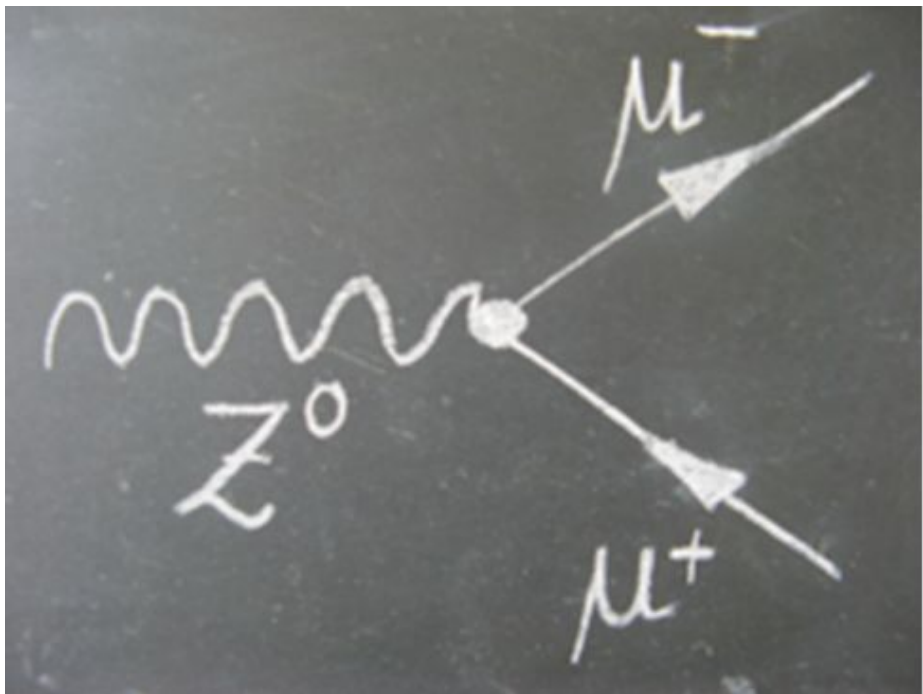
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_e
elektrónové
neutríno

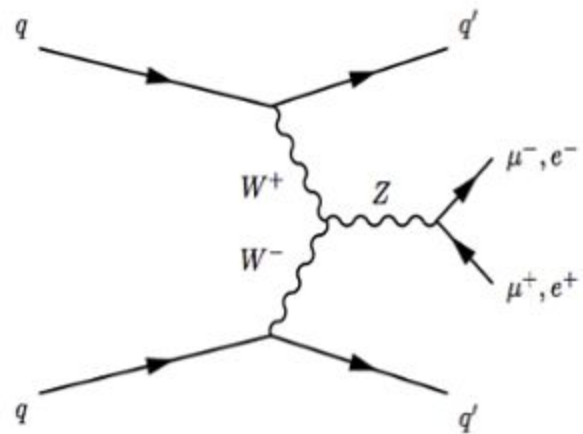
$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muónové
neutríno

$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
tau
neutríno

$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$
 ± 1
1
W
W bozón

BOZÓNY





Na fundamentálnej úrovni sa hmota skladá z kvarkov, leptónov a interakčných bozónov.

