

# Štandardný model časticovej fyziky

Marek Bombara, Medzinárodné Masterclasses 1. 4. 2022, Košice (KE2PO)



# Čo nás čaká?

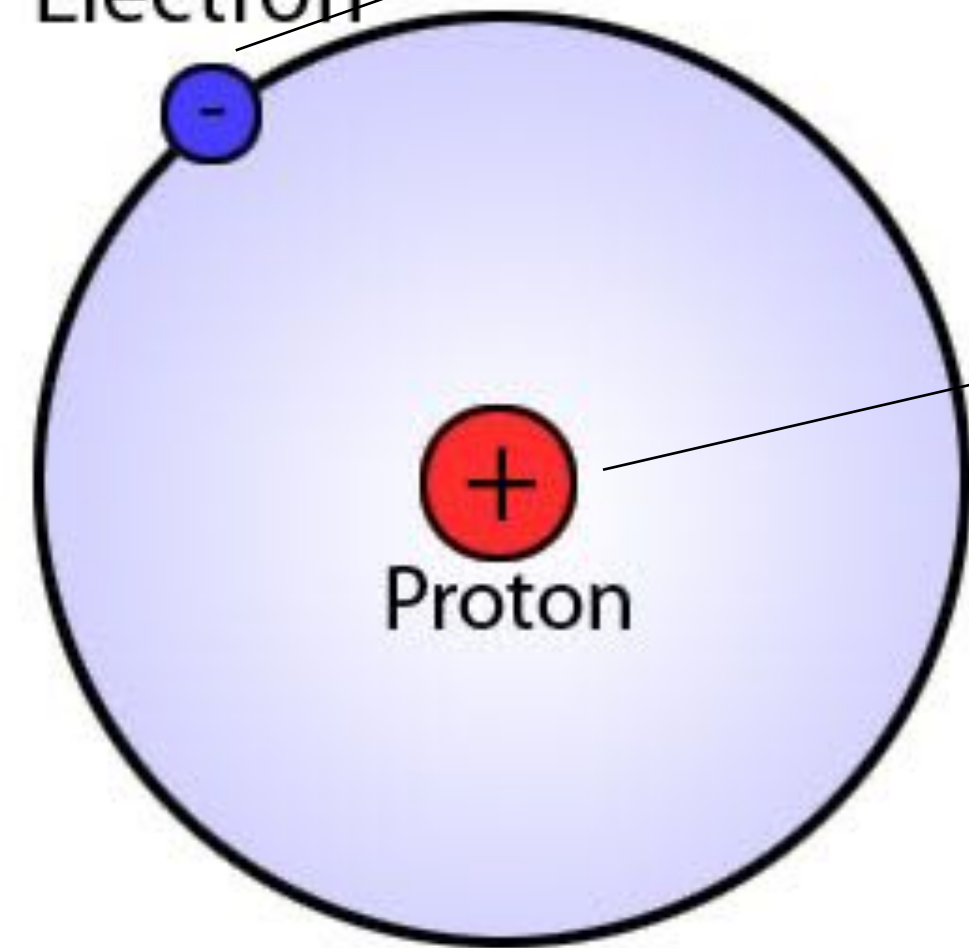
- Čo sú to elementárne častice?
- Aké majú vlastnosti (trocha relativity)?
- Ako študujeme elementárne častice (urýchľovače a detektory)?
- Štandardný model elementárnych častíc
- Ako častice interagujú (popis interakcií)?
- Štandardný model nie je konečná stanica..

Čo sú to elementárne častice?

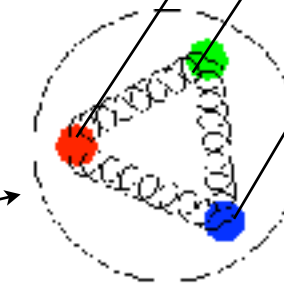
# Atóm vodíka

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

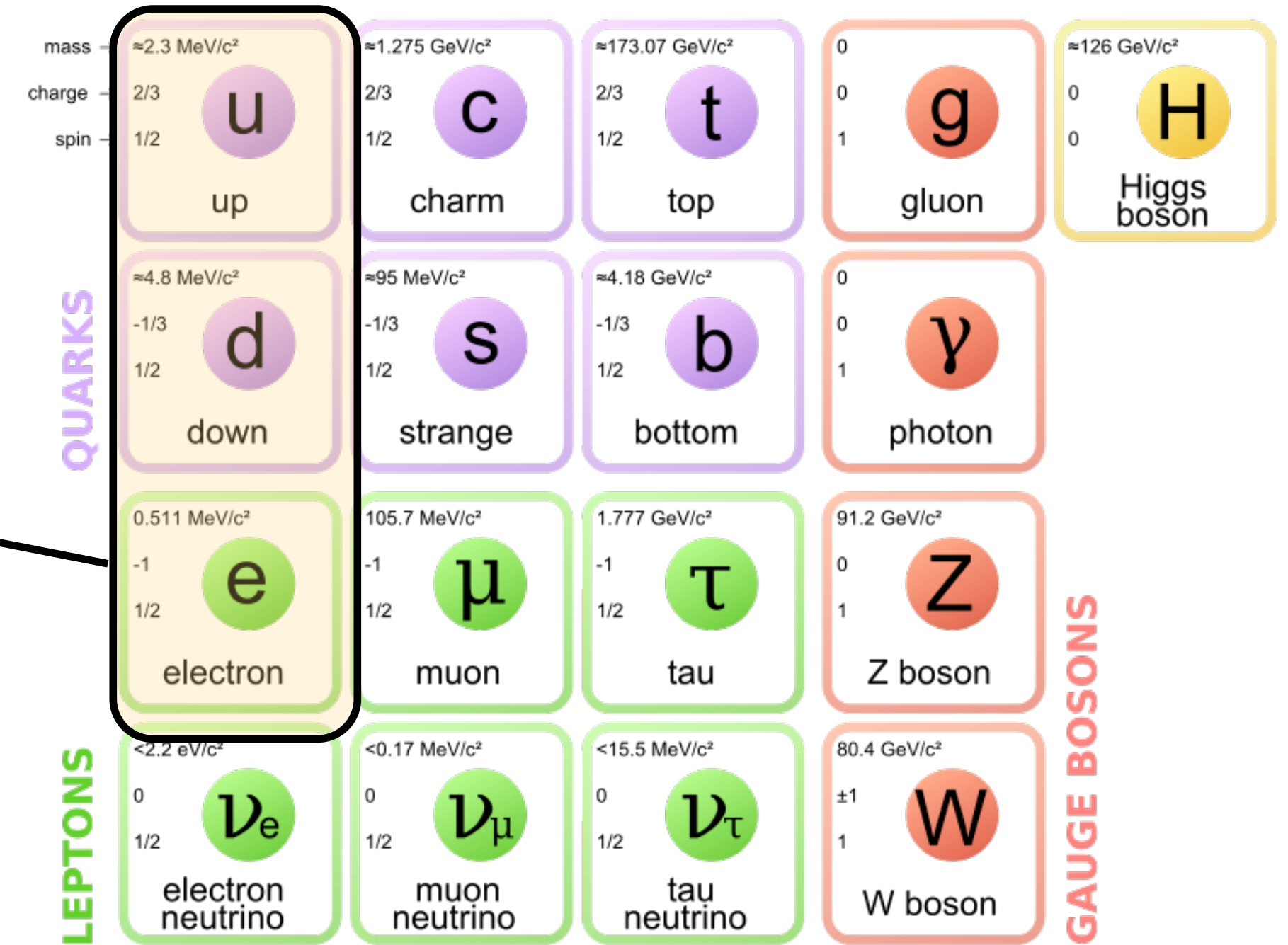


**Elementárna častica:** objekt, o ktorom si na dnešnej úrovni poznania myslíme, že nemá vnútornú štruktúru.

	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
		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	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><math>\gamma</math></b> photon	
<b>LEPTONS</b>		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
			<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$		
	0	0	0	$\pm 1$		
	1/2	1/2	1/2	1		
		<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
						<b>GAUGE BOSONS</b>

# Z čoho sa skladá svet okolo nás?

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
↓ Period																			
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	



# 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:

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

Protón na LHC,  $\gamma$

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

$E = mc^2$  - 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!

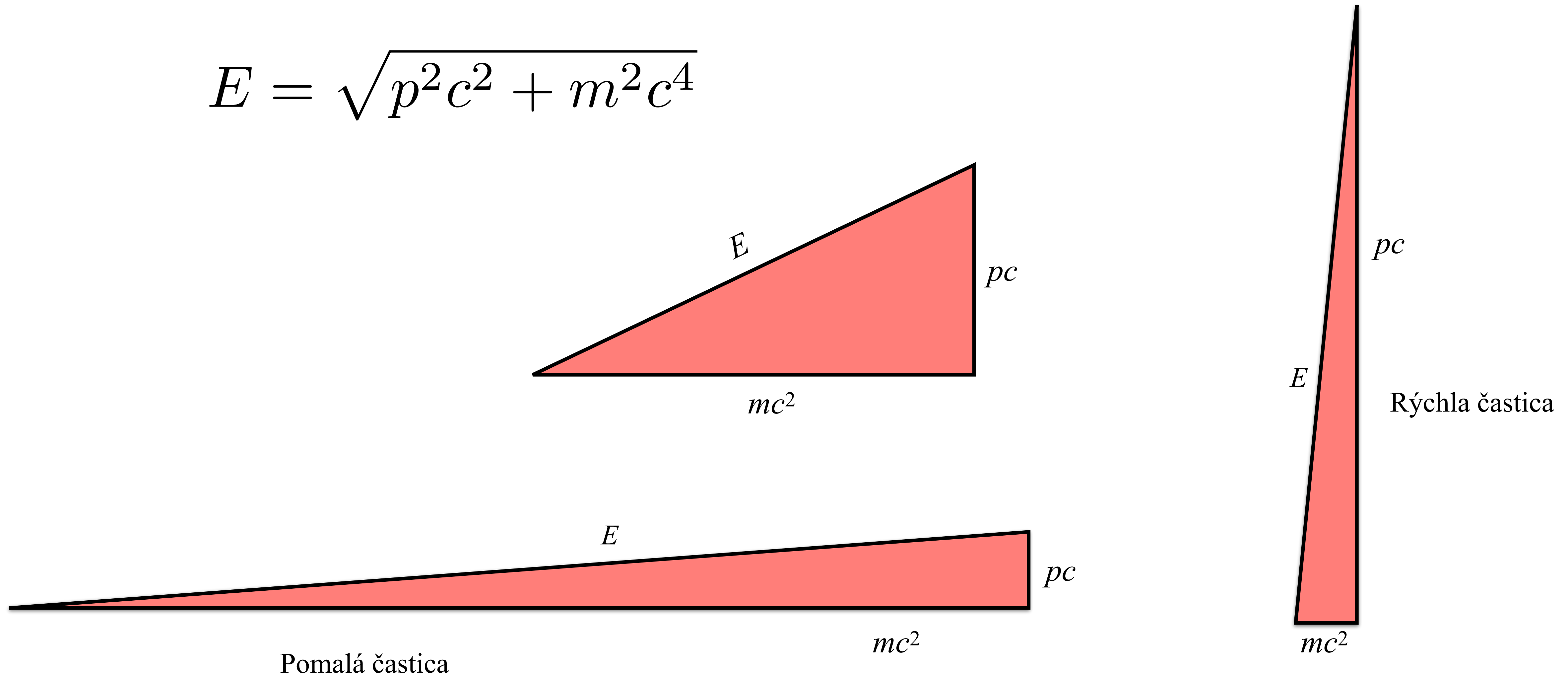


Pripomenka:  $c = 300\,000\,000$  m/s

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

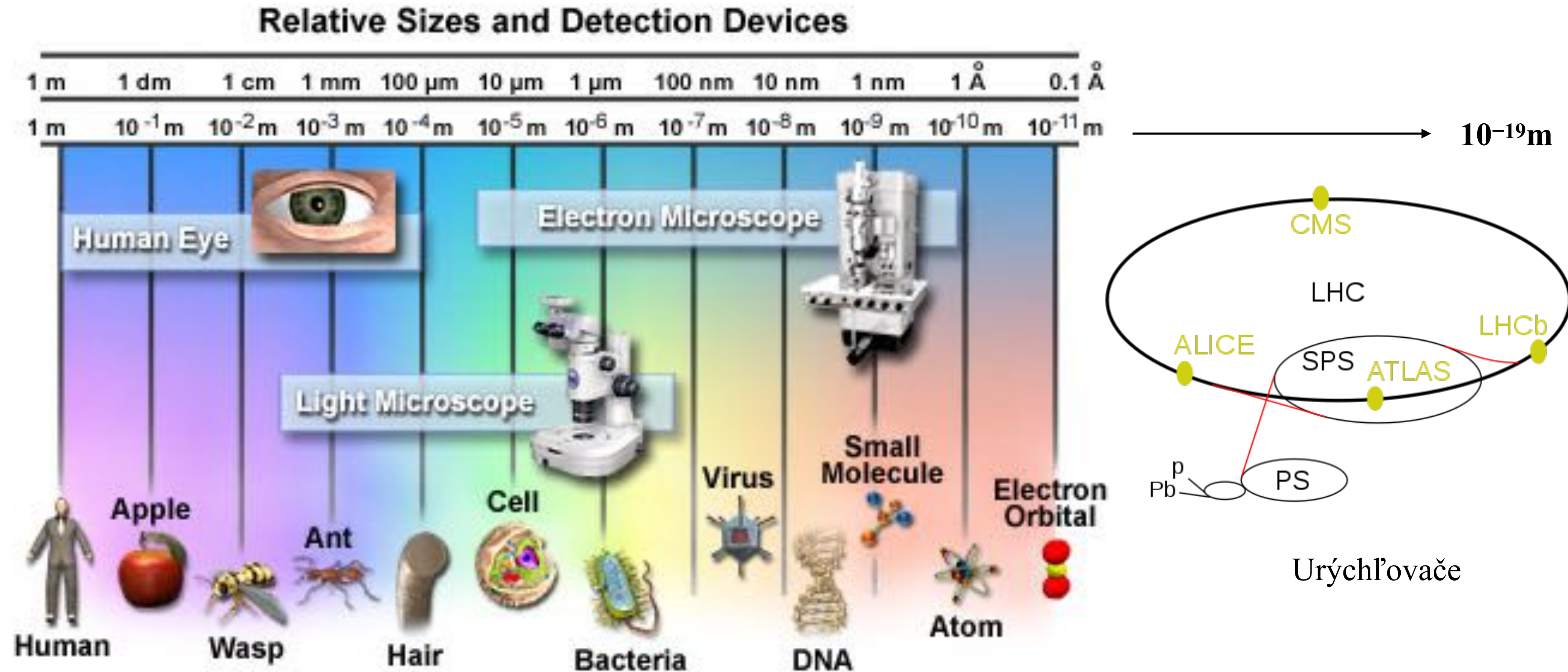


Figure 1

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

# Urýchľovanie

Urýchľovanie  $\equiv$  zvyšovanie rýchlosti

Pre nabitú časticu:

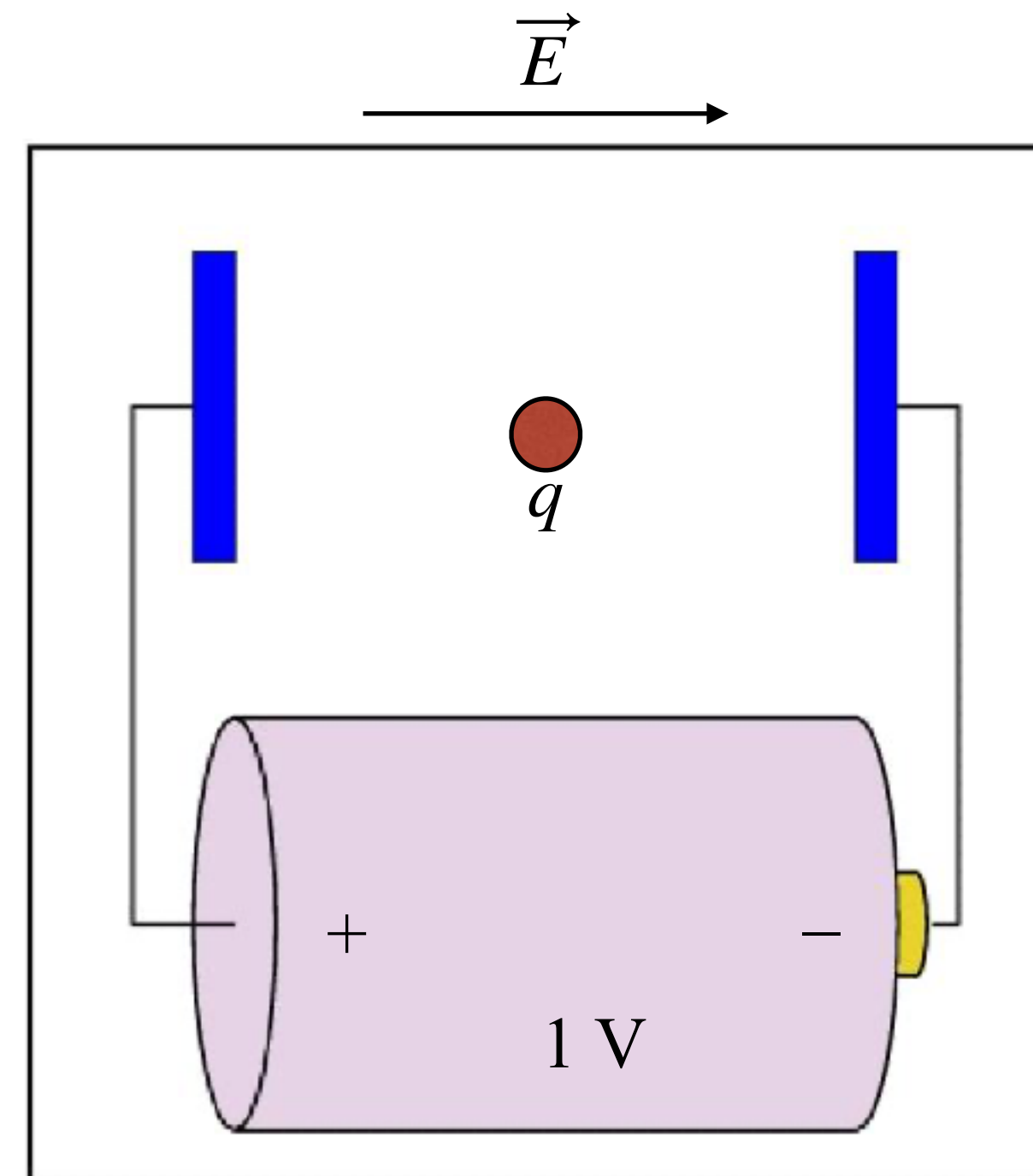
$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = q \vec{E}$$

# 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:

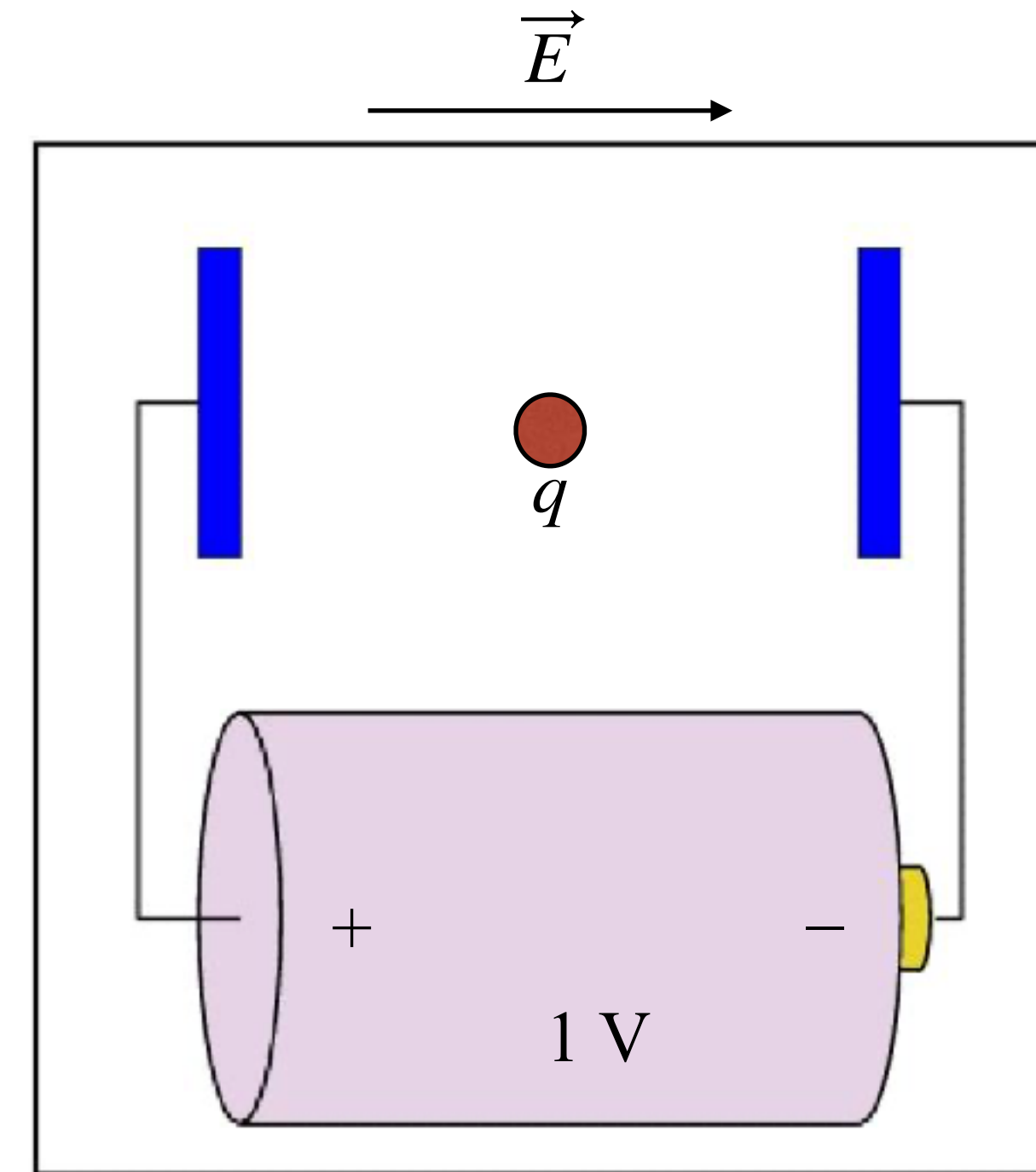
$$\vec{F} = m \vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = q \vec{E}$$

