

# Štandardný model časticovej fyziky

Marek Bombara, Medzinárodné Masterclasses 30. 3. 2022, Košice



# Čo nás čaká?

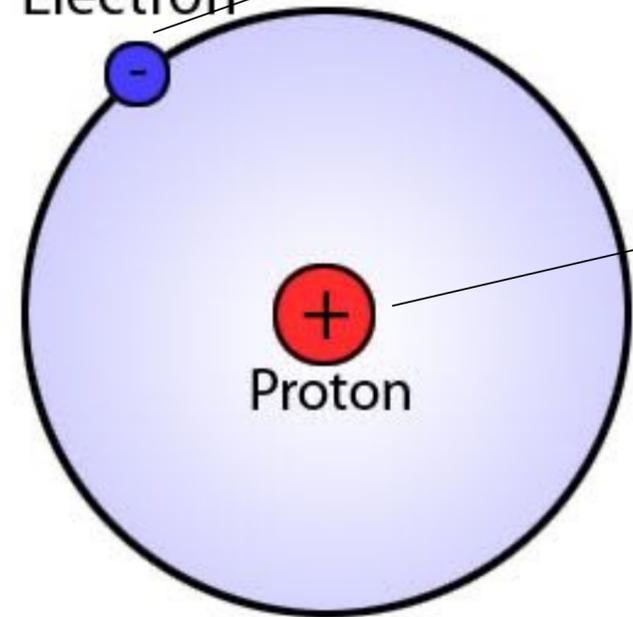
- Čo sú to elementárne častice?
- Aké majú vlastnosti (trocha relativity)?
- Ako študujeme elementárne častice (urýchľovače a detektory)?
- Štandardný model elementárnych častíc
- Ako častice interagujú (popis interakcií)?
- Štandardný model nie je konečná stanica..

Čo sú to elementárne častice?

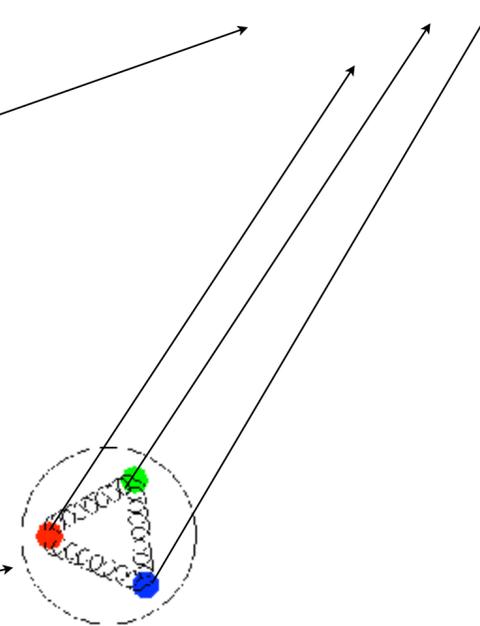
# Atóm vodíka

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	*	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
				* 57 La	* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	* 61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb	* 71 Lu
				** 89 Ac	** 90 Th	** 91 Pa	** 92 U	** 93 Np	** 94 Pu	** 95 Am	** 96 Cm	** 97 Bk	** 98 Cf	** 99 Es	** 100 Fm	** 101 Md	** 102 No	** 103 Lr

Electron



Elementárne častice



Protón má vnútornú štruktúru





# Niektoré vlastnosti častíc (trocha relativity)

# Celková energia v makrosvete (rýchlosti sú malé)



Obr.: [https://en.wikipedia.org/wiki/Homer\\_Simpson](https://en.wikipedia.org/wiki/Homer_Simpson)

celková energia = pokojová energia

$$E_{total} = mc^2$$

Pripomienka:  $c = 300\,000\,000$  m/s



celková energia = pokojová energia + pohybová energia

$$E_{total} = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

# Celková energia v mikrosvete (rýchlosti sú relativistické)

$$E_{total} = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Extrémne prípady:

$$E_{total} = pc \quad (\text{pre } p \gg m)$$

Protón na LHC,  $\gamma$

$$E_{total} = mc^2 \quad (\text{pre } m \gg p)$$

$E = mc^2$  - minimálna energia potrebná na existenciu voľnej častice.



Pripomenka:  $c = 300\,000\,000$  m/s

Obr.: [https://en.wikipedia.org/wiki/Homer\\_Simpson](https://en.wikipedia.org/wiki/Homer_Simpson)

# Celková energia v mikrosvete (rýchlosti sú relativistické)

$$E_{total} = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Extrémne prípady:

$$E_{total} = pc \quad (\text{pre } p \gg m)$$

Protón na LHC,  $\gamma$

$$E_{total} = mc^2 \quad (\text{pre } m \gg p)$$

$E = mc^2$  - minimálna energia potrebná na existenciu voľnej častice.

Hmotnosť častíc sa nemení a nájdeme ju v tabuľkách!  
T.j. všetky protóny majú tú istú hmotnosť!

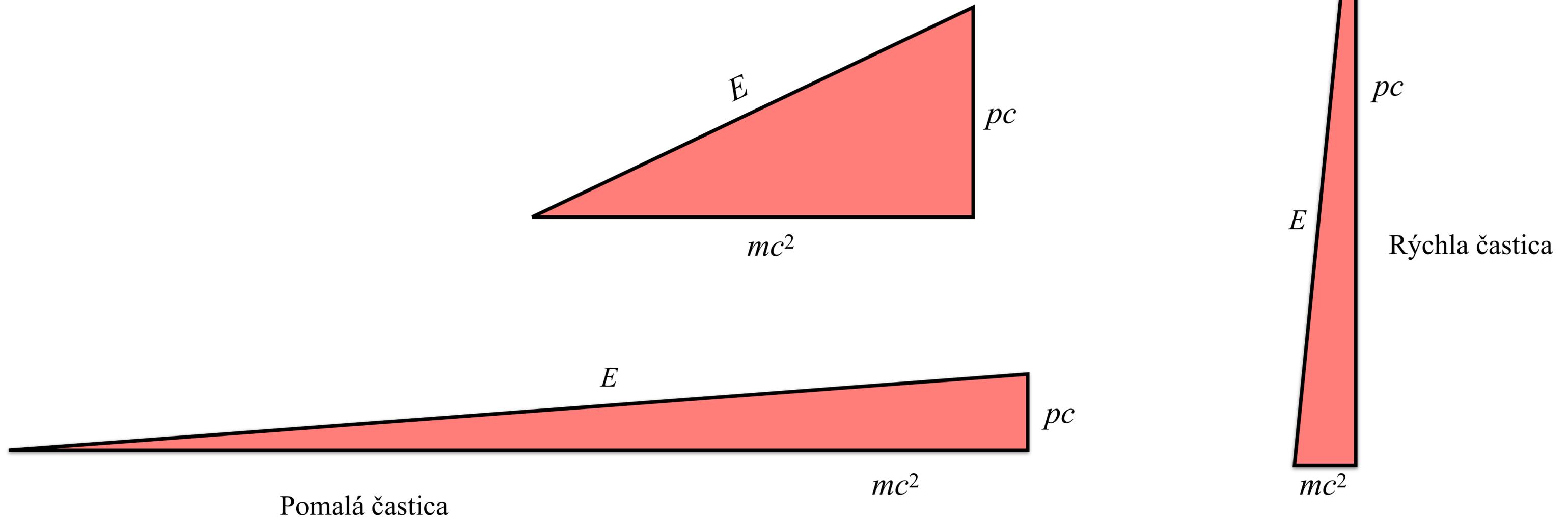


Pripomenka:  $c = 300\,000\,000$  m/s

Obr.: [https://en.wikipedia.org/wiki/Homer\\_Simpson](https://en.wikipedia.org/wiki/Homer_Simpson)

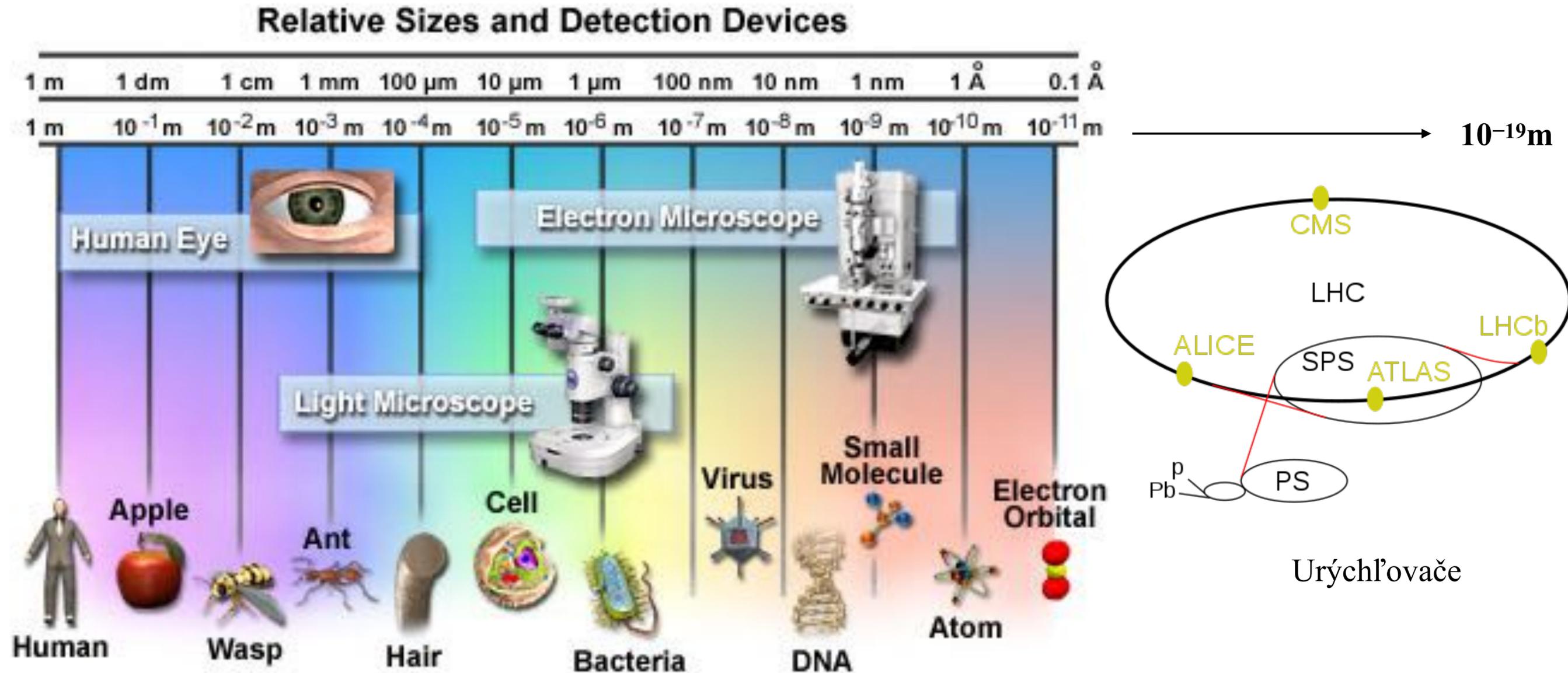
Pomôcka na zapamätanie si základného vzťahu pre celkovú energiu voľnej častice: je to vlastne Pytagorova veta:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$



Ako študujeme elementárne  
častice (urýchľovače a  
detektory)?

# Škály v prírode



**Figure 1**

Obr.: <https://www.tes.com/lessons/hNjtfiM9zJGzCQ/viruses-and-bacteria>

# Urýchľovanie

Urýchľovanie  $\equiv$  zvyšovanie rýchlosti

Pre nabitú časticu:

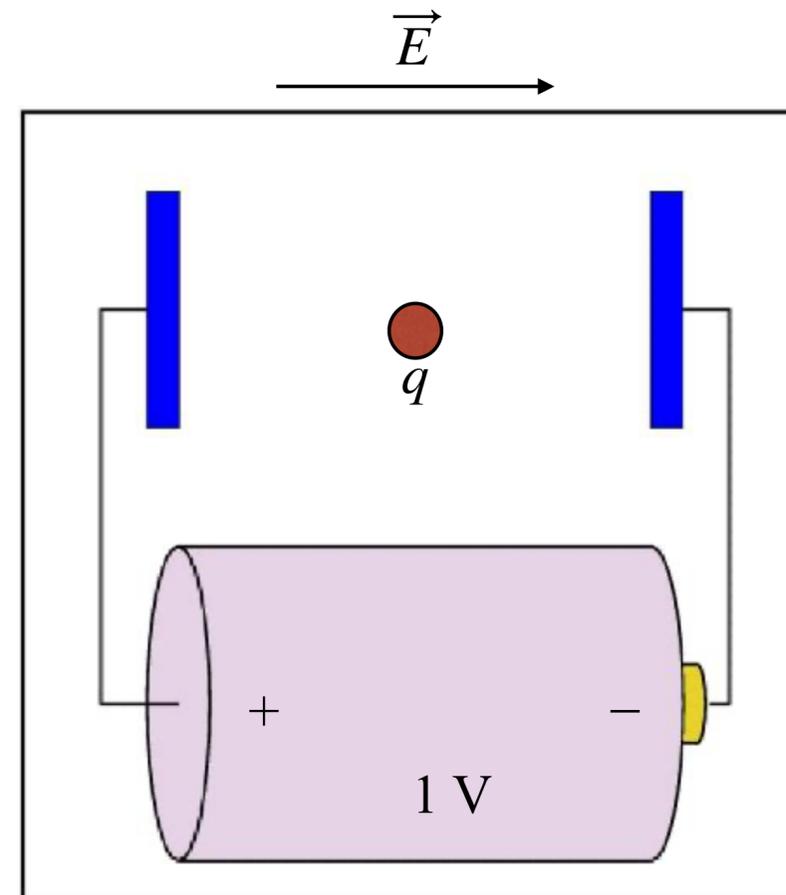
$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = q \vec{E}$$

# Urýchľovanie

Urýchľovanie  $\equiv$  zvyšovanie rýchlosti

Pre nabitú časticu:

$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = q \vec{E}$$



urýchľovač  $\equiv$  prístroj, ktorý urýchľuje častice.

- ak náboj častice  $|q| = 1|e|$ , potom prírastok energie nabitej častice, ak preletí medzi doskami bude  $\Delta E = 1 \text{ eV}$
- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

# Urýchľovanie

Urýchľovanie  $\equiv$  zvyšovanie rýchlosti

Pre nabitú časticu:

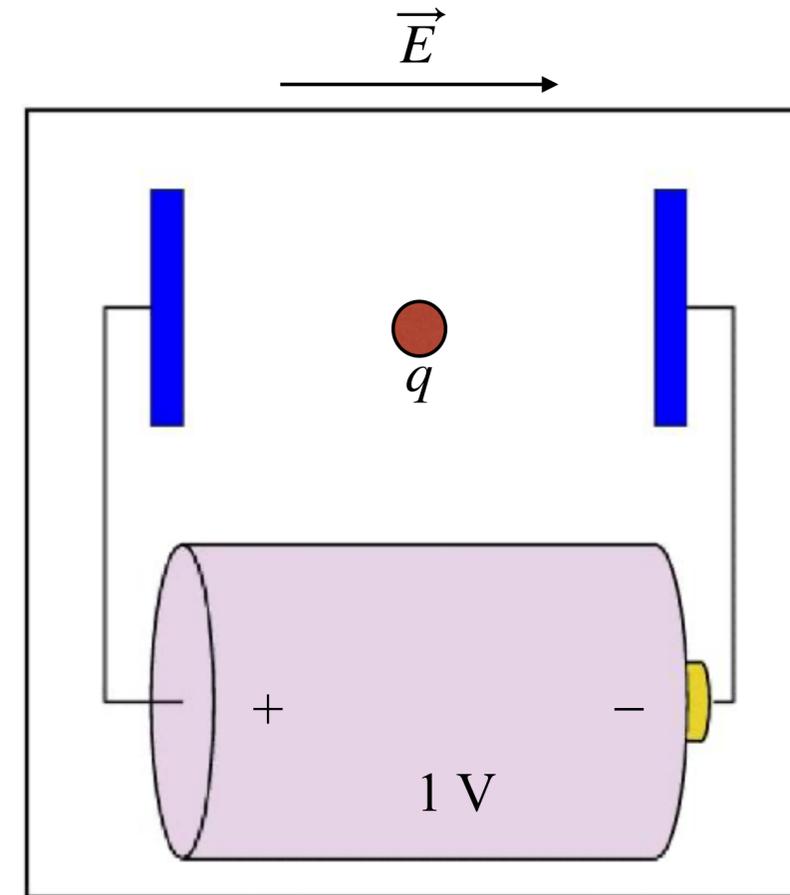
$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = q \vec{E}$$

Prečo zvyšujeme rýchlosť?

Aby sme zvýšili hybnosť a pohybovú energiu:

$$\vec{p} = m \vec{v} \quad E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2$$

Prečo chceme zvýšiť hybnosť a energiu?



urýchľovač  $\equiv$  prístroj, ktorý urýchľuje častice.

- ak náboj častice  $|q| = 1|e|$ , potom prírastok energie nabitej častice, ak preletí medzi doskami bude  $\Delta E = 1 \text{ eV}$
- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

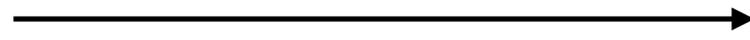
# Urýchľovače v časticovej fyzike

So zvyšovaním hybnosti:

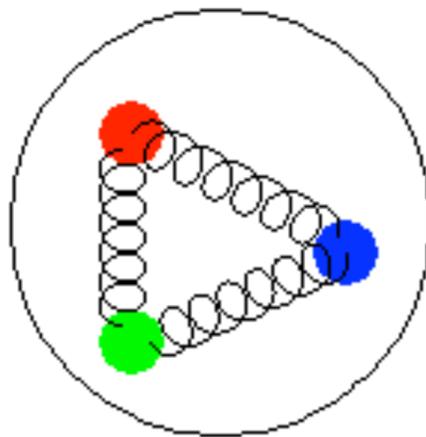
1. Vidíme na menšie vzdialenosti:

$$\lambda = \hbar/p$$

$$E_{\text{kin}} = 10 \text{ GeV}$$



$$\lambda \sim 0,01 \text{ fm}$$

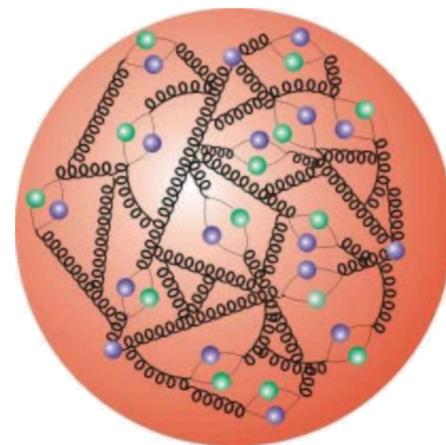


$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$E_{\text{kin}} = 1 \text{ TeV}$$



$$\lambda \sim 0,0001 \text{ fm}$$



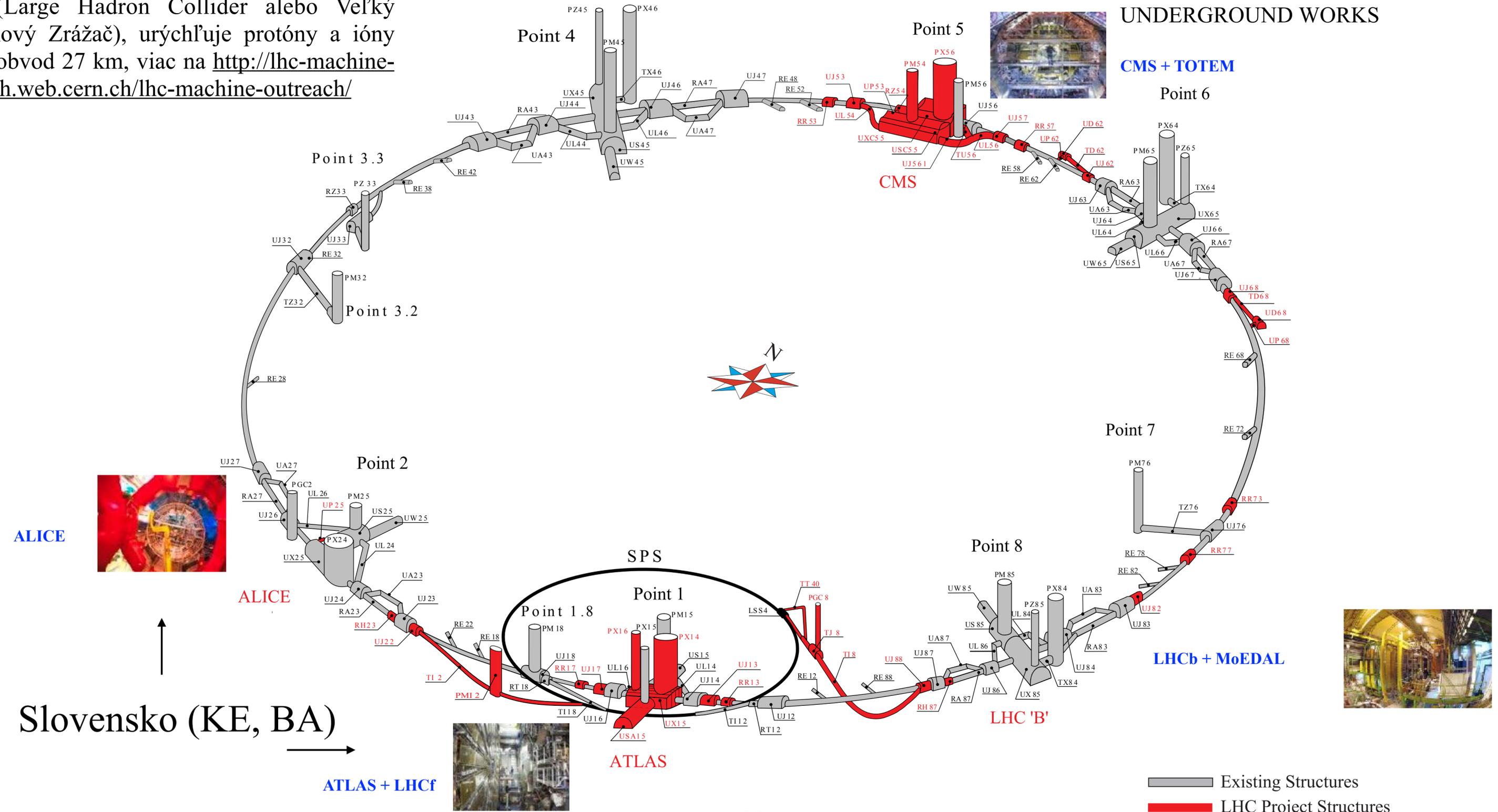
So zvyšovaním kinetickej energie:

