



FAKULTA MATEMATIKY,
FYZIKY A INFORMATIKY
Univerzita Komenského
v Bratislave

Časticová fyzika od **A** po **Z**

Juraj Tekel

Katedra teoretickej fyziky



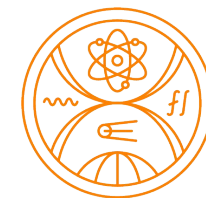
13. 2. 2023, International Masterclasses, FMFI UK



Prečo je časticová fyzika dôležitá?



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.



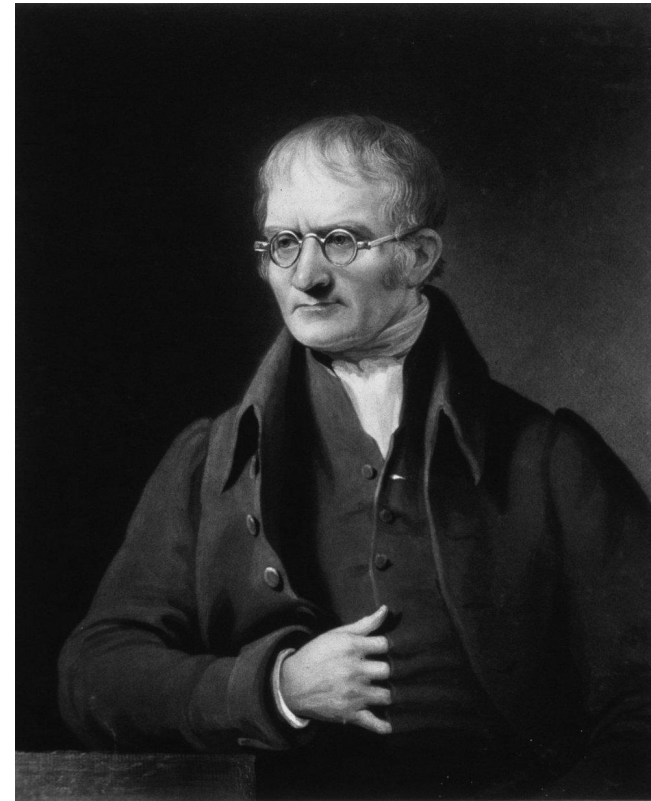


**Z čoho sa skladajú
veci?**



Z čoho sa skladajú veci?

- **1805** John Dalton.
- Veci sa skladajú z **molekúl**
a molekuly sa skladajú z **atómov**.

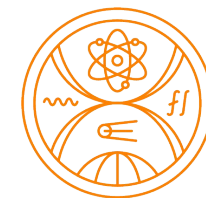
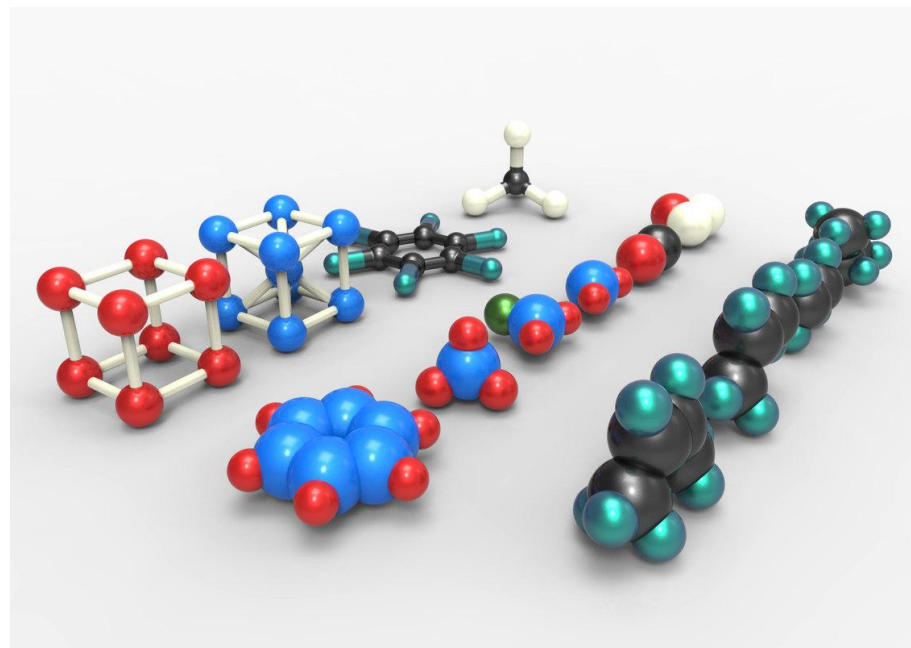


1766 – 1844



Z čoho sa skladajú veci?

- **1805** John Dalton.
- Veci sa skladajú z **molekúl**
a molekuly sa skladajú z **atómov**.



Z čoho sa skladajú veci?

- Aj atóm má štruktúru.



Z čoho sa skladajú veci?

- Aj atóm má štruktúru.
 - Elektrón - 1897 J. J. Thompson

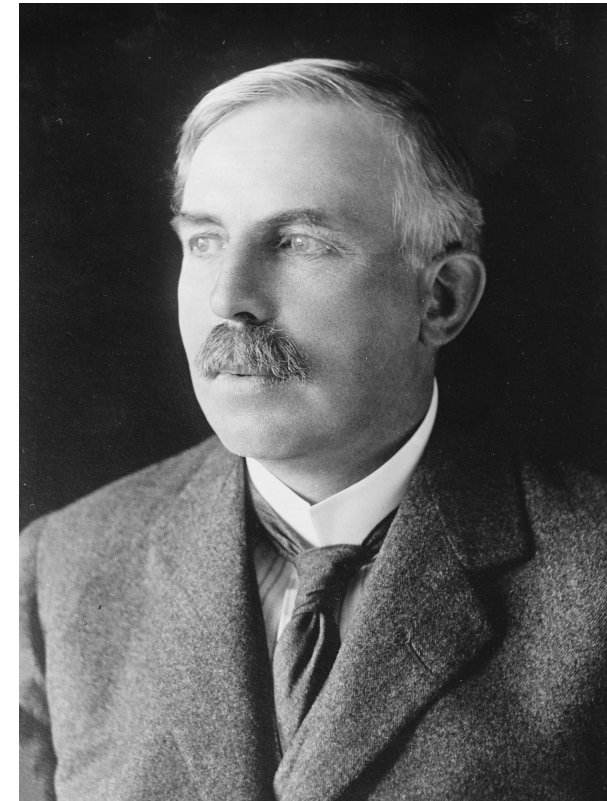


1766 – 1844



Z čoho sa skladajú veci?