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  $\Delta E = 1 \text{ eV}$
- $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



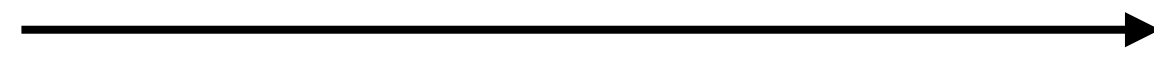
# Urýchľovače v časticovej fyzike

So zvyšovaním hybnosti:

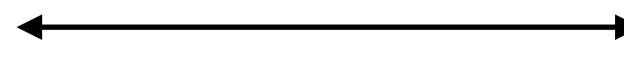
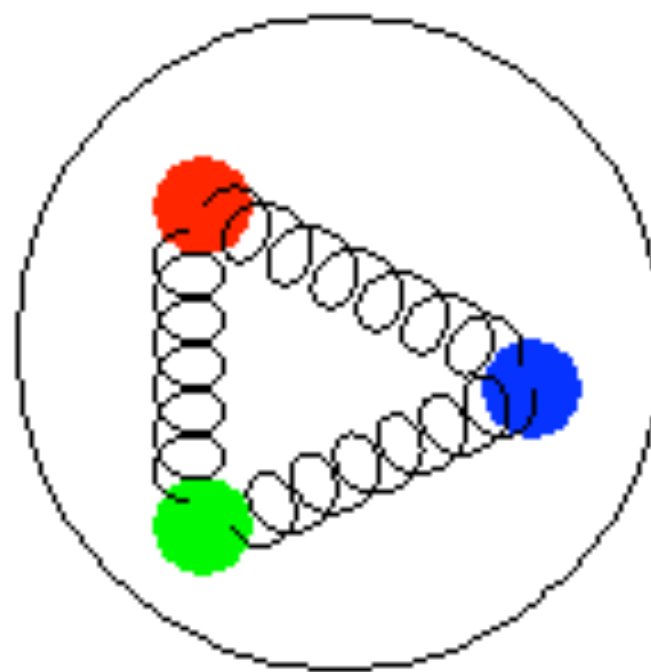
1. Vidíme na menšie vzdialenosti:

$$\lambda = \hbar/p$$

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



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

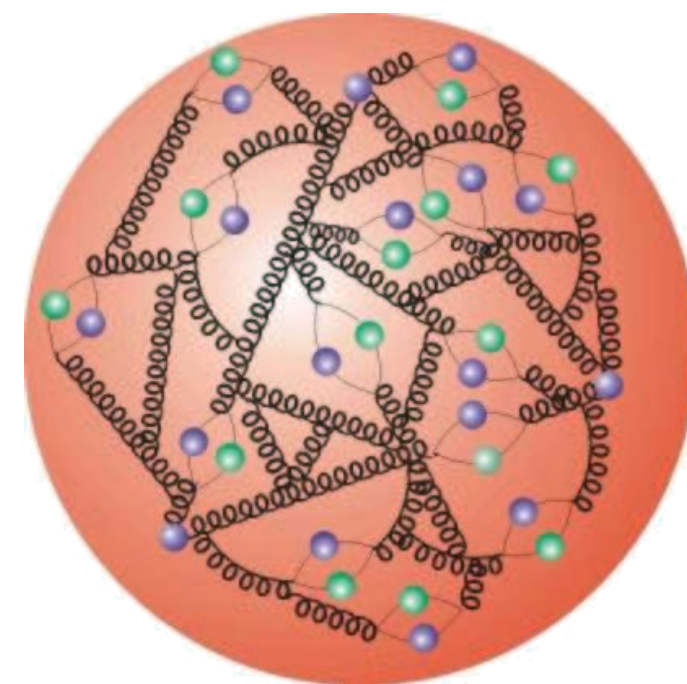


$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

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



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



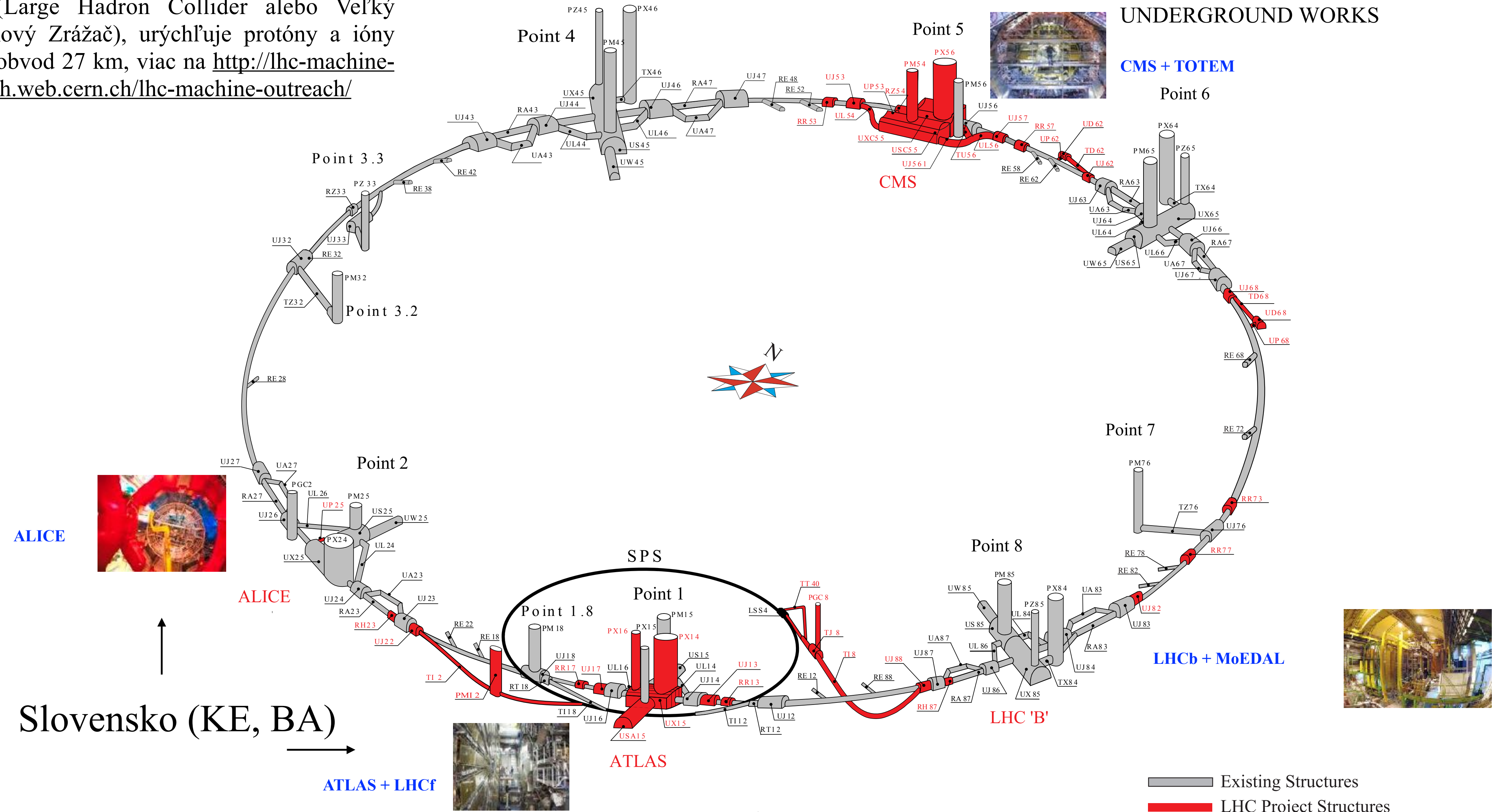
So zvyšovaním kinetickej energie:

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/>



ALICE



UNDERGROUND WORKS

CMS + TOTEM



LHCb + MoEDAL



ATLAS

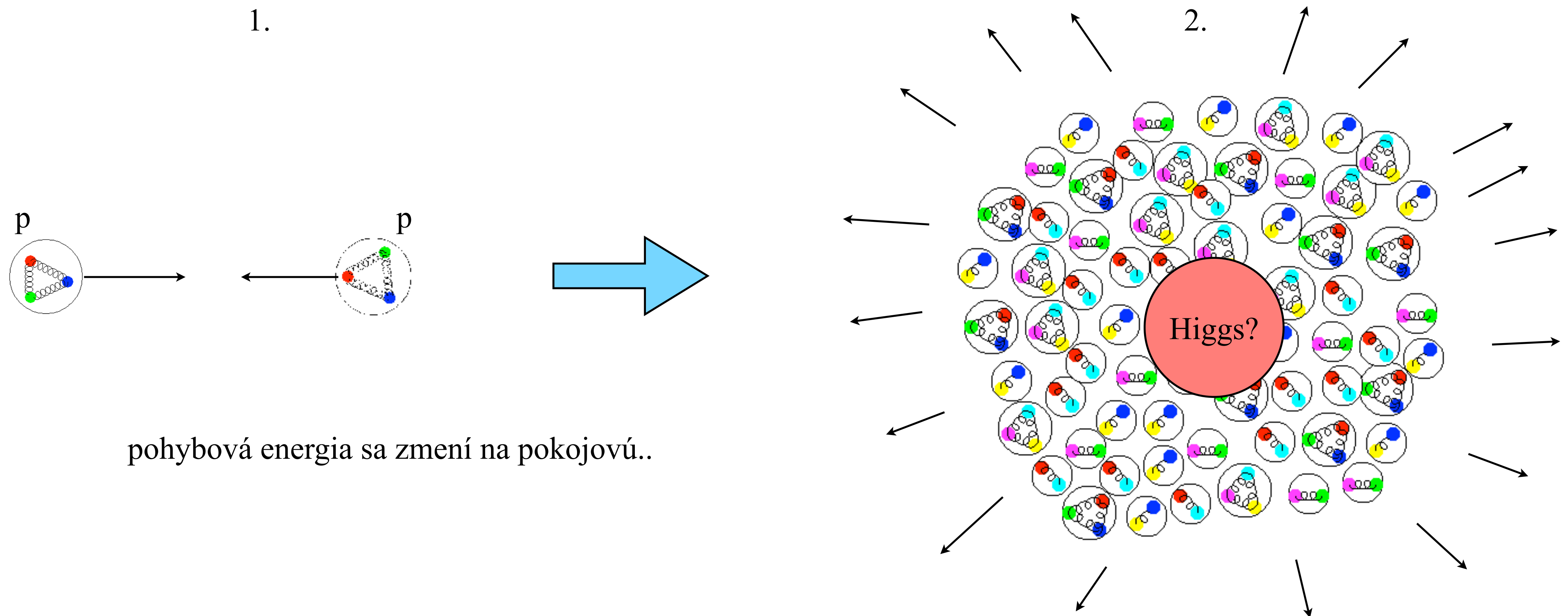
Slovensko (KE, BA)

ATLAS + LHCf

# Celková energia pred zrážkou = celková energia po zrážke

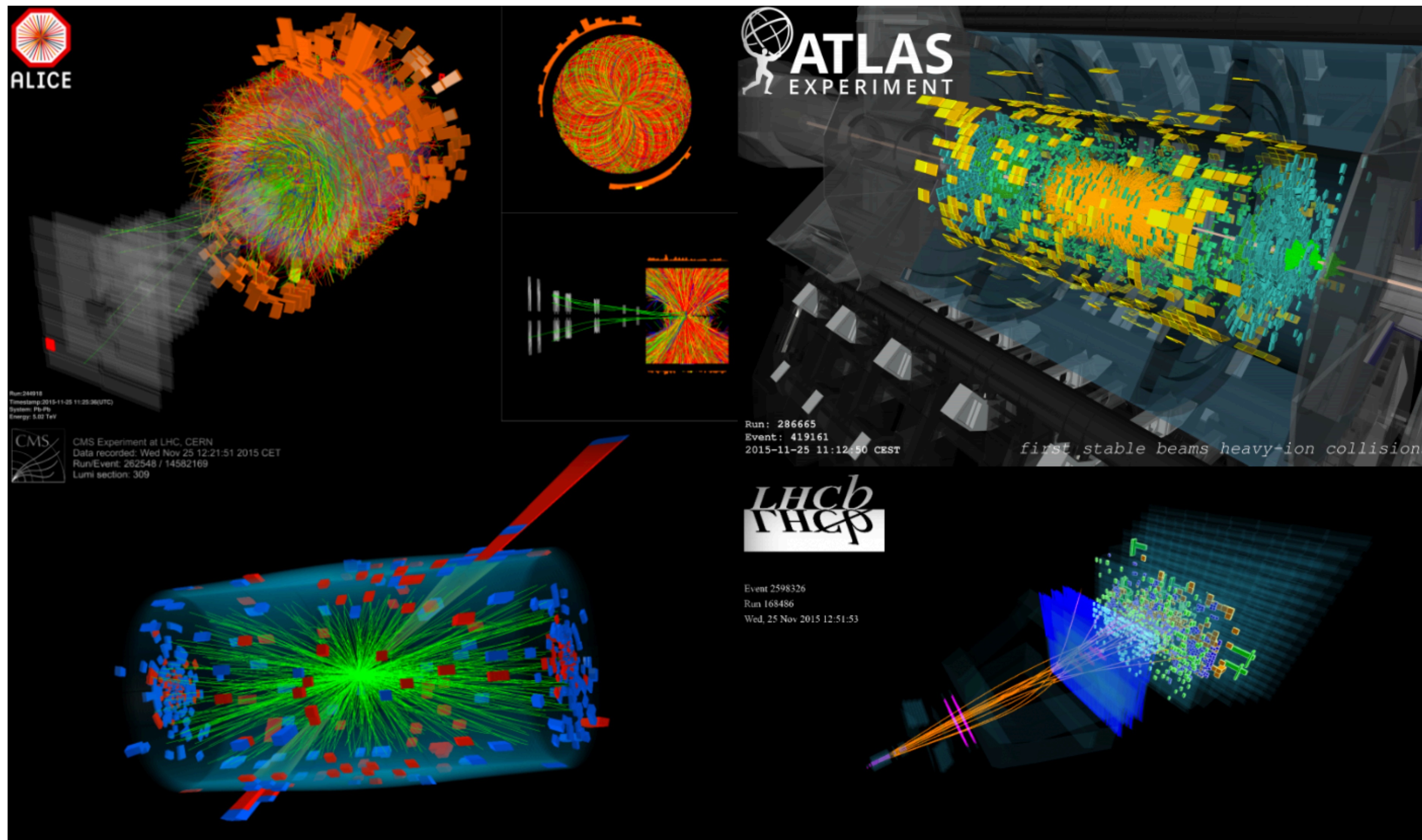
(Zákon zachovania energie)

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



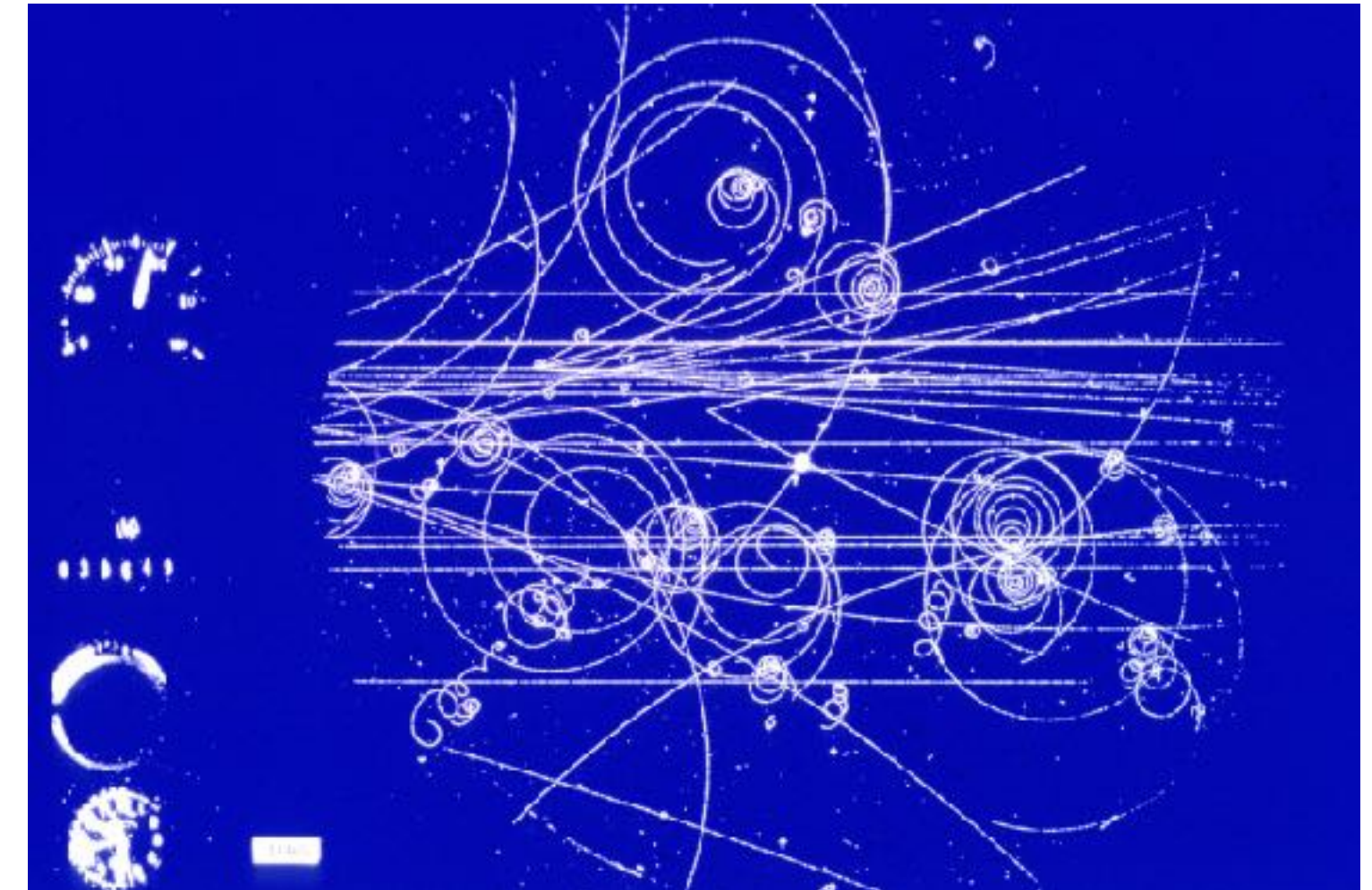
**Čím vyššia energia zväzku, tým viac a ťažších častíc sa v zrážke narodí!**