2. Narodia sa ťažšie objekty:

$$E = mc^2$$

# Príklad moderného urýchľovača: Large Hadron Collider v CERN

LHC (Large Hadron Collider alebo Veľký Hadrónový Zrážač), urýchľuje protóny a ióny olova, obvod 27 km, viac na <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/>



UNDERGROUND WORKS

CMS + TOTEM

Point 6

Point 7

Point 8

LHCb + MoEDAL



ALICE

ALICE

SPS

Point 1

ATLAS

LHC 'B'

Slovensko (KE, BA)

ATLAS + LHCf

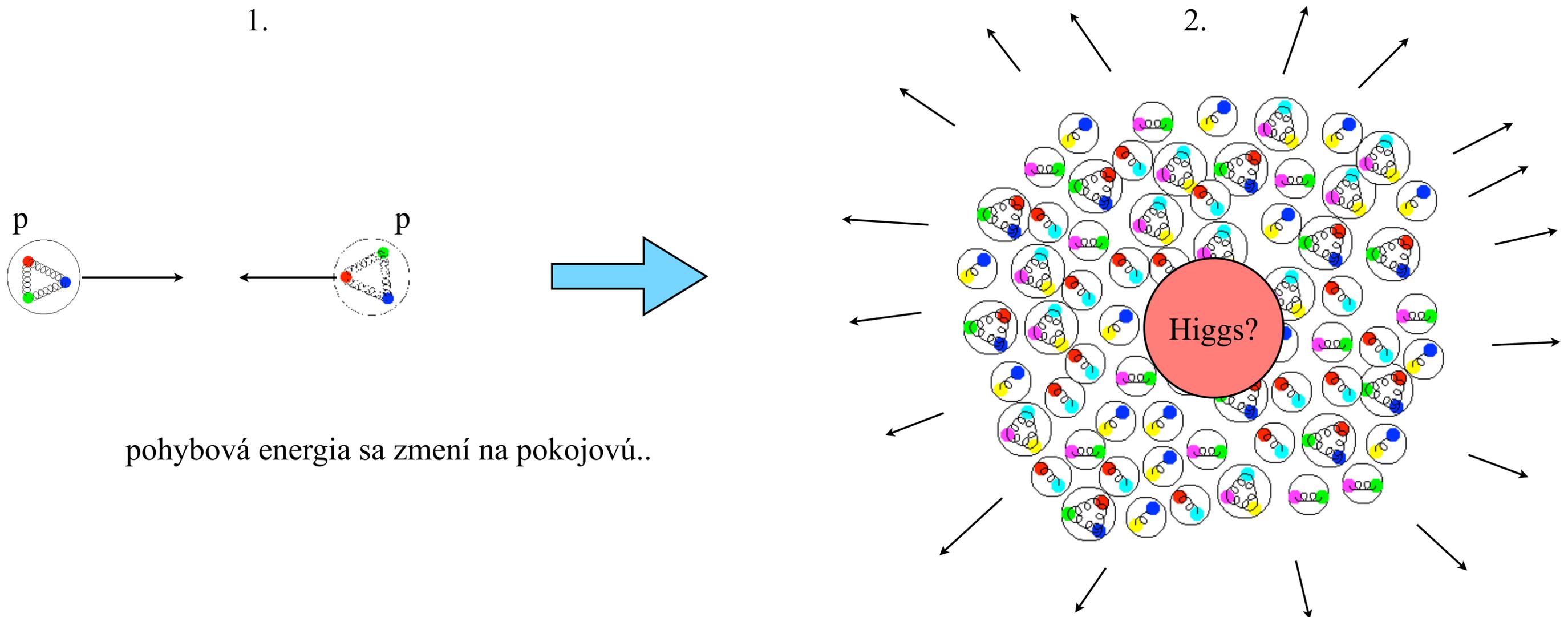
Existing Structures

LHC Project Structures

# Celková energia pred zrážkou = celková energia po zrážke

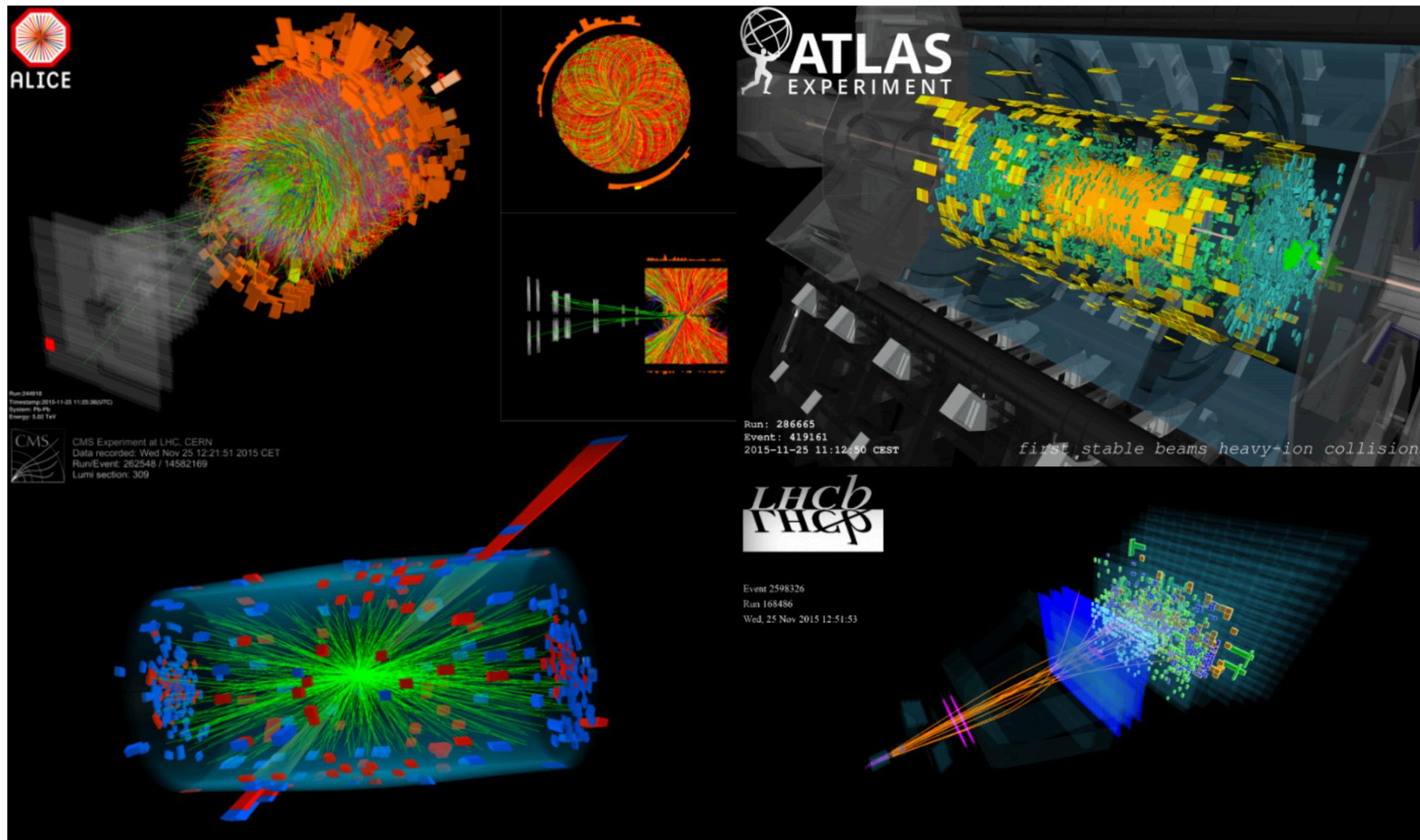
(Zákon zachovania energie)

13 TeV (pokoiová energia protónov  $\approx 2$  GeV)



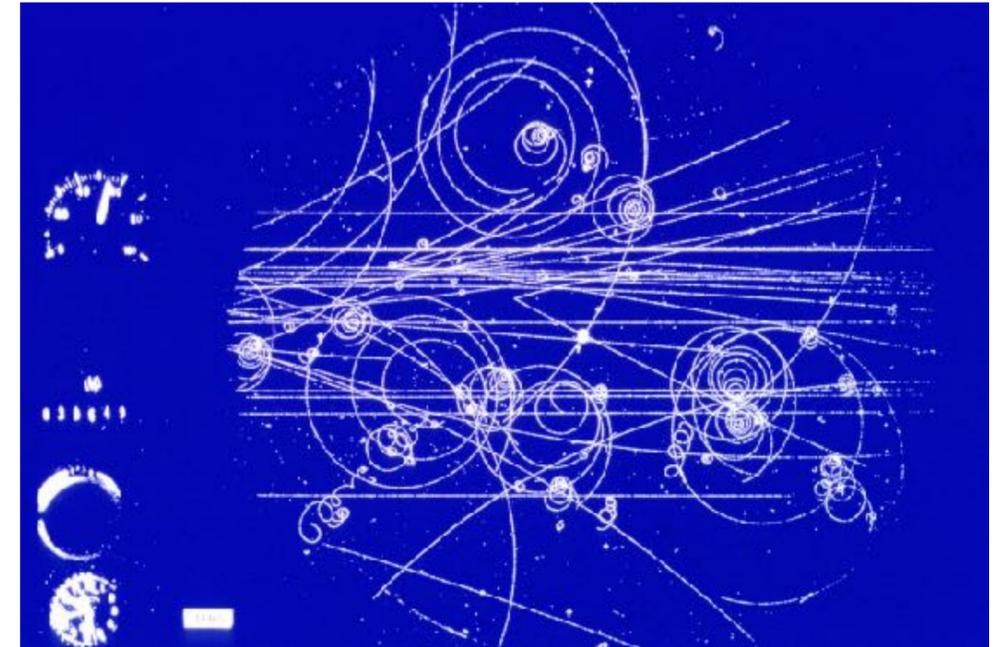
**Čím vyššia energia zväzku, tým viac a ťažších častíc sa v zrážke narodí!**

# Zrážky na LHC

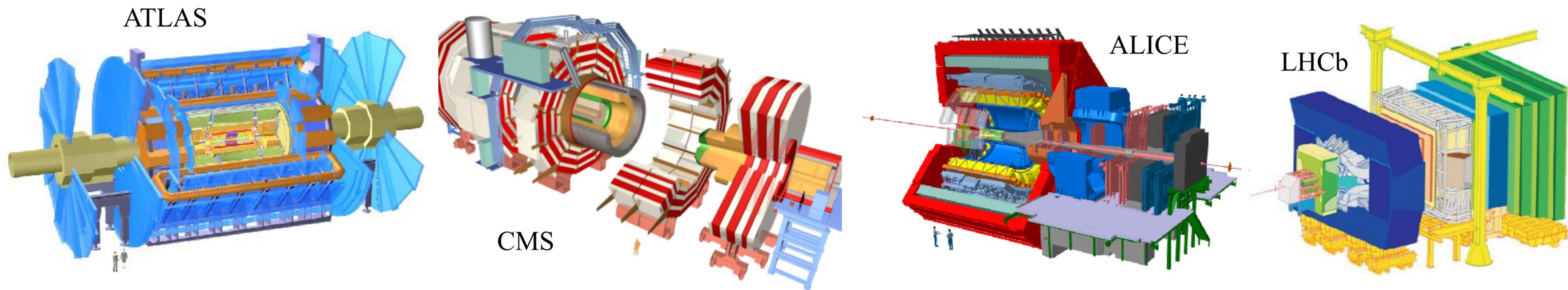


# Detekcia častíc

o existencii častice vieme na základe jej interakcie s prostredím (detektor)



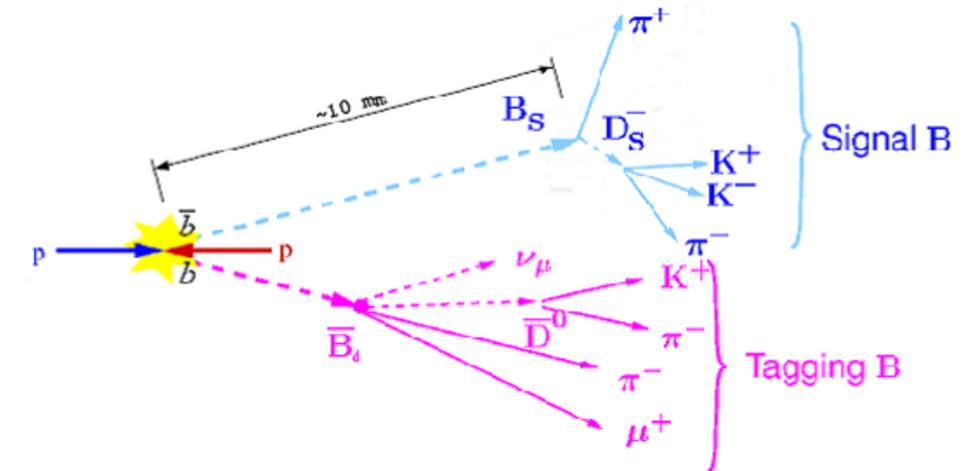
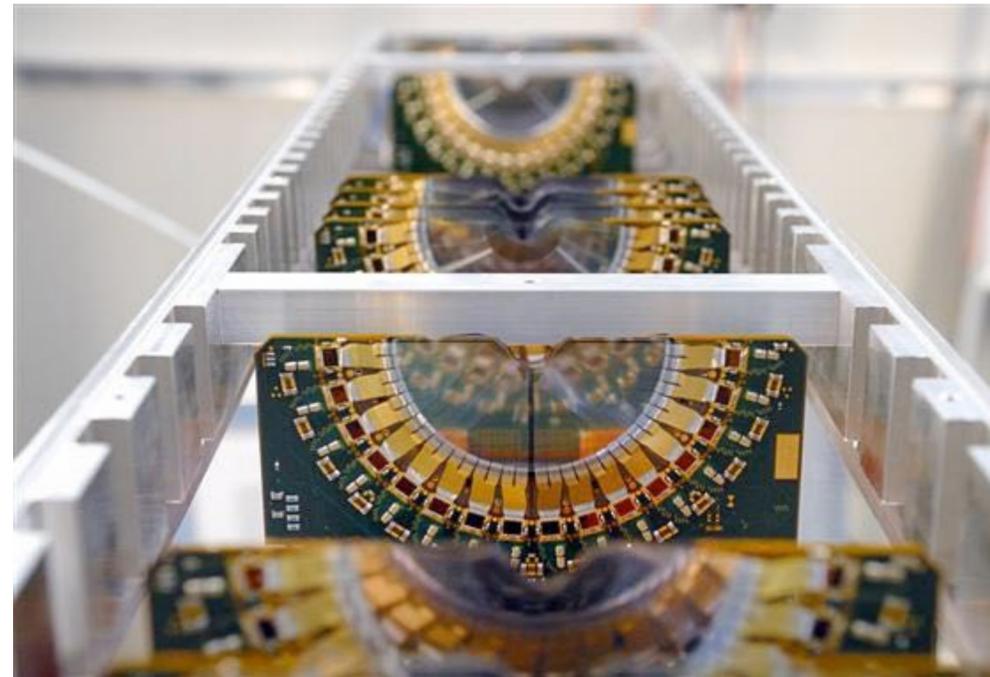
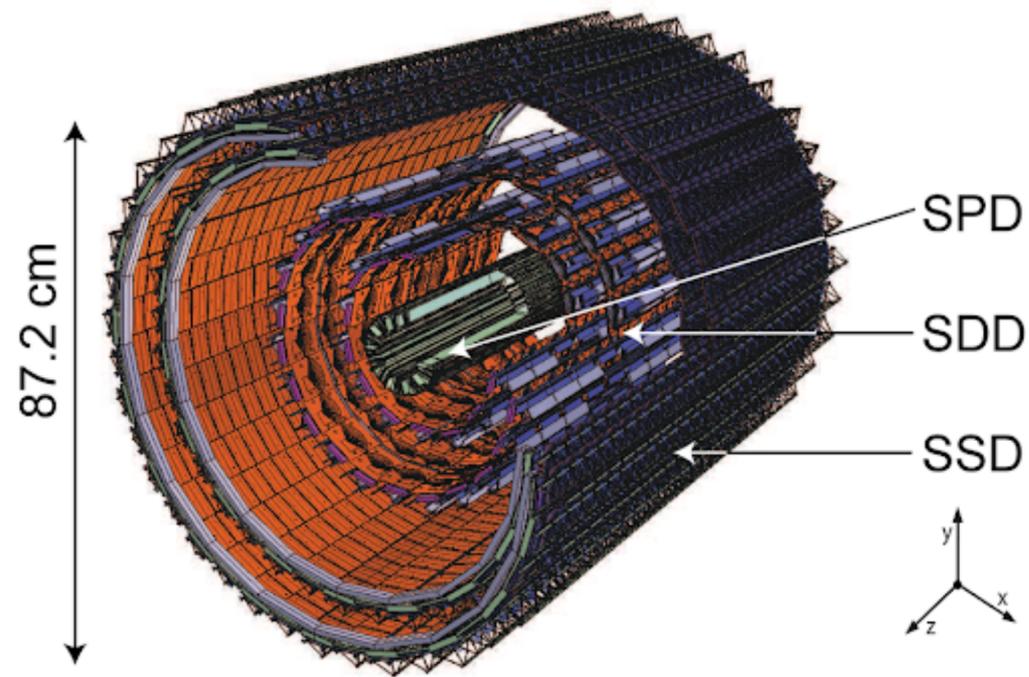
# Príklad detekcie elementárnych častíc: detektory na LHC



- výber a usporiadanie detektorov sleduje fyzikálne ciele experimentu
- vo všeobecnosti - chceme vedieť, aké častice vznikli v zrážke a aké majú vlastnosti
- častice sú:
  - ➔ nabité a neutrálne
  - ➔ krátkožijúce a dlhožijúce
  - ➔ ťažké a ľahké
  - ➔ rýchle a pomalé

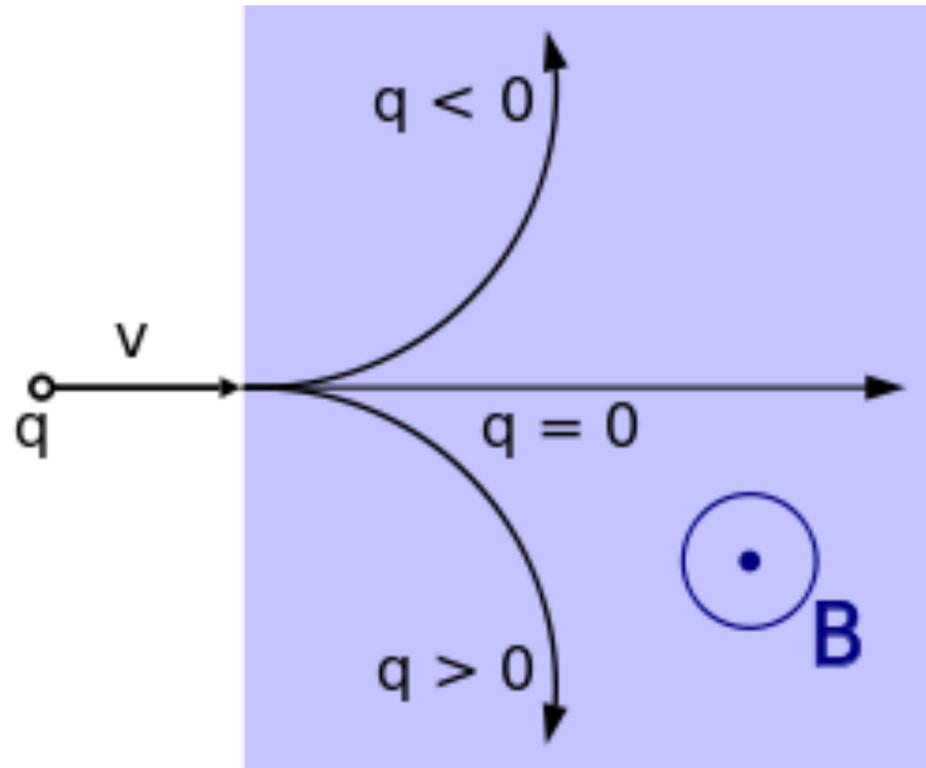
**Na každú vlastnosť je dobrý iný materiál alebo typ detektora ⇒ cibul'ová štruktúra!**