- Aj atóm má štruktúru.
 - Elektrón
 - Protón - **1917** Ernest Rutherford



1871 – 1937



Z čoho sa skladajú veci?

- Aj atóm má štruktúru.
 - Elektrón
 - Protón
 - Neutrón - 1935 James Chadwick



1891 – 1974



Z čoho sa skladajú veci?

- **Atóm** má veľkosť asi 10^{-10} m.
- **Jadro** atómu asi 10^{-15} m.
- Ak by bolo **jablko** ako **Zem**, **atóm** by bol ako **jablko**.
- Ak by bol **atóm** ako **Zem**, **jadro** by bolo ako **budova**.



Z čoho sa skladajú veci?

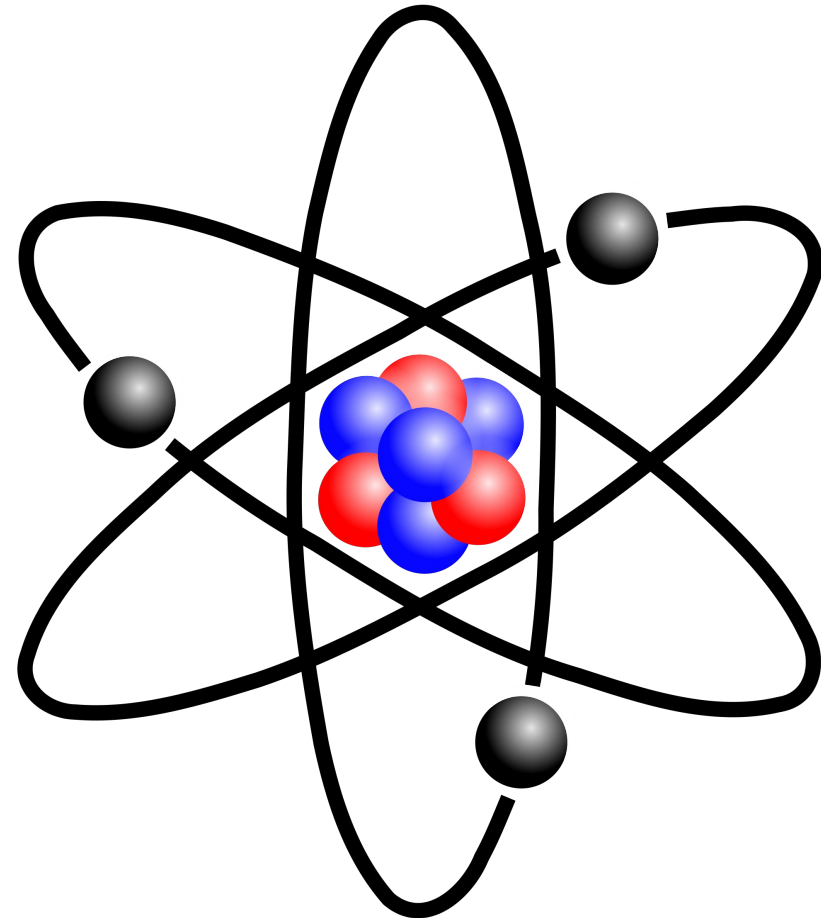
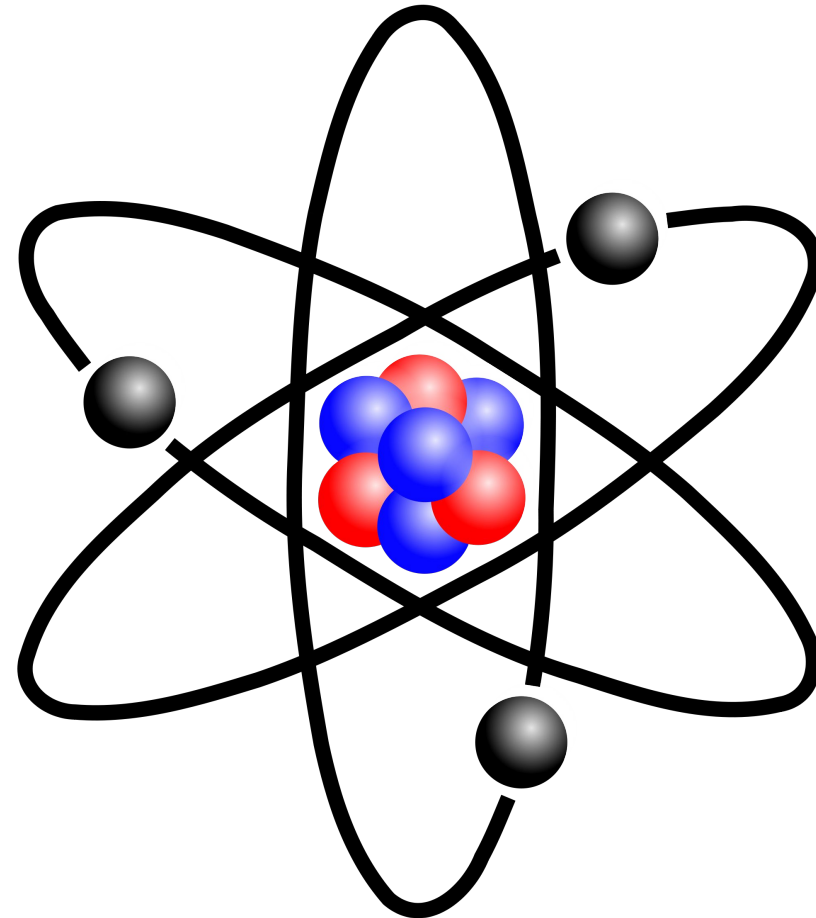


fig.: wiki

Z čoho sa skladajú veci?