# Zrážky na LHC

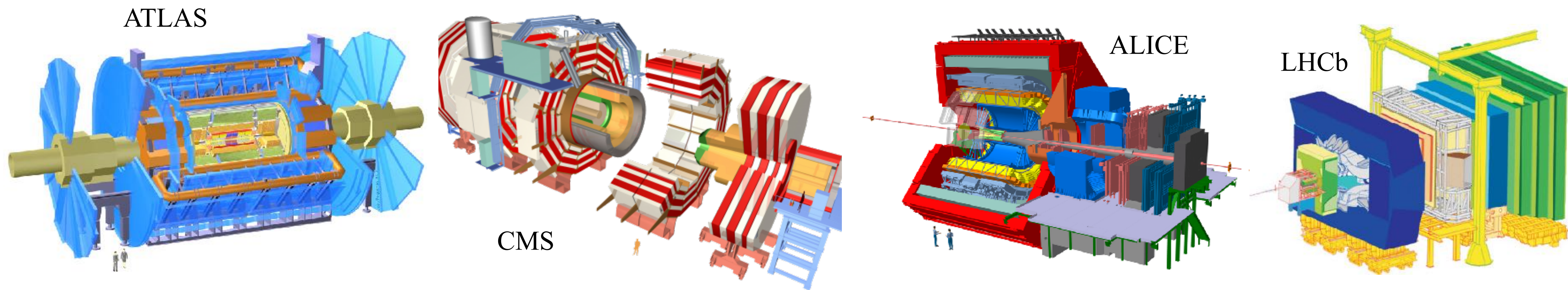


# Detekcia častíc

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



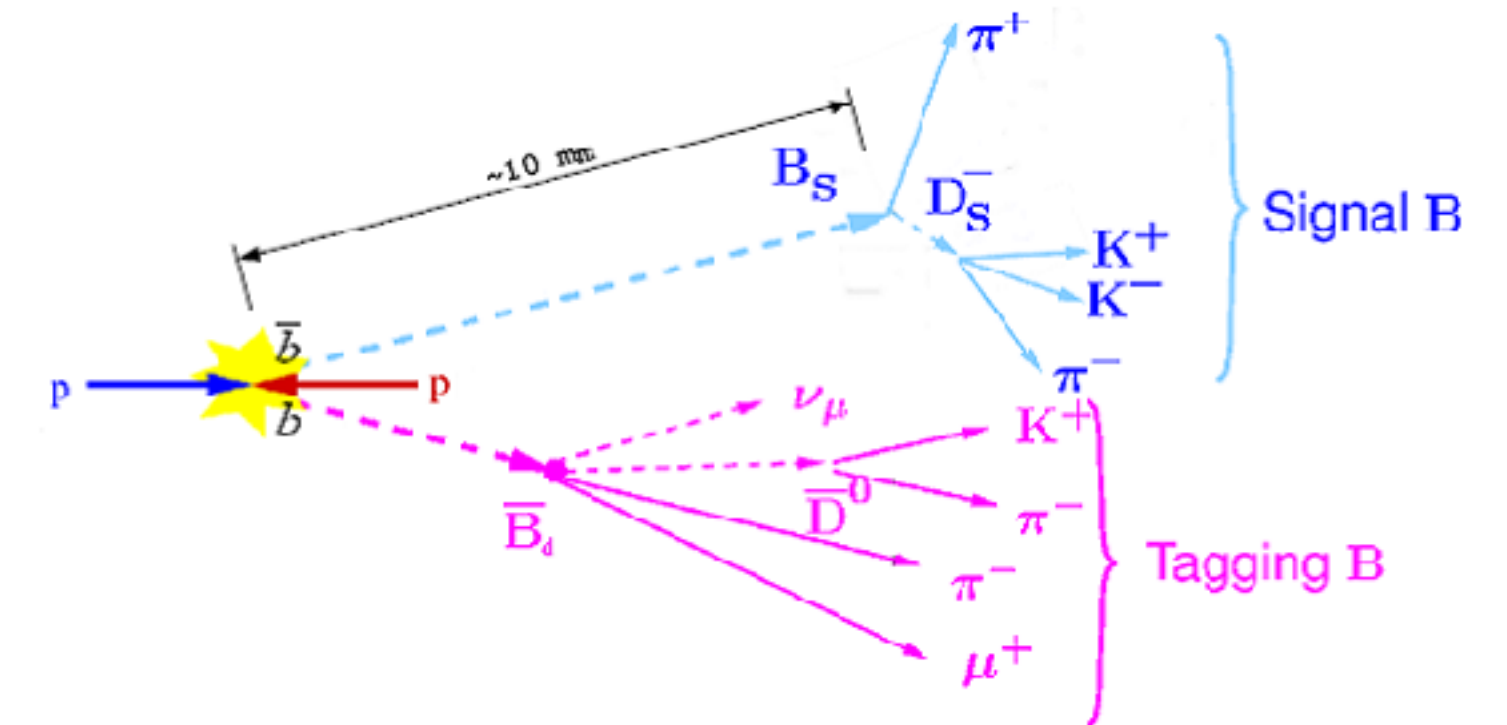
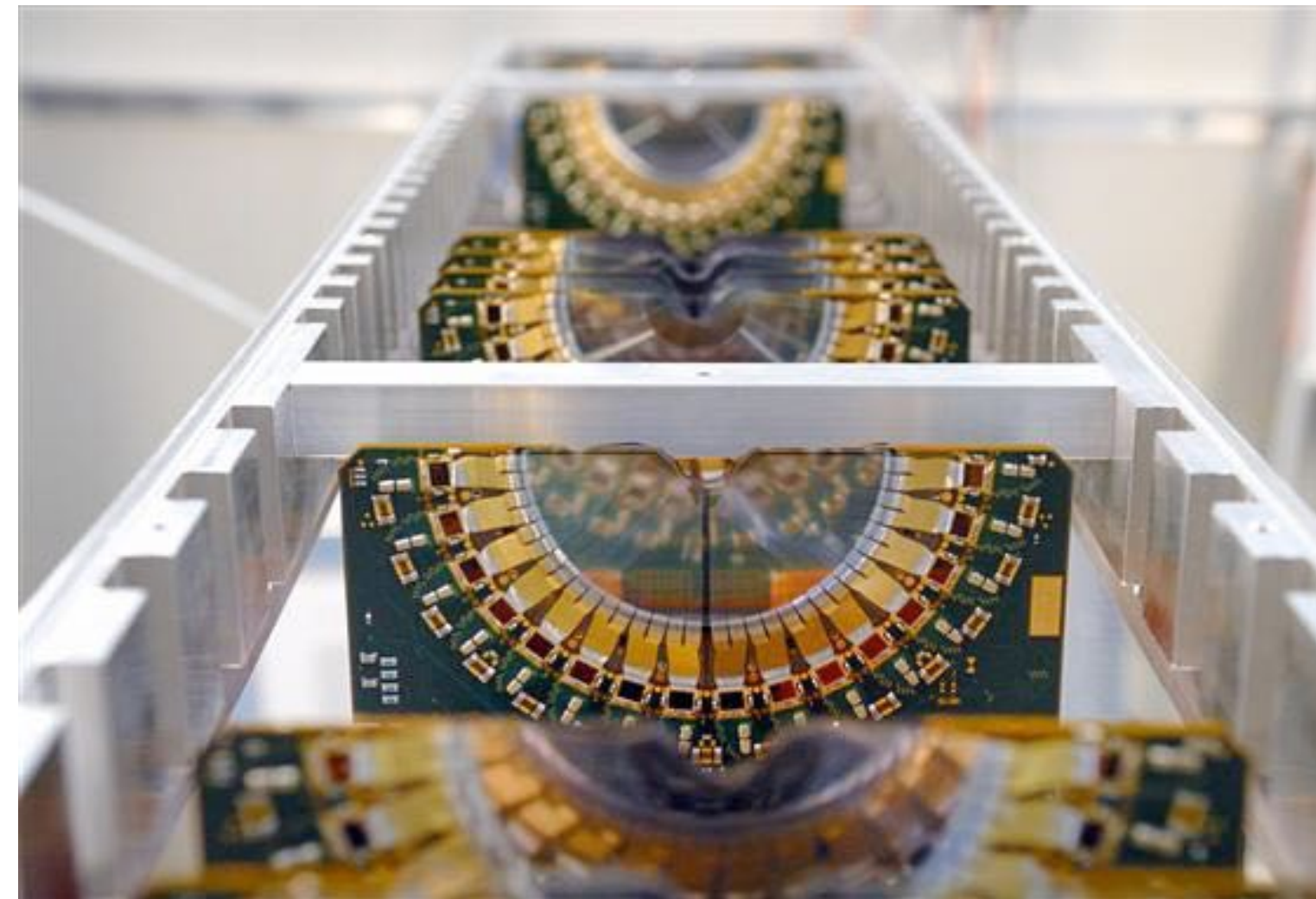
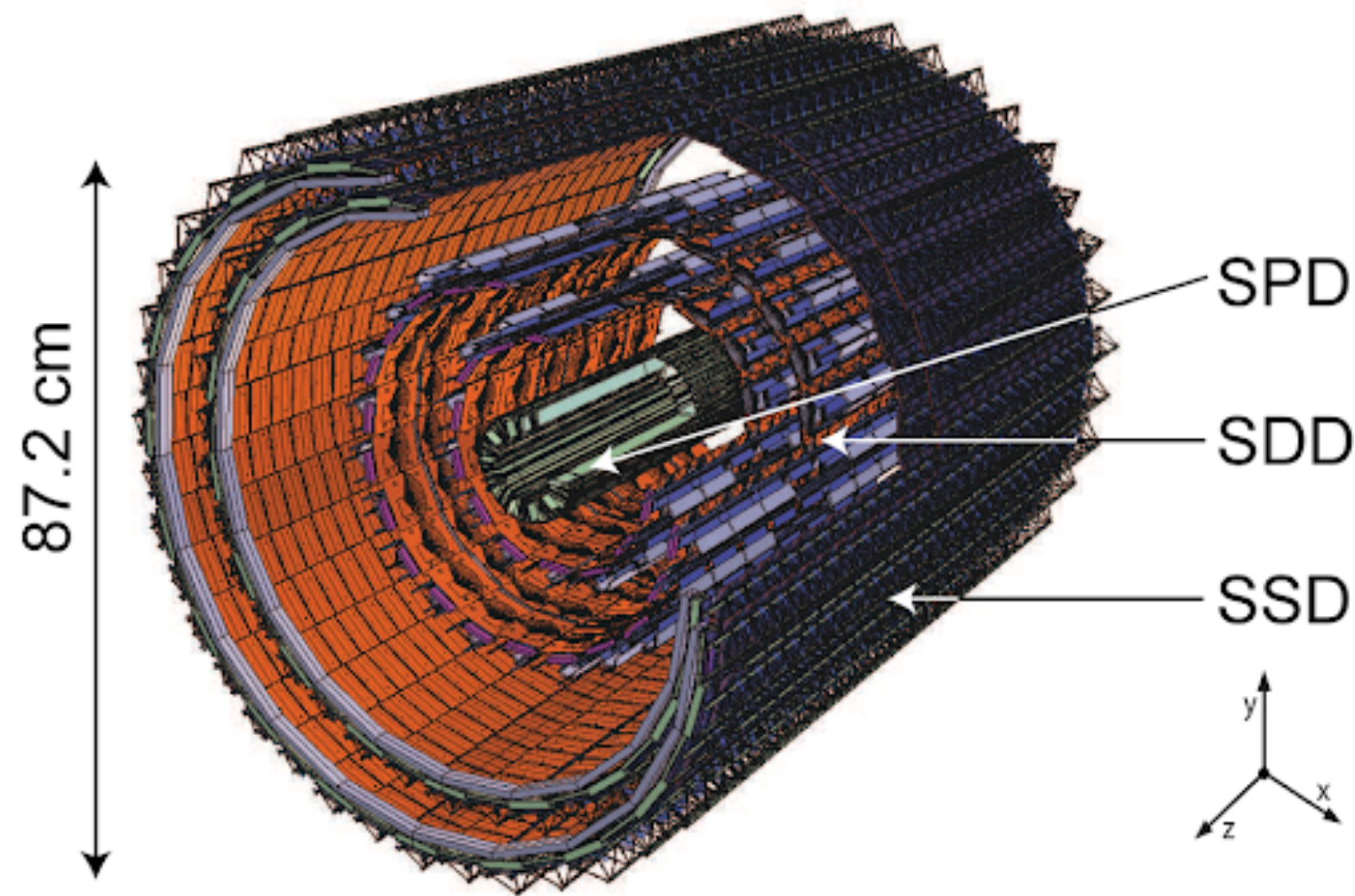
# Príklad detekcie elementárnych častíc: detektory na LHC



- 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

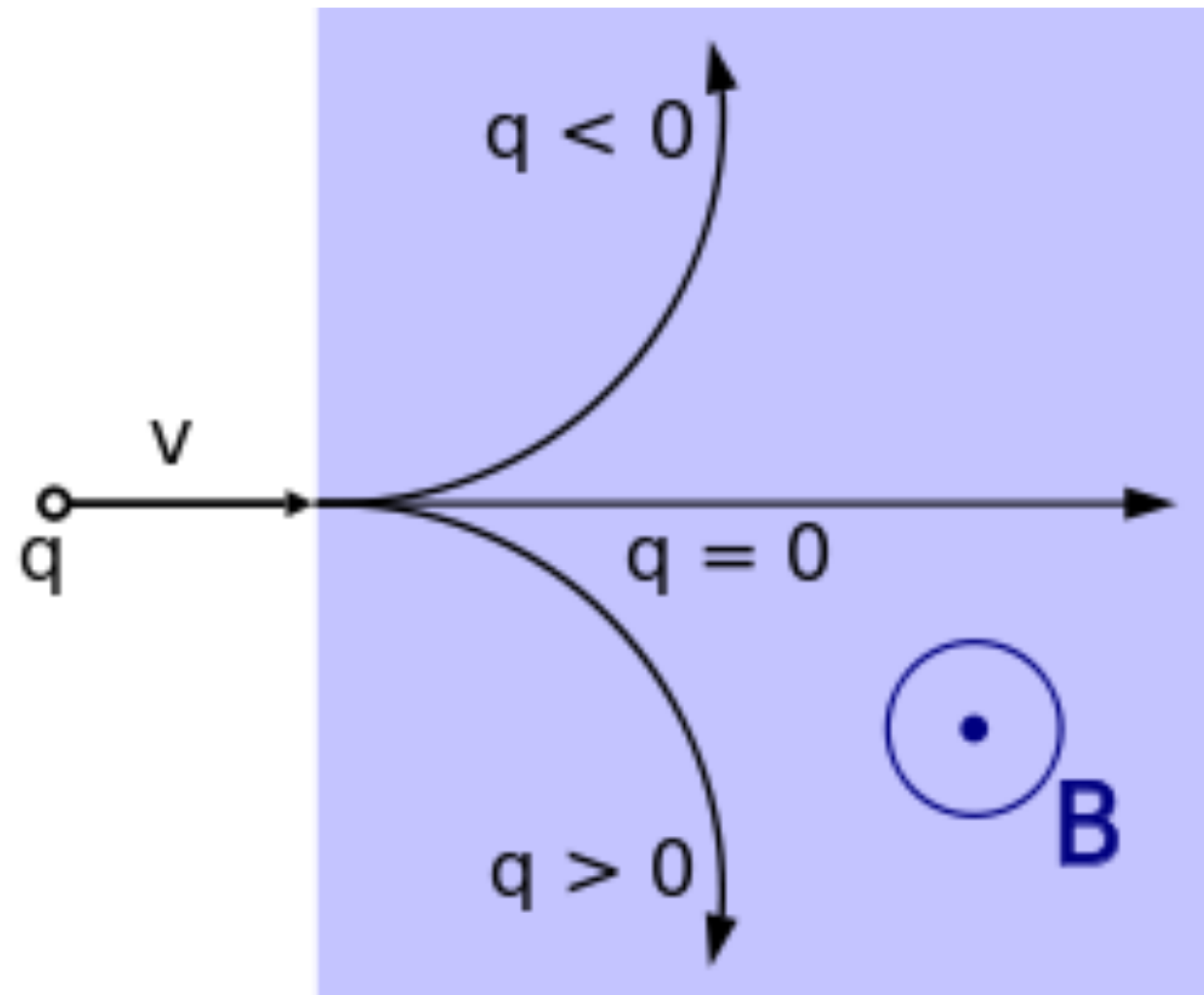
**Na každú vlastnosť je dobrý iný materiál alebo typ detektora ⇒ cibul'ová štruktúra!**

# Dráhové detektory



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

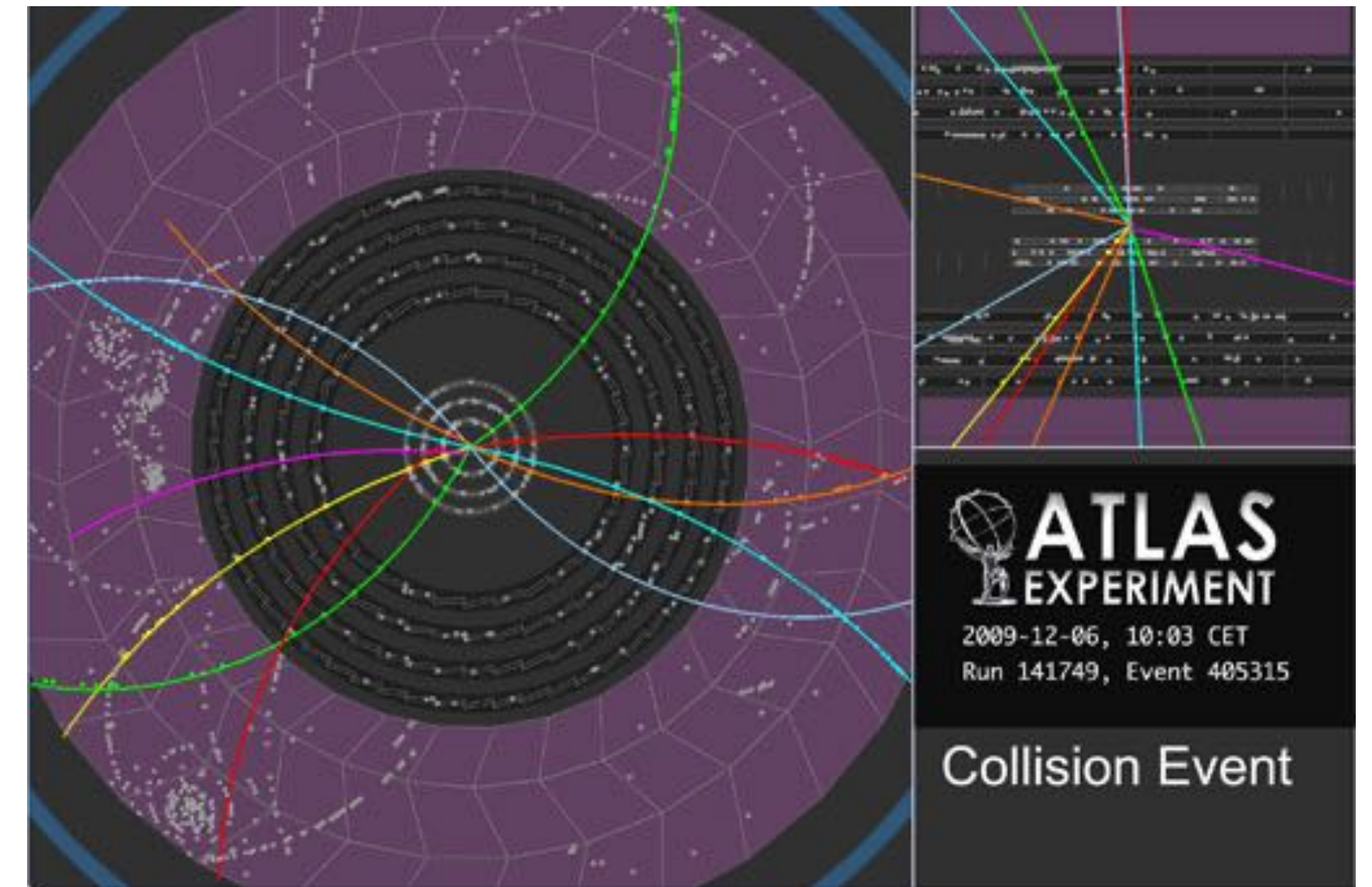
# Dráhové detektory



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

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

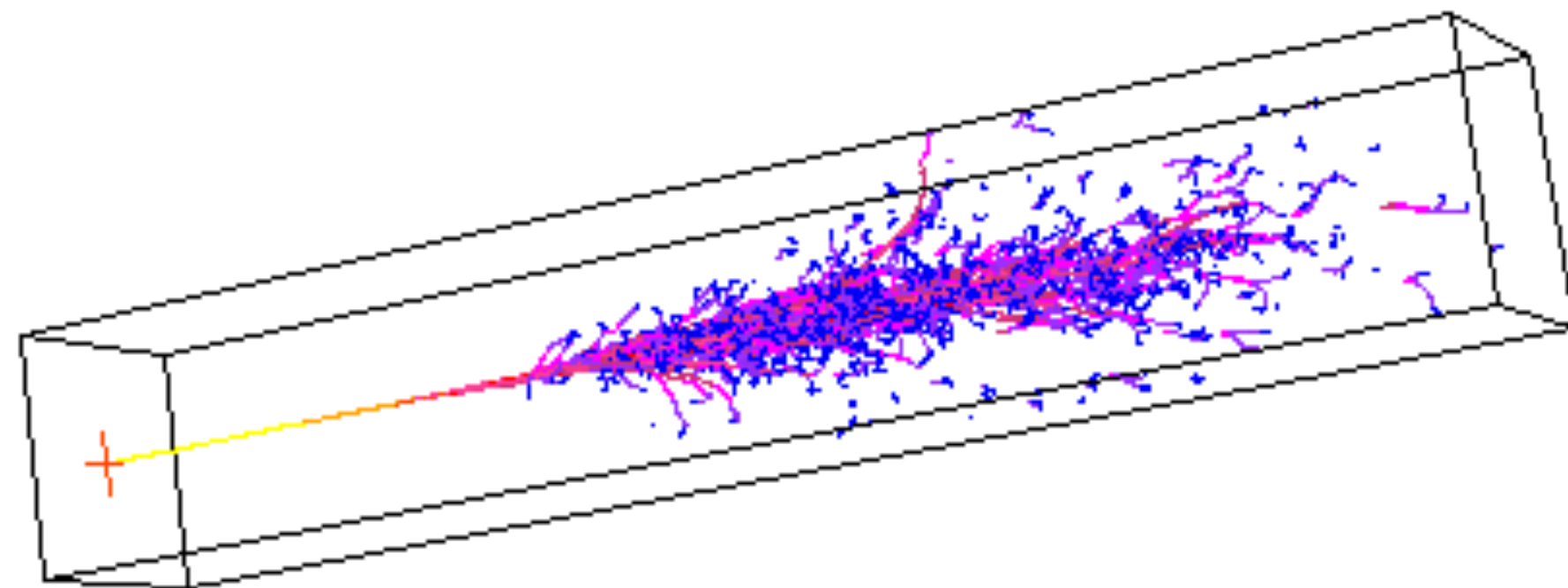
$$p = qBR$$



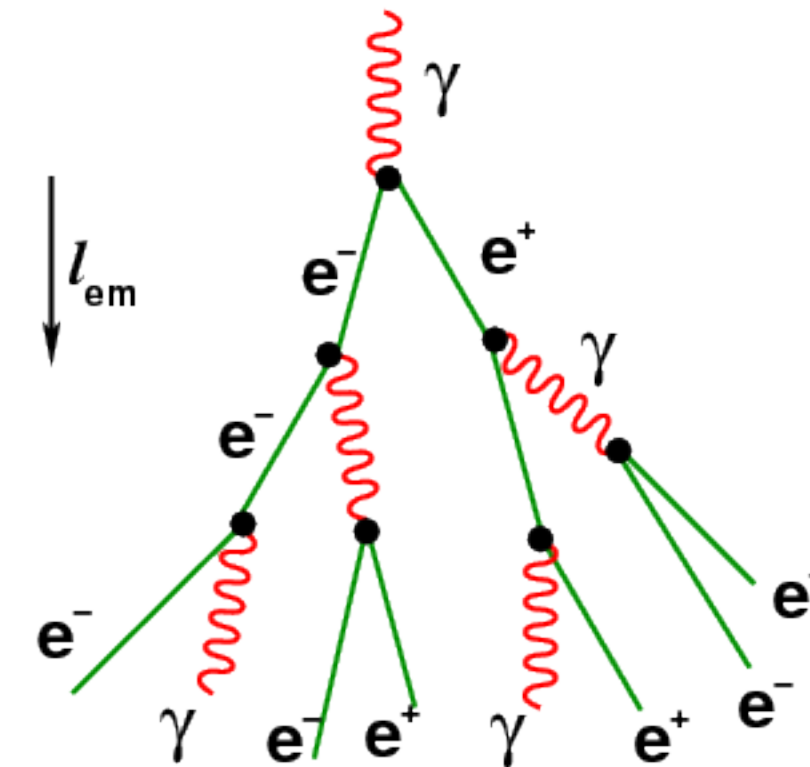
- dráhové detektory merajú hybnosť nabitej častice zo zakrivenia jej dráhy
- čím vyššia hybnosť, tým horšia presnosť - počet detektorových vrstiev pomáha