# Dráhové detektory



- dráhové detektory najbližšie k zrážke: kremíkové pixelové detektory
- účel: určiť miesto zrážky a odlíšiť miesta rozpadov stredne žijúcich častíc

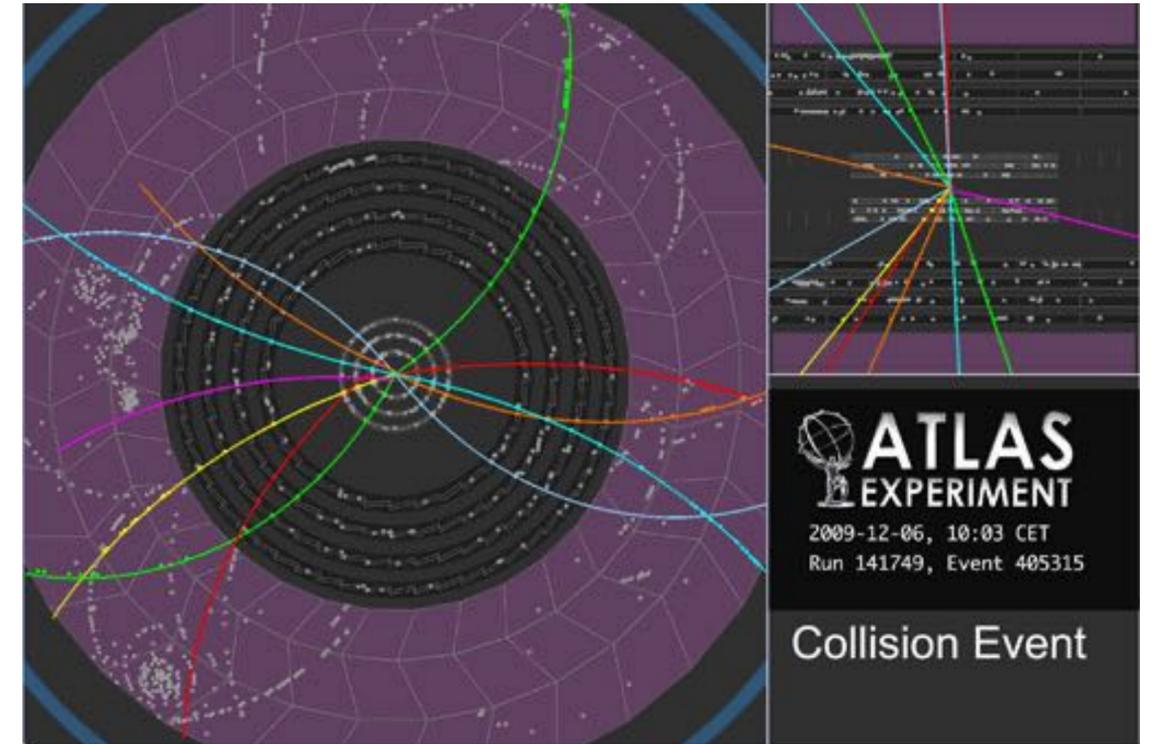
# Dráhové detektory



Obr: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_force)

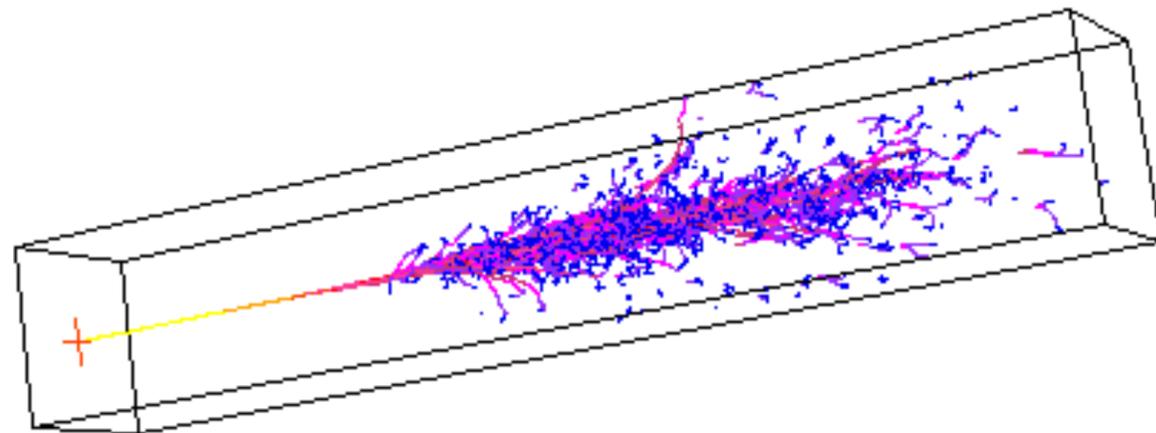
$$R = \frac{mv}{qB}$$

$$p = qBR$$

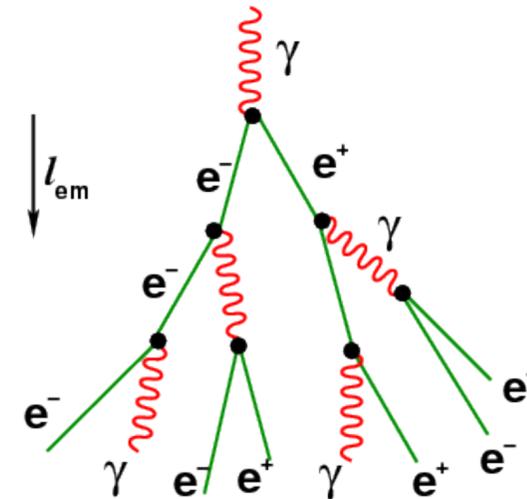


- dráhové detektory merajú hybnosť nabitej častice zo zakrivenia jej dráhy
- čím vyššia hybnosť, tým horšia presnosť - počet detektorových vrstiev pomáha

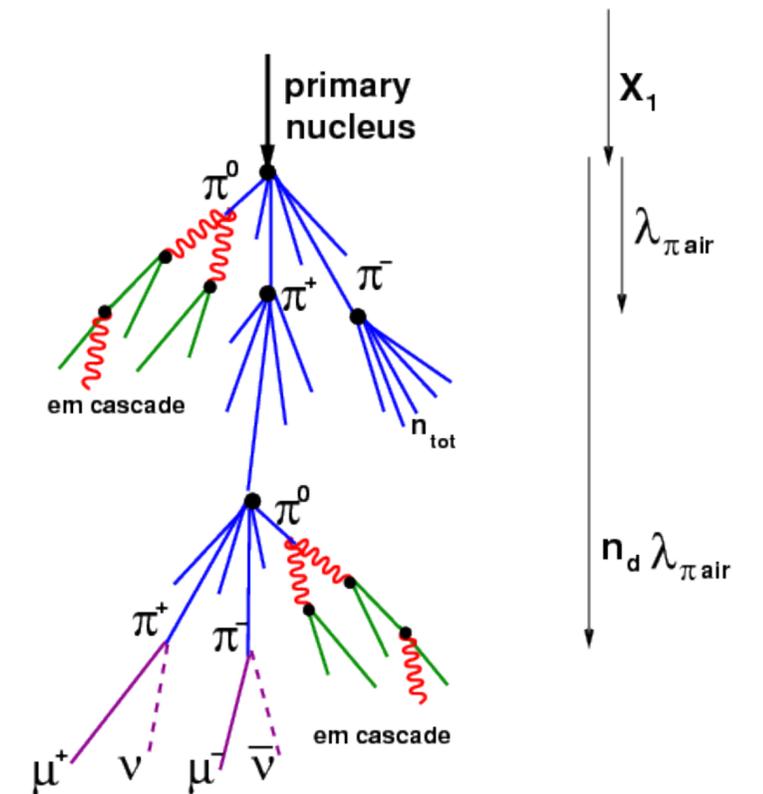
# Elektromagnetické kalorimetre



em cascade

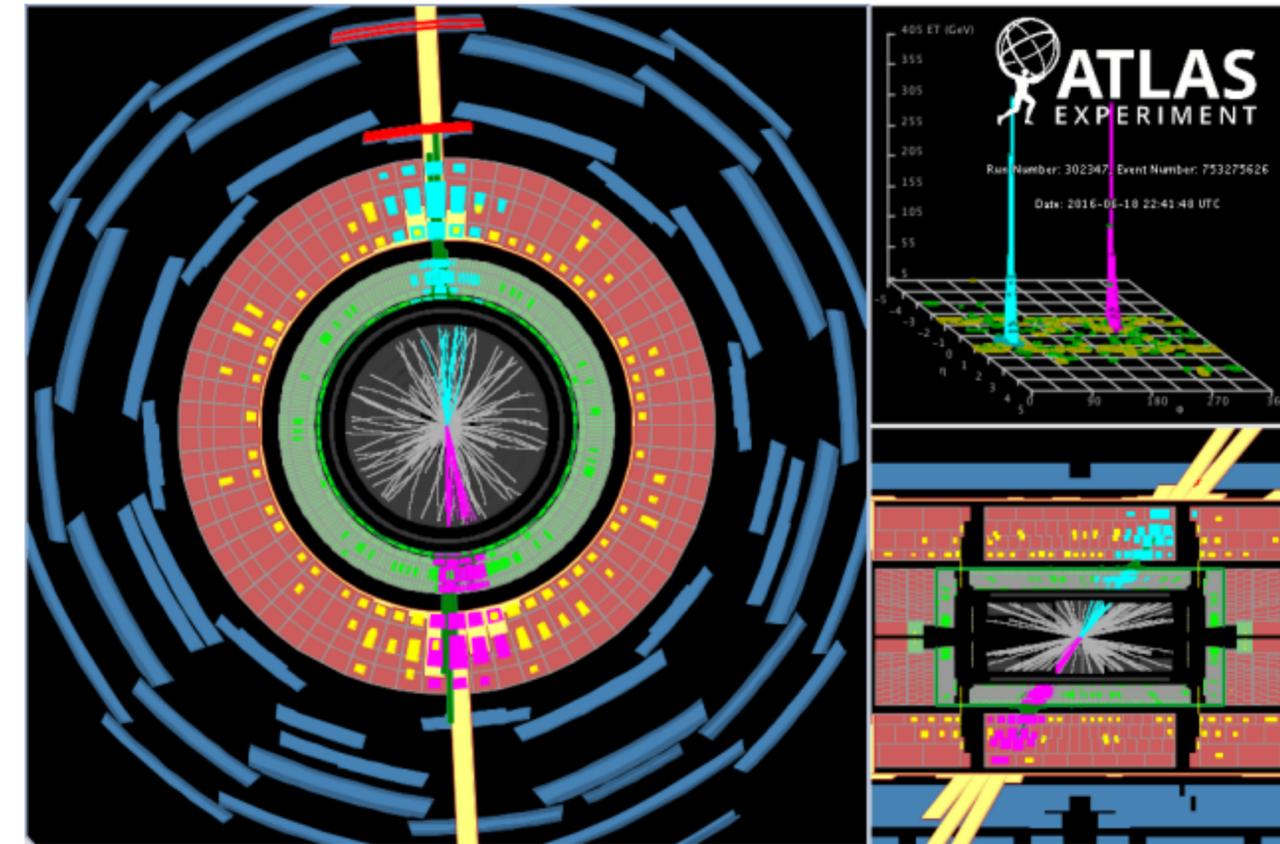
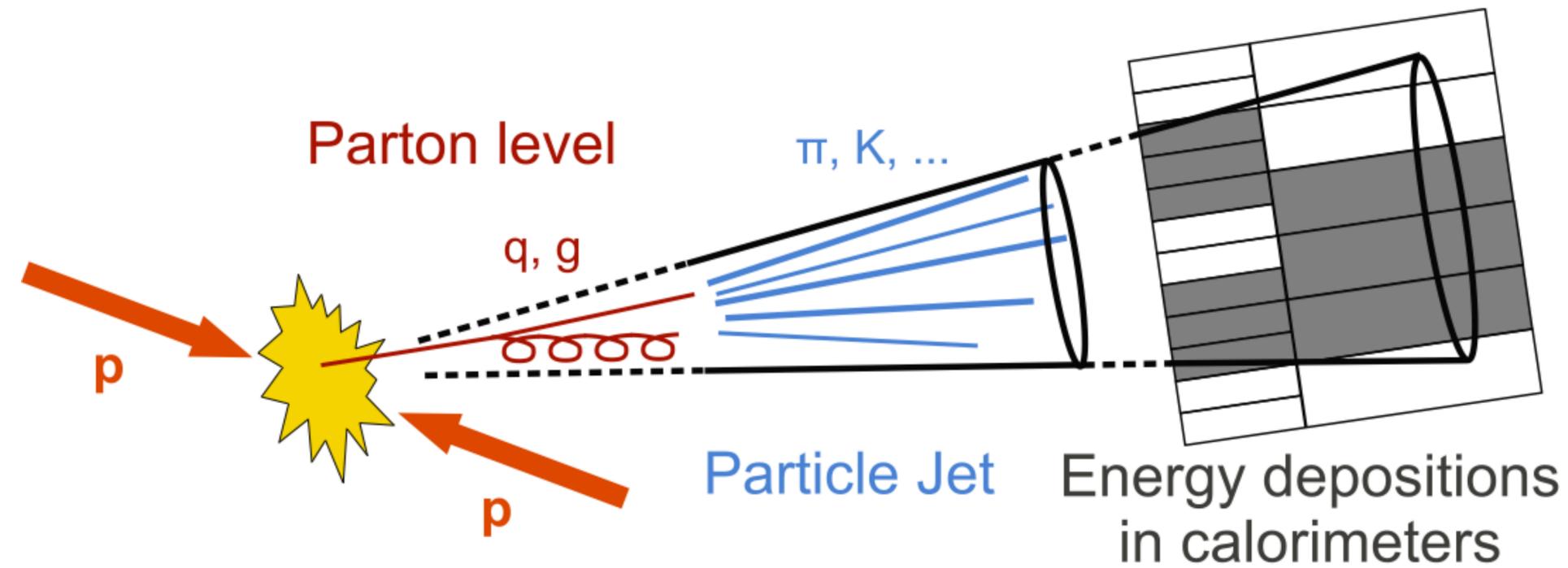


hadronic cascade



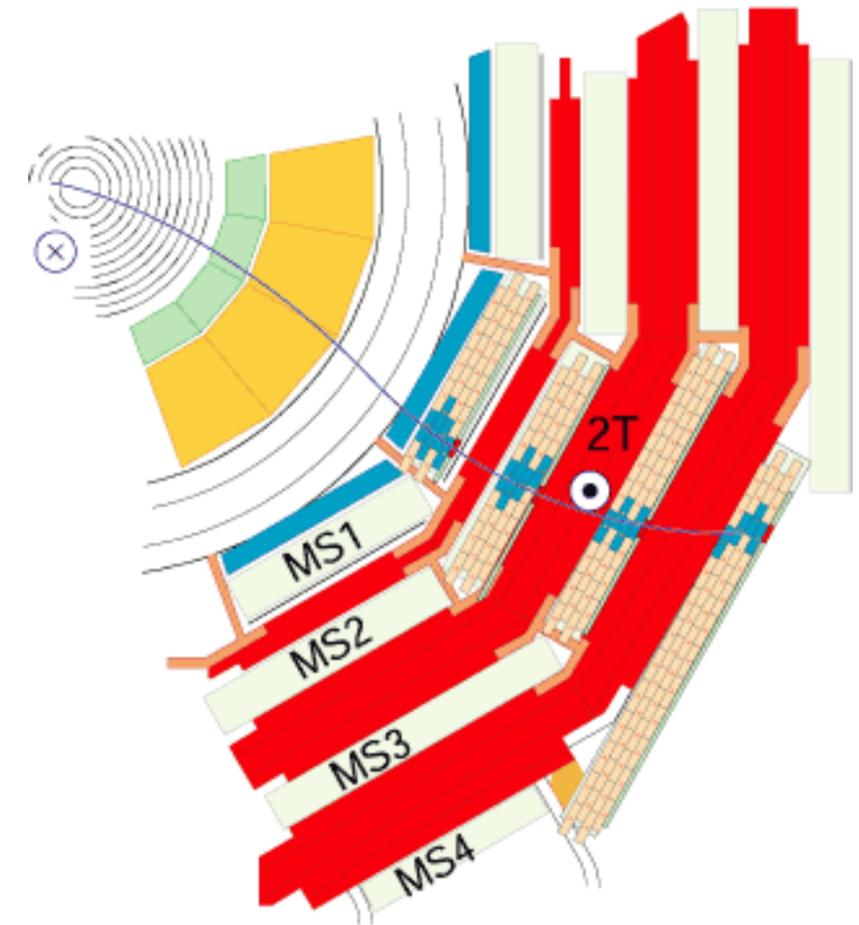
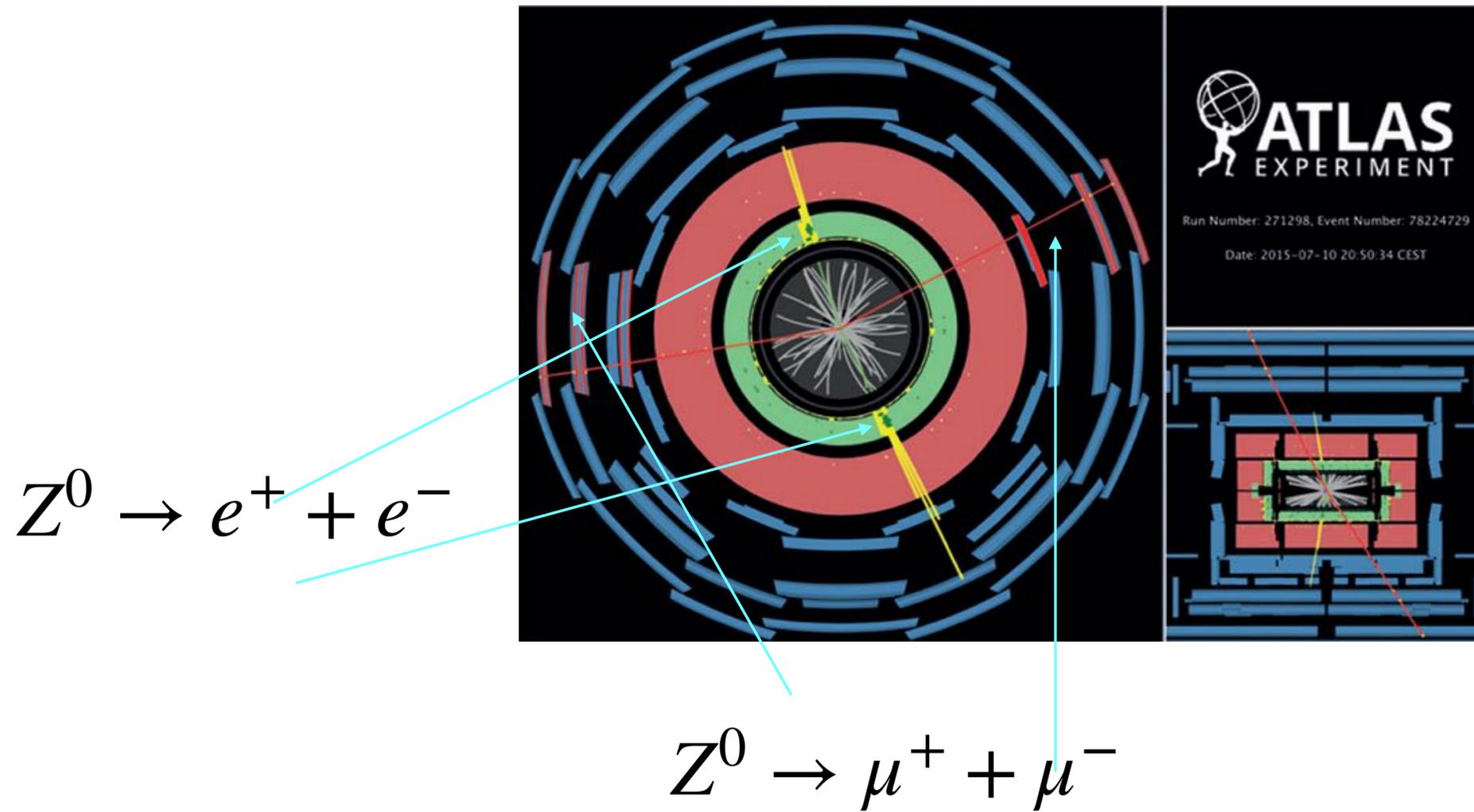
- absorbujú energiu elektricky nabitých častíc a fotónov