- Jadro je oveľa menšie.
- Elektróny sú bodové.
- Celé to riadi kvantová mechanika.



Z čoho sa skladajú veci?



- Aj atóm má štruktúru.
 - Elektrón
 - Protón
 - Neutrón
- Elektrónmi, protónmi a neutrónmi sa ale možnosti v mikrosvete **nekončia.**

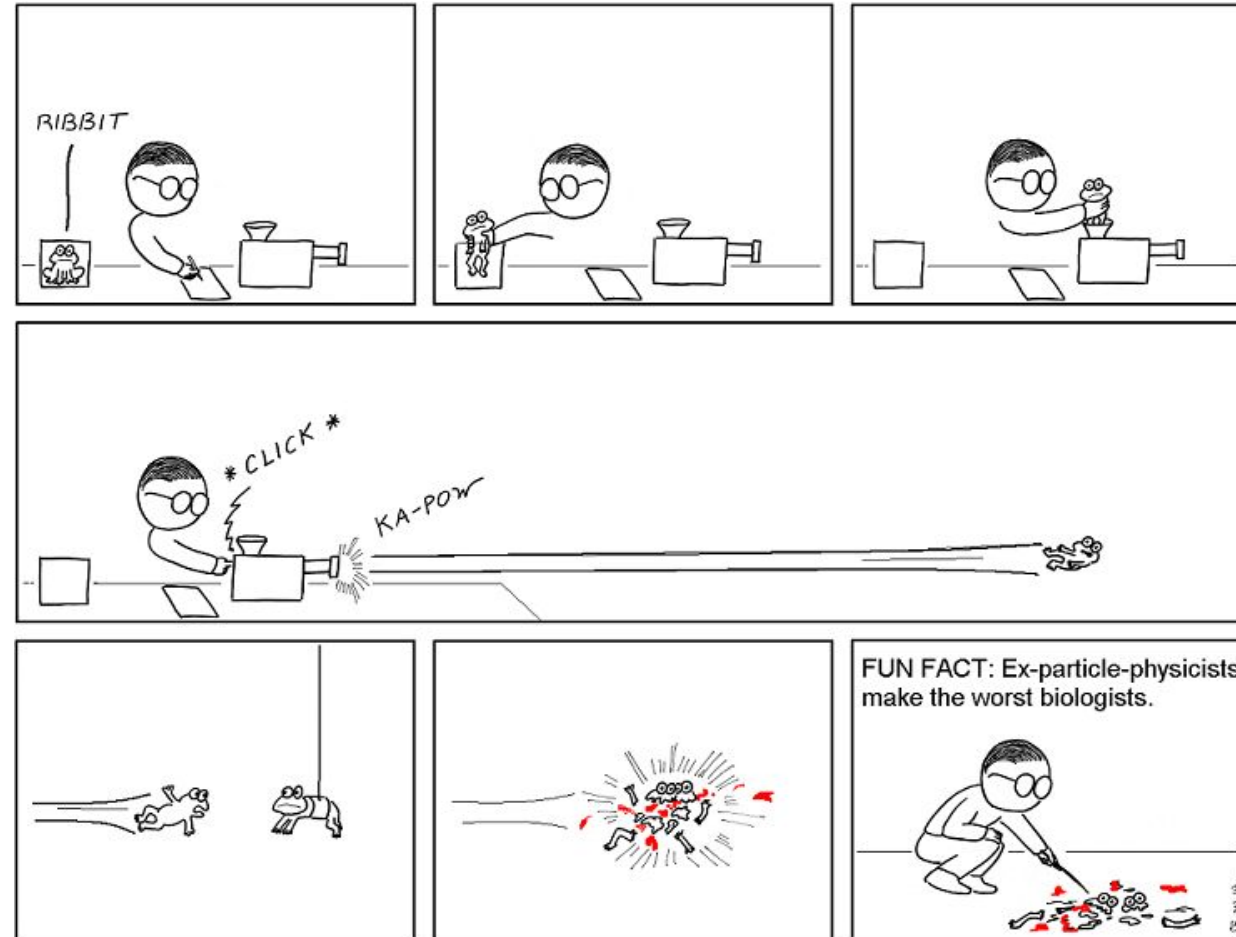




Zrážaním ľahších
častíc vieme dostať
ťažšie častice



Zrážaním ľahších častíc vieme dostať ťažšie častice



Zrážaním ľahších častíc vieme dostať ťažšie častice



- Zrážaním častíc sa vieme čosi dozvedieť o ich **vnútornej štruktúre**.
- Pri dostatočnej energii vieme **vytvoriť nové častice**, ktoré sú ťažšie ako tie pôvodné.



Zrážaním ľahších častíc vieme dostať ťažšie častice



- Zrážaním častíc sa vieme čosi dozvedieť o ich **vnútornej štruktúre**.
- Pri dostatočnej energii vieme **vytvoriť nové častice**, ktoré sú ťažšie ako tie pôvodné.

$$E = m c^2$$



Zrážaním ľahších častíc vieme dostať ťažšie častice



- V polovici dvadsiateho storočia bolo takto objavených **niekoľko stoviek** “elementárnych” častíc.
- Všetky nové sa veľmi rýchlo rozpadajú.
- Dávali im rôzne mená ako K , π , Λ , Σ , Ξ 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 šstandardného modelu



Častice štandardného modelu



- **Štandardný model** je teória ozaj elementárnych častíc.