**Fyzika týchto malých
častíc nám vie veľa
povedať o veľkých
veciach.**

**Ďakujem za
pozornosť!**

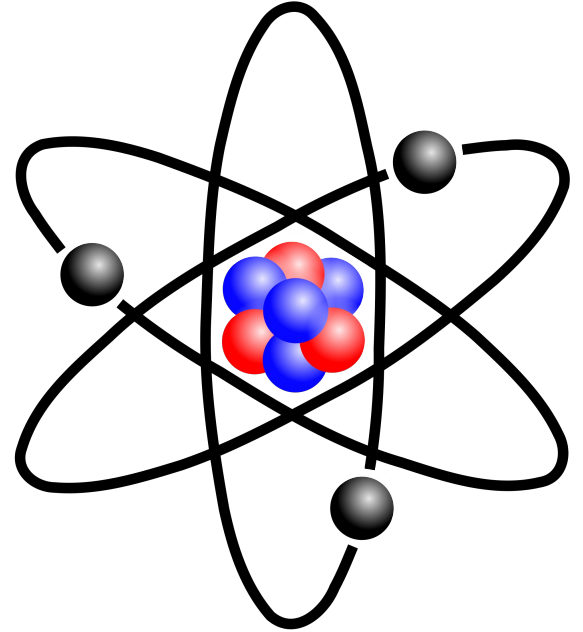
**Čo v časticovej
fyzike ešte
chýba?**

Interakcie medzi časticami

Elektromagnetická

Silná

Slabá



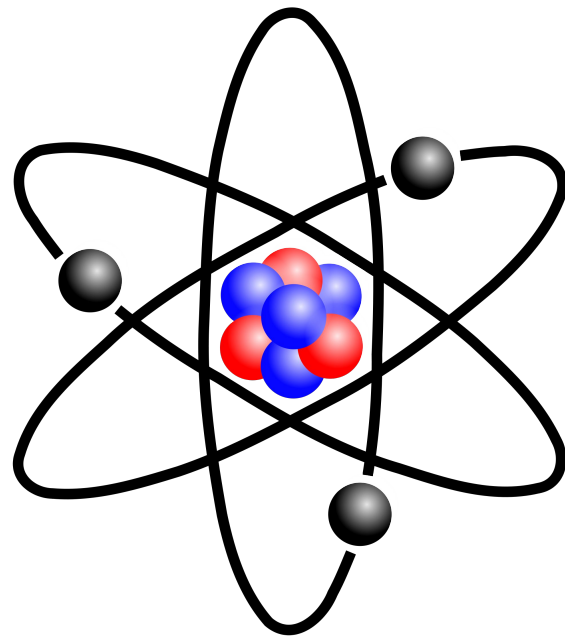
Interakcie medzi časticami

Elektromagnetická

Silná

Slabá

Gravitačná