# Hadrónové kalorimetre



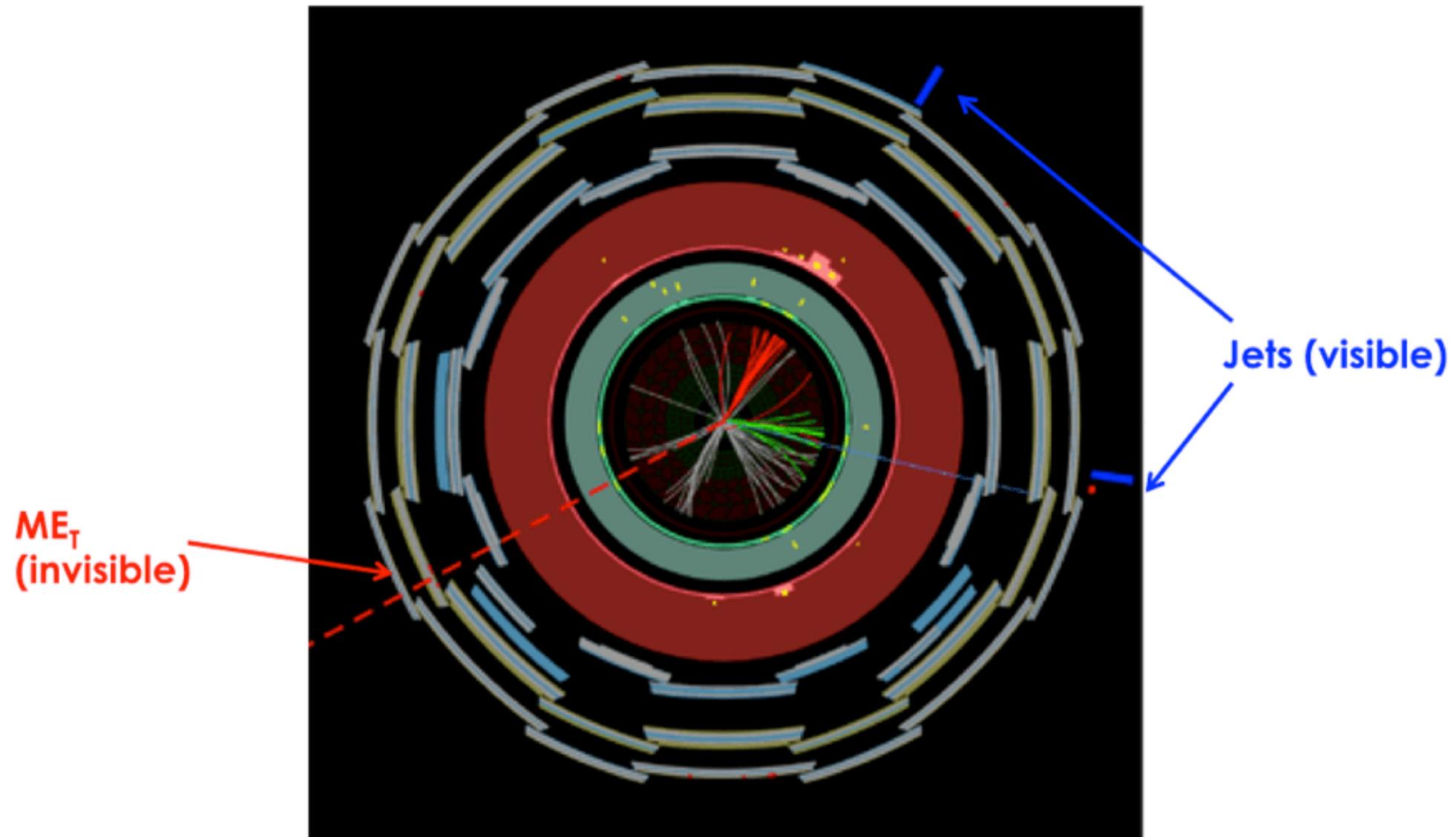
- absorbujú energiu spršok hadrónov pochádzajúcich z kvarkov a z gluónov

# Miónové detektory



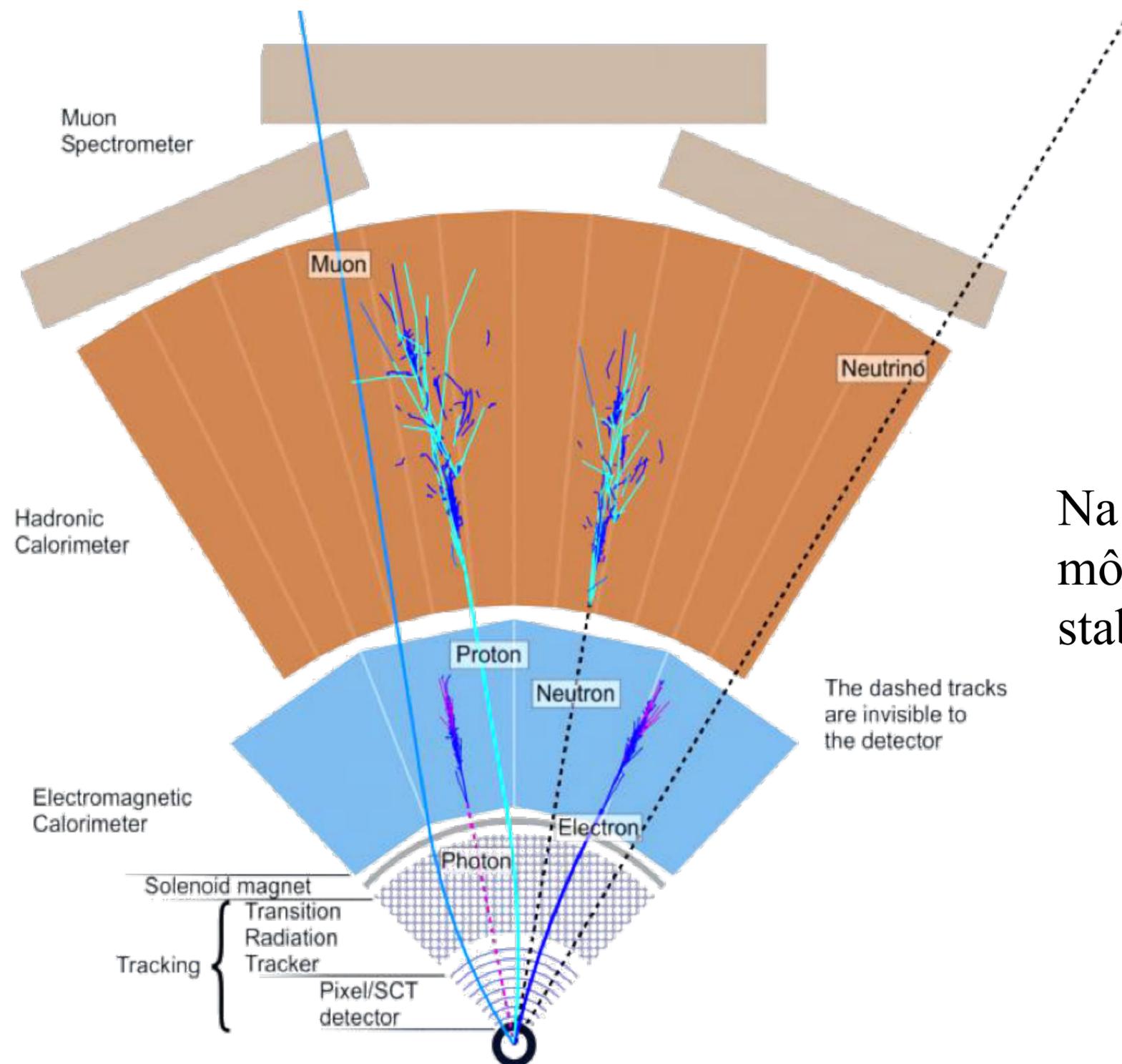
- mióny prechádzajú materiálom ľahko, lebo sú ťažké a neinteragujú silno

# Chýbajúca hybnosť - neutrína



- okrem zákona zachovania energie platí pre zrážku aj zákon zachovania hybnosti!

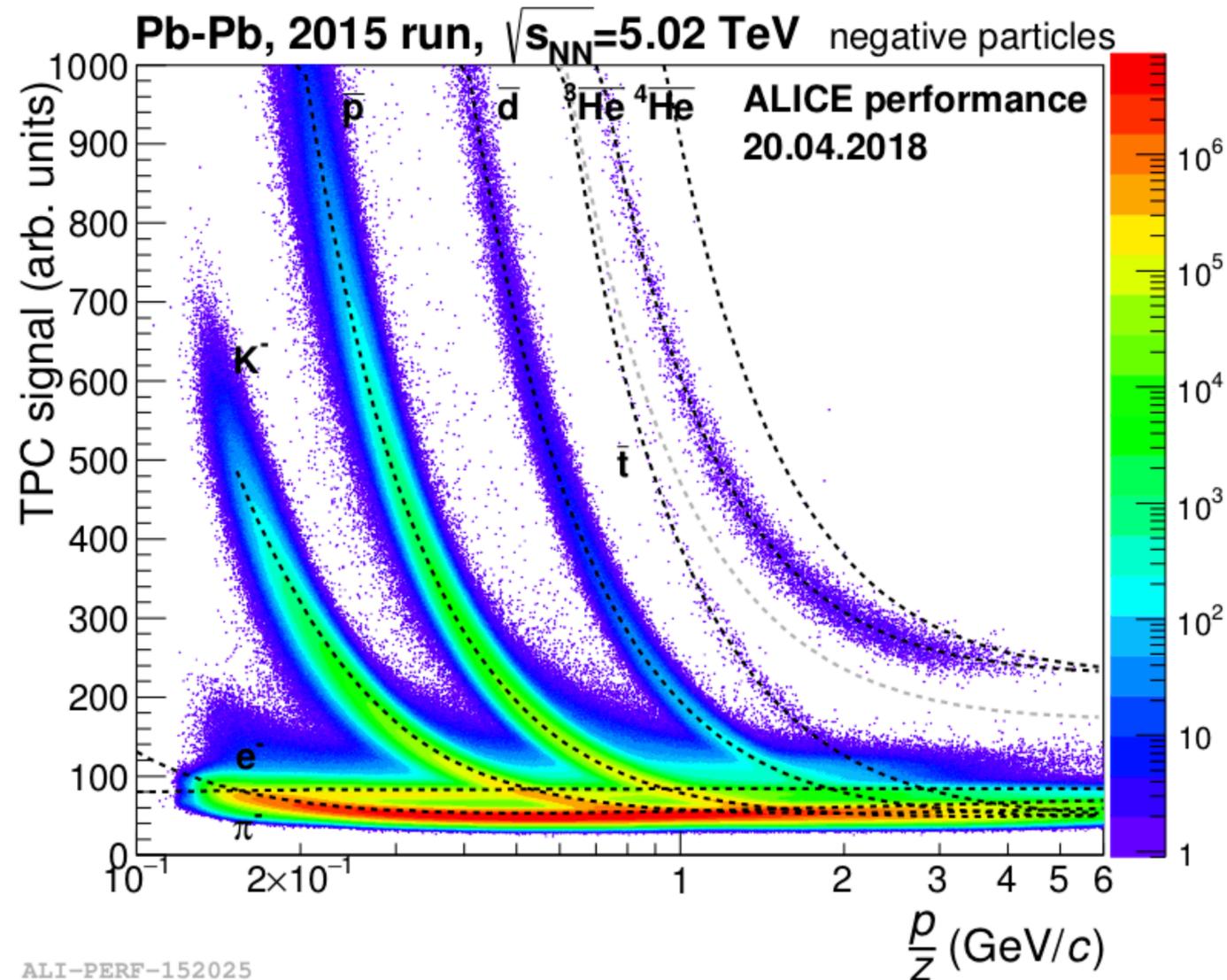
# Identifikácia stabilných a dlhožijúcich častíc v detektore ATLAS



Na dnešných Masterclasses budeme môcť voľným okom identifikovať stabilné a dlhožijúce častice!

# Identifikácia stabilných a dlhožijúcich častíc v detektore ALICE

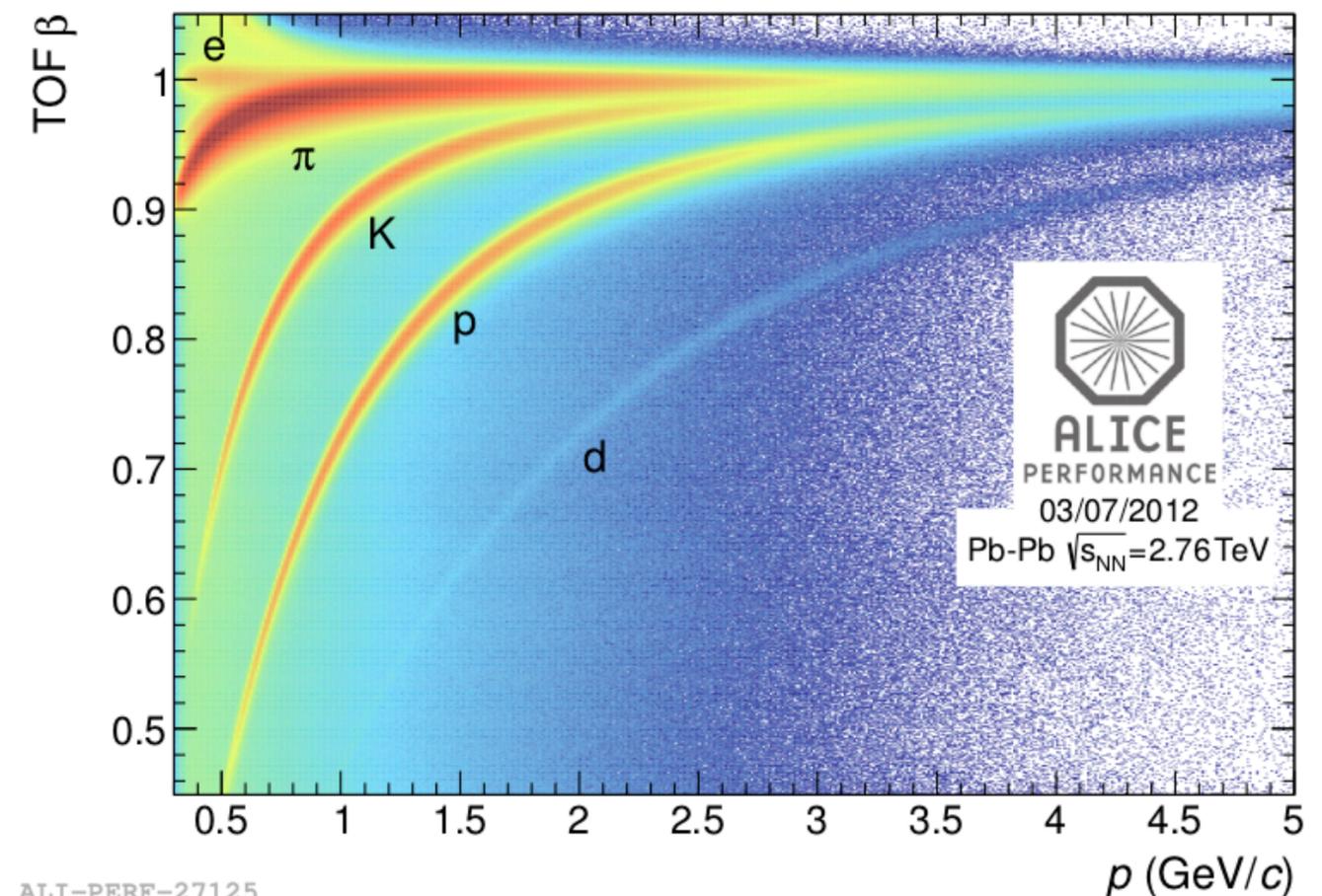
**hmotnosť a náboj = ID častice**



$$m = \frac{1}{c^2} \sqrt{E^2 - p^2 c^2}$$

A čo krátkožijúce častice?

$$m = \frac{p}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2}$$



# Identifikácia (a.k.a. zisťovanie hmotnosti) krátkožijúcej častice

- Krátkožijúca: nestihneme zmerať jej energiu alebo hybnosť alebo rýchlosť, aby sme určili jej hmotnosť (a tým ju identifikovali).
- môžeme ale zmerať energiu alebo hybnosť alebo rýchlosť jej rozpadových produktov a získať hmotnosť pomocou nich
- využijeme pritom:
  - ➔ hmotnosť je rovnaká v každej vzťažnej sústave
  - ➔ platí zákon zachovania energie a hybnosti