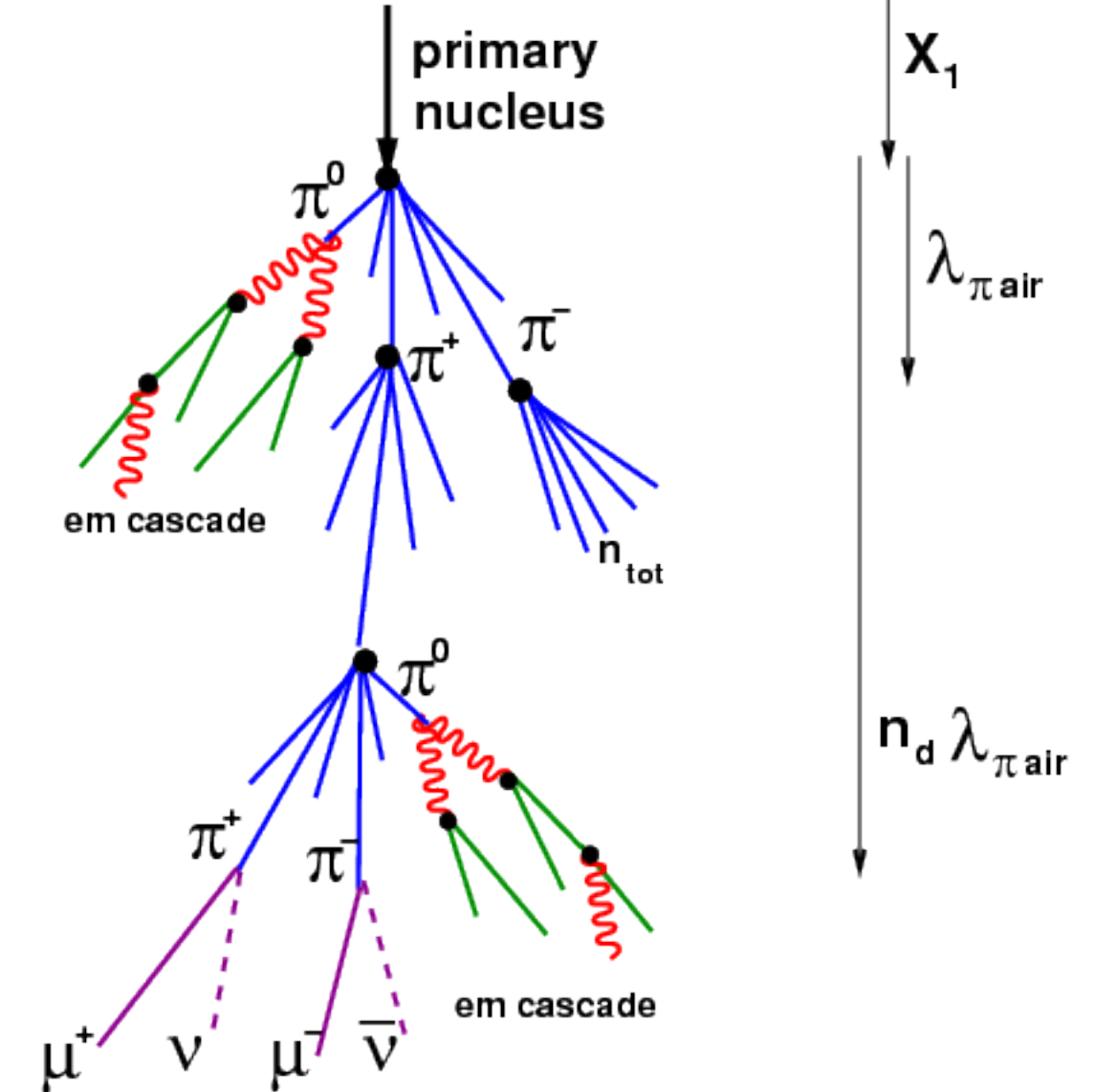
# Elektromagnetické kalorimetre



em cascade

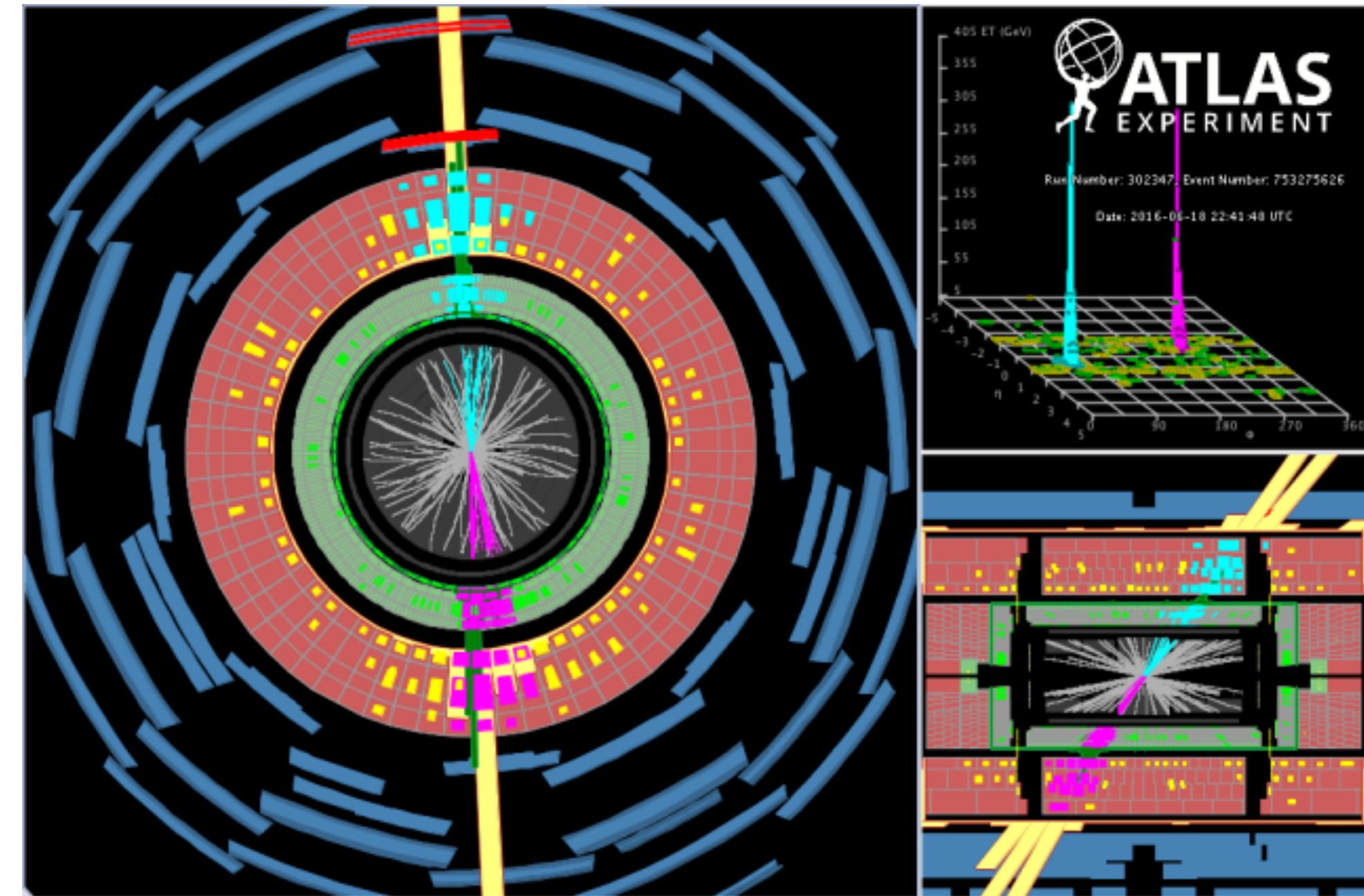
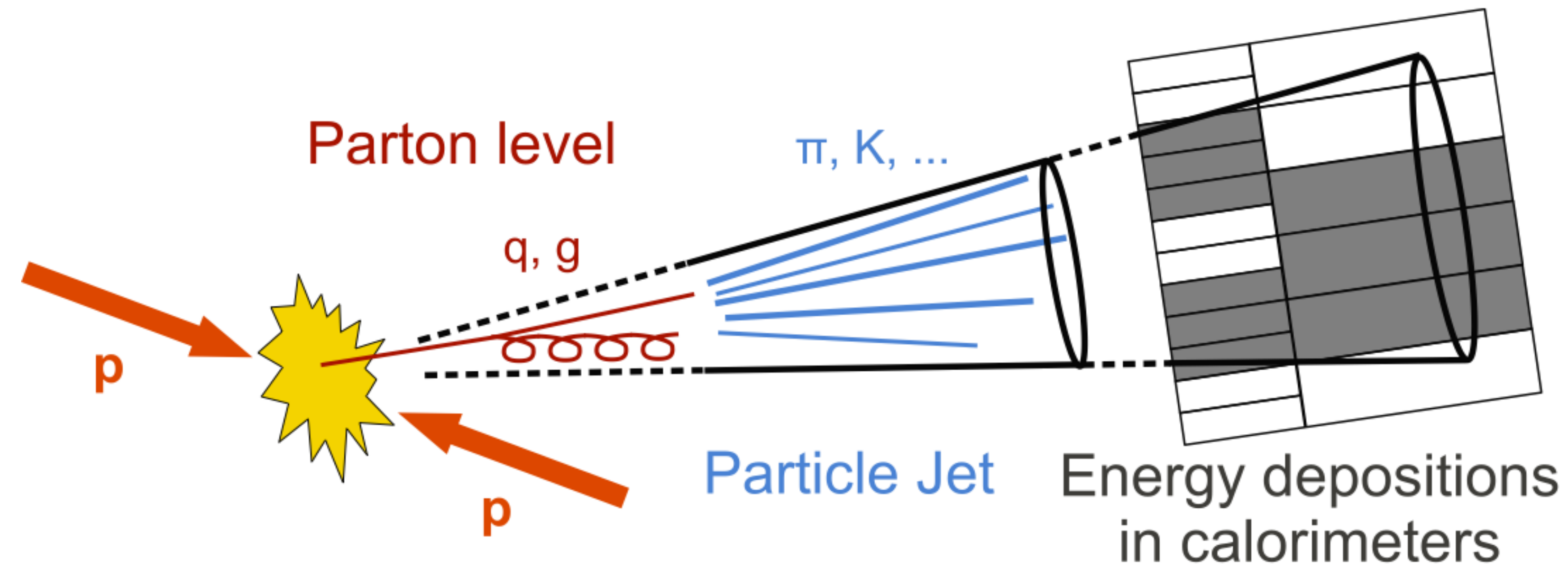


hadronic cascade



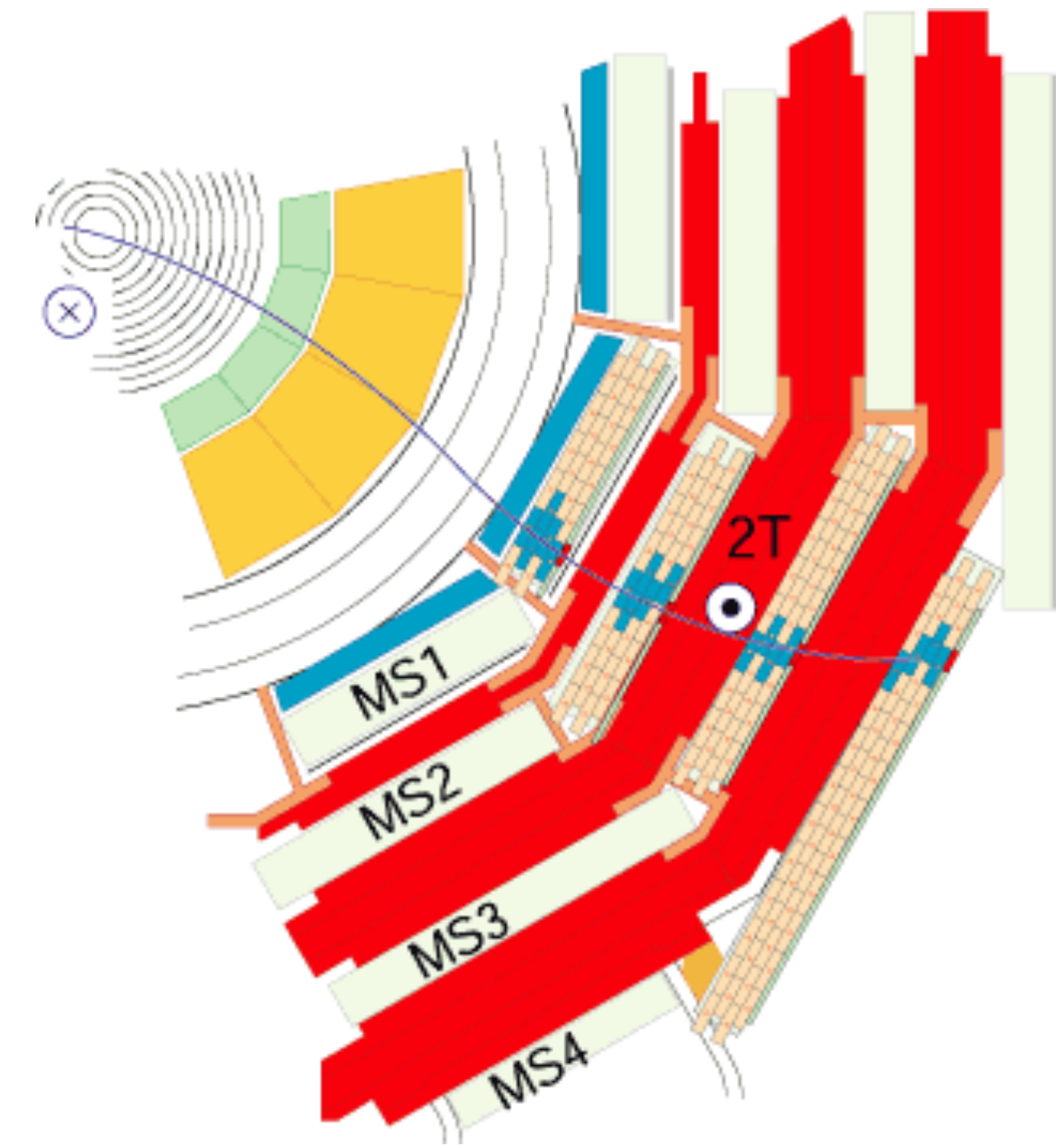
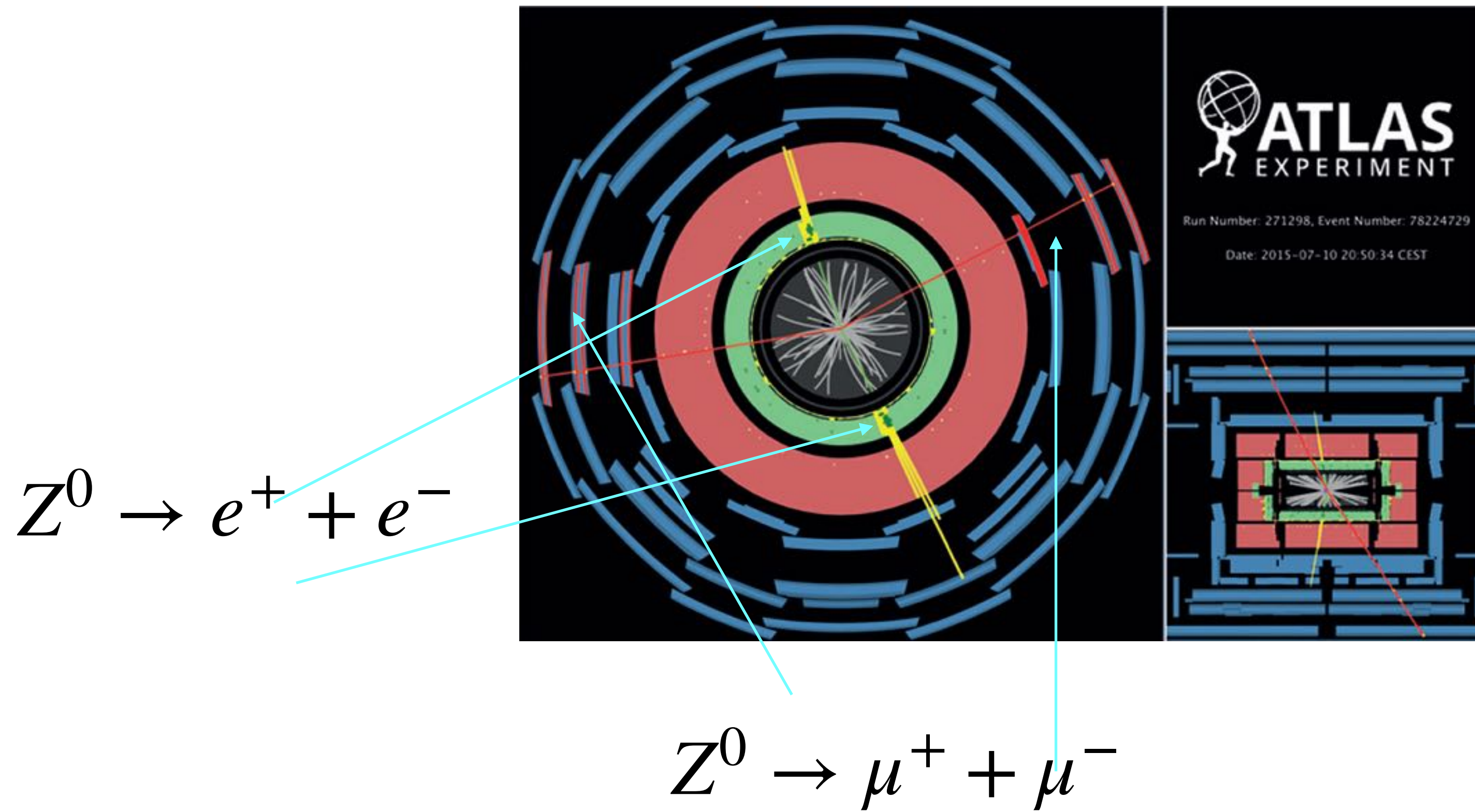
- absorbujú energiu elektricky nabitých častíc a fotónov

# Hadrónové kalorimetre



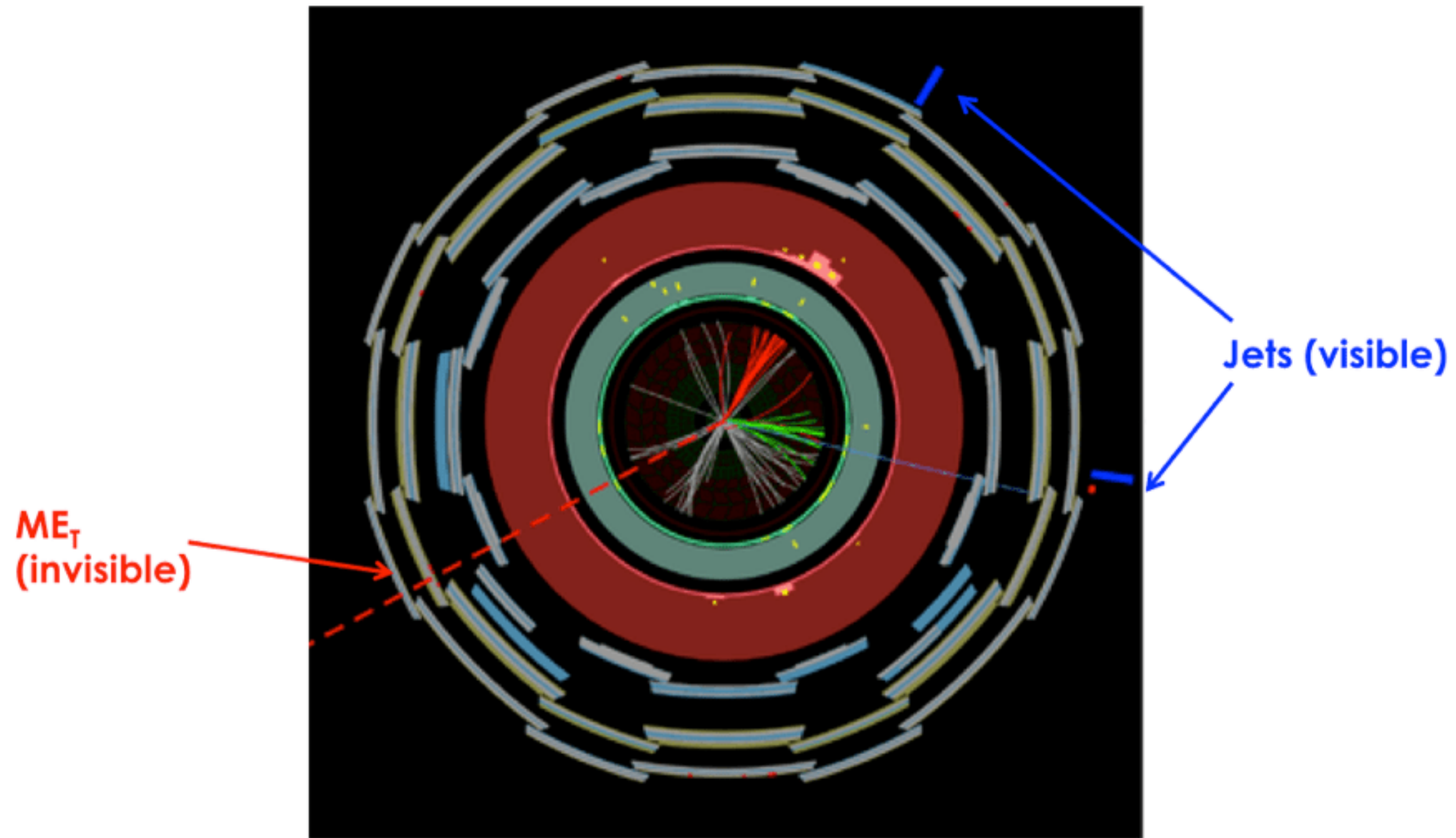
- absorbujú energiu spršok hadrónov pochádzajúcich z kvarkov a z gluónov