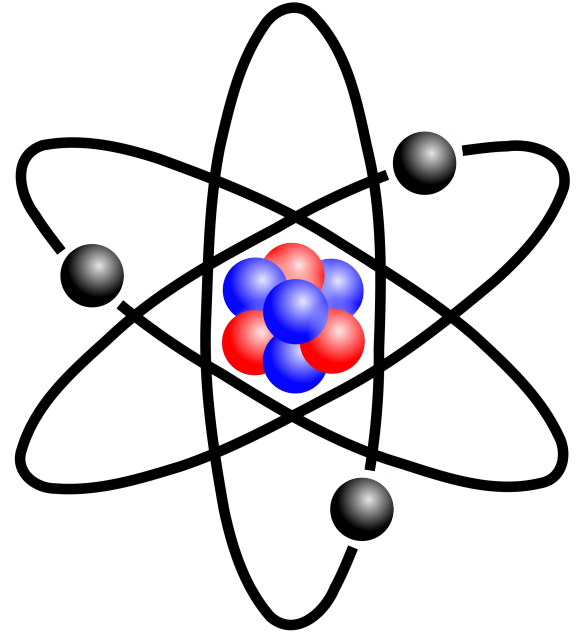
Interakcie medzi časticami

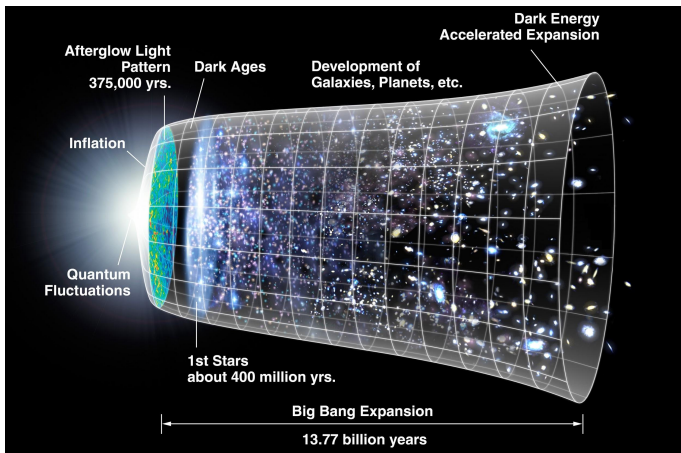
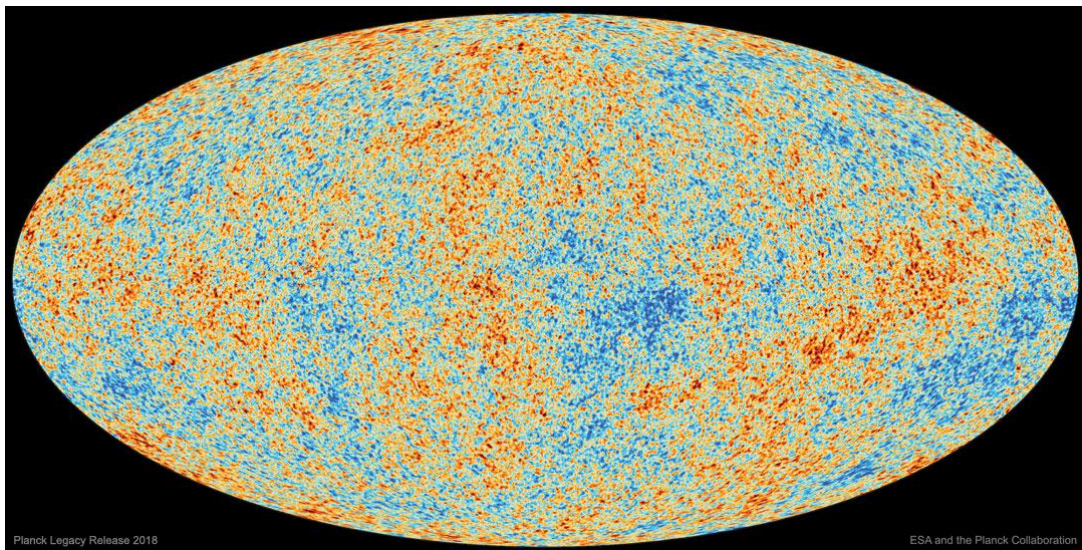
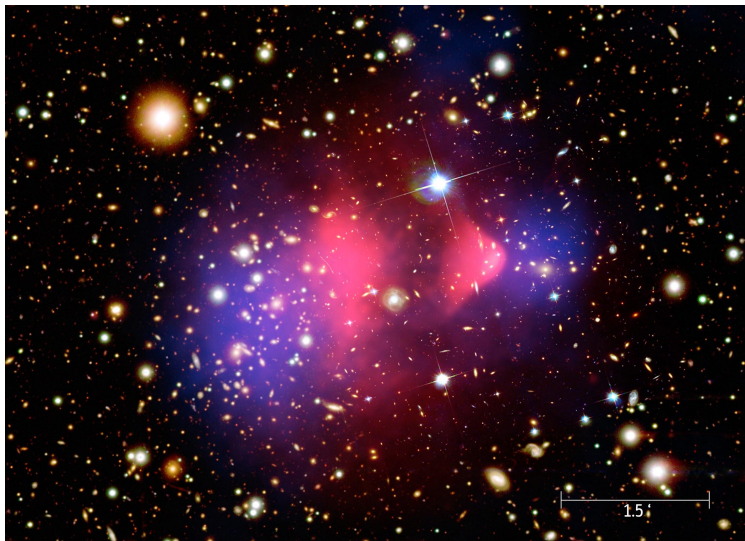
Elektromagnetická

Silná

Slabá

??? Gravitačná ???





Častice štandardného modelu
tvoria iba **4,6%** vesmíru.

Zvyšok tvorí **tmavá hmota** a **tmavá energia**. Vieme o nich len veľmi veľmi málo.