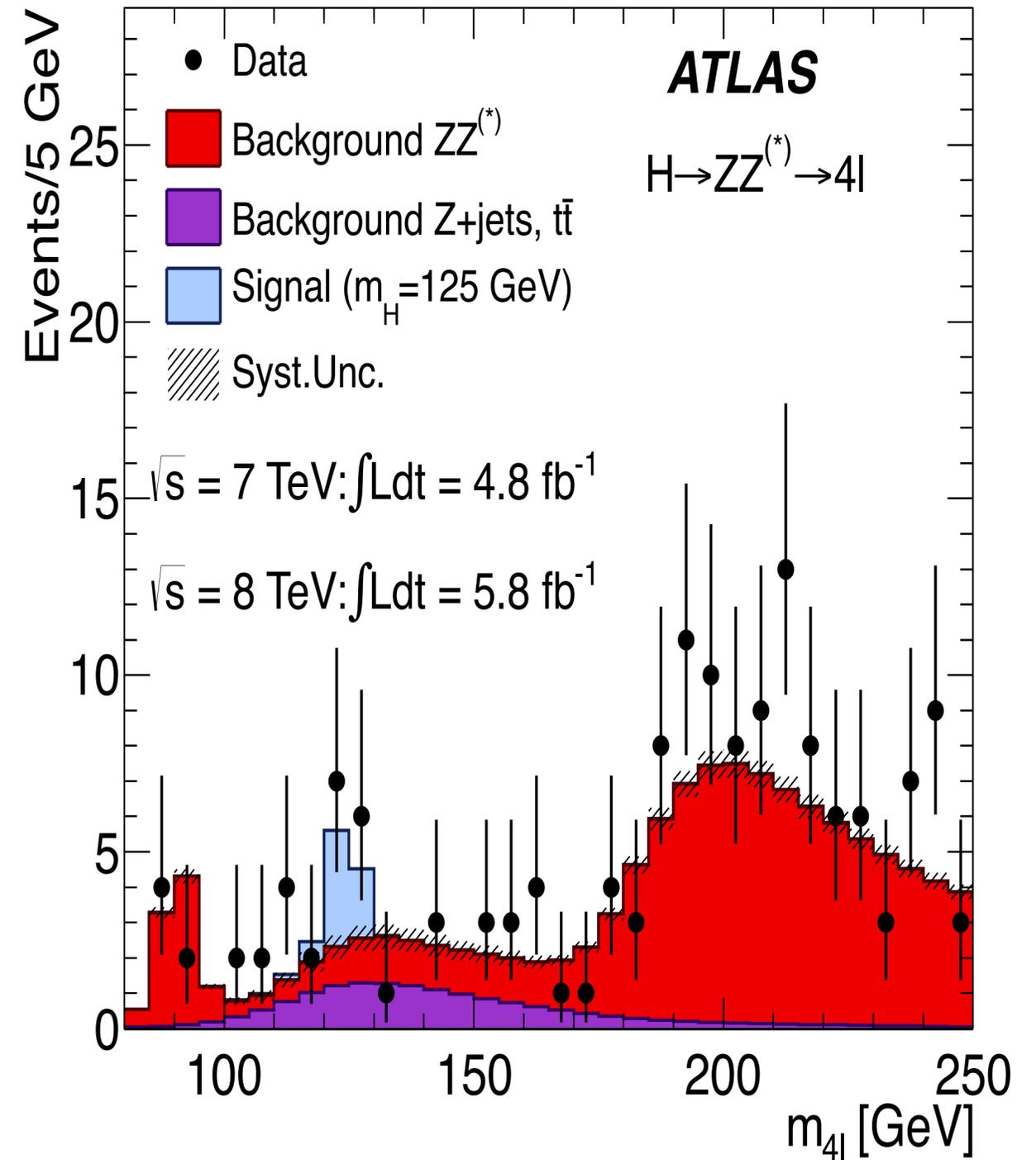
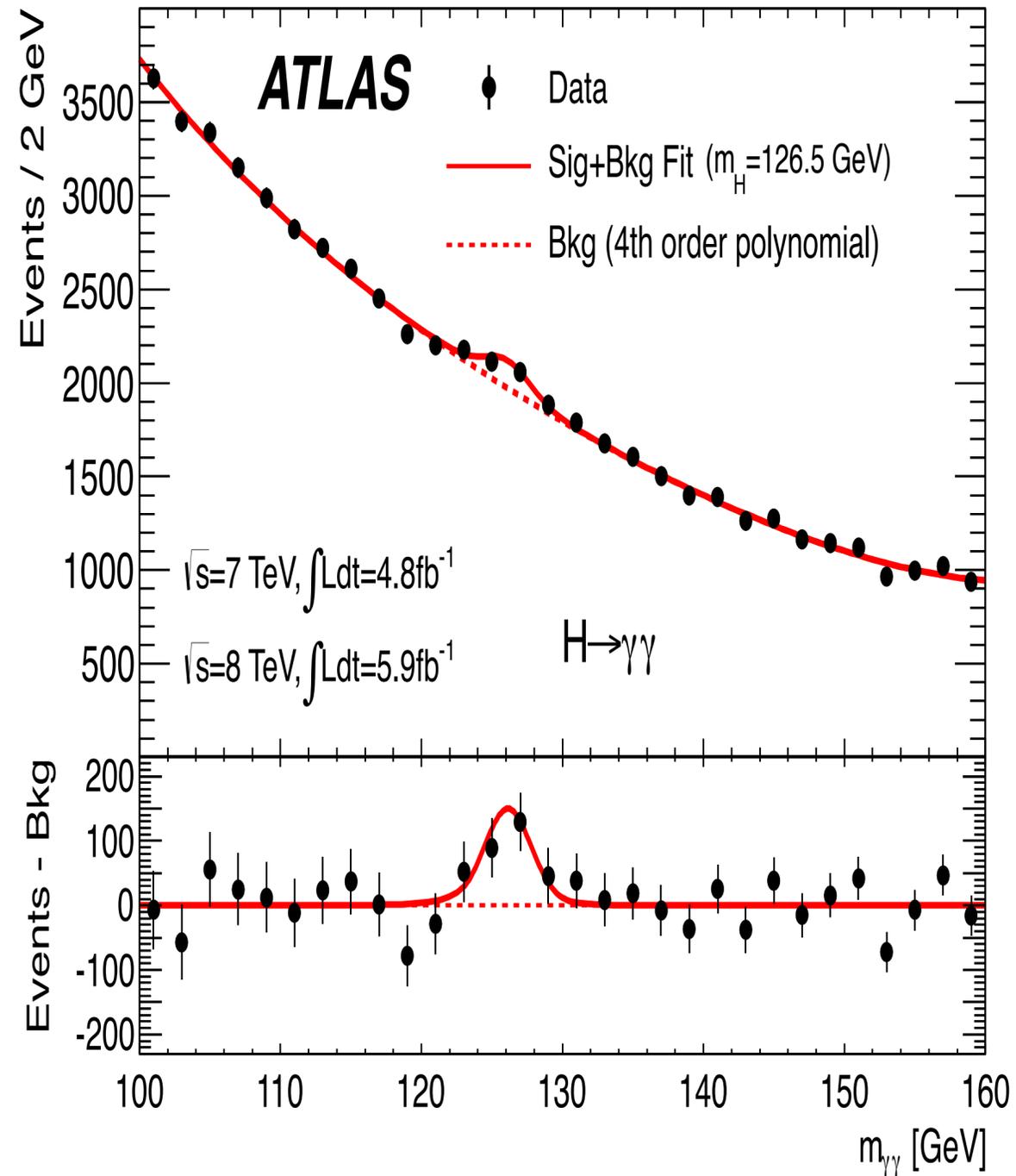
$$X \rightarrow A + B$$

$$m_X = \frac{1}{c^2} \sqrt{(E_A + E_B)^2 - (\vec{p}_A + \vec{p}_B)^2 c^2}$$

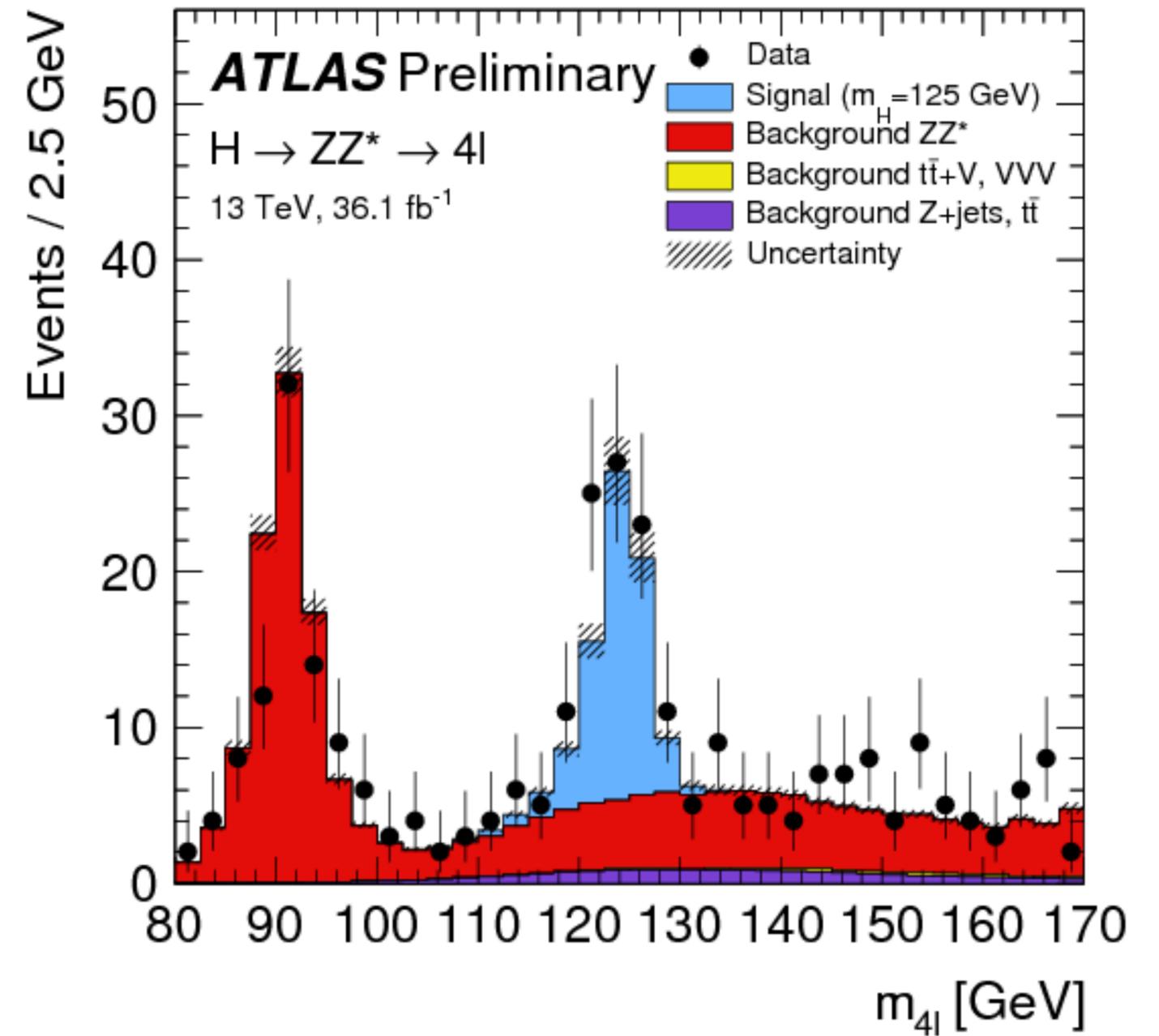
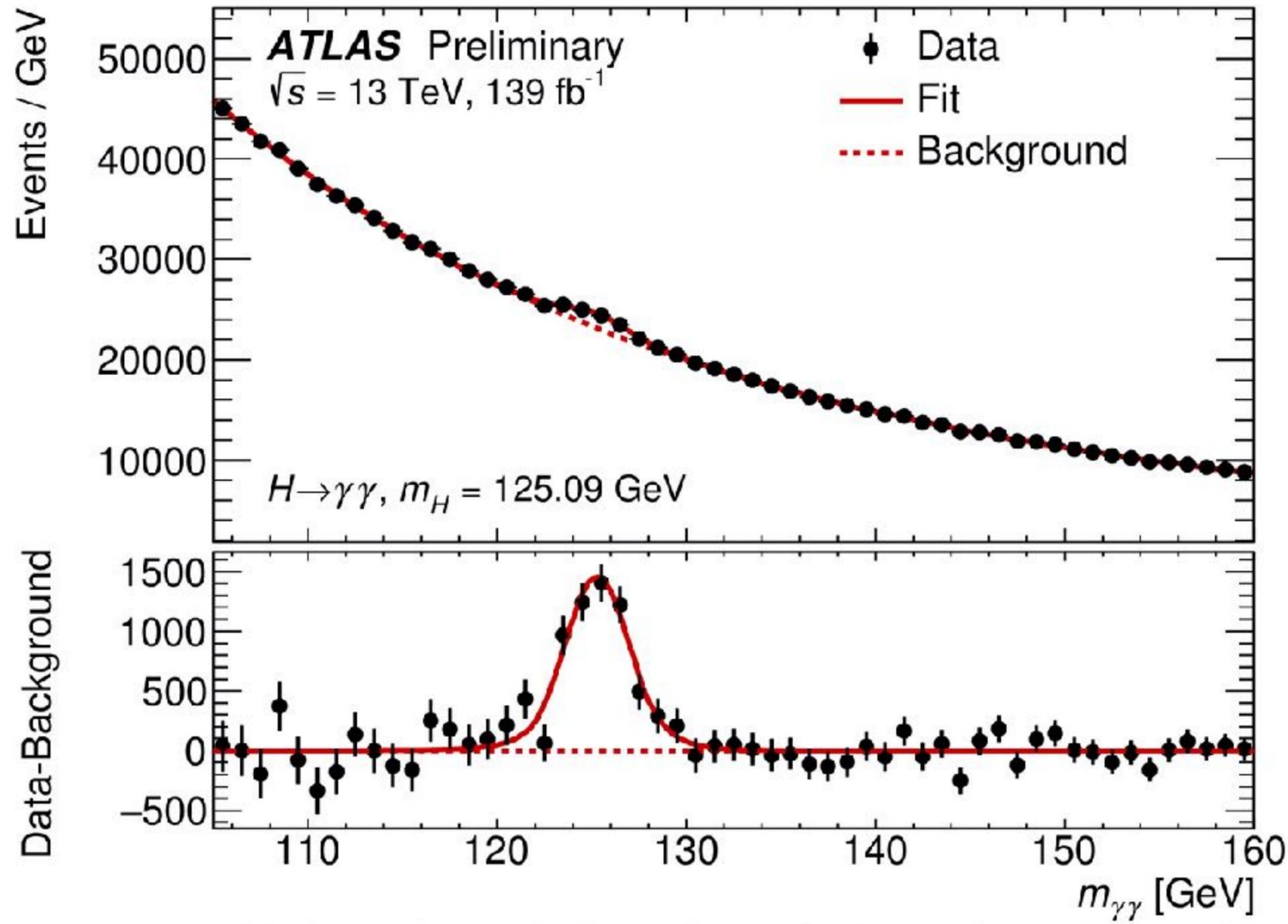
tieto veličiny meriame v experimente!

**a meriame ich aj dnes!! 😊**

# Príklad na zisťovanie hmotnosti krátkožijúcej častice: Higgsov bozón: 4. 7. 2012



# Higgsov bozón po 10 rokoch..

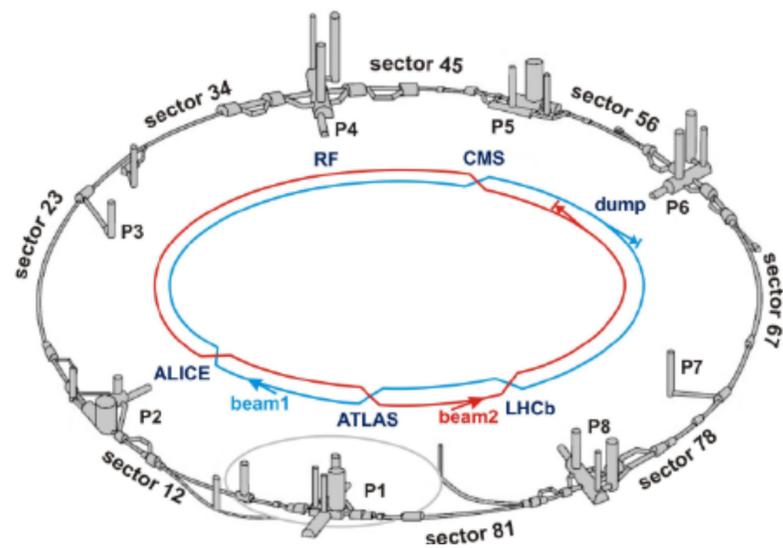


# Štandardný model elementárných částíc

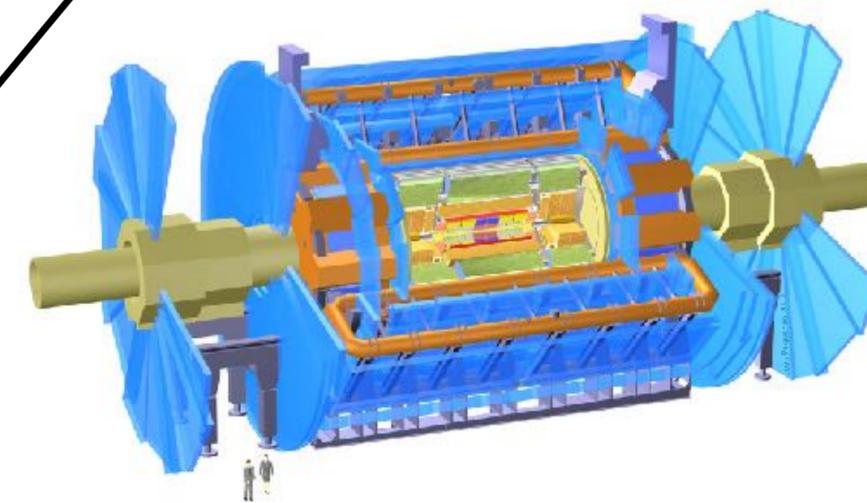
Elementárne častice študujeme tak, že zrážame zväzky častíc a detegujeme častice, ktoré v zrážke vznikli. Snažíme sa pochopiť ako vznikli (model). Najúspešnejší je tzv. Štandardný model elementárnych častíc, ktorý vie v súčasnosti najspoľahlivejšie predpovedať, čo v zrážke vznikne..

$$A + B \rightarrow X \rightarrow C + D$$

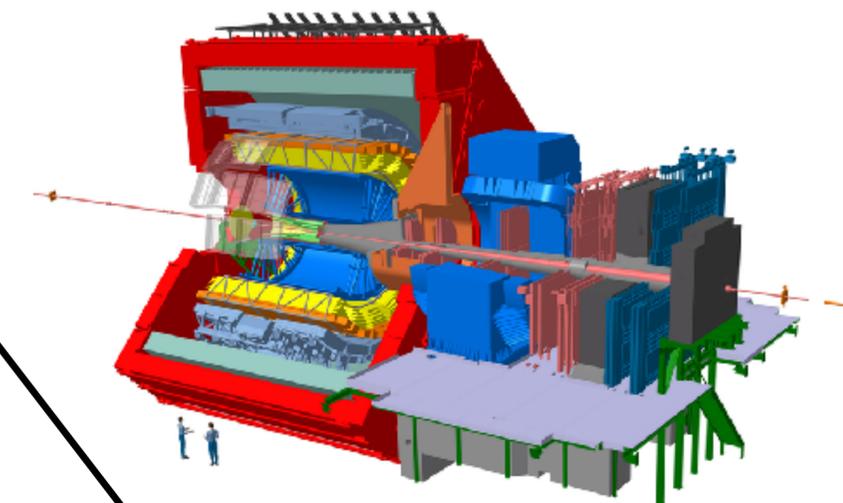
**A + B** - toto vieme kontrolovať



**X** - naša fyzikálna predstava  
mechanizmu interakcie  
(Štandardný model)



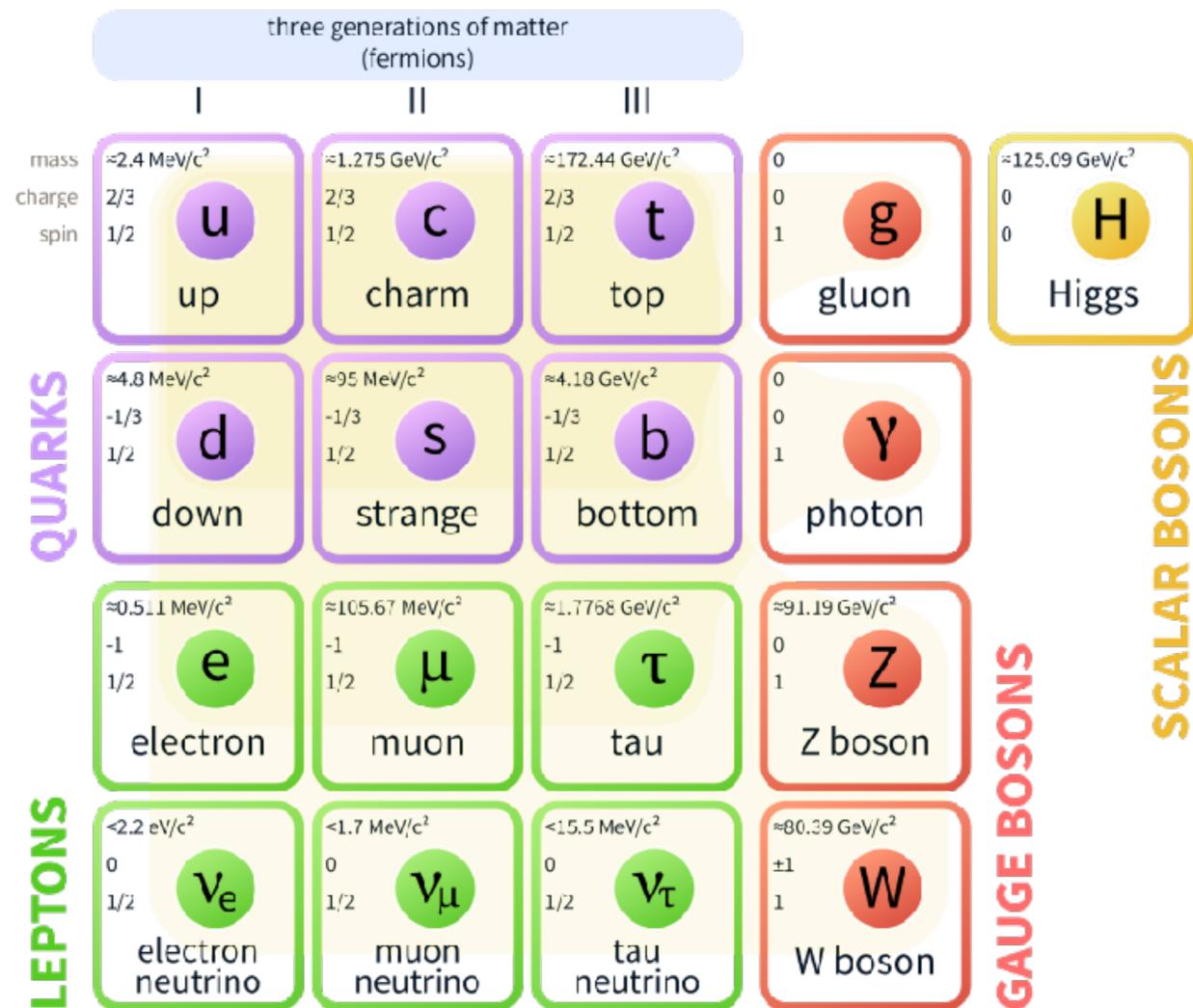
**C + D** - toto vieme detegovať



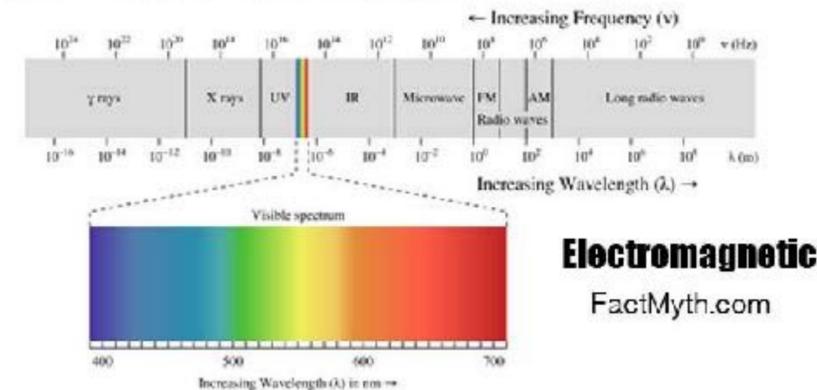
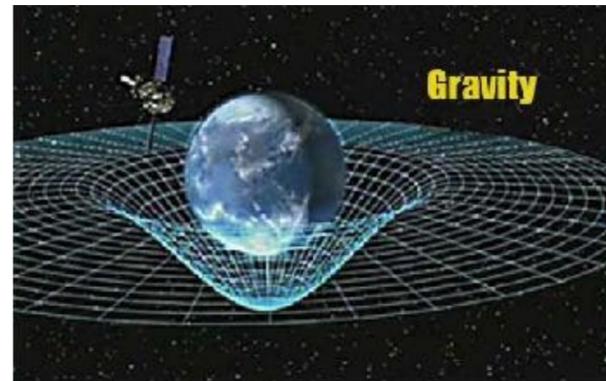
Štandardný model elementárnych častíc popisuje interakcie medzi nimi.  
Experimenty testujú Štandardný model na základe merania  
pravdepodobnosti interakcie alebo pravdepodobnosti rozpadu.