# Miónové detektory



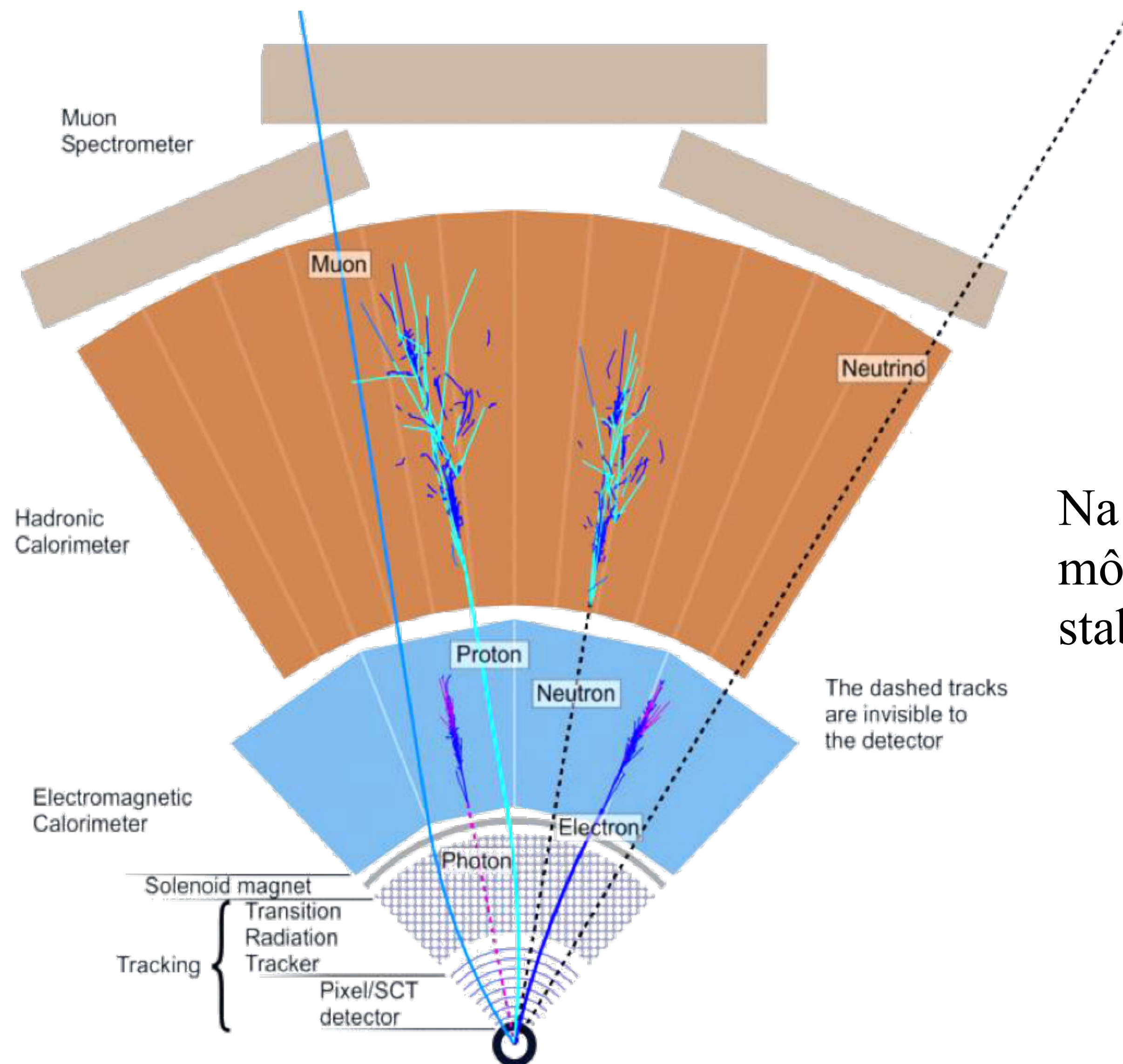
- mióny prechádzajú materiálom ľahko, lebo sú ťažké a neinteragujú silno

# Chýbajúca hybnosť - neutrína



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

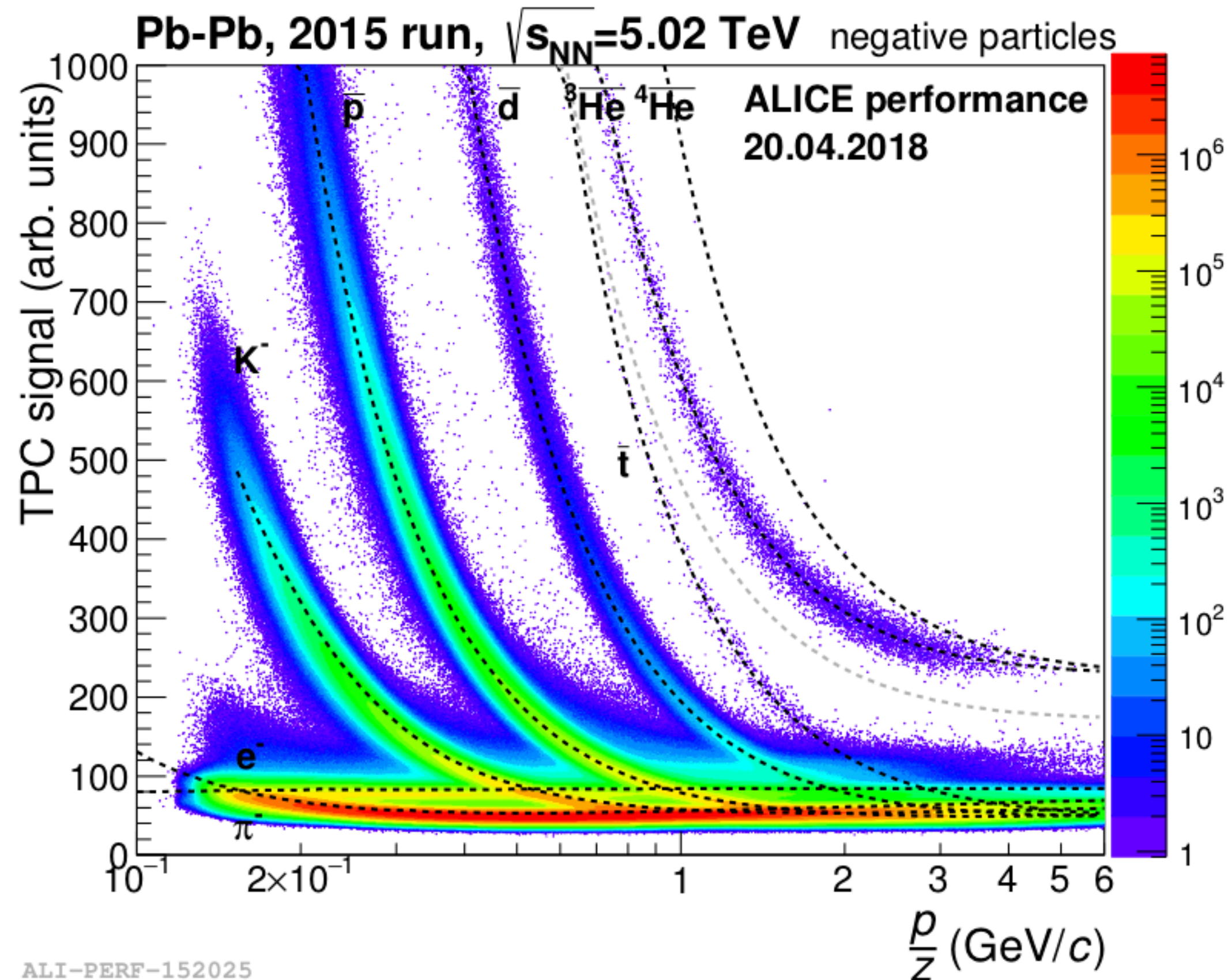
# Identifikácia stabilných a dlhožijúcich častíc v detektore ATLAS



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

# Identifikácia stabilných a dlhožijúcich častíc v detektore ALICE

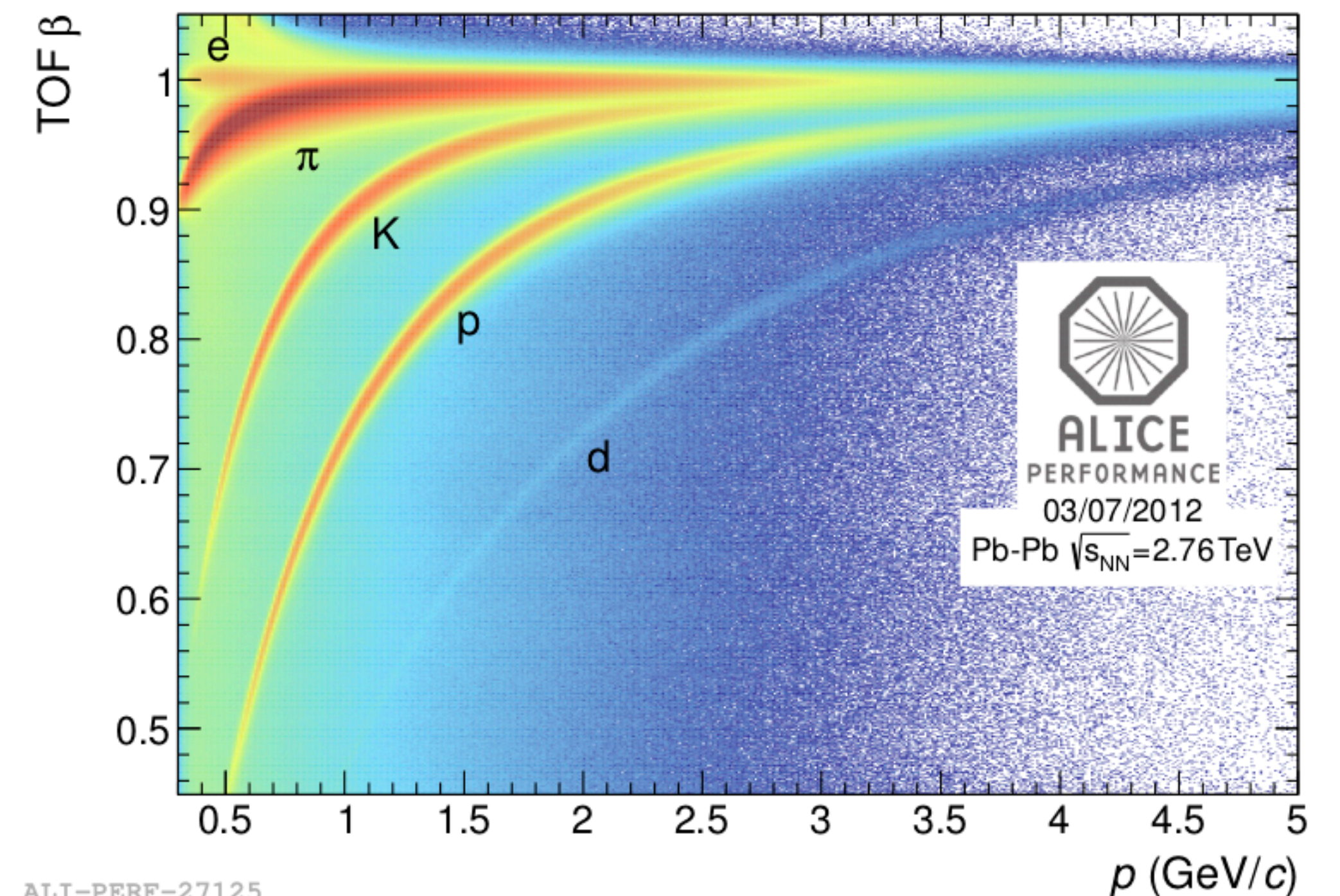
## hmotnosť a náboj = ID častice



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

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

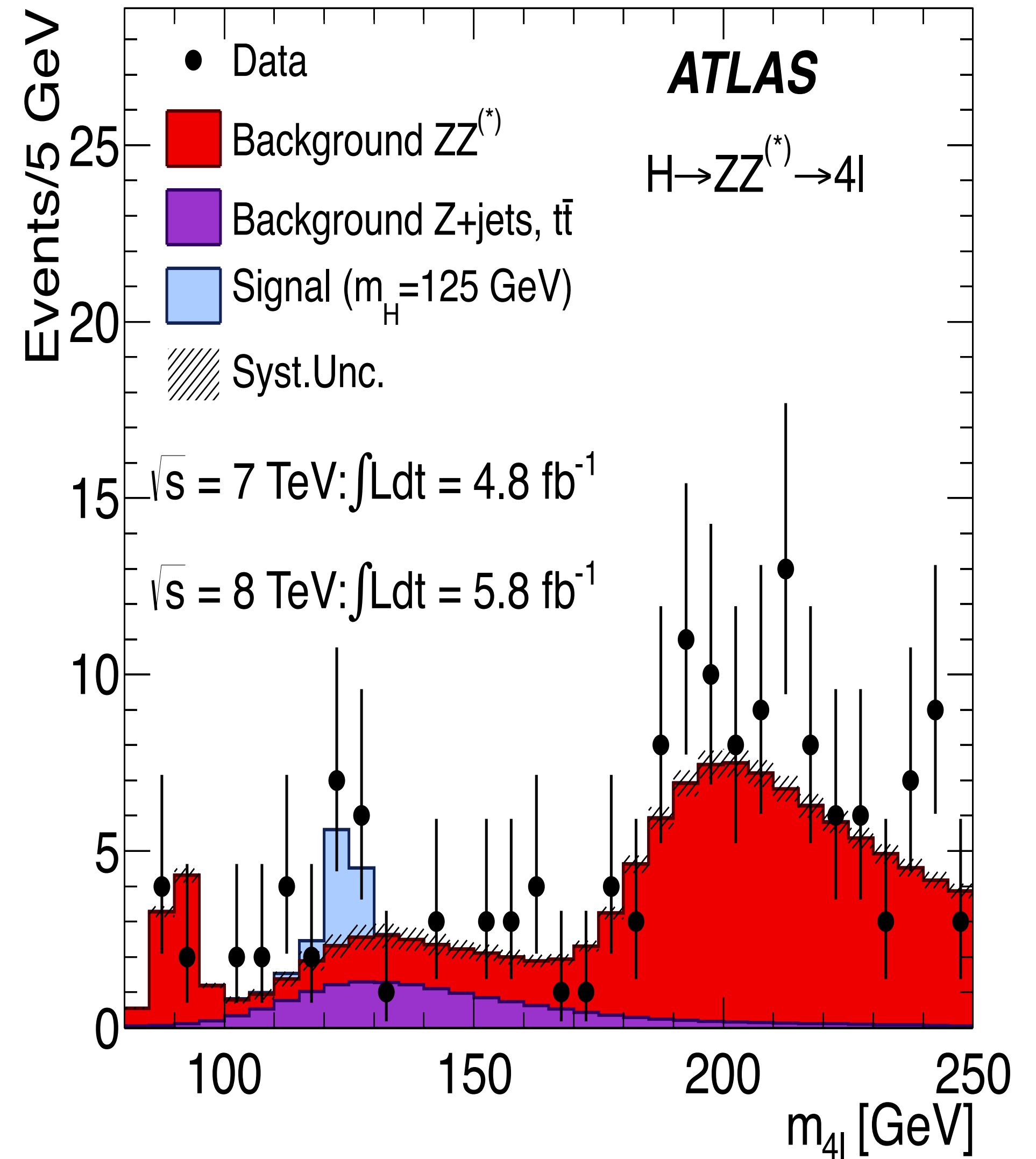
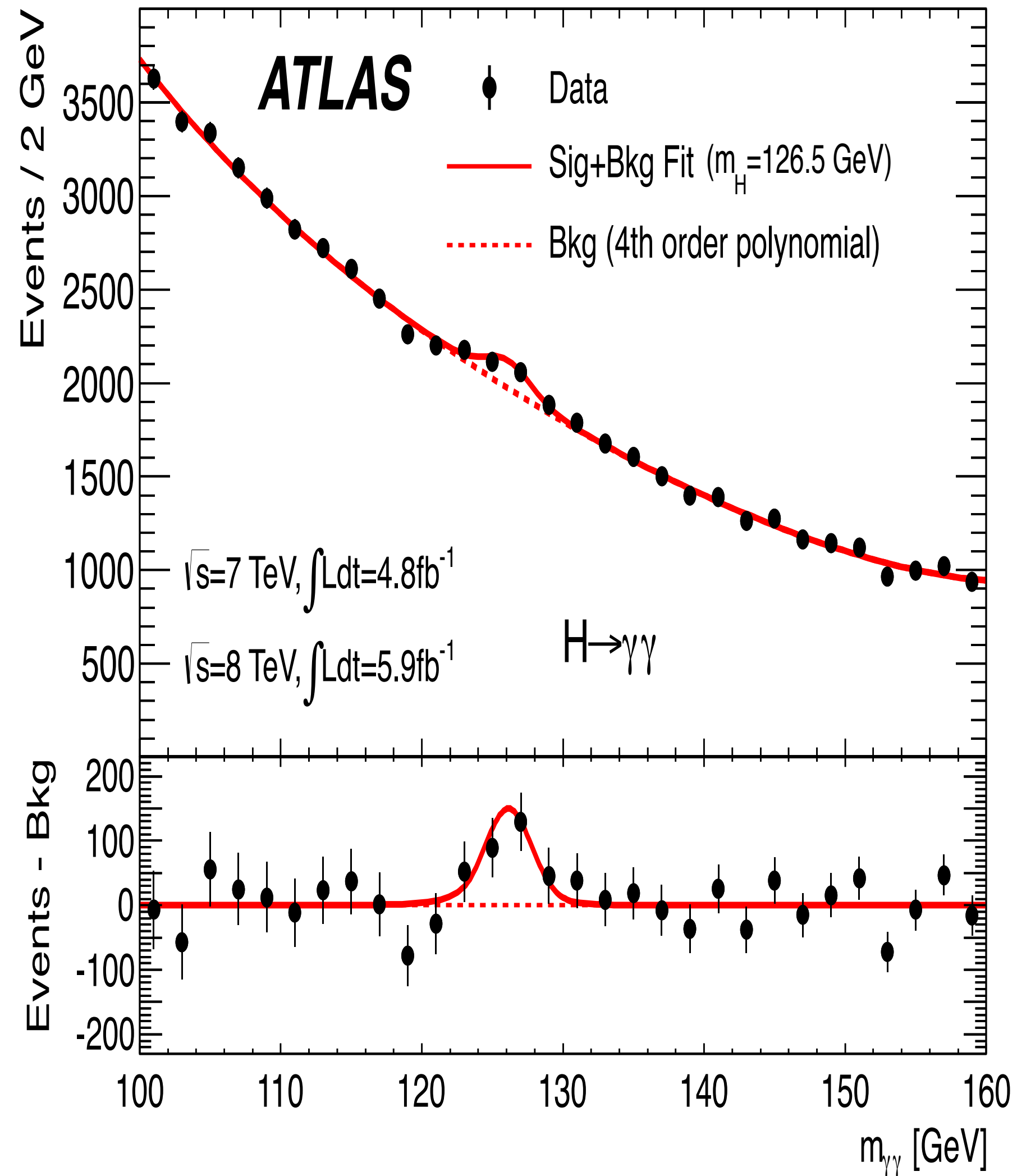
$$X \rightarrow A + B$$

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

tieto veličiny meriame v experimente!