KVARKY	hmotnosť náboj spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$
	u up	c charm	t top	
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	
	d down	s strange	b bottom	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	
	e elektrón	μ muón	τ tau	
LEPTÓNY	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	
	ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno	



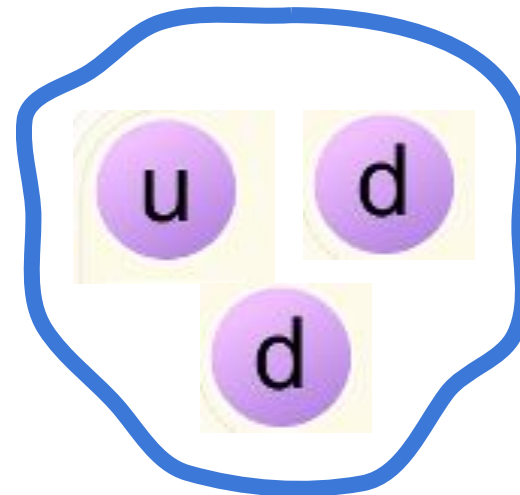
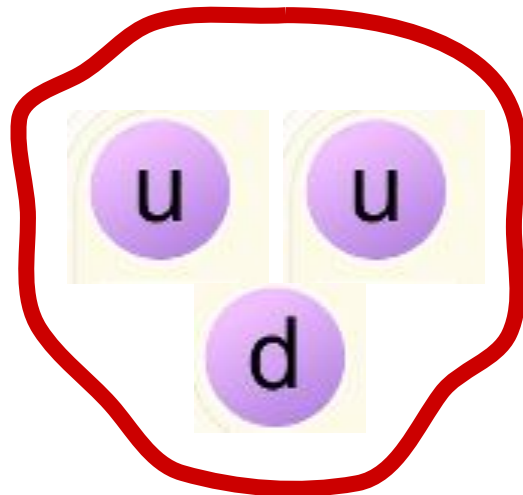
Murray Gell-Mann
1891 – 1974



Častice štandardného modelu



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



Častice štandardného modelu



- **Štandardný model** je teória o zjednotení elementárnych častíc.

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	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
KVARKY	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	e elektrón	μ muón	τ tau
LEPTÓNY	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno



Častice štandardného modelu



- **Štandardný model** je teória o zjednotení elementárnych častíc.

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	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
KVARKY	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	e elektrón	μ muón	τ tau
LEPTÓNY	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno



Častice štandardného modelu



- Ku každej častici existuje antičastica.

	častoť	antičastoť	častoť	
KVAVKY	$m = 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ u up	$m = 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ c charm	$m = 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ t top	$m = 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ u up
	$m = 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $q = -\frac{1}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ d down	$m = 96 \text{ MeV}/c^2$ $q = -\frac{1}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ s strange	$m = 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $q = -\frac{1}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ b bottom	$m = 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $q = -\frac{1}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ d down
	$m = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ e elektrón	$m = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ μ muón	$m = 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ e elektrón
	$m < 2.2 \text{ eV}/c^2$ $q = 0$ $s = \frac{1}{2}$ ν_e elektrónové neutríno	$m < 0.17 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$ $s = \frac{1}{2}$ ν_μ muónové neutríno	$m < 18.2 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$ $s = \frac{1}{2}$ ν_τ tau neutríno	$m < 2.2 \text{ eV}/c^2$ $q = 0$ $s = \frac{1}{2}$ ν_e elektrónové neutríno
	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ μ muón	$m = 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau
	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ μ muón	$m = 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau
LEPTÓNY	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ μ muón	$m = 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau
	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ μ muón	$m = 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau
	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ μ muón	$m = 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau
	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ μ muón	$m = 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $q = -1$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau	$m = 1.738 \text{ GeV}/c^2$ $q = +\frac{2}{3}$ $s = \frac{1}{2}$ τ tau



Častice štandardného modelu



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

	hmotnosť	náboj	spin		hmotnosť	náboj	spin		hmotnosť	náboj	spin	
KVARKY	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	u up	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	u up	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	u up
	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	c charm	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	c charm	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	c charm
	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	t top	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	t top	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	t top
	0	0	1	g gluón	0	0	1	g gluón	0	0	1	g gluón
	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$	0	0	H higgs	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$	0	0	H higgs	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$	0	0	H higgs
LEPTÓNY	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	d down	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	d down	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	d down
	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	s strange	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	s strange	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	s strange
	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	b bottom	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	b bottom	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	b bottom
	0	0	1	γ fotón	0	0	1	γ fotón	0	0	1	γ fotón
BOZÓNY	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	e elektrón	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	e elektrón	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	e elektrón
	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	μ muón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	μ muón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	μ muón
	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	τ tau	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	τ tau	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	τ tau
	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	0	1	Z Z bozón	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	0	1	Z Z bozón	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	0	1	Z Z bozón
BOZÓNY	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_e elektrónové neutrino	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_e elektrónové neutrino	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_e elektrónové neutrino
	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_μ muónové neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_μ muónové neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_μ muónové neutrino
	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_τ tau neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_τ tau neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_τ tau neutrino
	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	W W bozón	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	W W bozón	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	W W bozón



Častice štandardného modelu



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

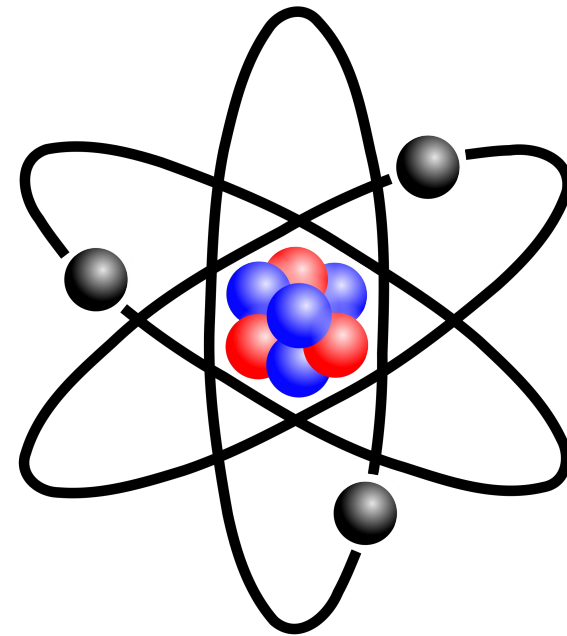




Interakcie částic (nové částice)