# Štandardný model elementárnych častíc

## Standard Model of Elementary Particles

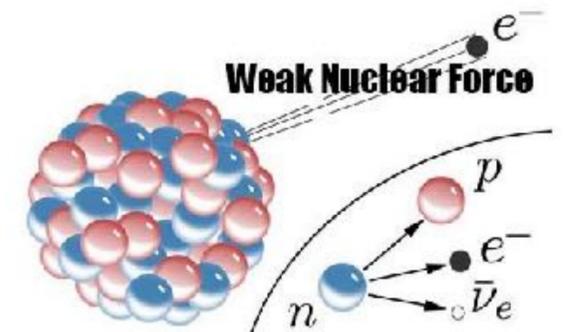
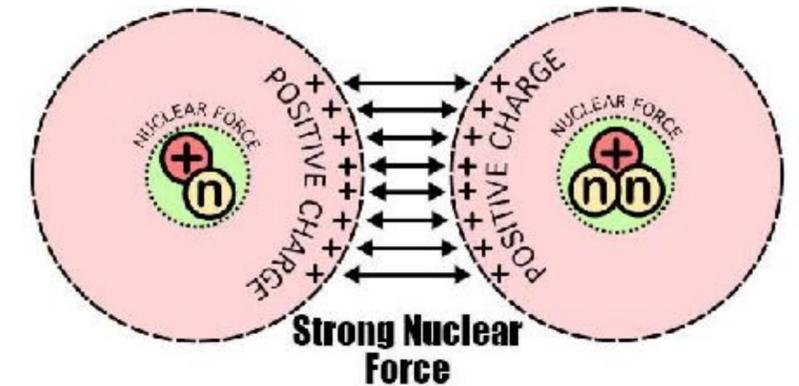


Gravitačná: všetky častice, avšak nie je popísaná ŠM



Elektromagnetická: všetky nabité častice a fotón

Silná jadrová: kvarky a gluóny



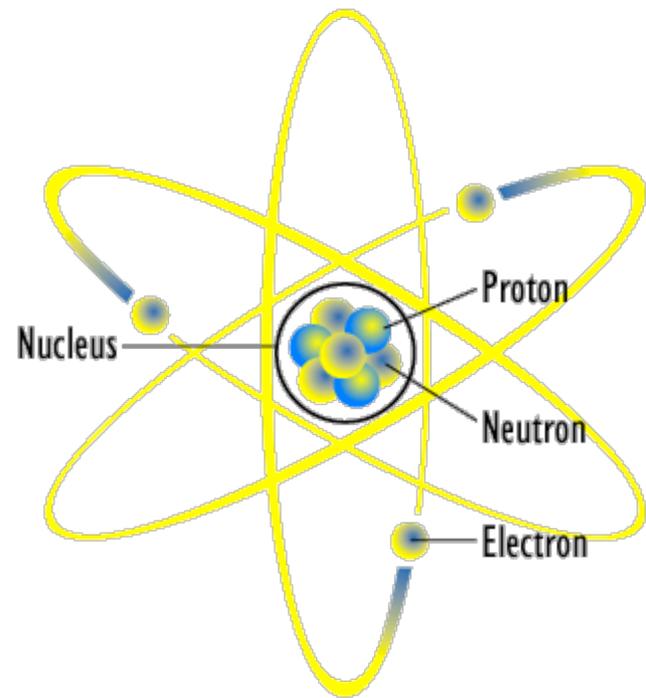
Slabá jadrová: všetky hmotné

Obr.: [https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary\\_particle](https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_particle)

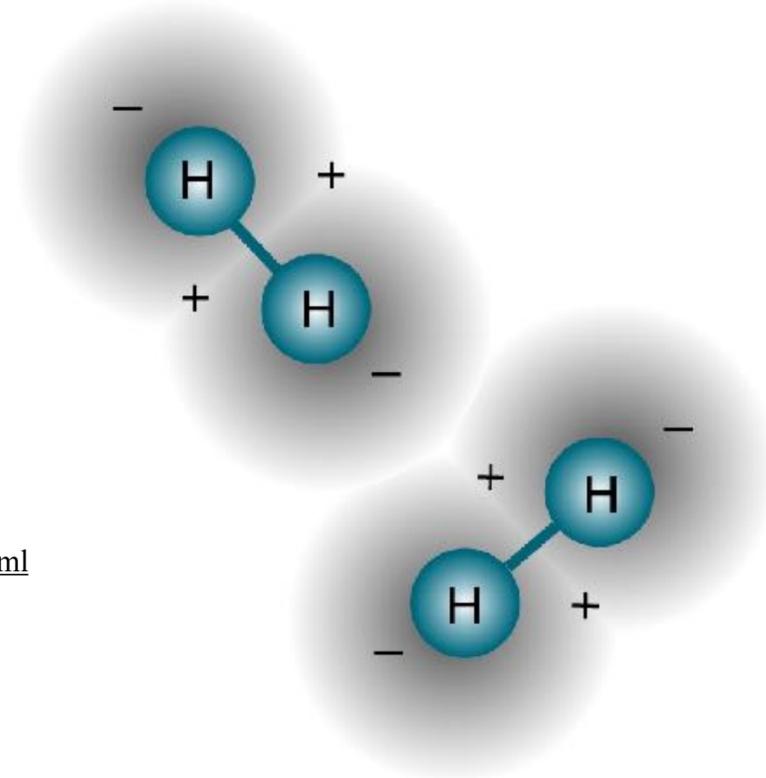
Obr.: <http://factmyth.com/factoids/there-are-four-fundamental-forces/>

# Interakcie, ktoré popisuje Štandardný model

# Elektromagnetická interakcia



<http://en.wikipedia.org/wiki/Atom>



<http://keyhole.web.cern.ch/keyhole/theory/main-5.html>

**Náboj** (zdroj sily): elektrický: kladný a záporný; všetky elektricky nabité častice dokážu komunikovať (interagovať) elektromagneticky  
**Prenášač**: fotón  
**Dosah**:  $\infty$   
**Intenzita komunikácie** (sila komunikácie): silná; príťažlivá aj odpudivá  
**Viazané stavy**: atómy, molekuly, my ☺, ...  
**Zaujímavosť**: skoro všetky makroskopické deje na našej planéte sa dajú na elementárnej úrovni popísať elektromagneticky

## Nosiče náboja:

	mass	charge	spin																									
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	<b>u</b>	up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	<b>c</b>	charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	<b>t</b>	top	$0$	$0$	$1$	<b>g</b>	gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	$0$	$0$	$0$	<b>H</b>	Higgs boson		
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	<b>d</b>	down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	<b>s</b>	strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	<b>b</b>	bottom	$0$	$0$	$1$	<b><math>\gamma</math></b>	photon								
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$-1$	$1/2$	<b>e</b>	electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$-1$	$1/2$	<b><math>\mu</math></b>	muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$-1$	$1/2$	<b><math>\tau</math></b>	tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	$0$	$0$	$1$	<b>Z</b>	Z boson							
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$0$	$1/2$	<b><math>\nu_e</math></b>	electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$0$	$1/2$	<b><math>\nu_\mu</math></b>	muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$0$	$1/2$	<b><math>\nu_\tau</math></b>	tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	$\pm 1$	$1$	$1$	<b>W</b>	W boson							

# Silná interakcia

**Náboj** (zdroj sily): farebný: 3 farby a 3 antifarby; všetky farebne nabité častice dokážu komunikovať (interagovať) silno

**Prenášač:** gluón

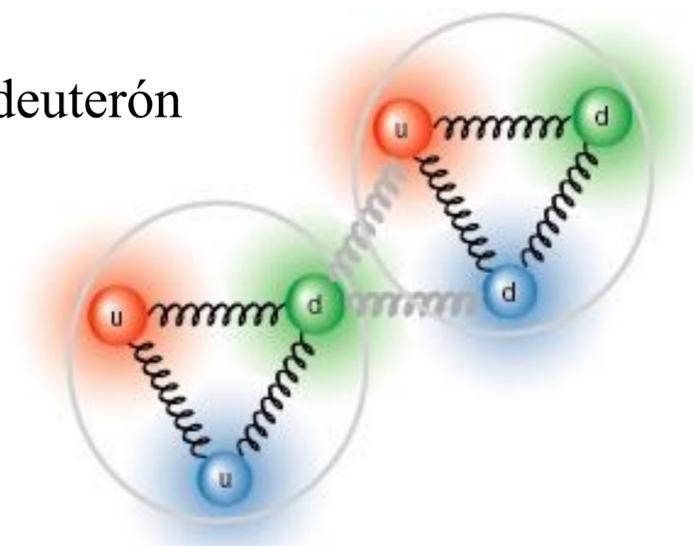
**Dosah:**  $\sim 10^{-15}$  m

**Intenzita komunikácie** (sila komunikácie): silná; príťažlivá aj odpudivá

**Viazané stavy:** hadróny, atómové jadrá, ...

**Zaujímavosť:** prenášač interakcie (gluón) je sám nositeľom farebného náboja  $\Rightarrow$  kvarky a gluóny sú v hadrónoch uväznené

deuterón

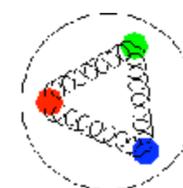


<http://keyhole.web.cern.ch/keyhole/theory/main-5.html>

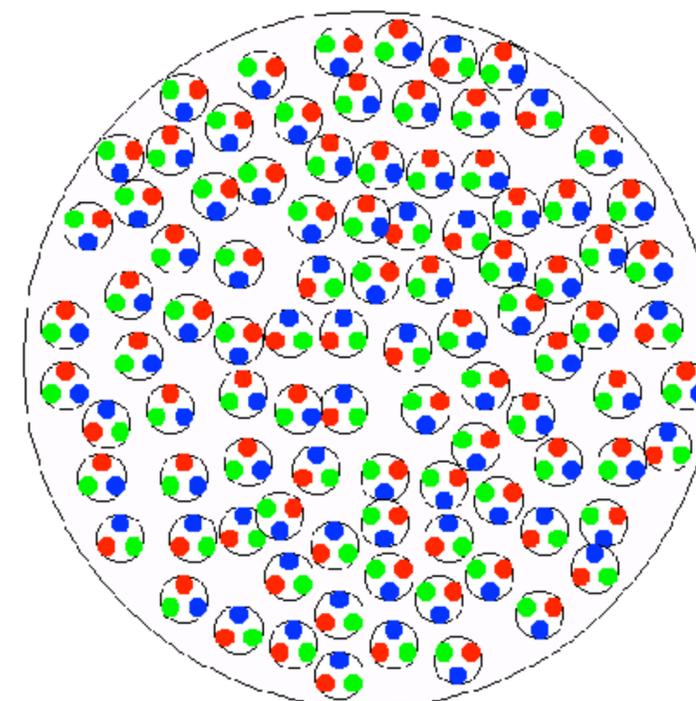
## Nosiče náboja:

mass	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	$\gamma$ photon	
	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	Z Z boson	
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	W W boson	

Pomenovanie náboja “farba” nemá nič spoločné so skutočnými farbami, súvisí len s fantáziou fyzikov pri zavádzaní náboja silnej interakcie!



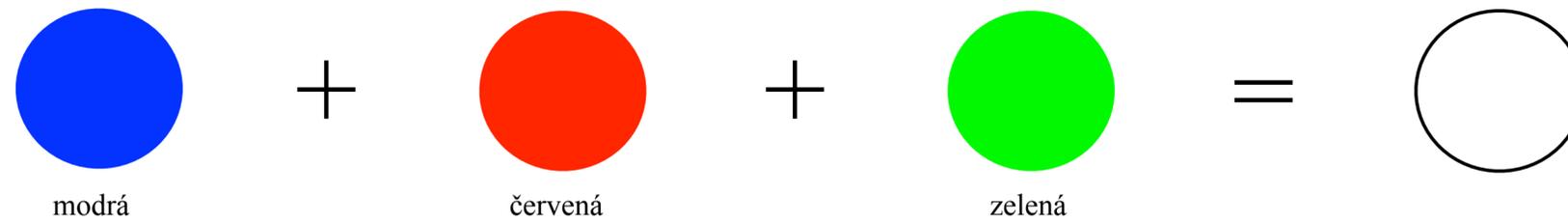
protón



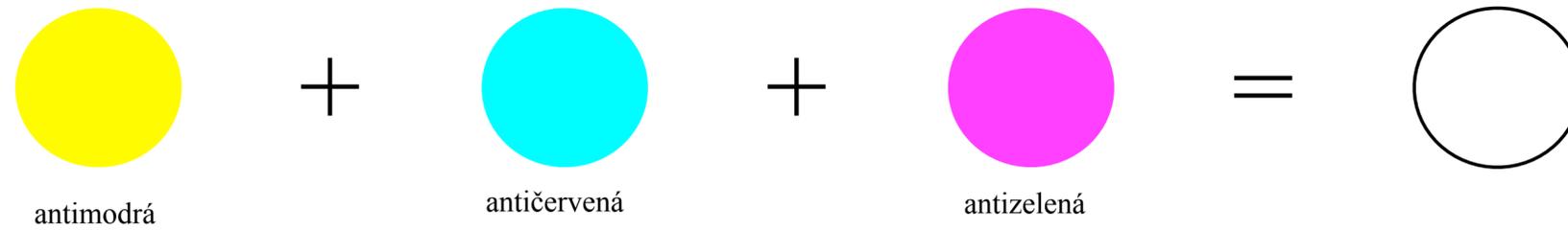
jadro

# Povolené farebné kombinácie nábojov silnej interakcie:

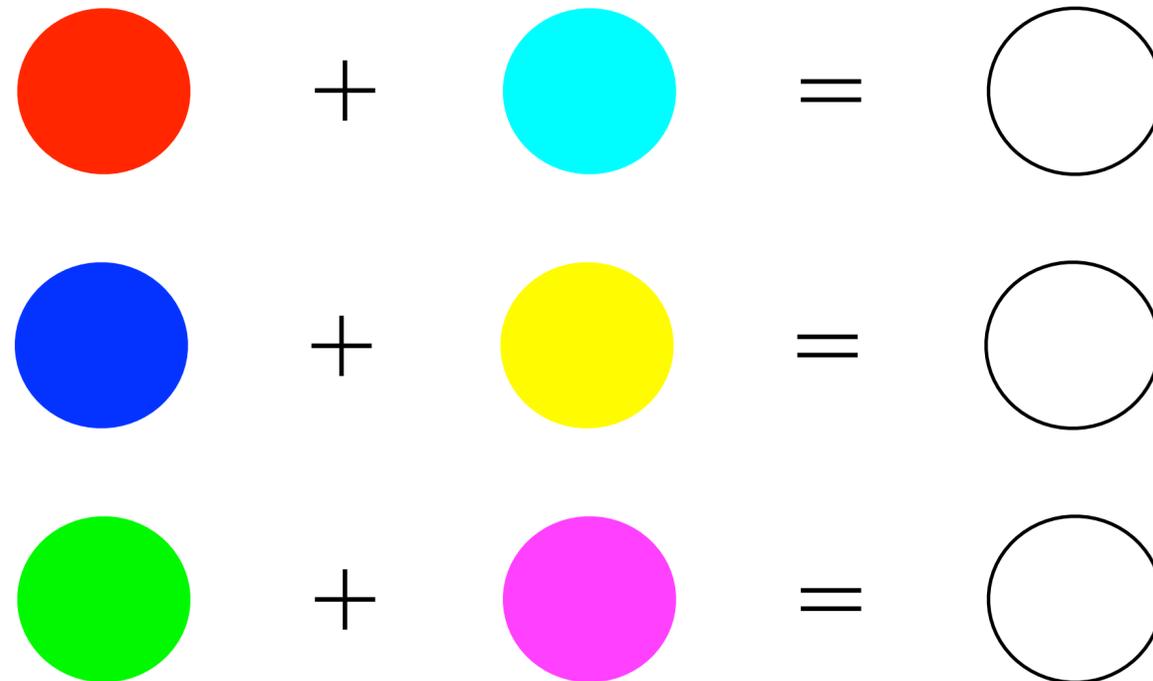
Baryóny:



Antibaryóny:



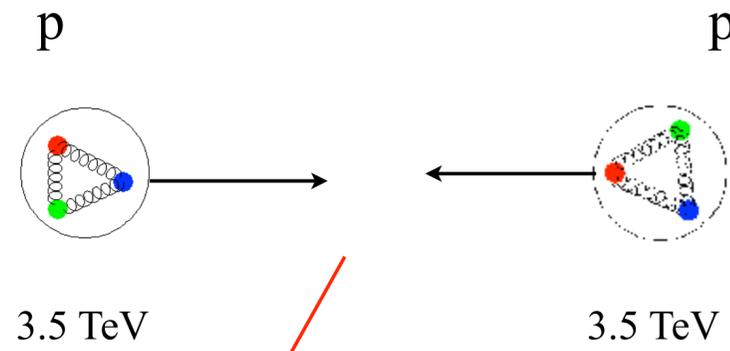
Mezóny:



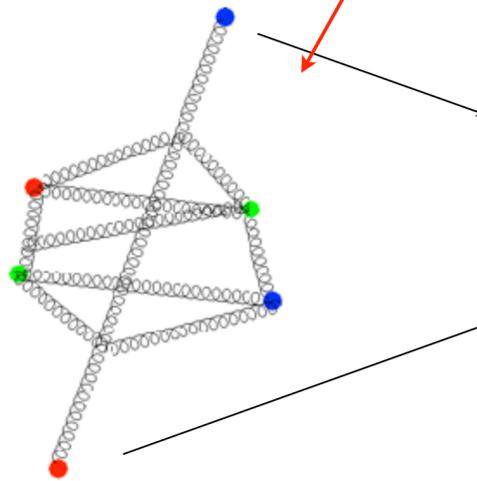
Hadróny

**Viazané stavy v silnej interakcii (hadróny) sú v prírode vždy bezfarebné!**

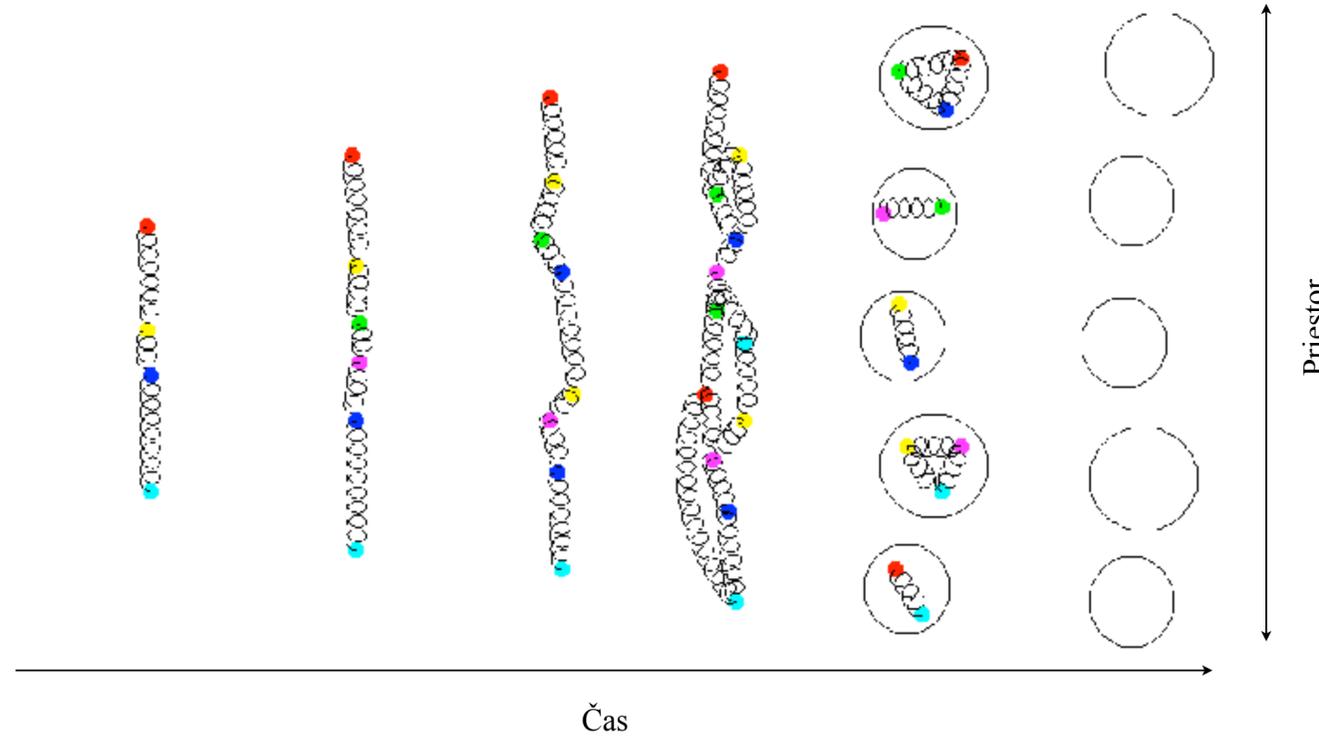
# Kvark sa dá pozorovať len nepriamo (príklad z LHC: pp@7 TeV):