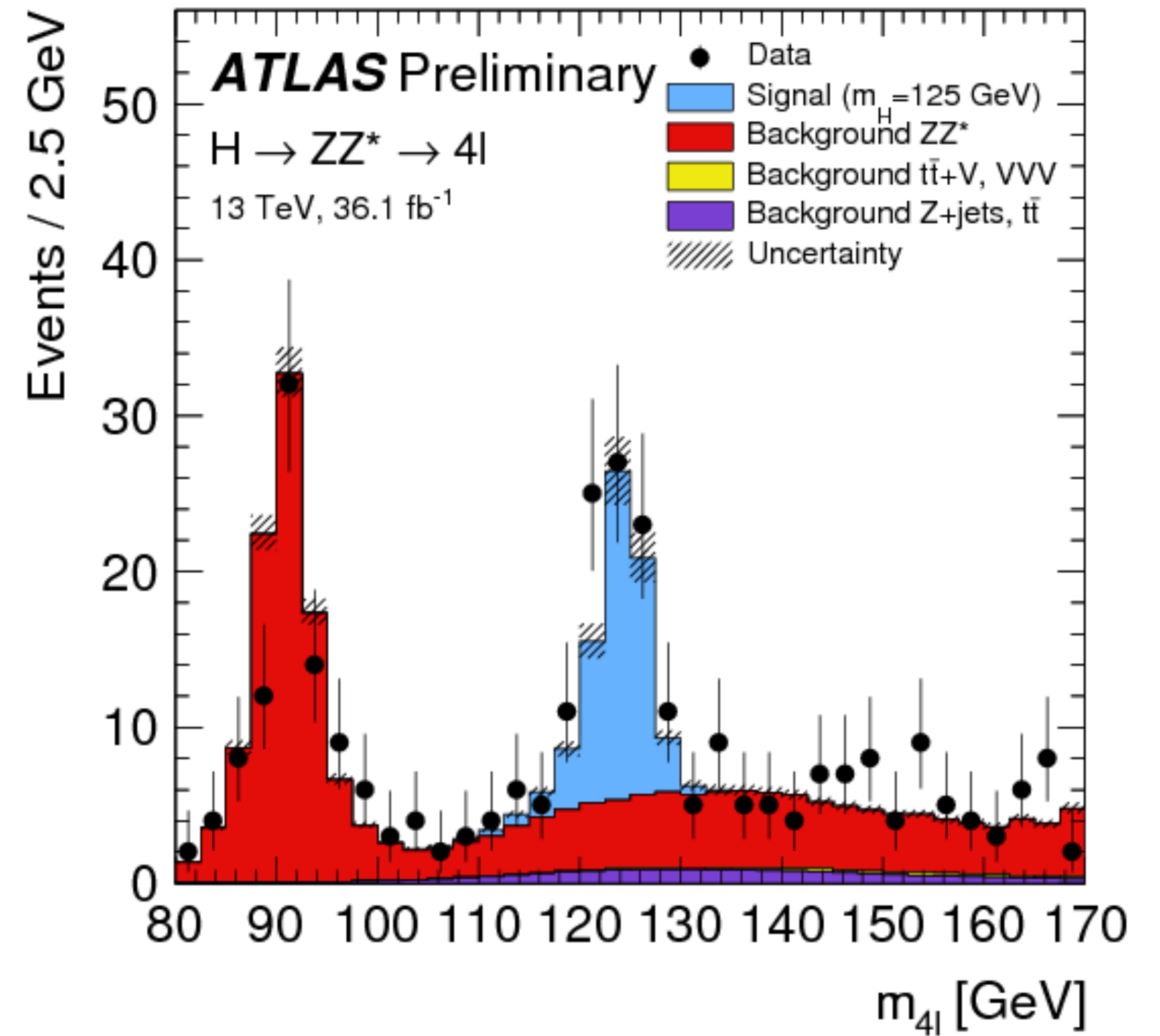
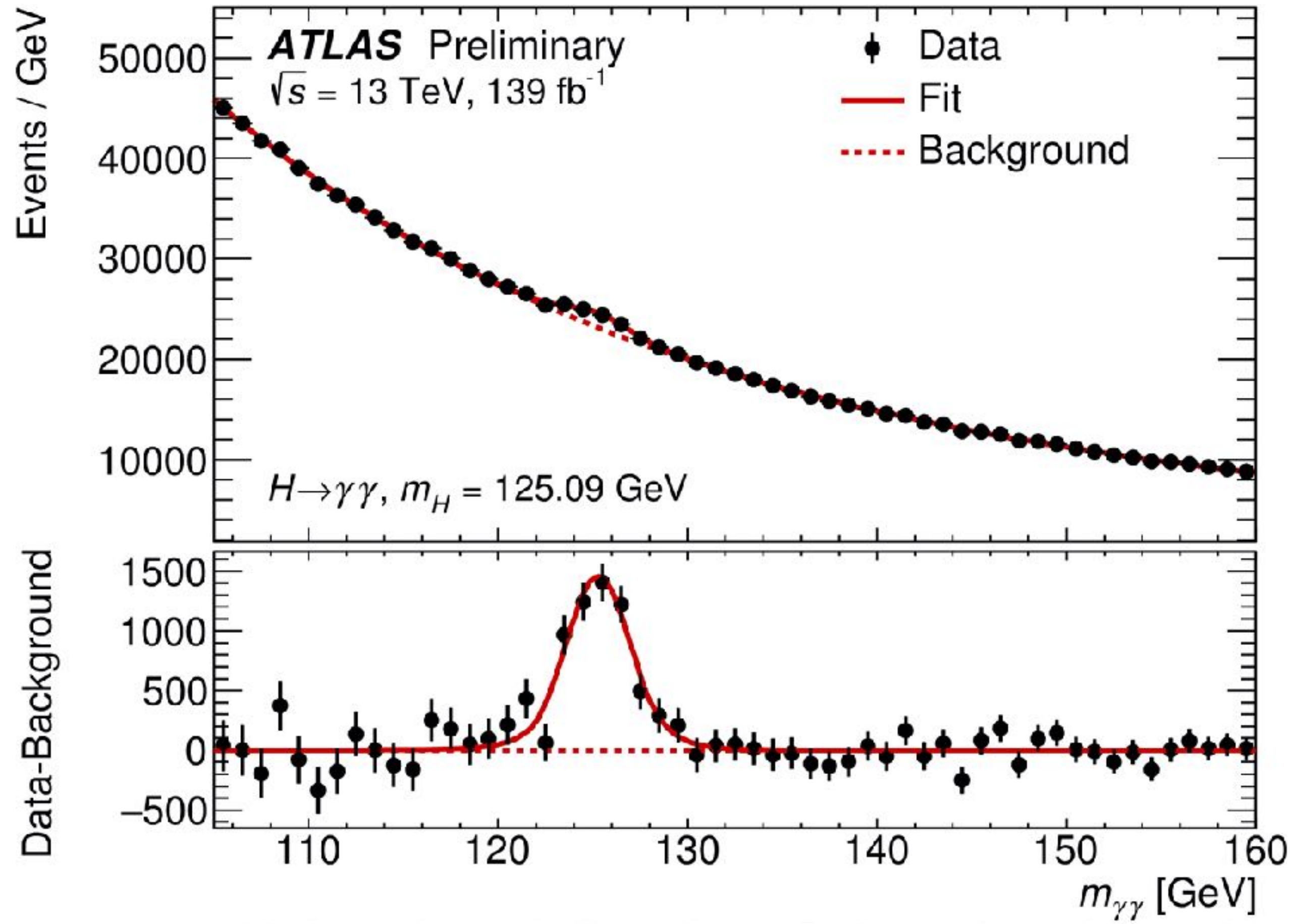
**a meriame ich aj dnes!! 😊**

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





# Higgsov bozón po 10 rokoch..

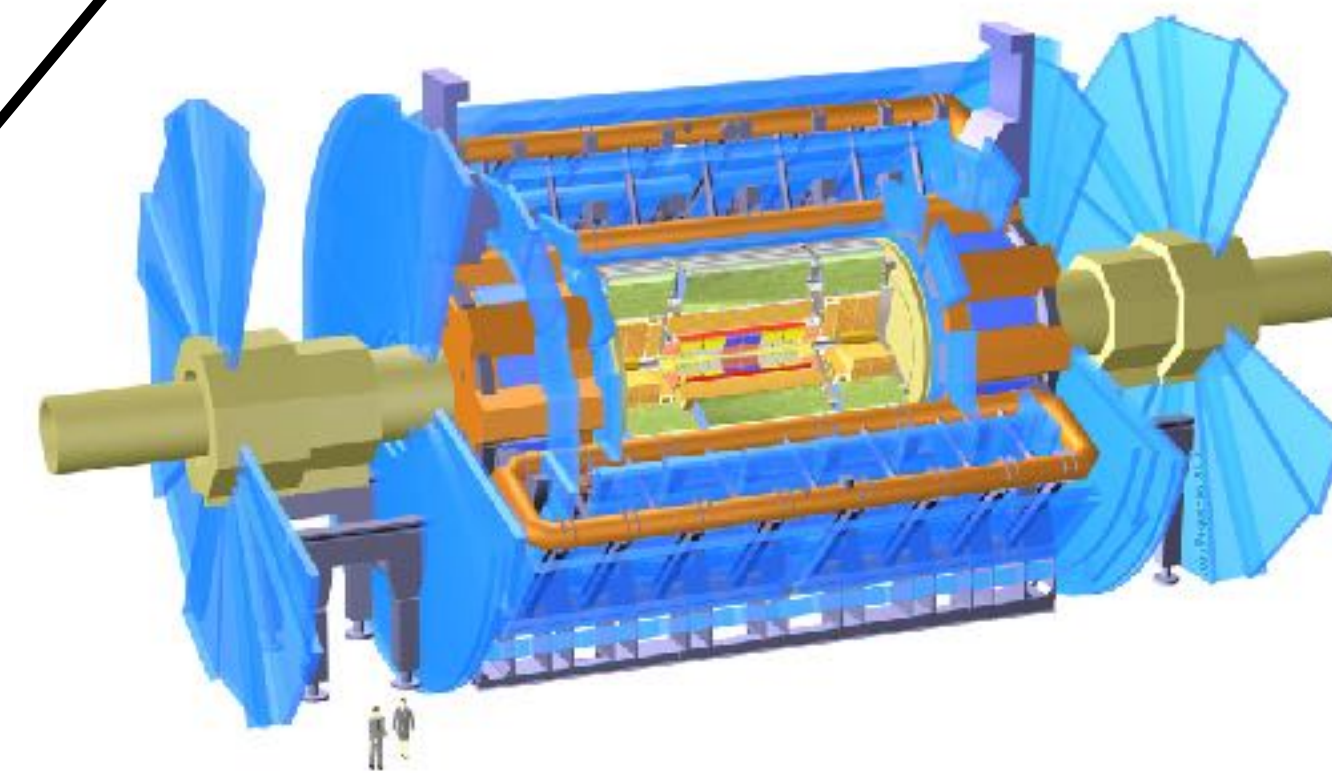
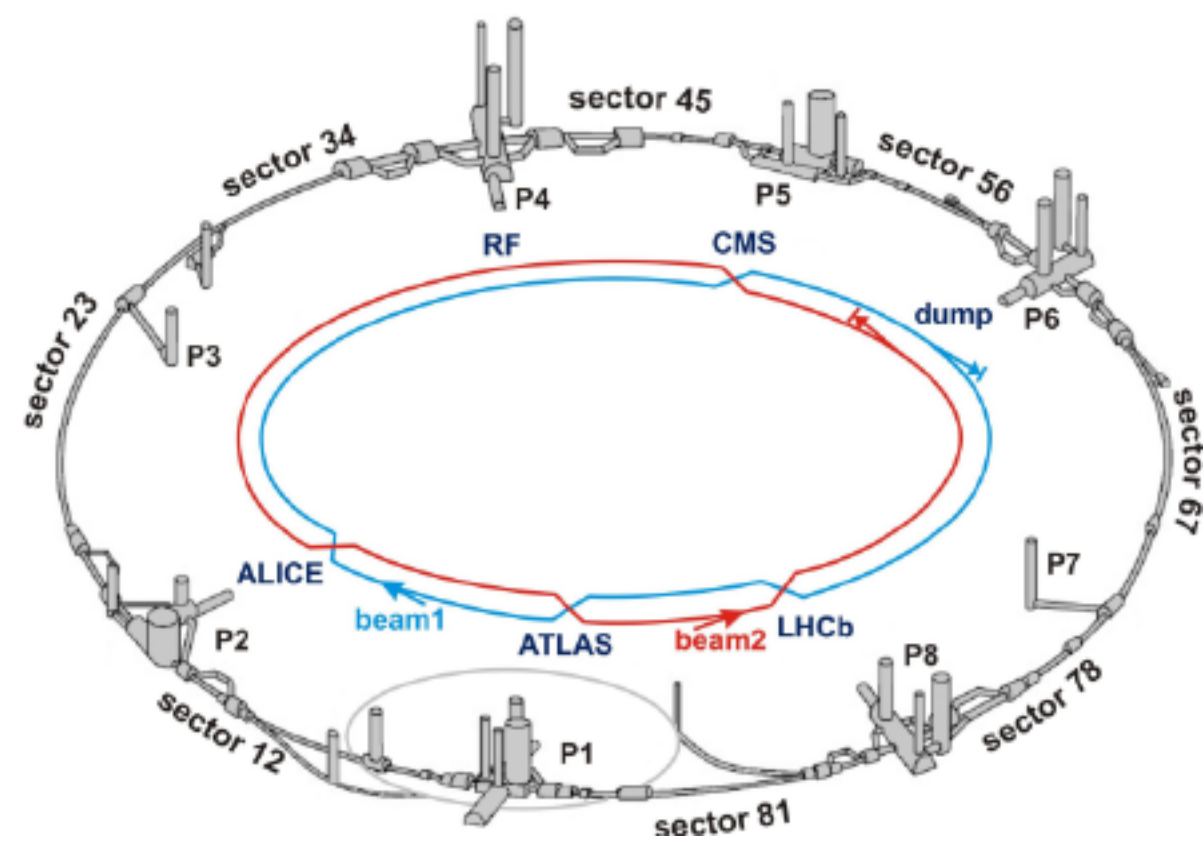


# Štandardný model elementárných částíc

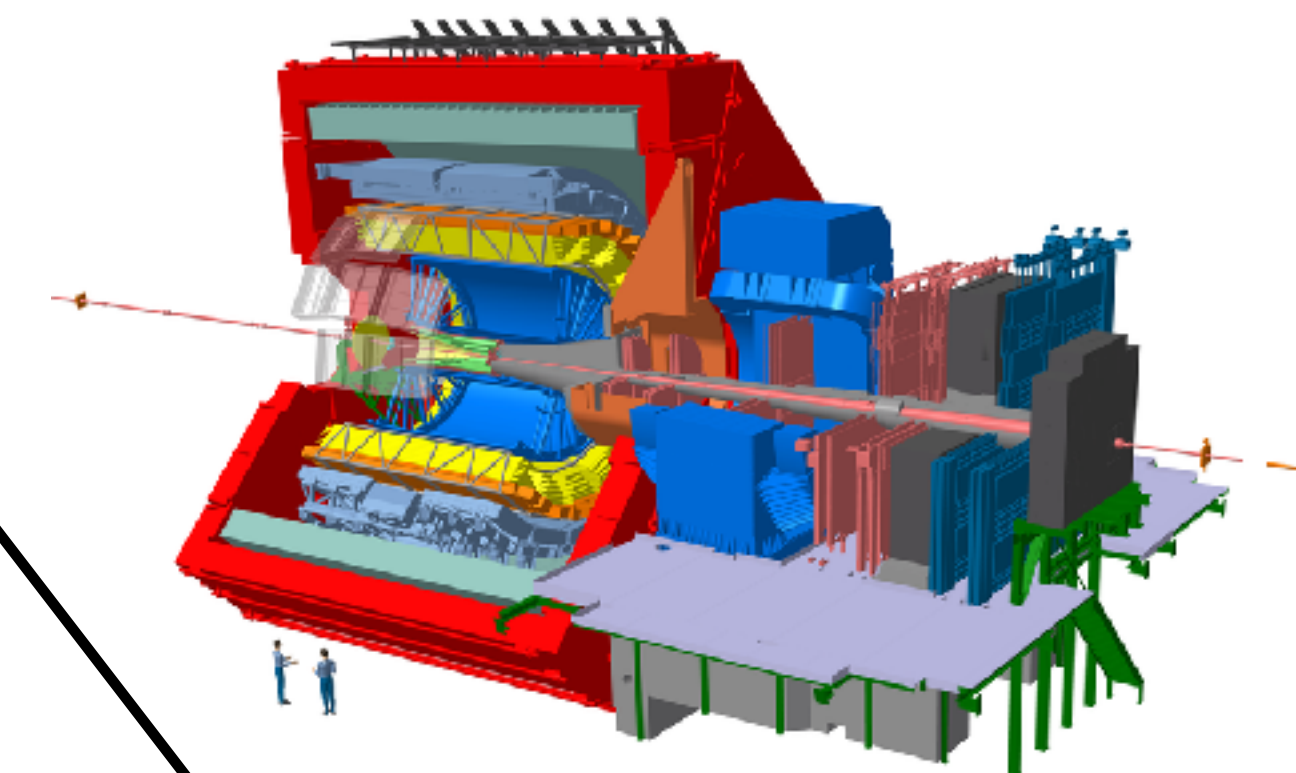
Elementárne častice študujeme tak, že zrážame zväzky častíc a detegujeme častice, ktoré v zrážke vznikli. Snažíme sa pochopiť ako vznikli (model). Najúspešnejší je tzv. Štandardný model elementárnych častíc, ktorý vie v súčasnosti najspoľahlivejšie predpovedať, čo v zrážke vznikne..

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

$A + B$  - toto vieme kontrolovať



$C + D$  - toto vieme detegovať

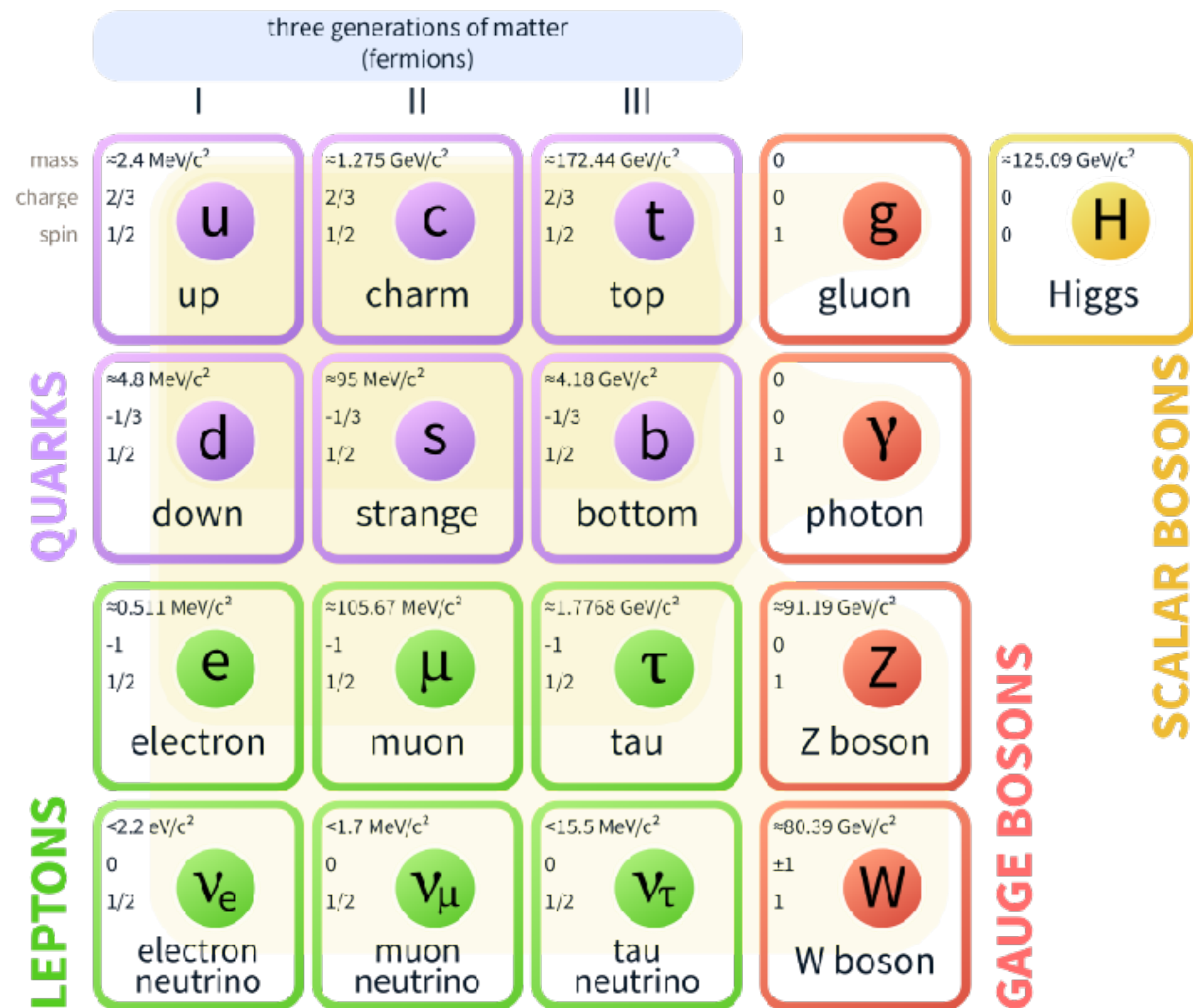


$X$  - naša fyzikálna predstava  
mechanizmu interakcie  
(Štandardný model)