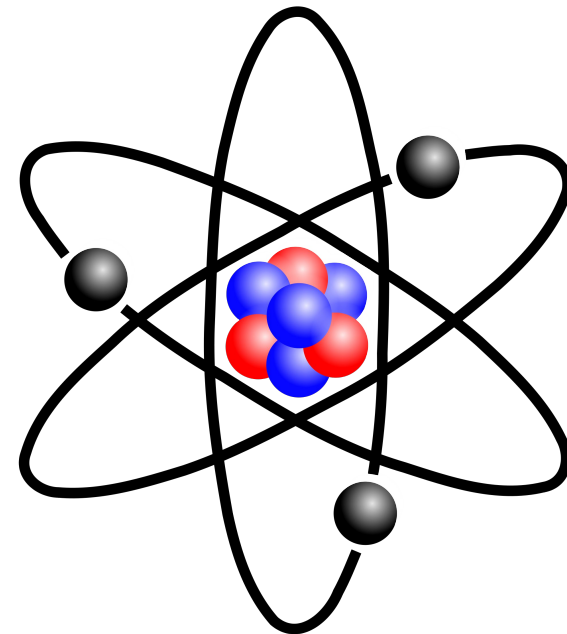


Interakcie častíc



Interakcie častíc

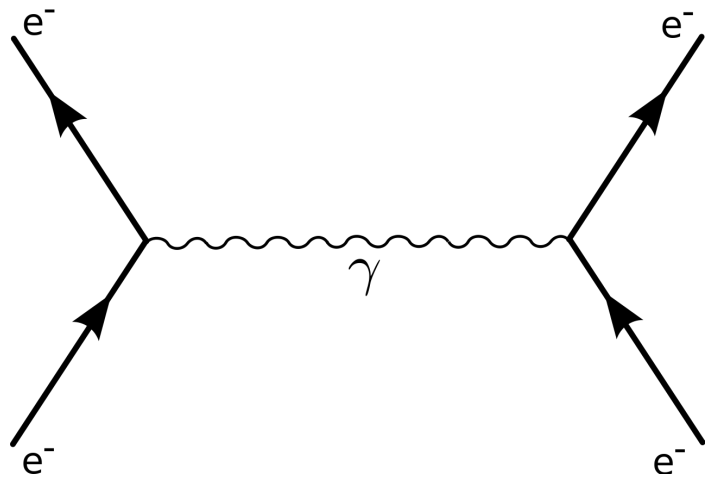
- Interakcie medzi časticami
 - **Elektromagnetická**



Interakcie častíc



- 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
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	
			0 0 1	γ fotón
				BOZÓNY



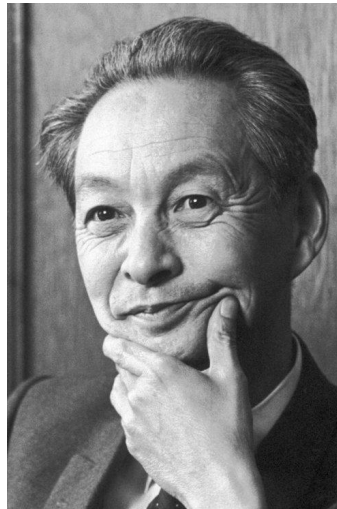
Interakcie častíc



- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická



Julian Schwinger
1918 – 1994



Shin'ichirō Tomonaga
1906 – 1979

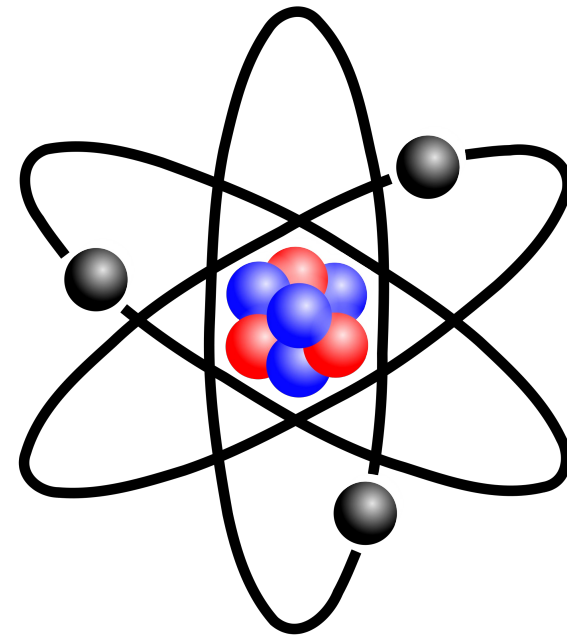


Richard Feynman
1918 – 1988



Interakcie častíc

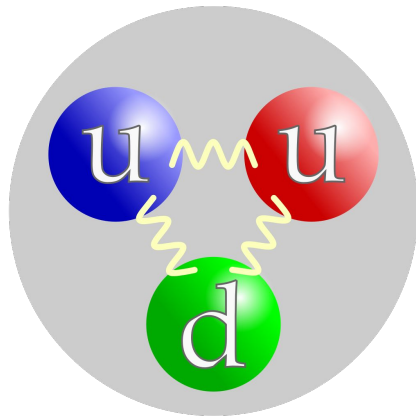
- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná



Interakcie častíc



- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná



	u	c	t	g
hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	up	charm	top	gluón
	d	s	b	γ
	down	strange	bottom	fotón
	e	μ	τ	
	elektrón	muón	tau	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	
	elektrónové neutríno	muónové neutríno	tau neutríno	

KVARKY

LEPTÓNY

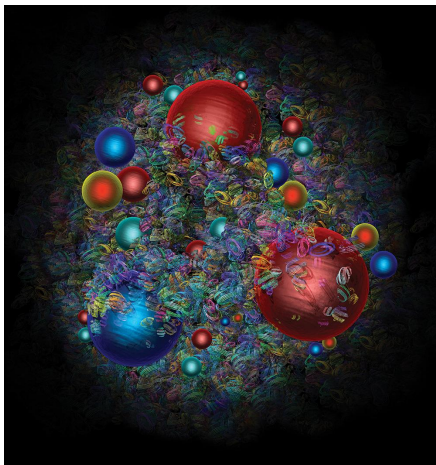
BOZÓNY



Interakcie častíc



- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná



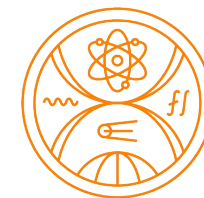
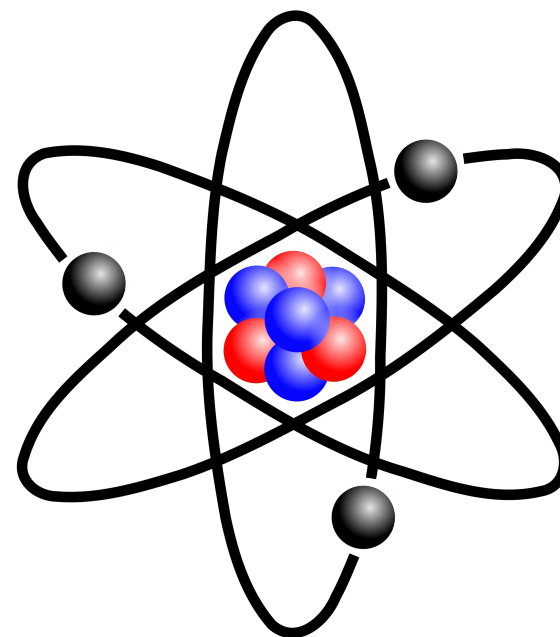
hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	BOZÓNY
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
KVARKY	u up	c charm	t top	g gluón	
	d down	s strange	b bottom	γ fotón	
	e elektrón	μ muón	τ tau		
LEPTÓNY	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$		
	0	0	0		
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		
	ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno		



fig.: D Dominguez/CERN

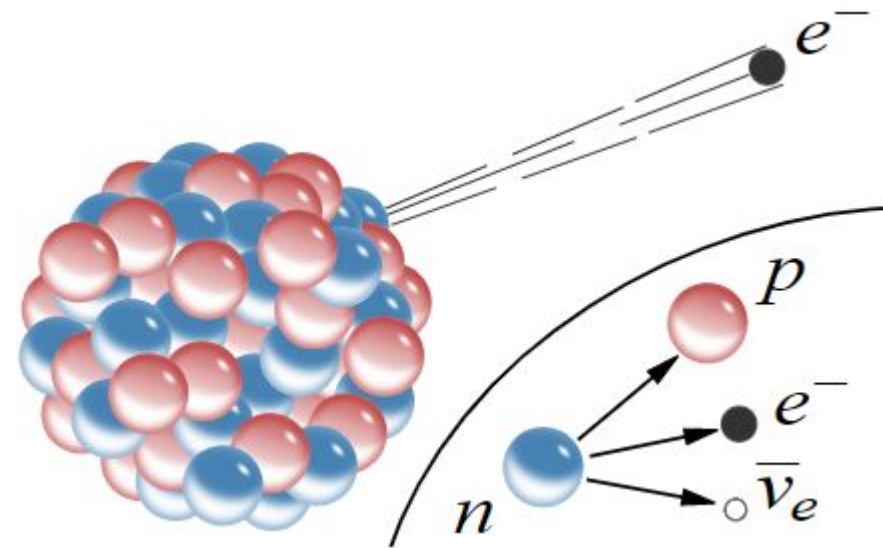
Interakcie častíc

- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná
 - Slabá



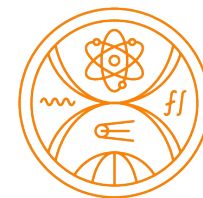
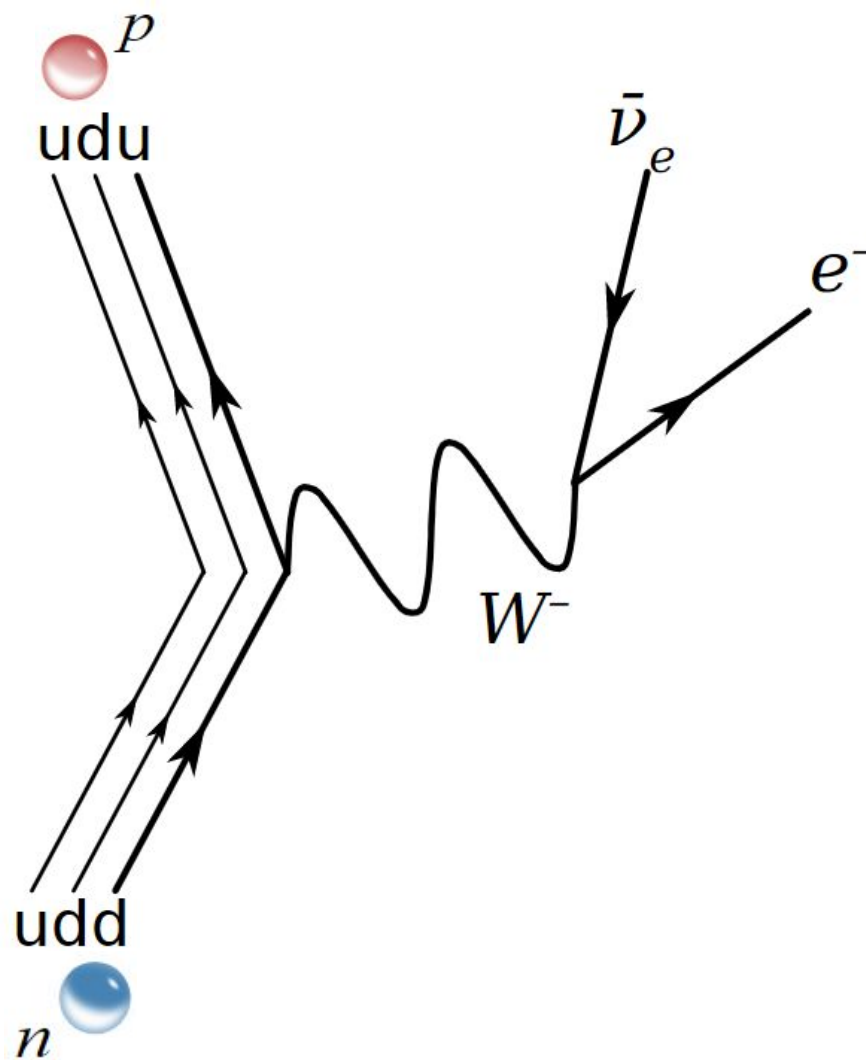
Interakcie častíc

- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná
 - Slabá



Interakcie častíc

- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná
 - Slabá



Interakcie častíc



- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná
 - Slabá

hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	BOZÓNY
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
KVARKY	u up	c charm	t top	g gluón	
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	d down	s strange	b bottom	γ fotón	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
LEPTÓNY	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$		
	-1	-1	-1		
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$		
	e elektrón	μ muón	τ tau		
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$		
0	0	0	± 1		
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		
ν_e elektrónové neutrino	ν_μ muónové neutrino	ν_τ tau neutrino	W W bozón		



Interakcie častíc



- Interakcie medzi časticami

- Slabá



Steven Weinberg
1933 – 2021



Abdus Salam
1926 – 1996



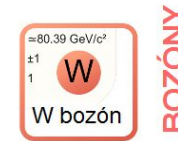
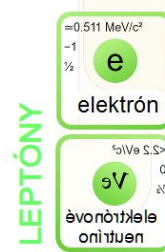
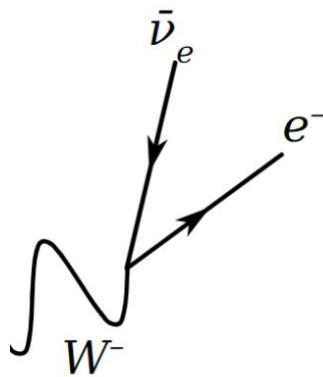
Sheldon Glashow
1932



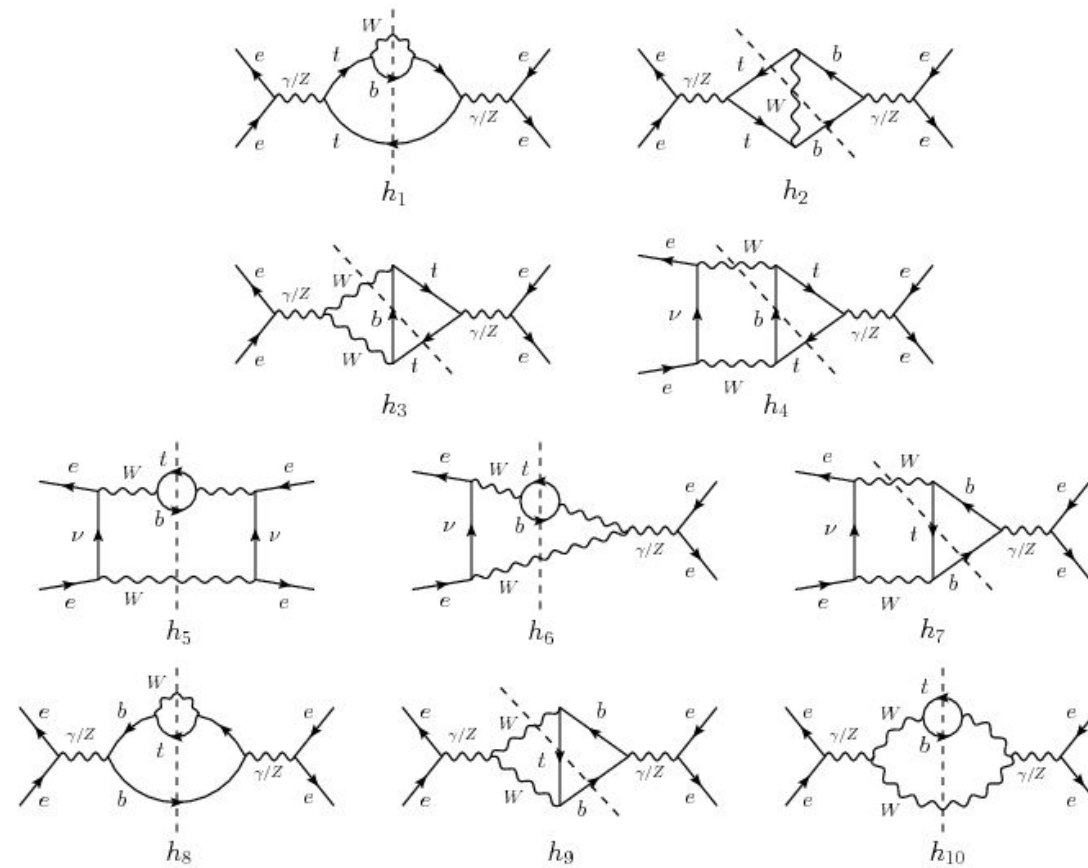
Interakcie častíc



- V štandardnom modeli sú interakcie medzi časticami charakterizované vrcholmi.
- Spájaním vrcholov vznikajú komplikované procesy.