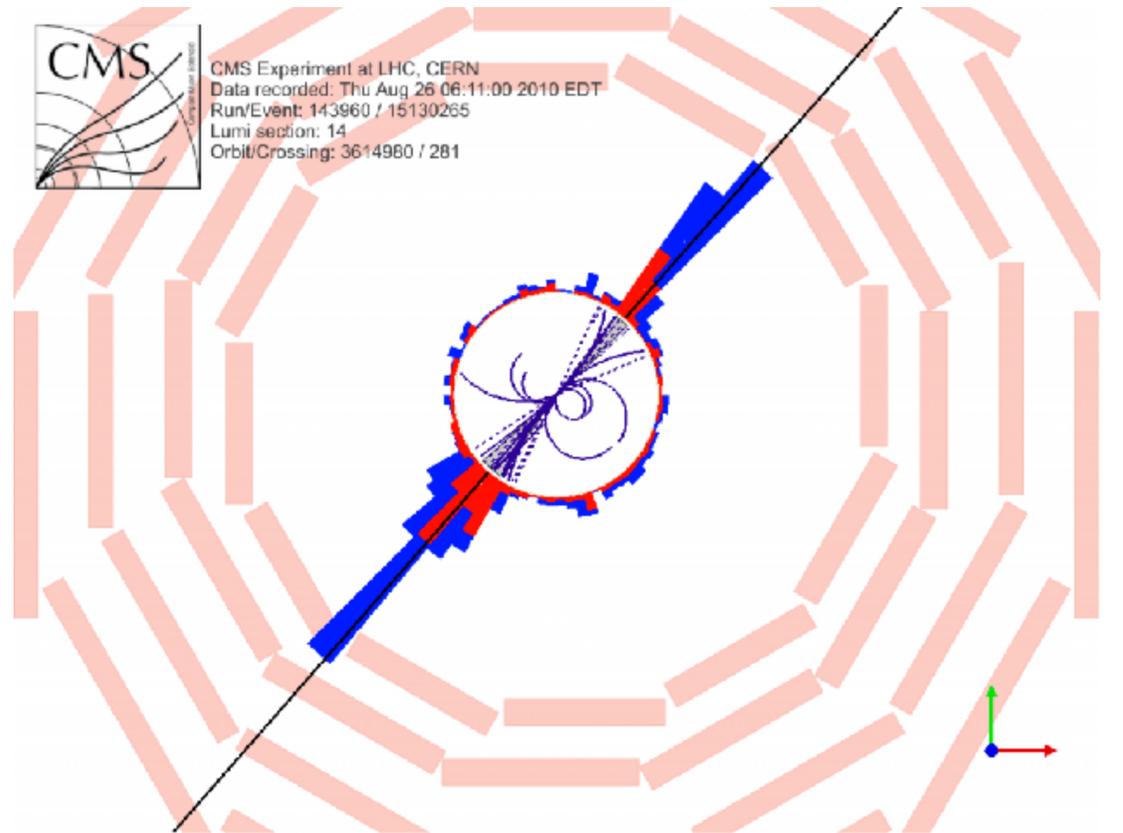
Tvrký rozptyl dvoch kvarko:



Hadronizácia (fragmentácia struny)

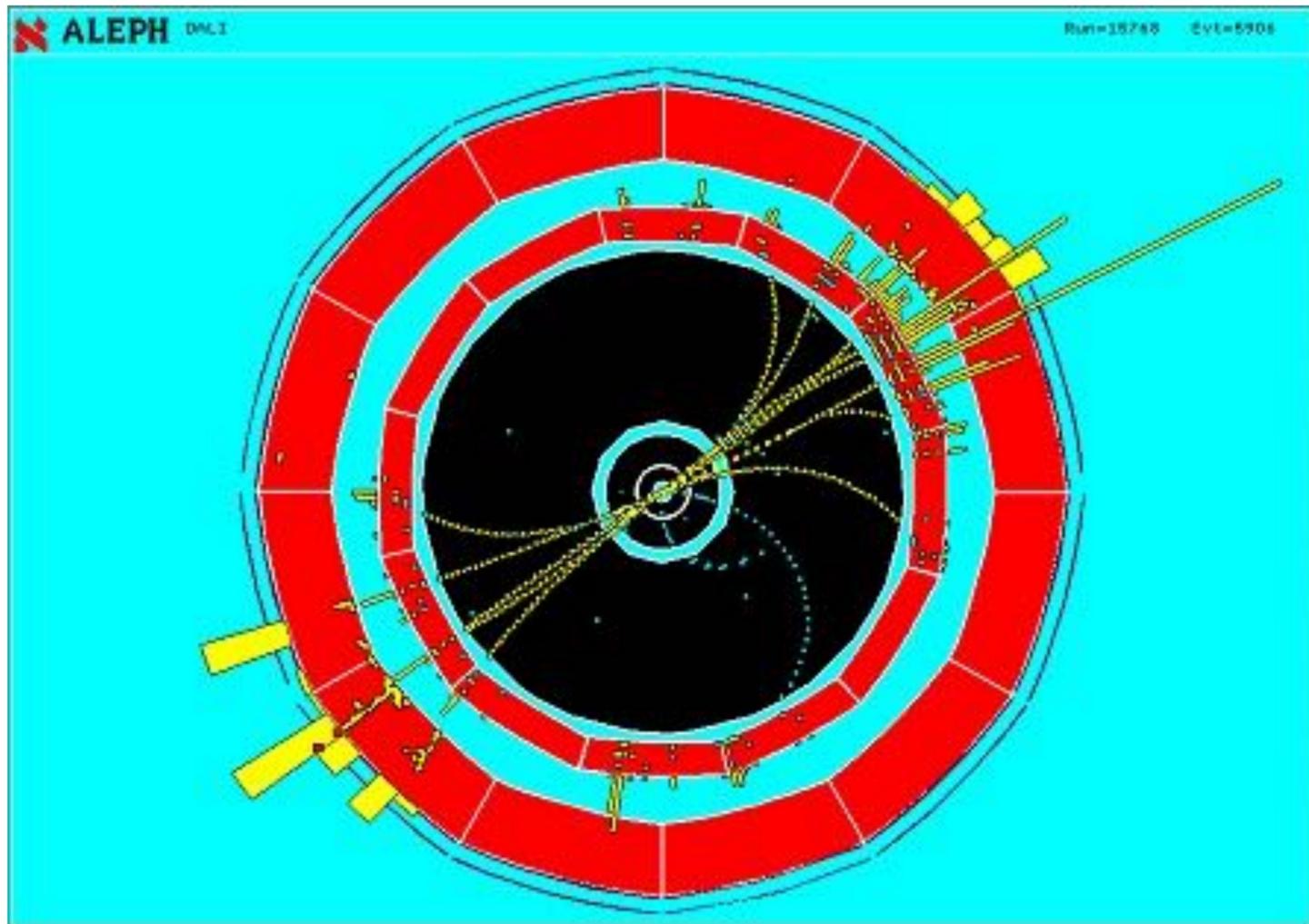


'Kvarky' v detektore CMS:

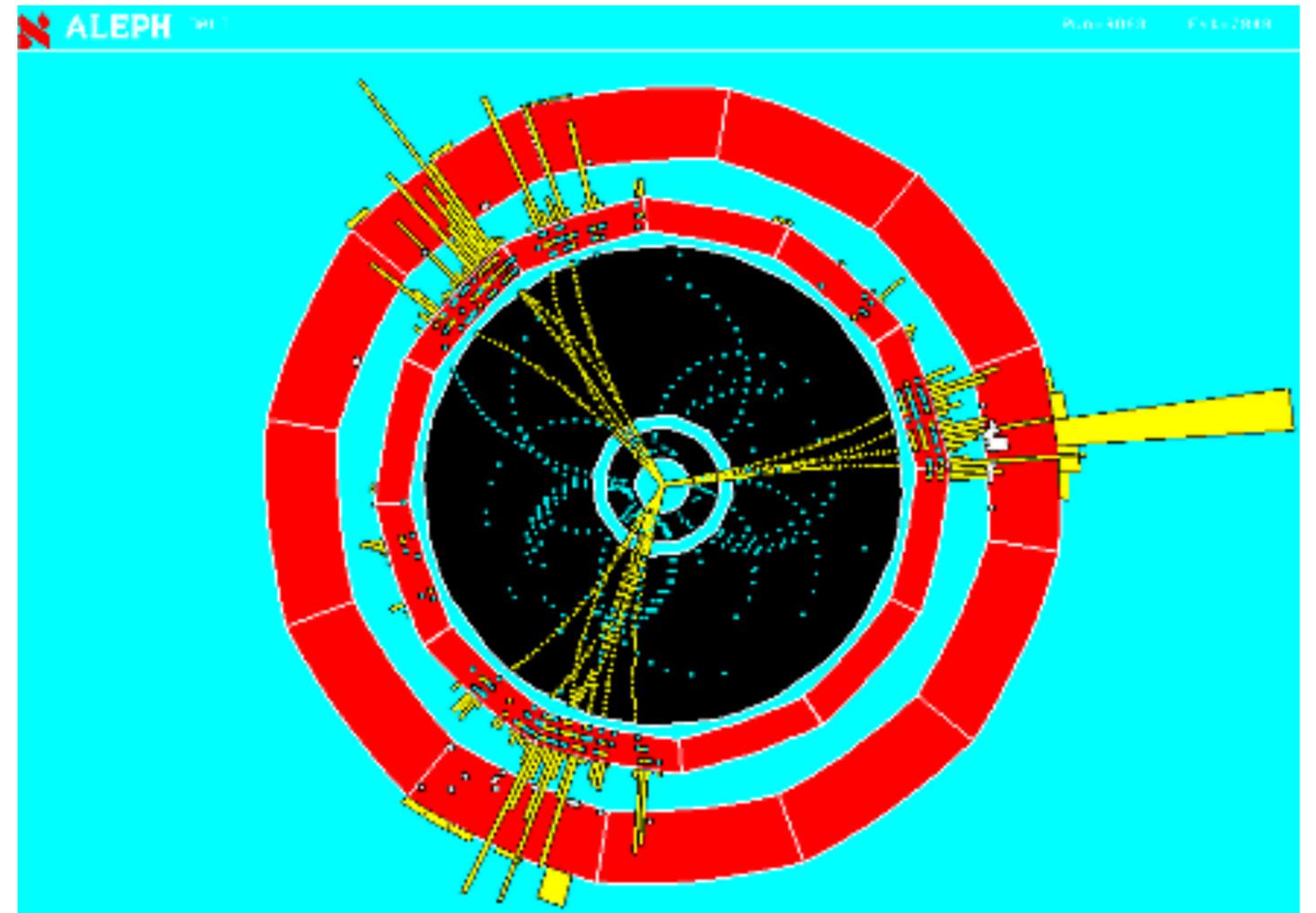


# Príklad nepriameho pozorovania kvarkov a gluónov na urýchľovači LEP

$$e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$$

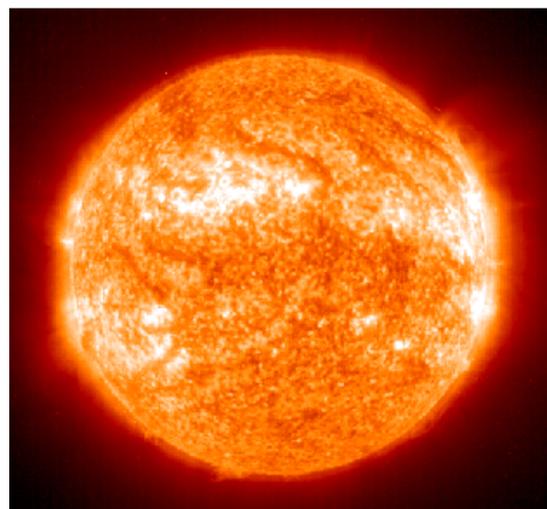


$$e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} + g$$

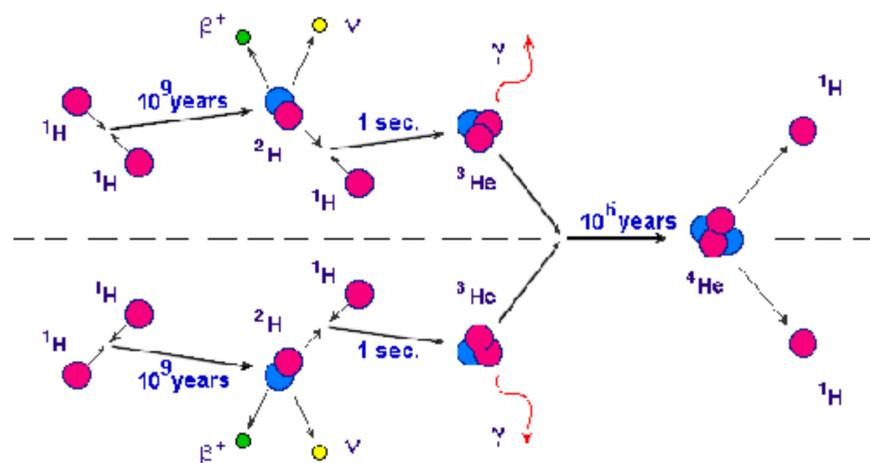


# Slabá interakcia

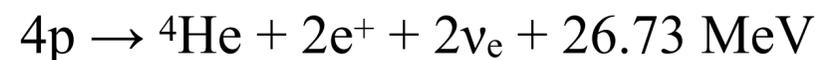
Život na našej planéte existuje (aj) vďaka slabej interakcii: p-p cyklus v Slnku



<http://keyhole.web.cern.ch/keyhole/theory/main-5.html>



[http://www.cassiopeaonline.it/30-sep-2002/catena\\_pp.html](http://www.cassiopeaonline.it/30-sep-2002/catena_pp.html)



**Náboj** (zdroj sily): slabý: 2 slabé a 2 antislabe; všetky slabo nabité častice dokážu komunikovať (interagovať) slabo (v skutočnosti sú to aj všetky hmotné častice)

**Prenášač:**  $W^\pm$  a  $Z^0$

**Dosah:**  $\sim 10^{-18} \text{ m}$

**Intenzita komunikácie** (sila komunikácie): silná; príťažlivá aj odpudivá

**Viazané stavy:** žiadne (kvôli iným interakciám), možno neutrína...

**Zaujímavosť:** prenášače interakcie sú veľmi hmotné (ako stredne ťažké atómové jadrá)

## Nosiče náboja:

	mass ≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
	charge 2/3	2/3	2/3	0	0
	spin 1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
					<b>GAUGE BOSONS</b>

Prvá fáza p-p cyklu ide cez slabú interakciu (našťastie kvantové javy pomáhajú prekonať Coulombovskú bariéru). Pomalá premena (aj kvôli relatívne malej teplote, v porovnaní napr. s podmienkami po Veľkom tresku), našťastie, inak by Slnko ihneď vyhorelo.

Štandardný model nie je  
konečná stanica..

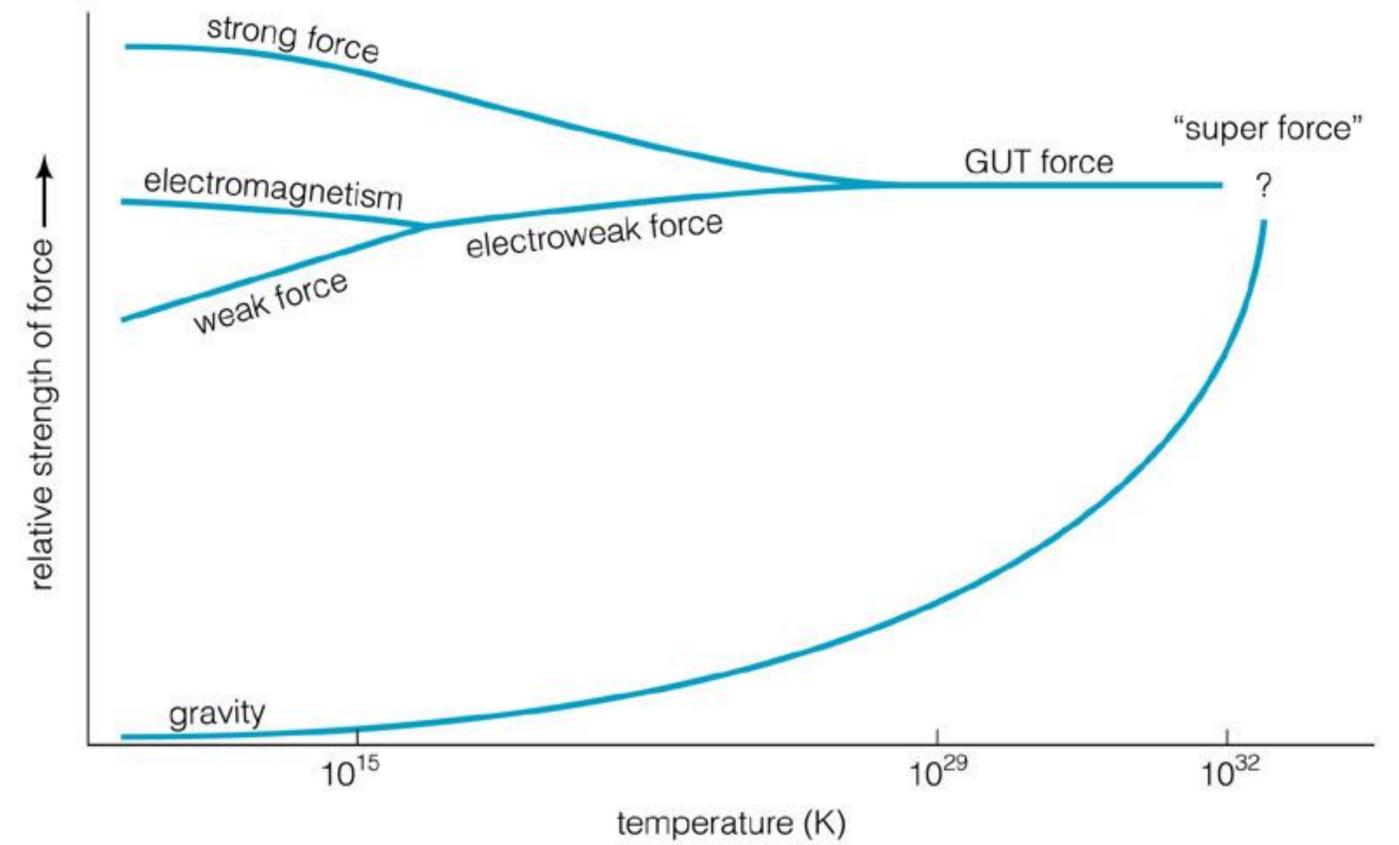
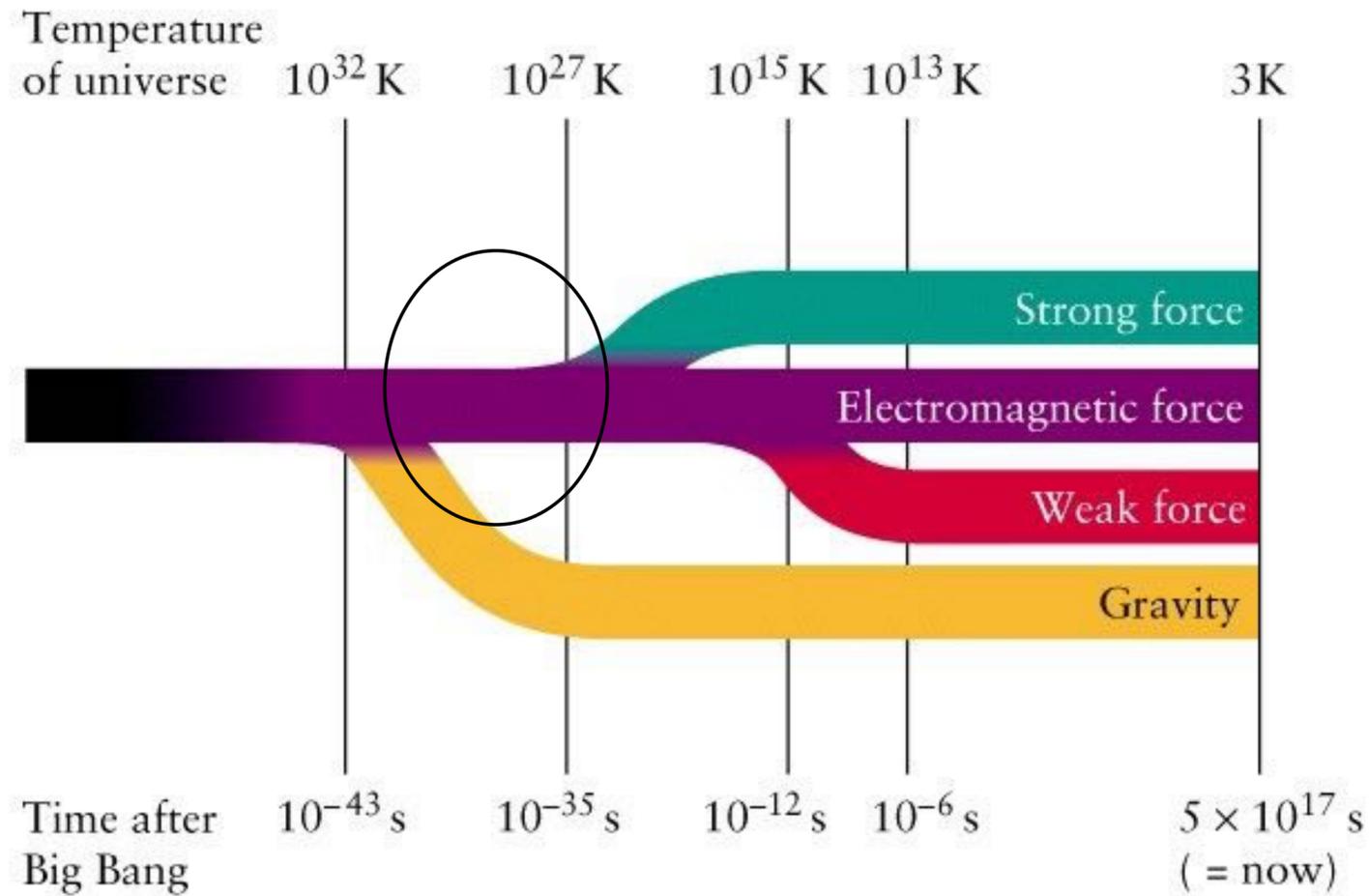
# Problém so Štandardným modelom