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

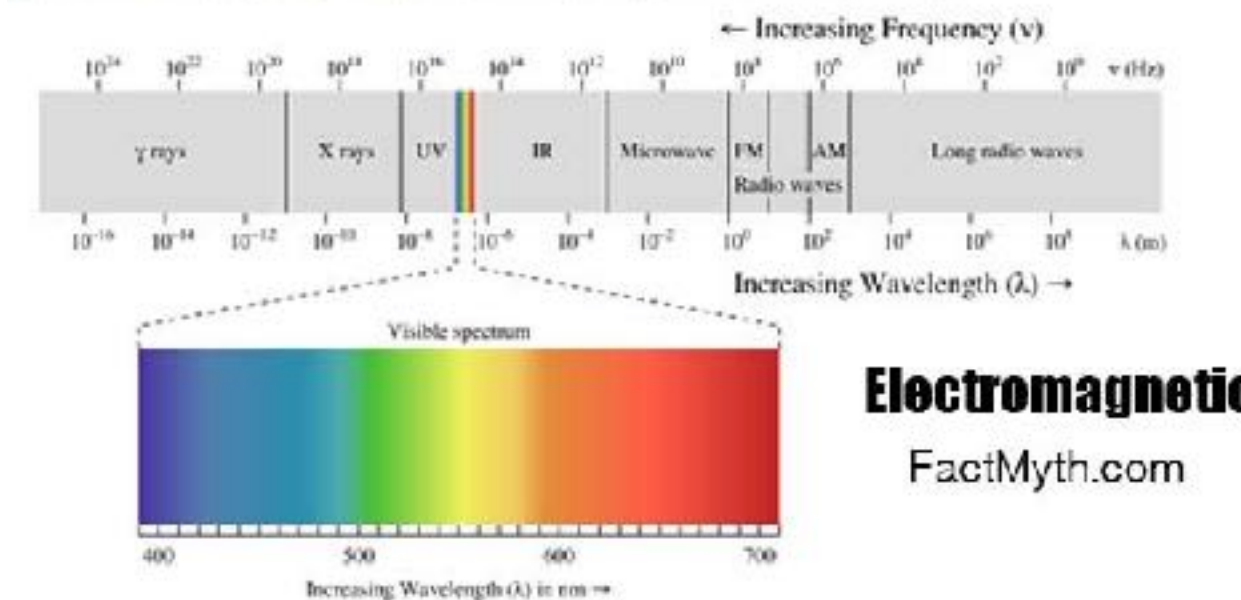
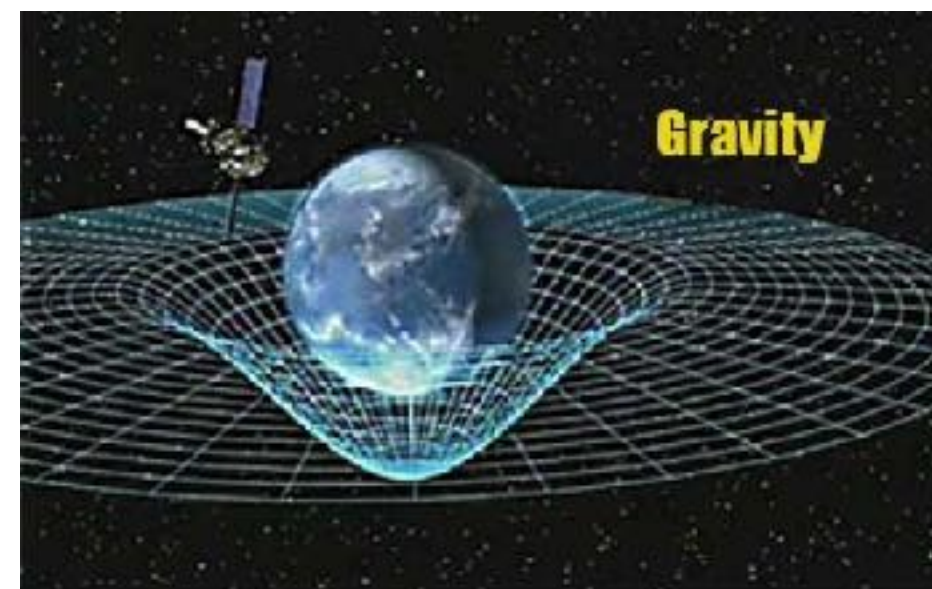
# Štandardný model elementárnych častíc

## Standard Model of Elementary Particles



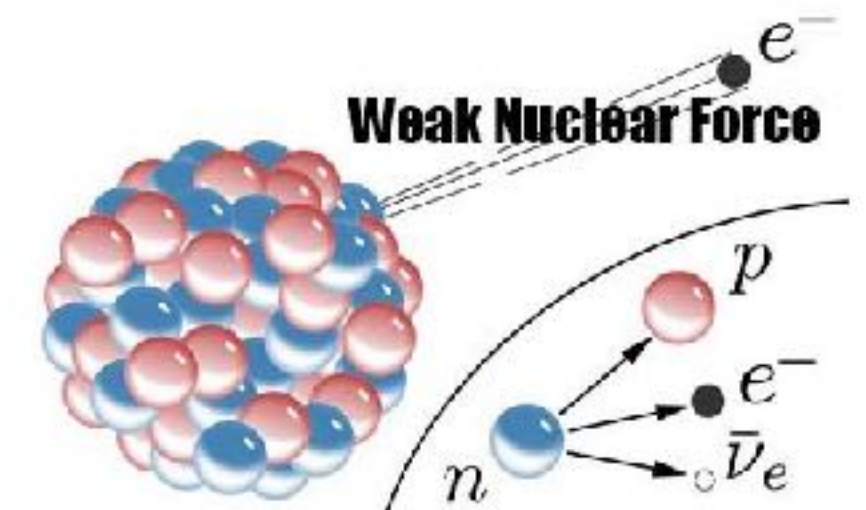
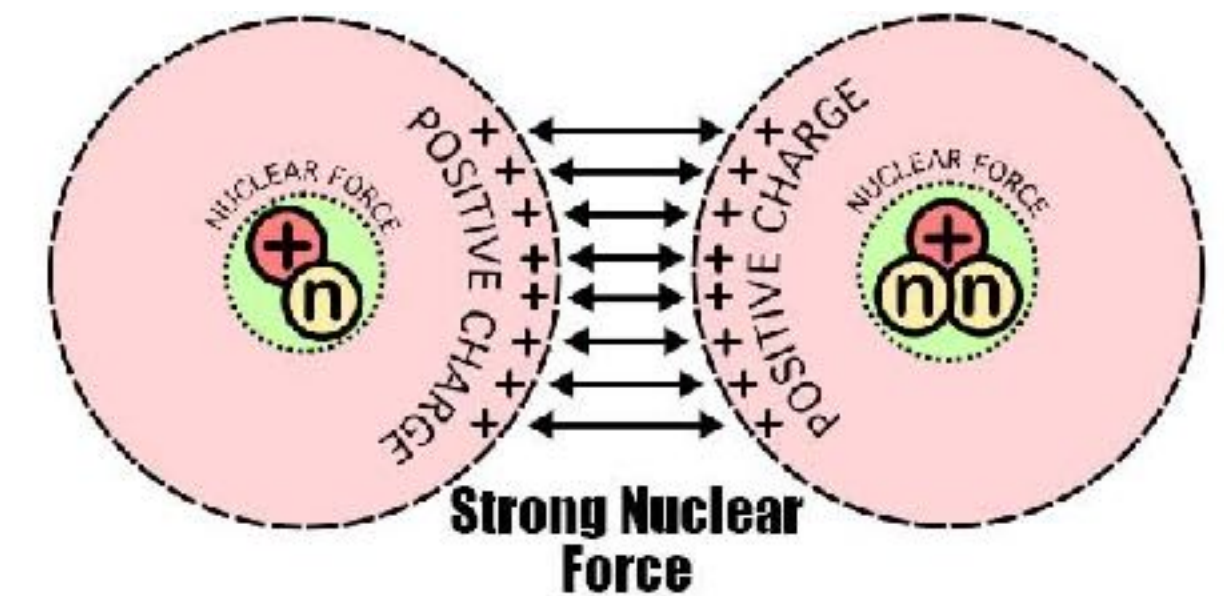
Obr.: [https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary\\_particle](https://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_particle)

Gravitačná: všetky častice, avšak nie je popísaná ŠM



Elektromagnetická: všetky nabité častice a fotón

Silná jadrová: kvarky a gluóny

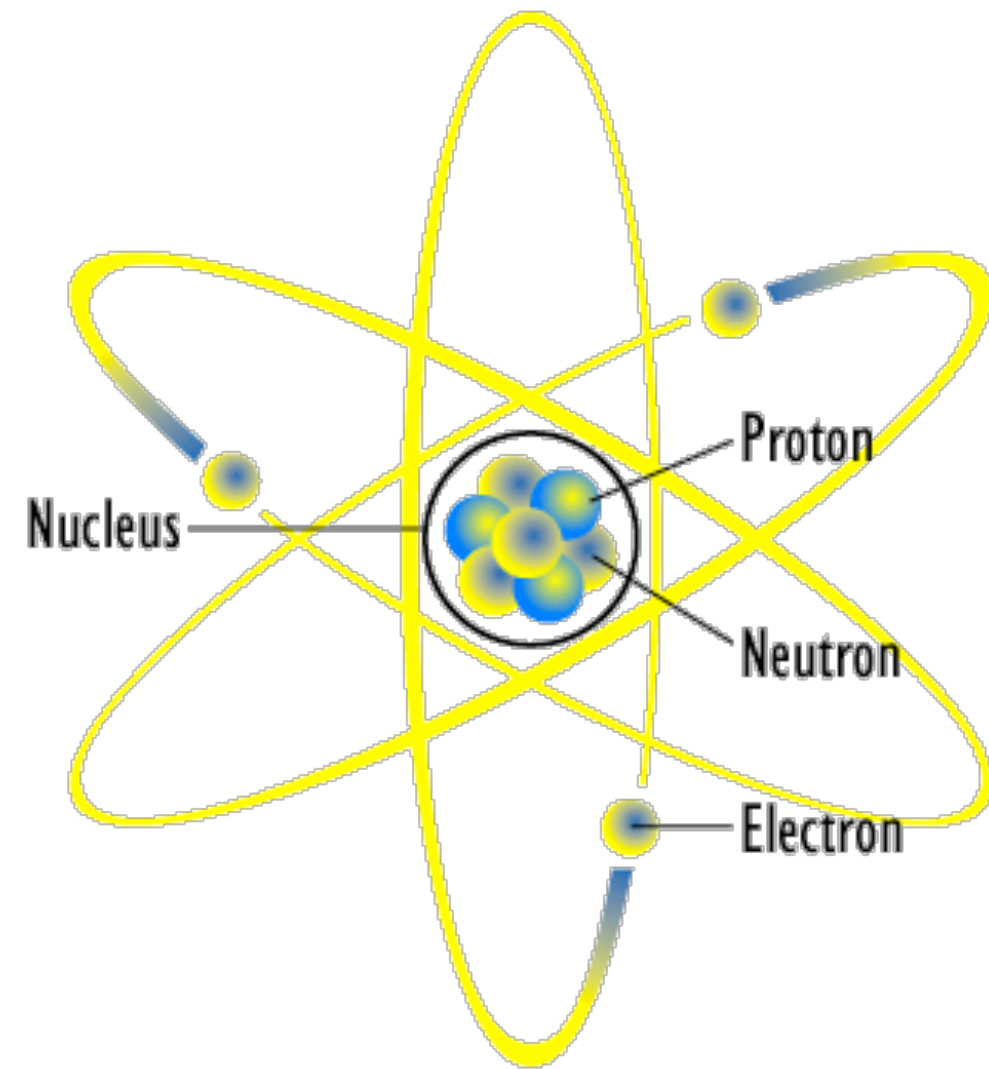


Slabá jadrová: všetky hmotné

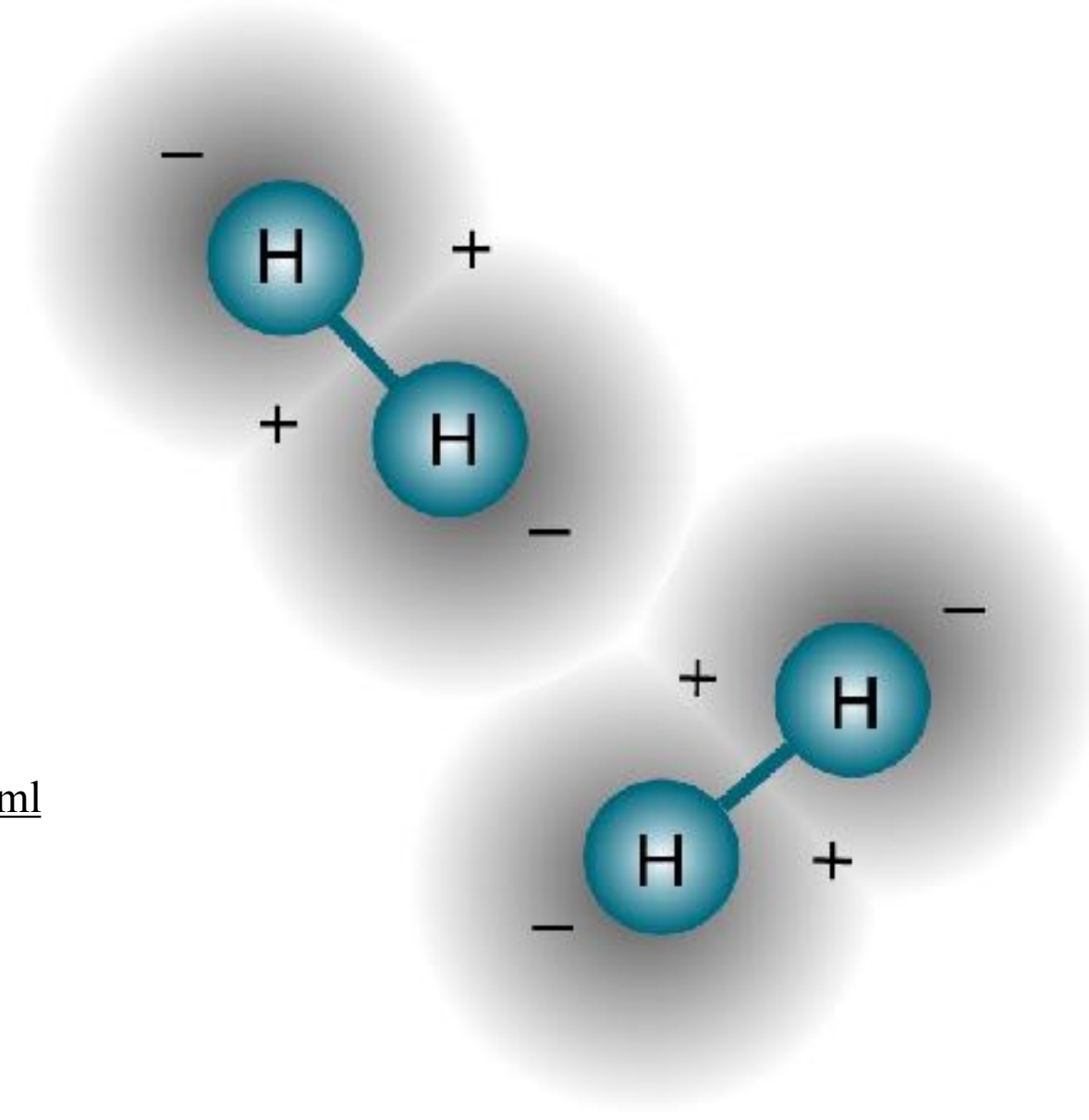
Obr.: <http://factmyth.com/factoids/there-are-four-fundamental-forces/>

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

# Silná interakcia

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

**Prenášač:** gluón

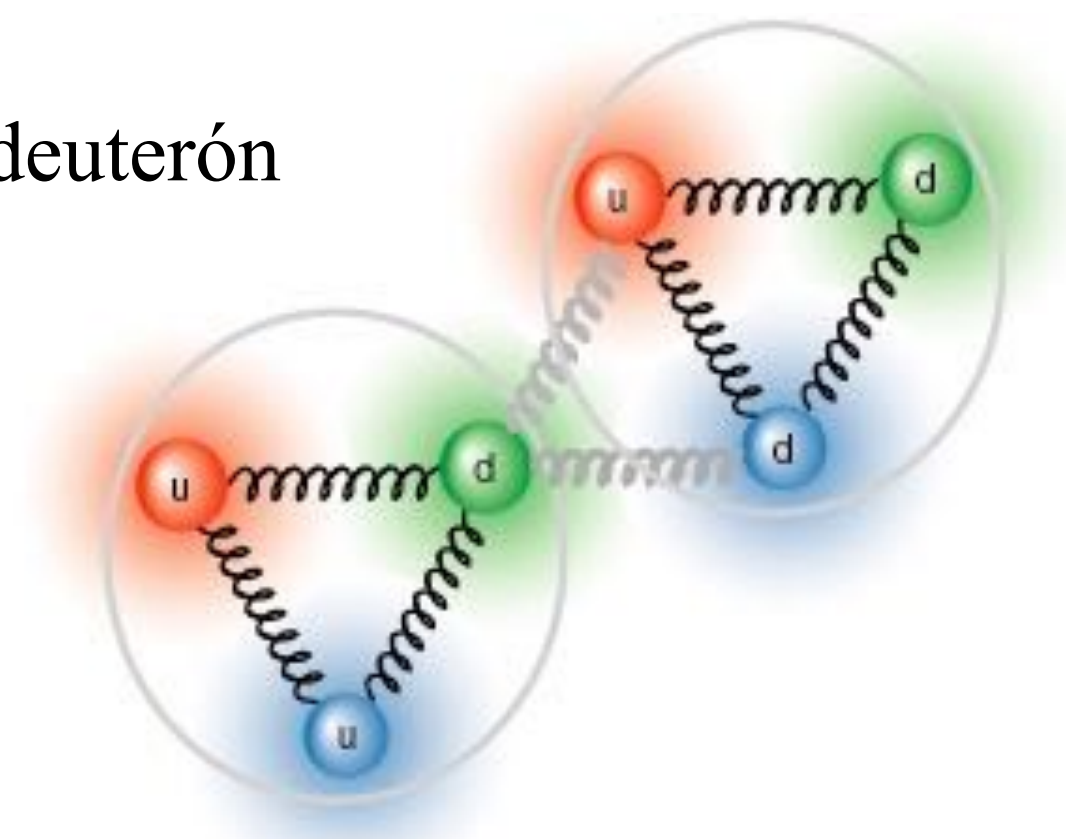
**Dosah:**  $\sim 10^{-15}$  m

**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

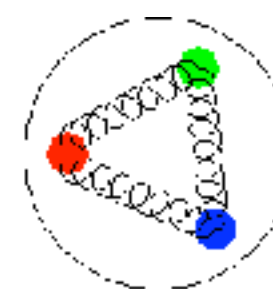


<http://keyhole.web.cern.ch/keyhole/theory/main-5.html>

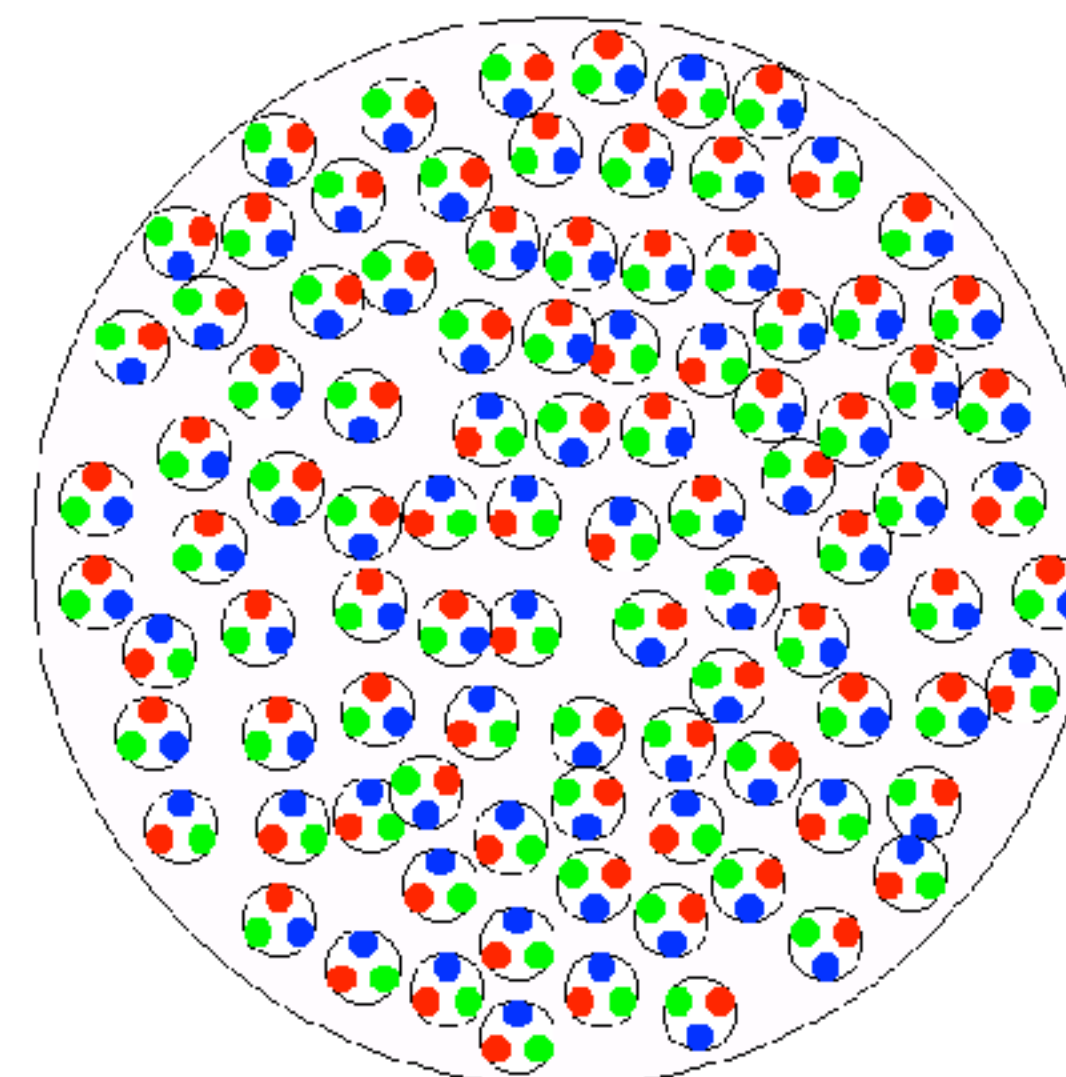
## Nosiče náboja:

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!