Interakcie častíc



Interakcie častíc



- 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.



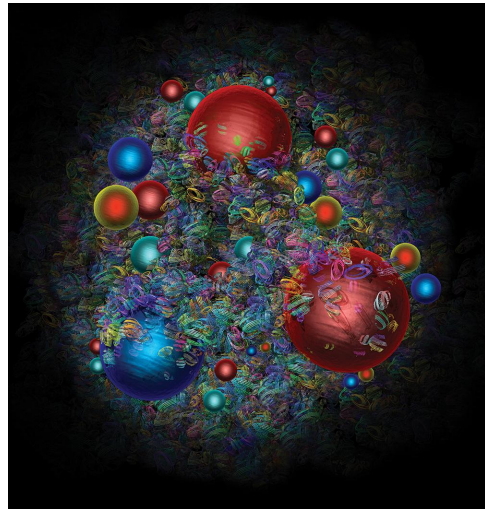


Predposledné okienko - Higgsov bozón



Higgsov bozón

- Častice v štandardnom modeli sú všetky nehmotné!
- Hmotnosť získavajú až interakciou s Higgsovými bozónmi.



	hmotnosť náboj spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0
KVARKY		u up	c charm	t top	g gluón	H higgs
		d down	s strange	b bottom	γ fotón	
		e elektrón	μ muón	τ tau		
LEPTÓNY		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
		ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno	W W bozón	
						BOZÓNY



Higgsov bozón



Peter Higgs
1929



François Englert
1932





Posledné okienko - Z bozón



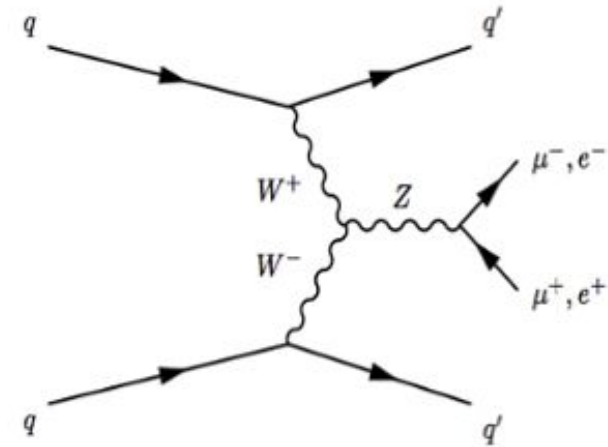
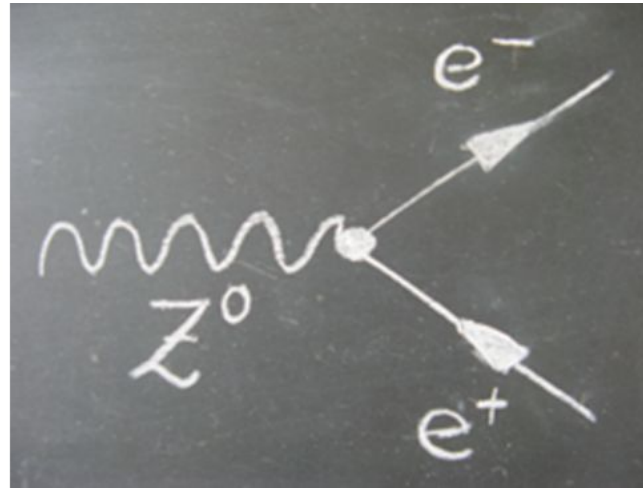
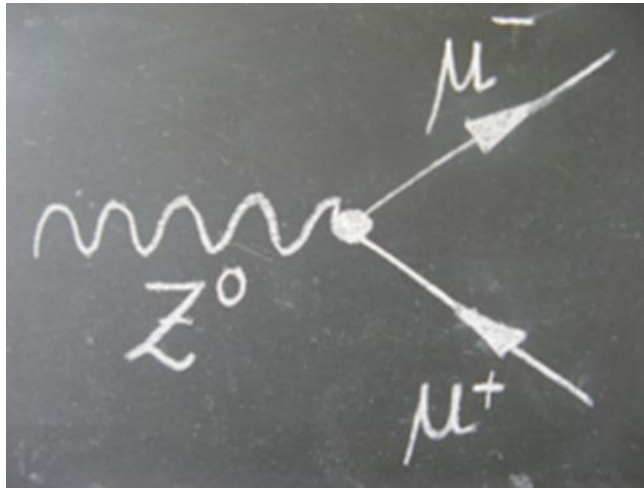
Z bozón



hmotnosť	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
KVARKY	u up	c charm	t top	g gluón	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fotón	
LEPTÓNY	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e elektrón	μ muón	τ tau	Z Z bozón	
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$		
0	0	0	± 1		
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		
	ν_e elektrónové neutríno	ν_μ muónové neutríno	ν_τ tau neutríno	W W bozón	
				BOZÓNY	



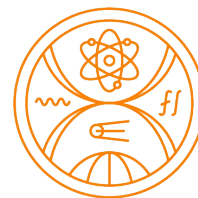
Z bozón





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





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



**Ďakujem za
pozornosť!**





Čo v časticovej fyzike ešte chýba?



Čo v časticovej fyzike ešte chýba?



- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná
 - Slabá



Čo v časticovej fyzike ešte chýba?



- Interakcie medzi časticami
 - Elektromagnetická
 - Silná
 - Slabá
 - ??? Gravitačná ???



Čo v časticovej fyzike ešte chýba?



- Častice štandardného modelu tvoria iba 4,6% vesmíru.
- Zvyšok tvorí **tmavá hmota** a **tmavá energia**. Vieme o nich len veľmi veľmi málo.