Existuje veľa vecí, ktoré Štandardný model nevie vysvetliť. Napríklad hmotnosti leptónov a kvarkov:

leptón	hmotnosť (MeV/c <sup>2</sup> )		kvark	hmotnosť (MeV/c <sup>2</sup> )
$\nu_e$	$< 2 \times 10^{-6}$		u	2
$\nu_\mu$	$< 0.2$		d	5
$\nu_\tau$	$< 18$		s	100
e	0,511		c	1200
$\mu$	106		b	4200
$\tau$	1777		t	174000

Štandardný model obsahuje okolo 20 parametrov, ktoré sa (ak sa dá) získavajú empiricky a musia sa do výpočtov dosadiť. Toto nie je štandardné pre žiadnu konečnú teóriu. Preto existuje všeobecné presvedčenie, že existuje aj Fyzika mimo Štandardného modelu (niekedy aj nazývaná Nová fyzika).

# Teórie veľkého zjednotenia Grand Unified Theories - GUTs

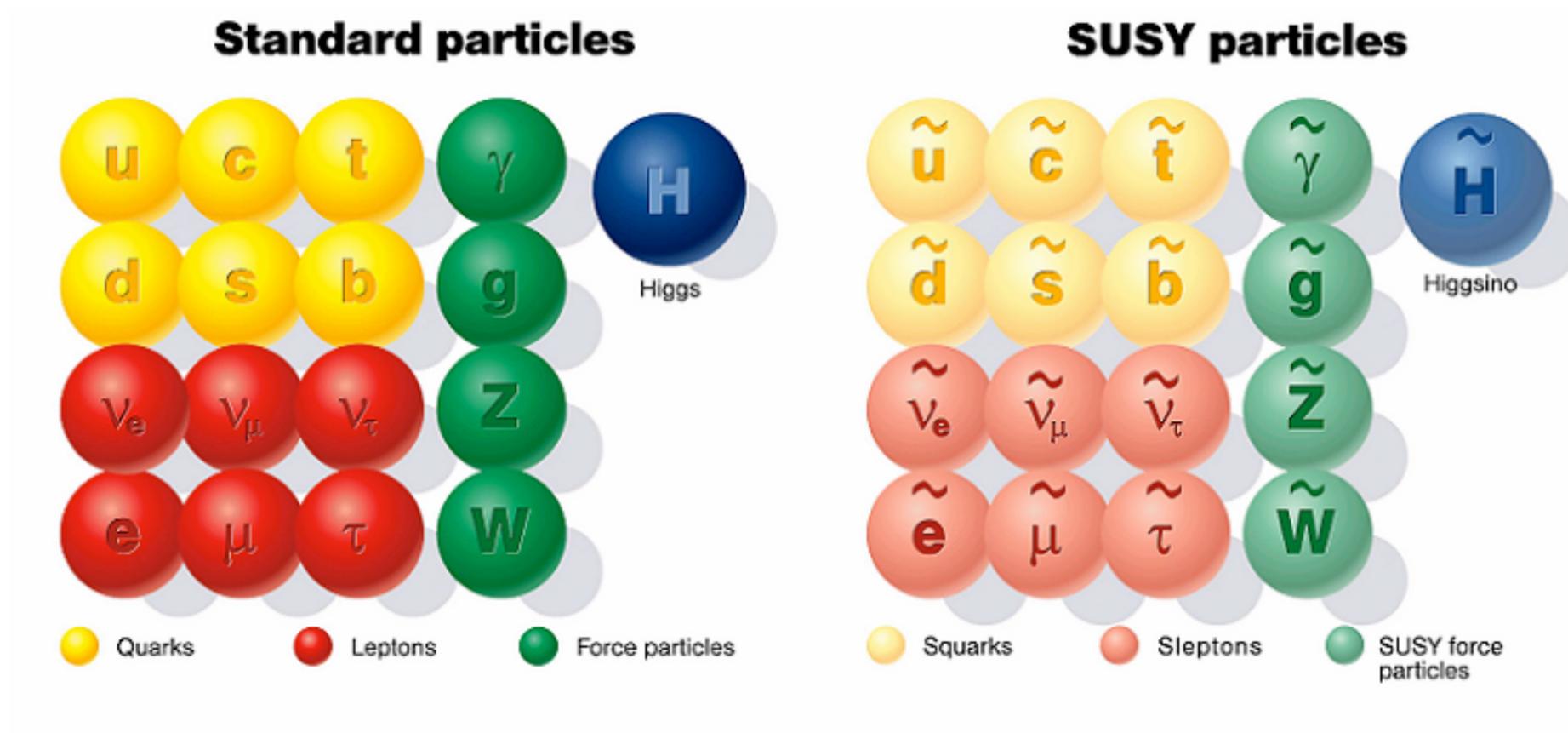


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

Obr.: <http://www.naturphilosophie.co.uk/why-the-universe-may-be-inherently-unstable/>

# Supersymetria (SUSY)

- Základná myšlienka: ku každej častici ŠM existuje superpartner s o polovicu iným spinom, všetko ostatné je rovnaké (aj hmotnosť, no keďže ich nepozorujeme, asi je táto symetria narušená)
- kandidát na tmavú hmotu



# Compositness - rishon model

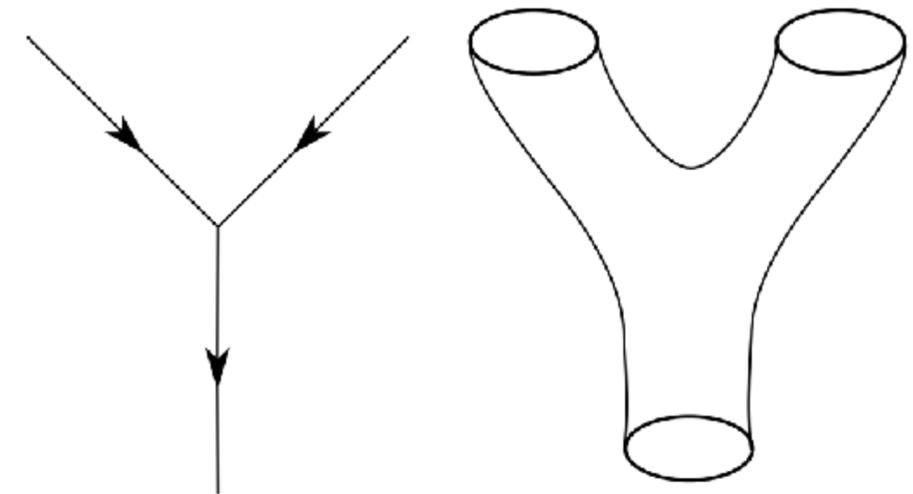
- Základná myšlienka: kvarky a leptóny sú zložené častice - vysvetlí to tri generácie, kde 2. a 3. ťažšia generácia sú len replikami prvej + zredukuje to počet naozaj fundamentálnych častíc a tiež to zredukuje počet voľných parametrov v ŠM.
- vo všeobecnosti sú potrebné 2 pre-kvarky - preóny, aby sme vysvetlili štruktúru 1. generácie kvarkov a leptónov. 2. a 3. generácia sa vysvetlí ako excitácia preónov.
- V Rishon (z hebrejčiny primary) modeli: prvý rishon (T - Third - kvôli náboju) má spin  $1/2$  a elektrický náboj  $1/3$  a druhý rishon (V - Vanishing - kvôli náboju) má tiež spin  $1/2$  a elektrický náboj 0.
- všetky leptóny a kvarky sú tvorené tripletmi rišónov: TTT - pozitron, VVV - elektrónové neutríno, TTV, TVT a VTT - tri farby pre u kvark, VVT, VTV a TVV - tri farby pre d kvark,
- B a L číslo sa osobitne nezachovávajú. ale ich rozdiel áno:  $B - L$ .
- Zatiaľ sa experimentálne nenašli..

# Teória superstrún

- Základná myšlienka: častice nie sú bodové, ale jednorozmerné struny (veľmi malá dĺžka), vibrovací mód (frekvencia) určí o akú časticu ide
- Pôvodne vznikla na popis silnej interakcie v 60-tych rokoch
- dva druhy strún - otvorené konce (fermióny) alebo uzavreté do seba (bozóny)
- implementovanie supersymetrie posunulo teóriu strún na teóriu superstrún
- výhody: popisuje aj gravitačnú interakciu, Vesmír je v podstate tvorený len jedným druhom objektu - strunou
- nevýhody: funguje len v 10 rozmeroch, nedá sa veľmi experimentálne testovať - struny sú príliš malé objekty



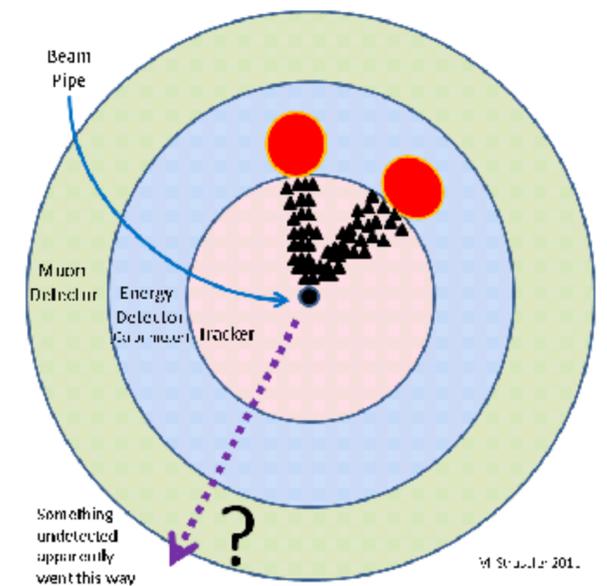
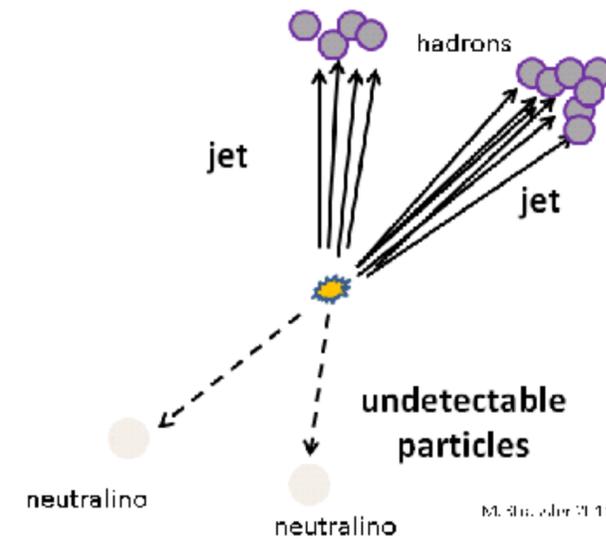
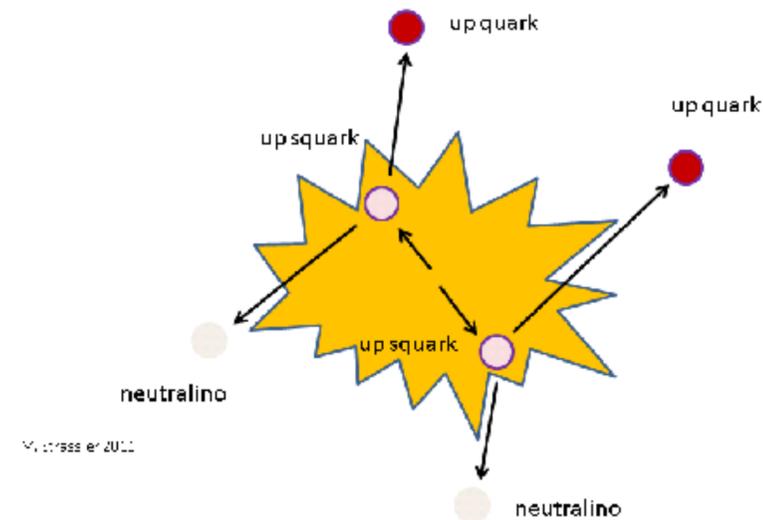
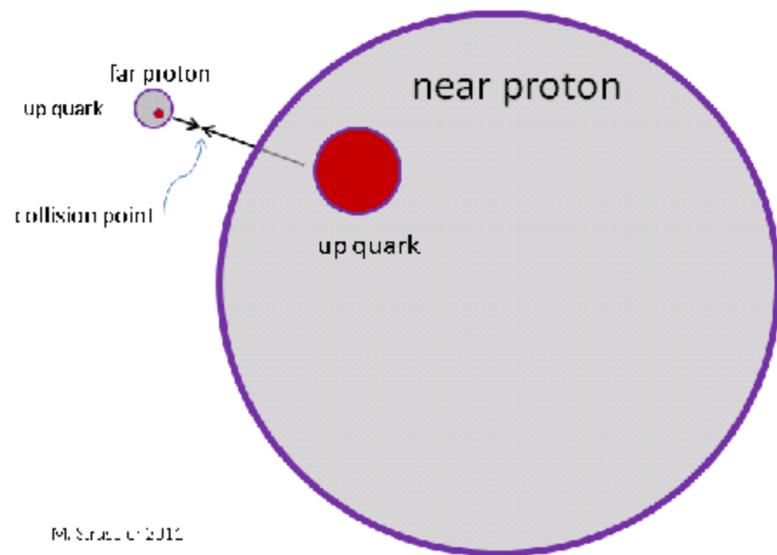
By Xoneca - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26564716>



By Kurochka, svg version by Actam - Point&string.png, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4293745>

# Hľadanie novej fyziky (Experimentálny stav Fyziky mimo ŠM)

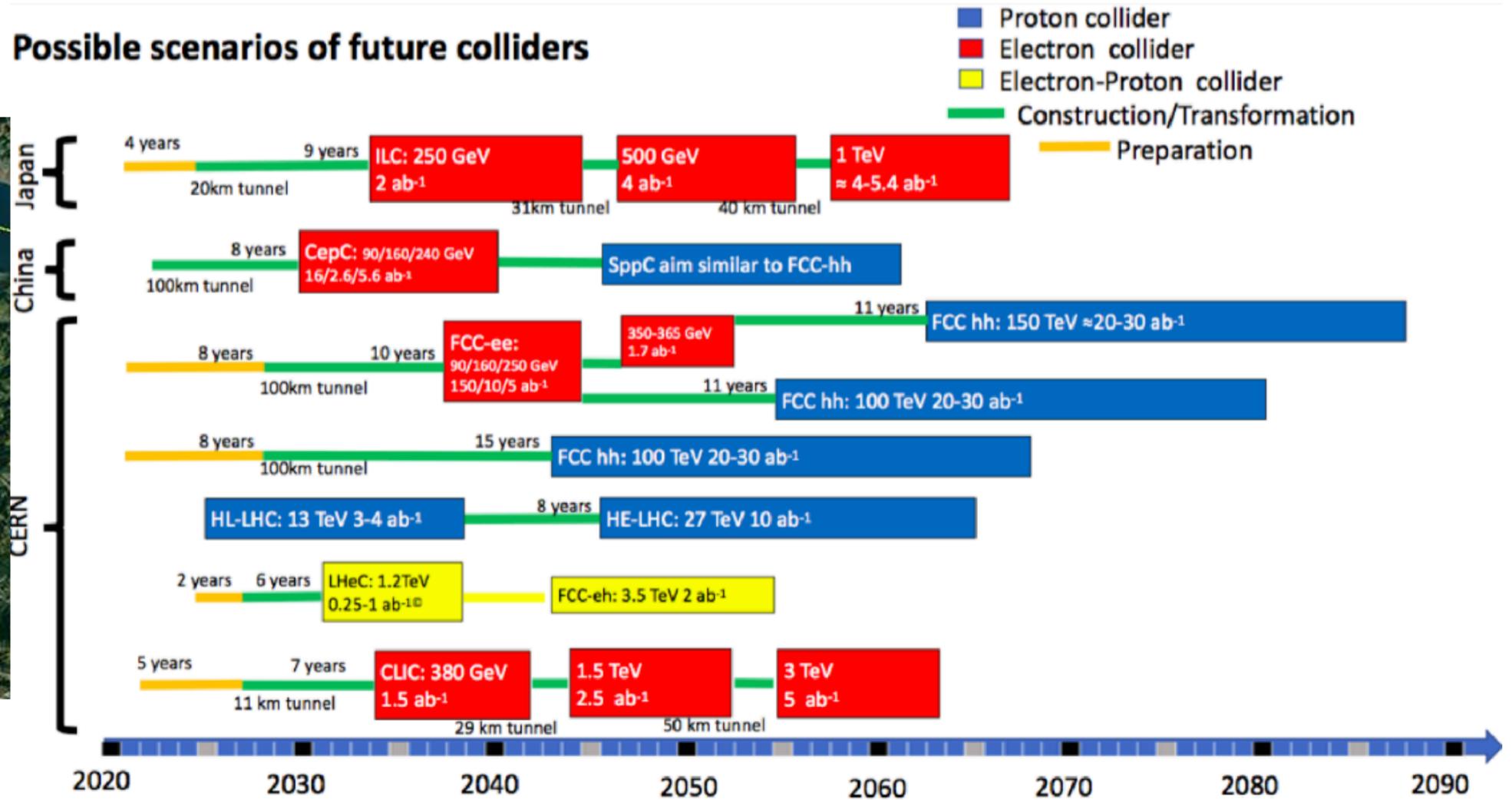
- Spôsoby hľadania novej fyziky:
  - nepriamo v zriedkavých rozpadoch častíc a porovnaním s predpoveďami ŠM
  - priamo v zrážkach častíc na urýchľovačoch (hlavne LHC):



Obr.: <https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/some-speculative-theoretical-ideas-for-the-lhc/supersymmetry/how-to-look-for-supersymmetry-at-the-lhc/>

# Budúcnosť časticovej fyziky

Doteraz však nie je vidno náznak novej fyziky, t.j. veci, ktoré nevieme vysvetliť Štandardným modelom. Bude odpoveďou FCC alebo CLIC?



Ďakujem za pozornosť! 😊