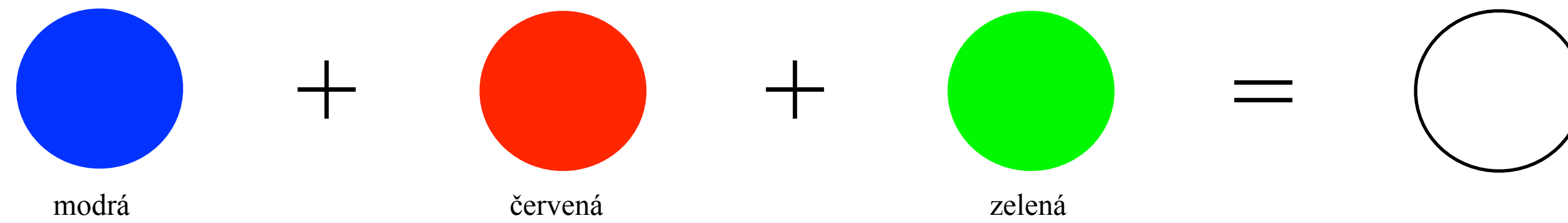
protón



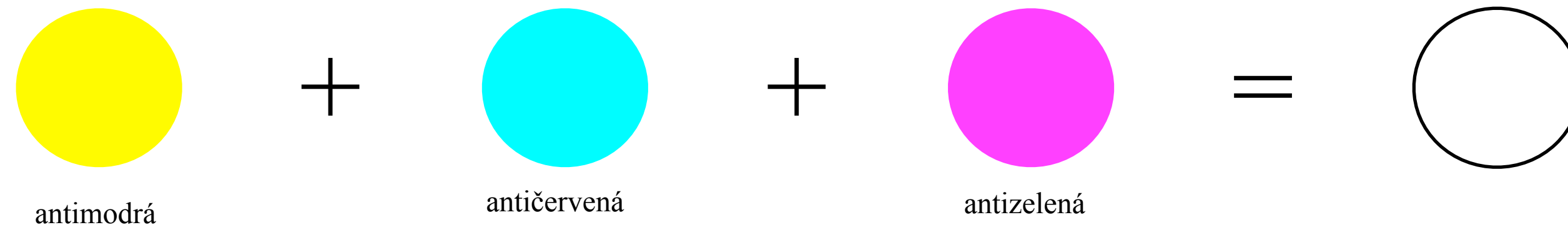
jadro

# Povolené farebné kombinácie nábojov silnej interakcie:

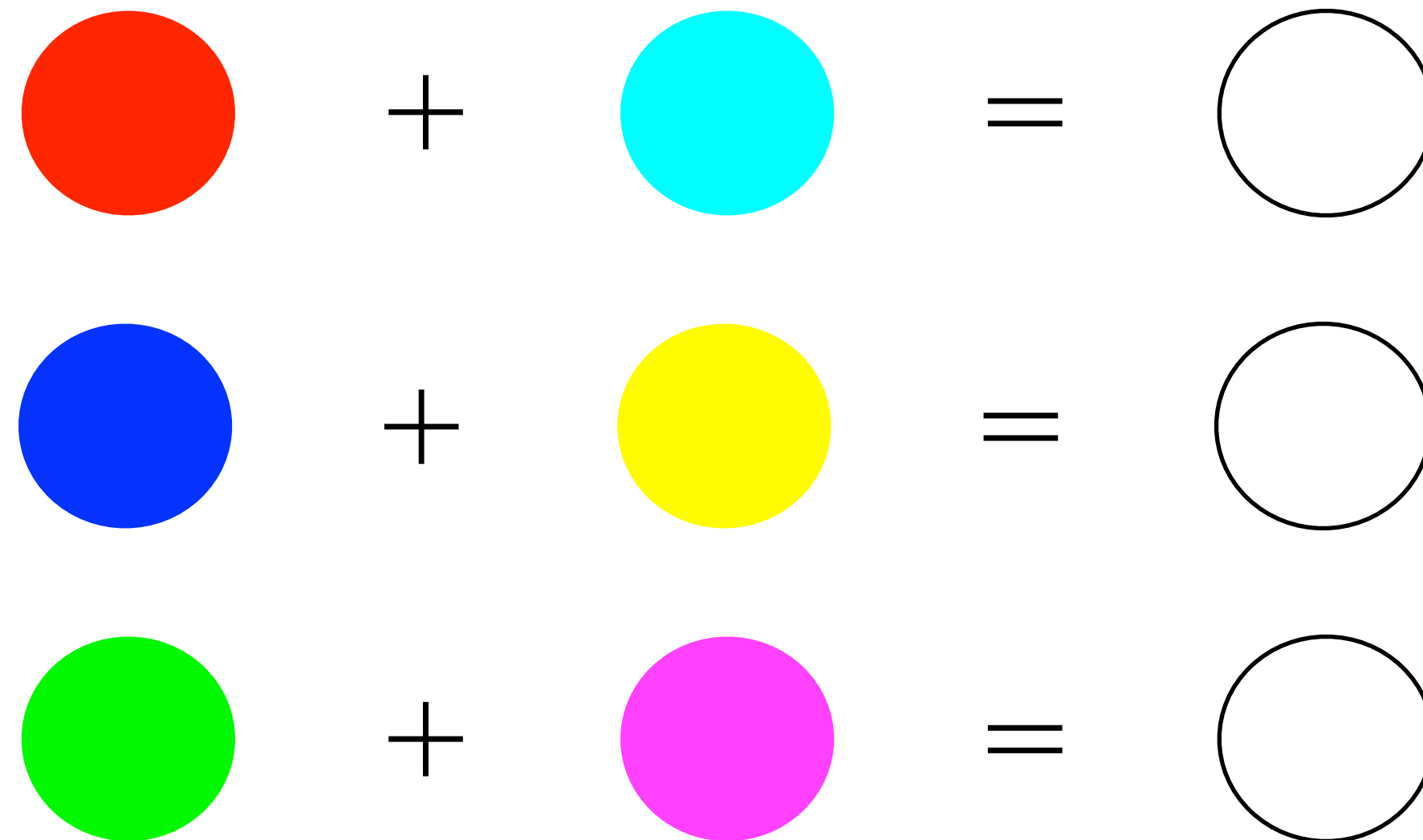
Baryóny:



Antibaryóny:



Mezóny:

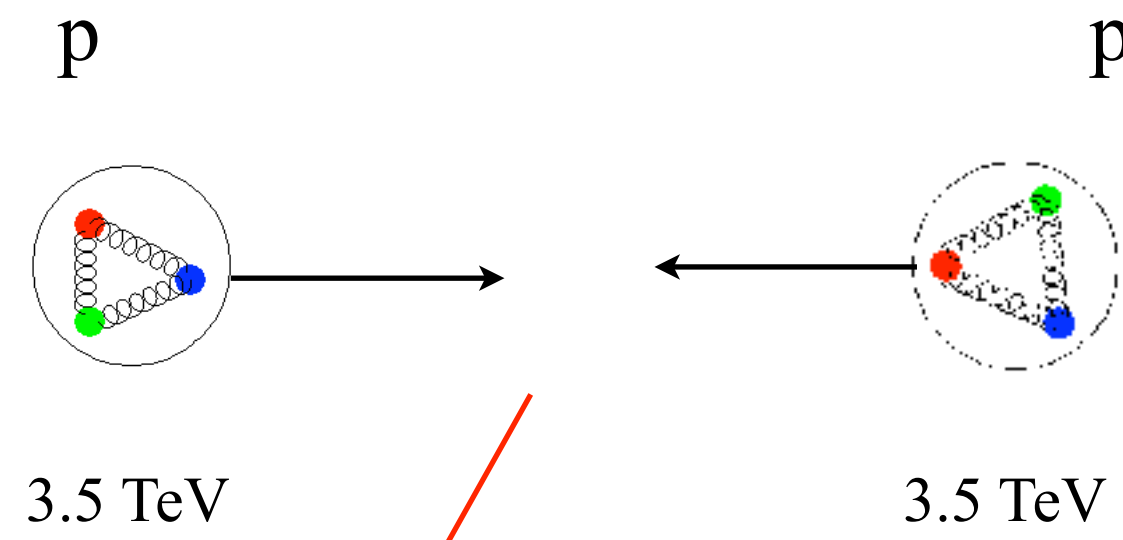


Hadróny

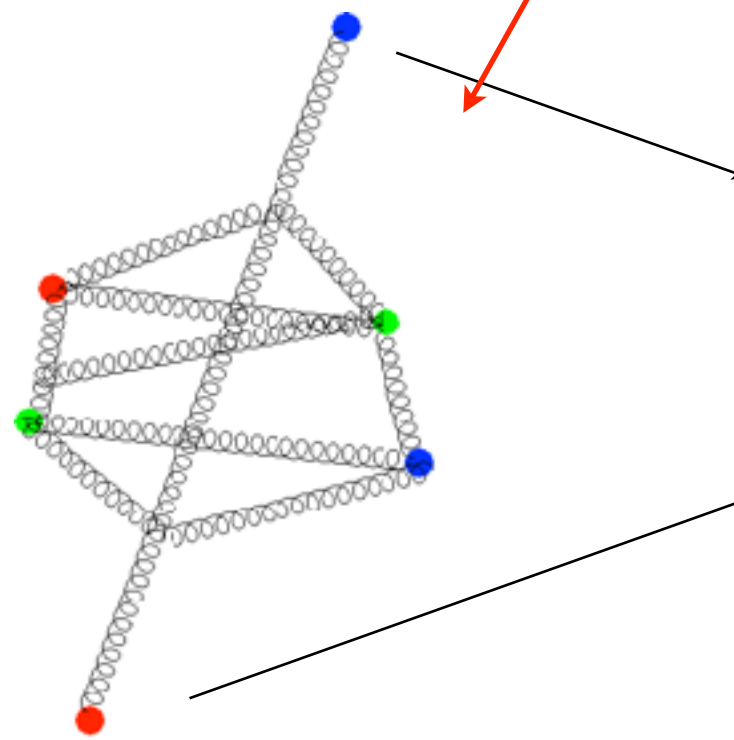
**Viazané stavy v silnej interakcii (hadróny) sú v prírode vždy bezfarebné!**



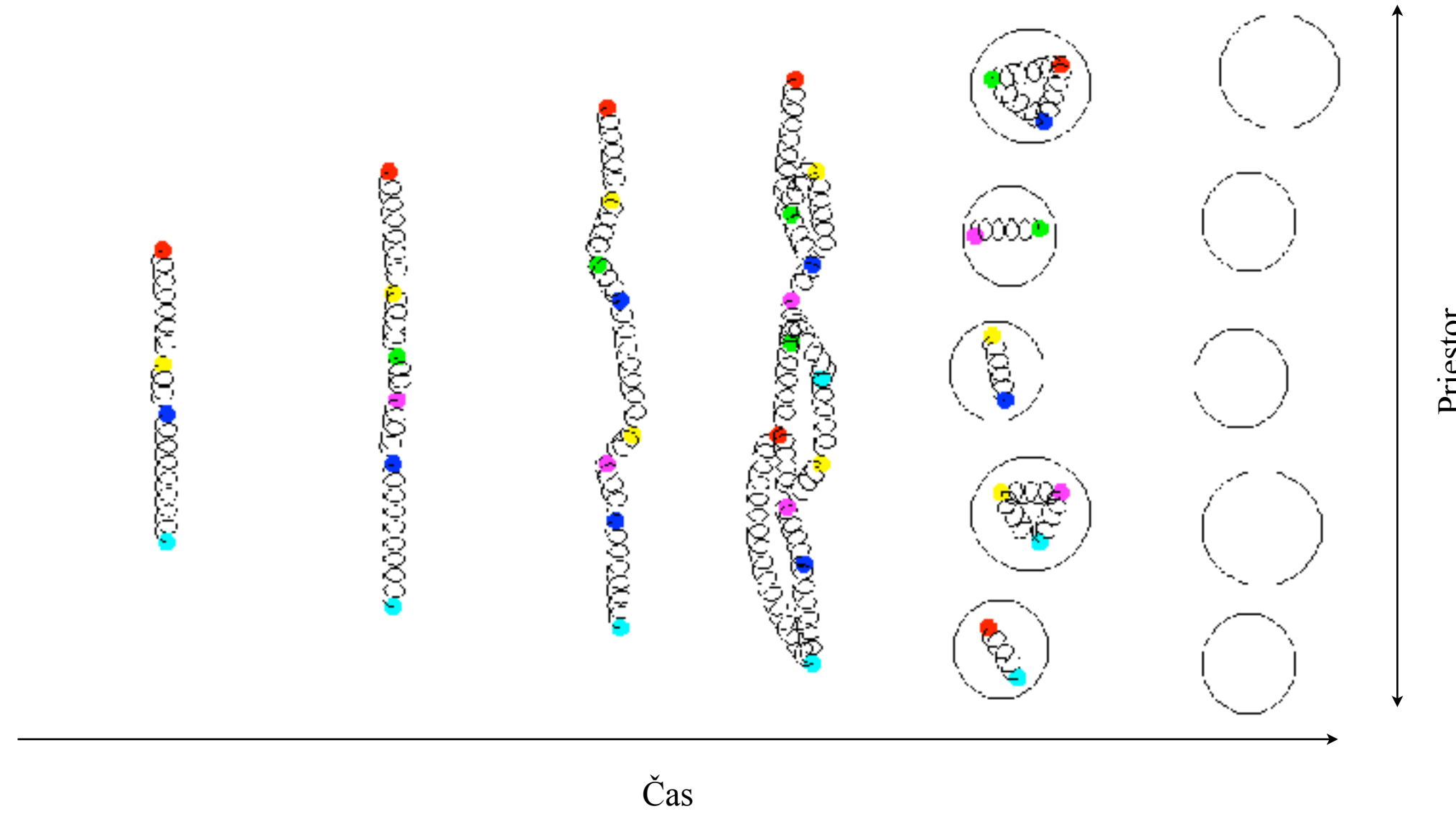
# Kvark sa dá pozorovať len nepriamo (príklad z LHC: pp@7 TeV):



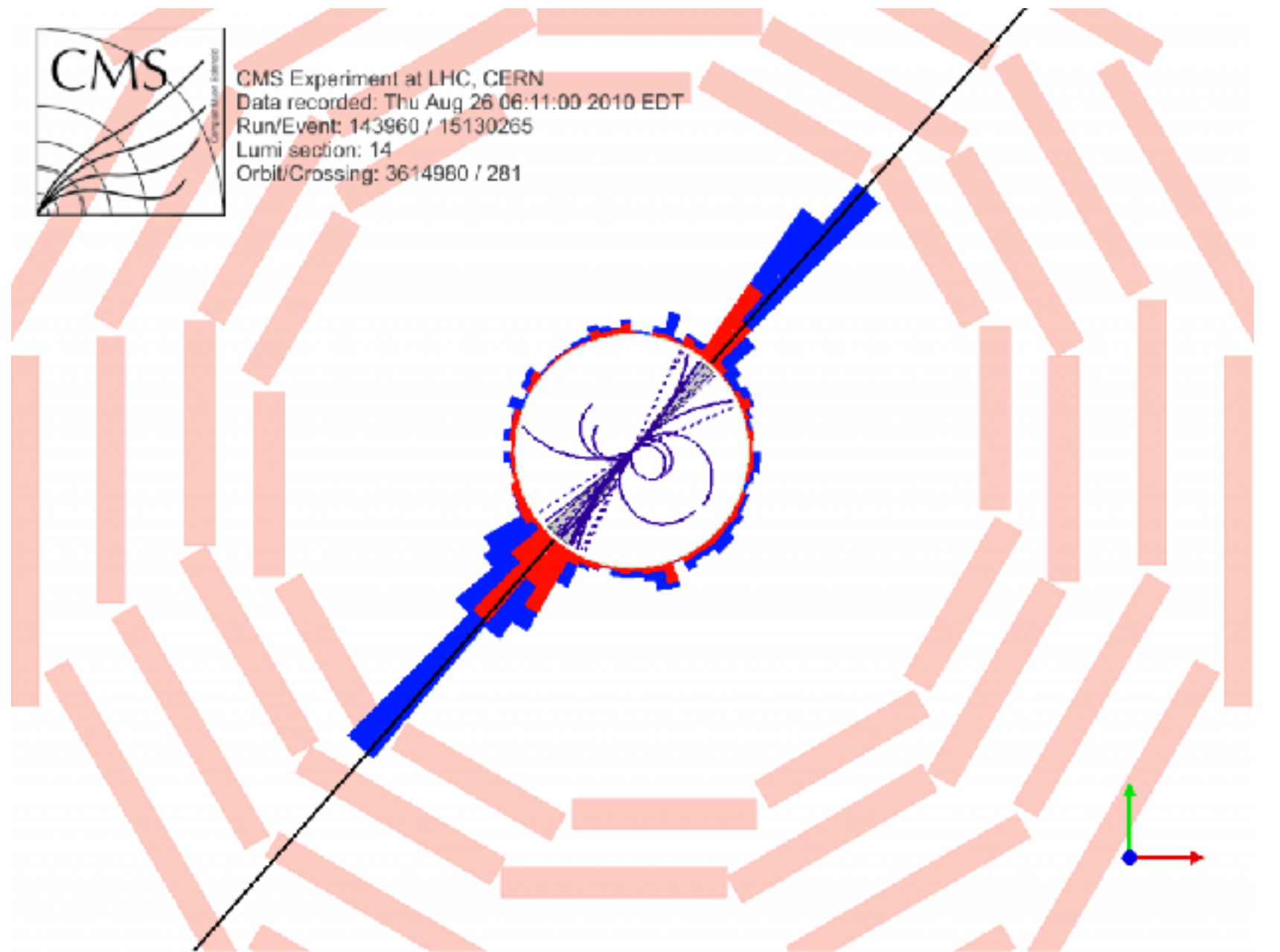
Tvrký rozptyl dvoch kvarko:



Hadronizácia (fragmentácia struny)

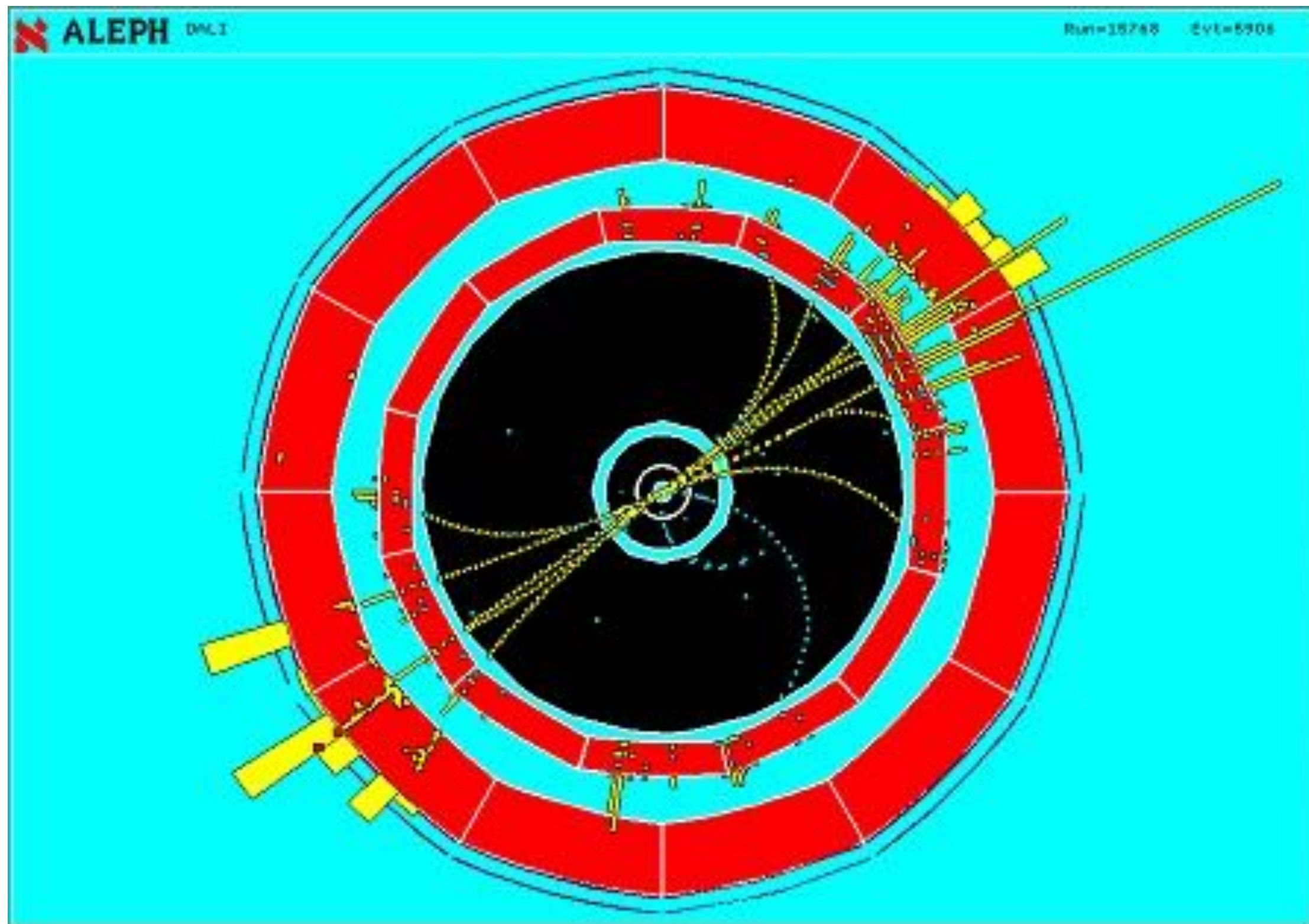


'Kvarky' v detektore CMS:

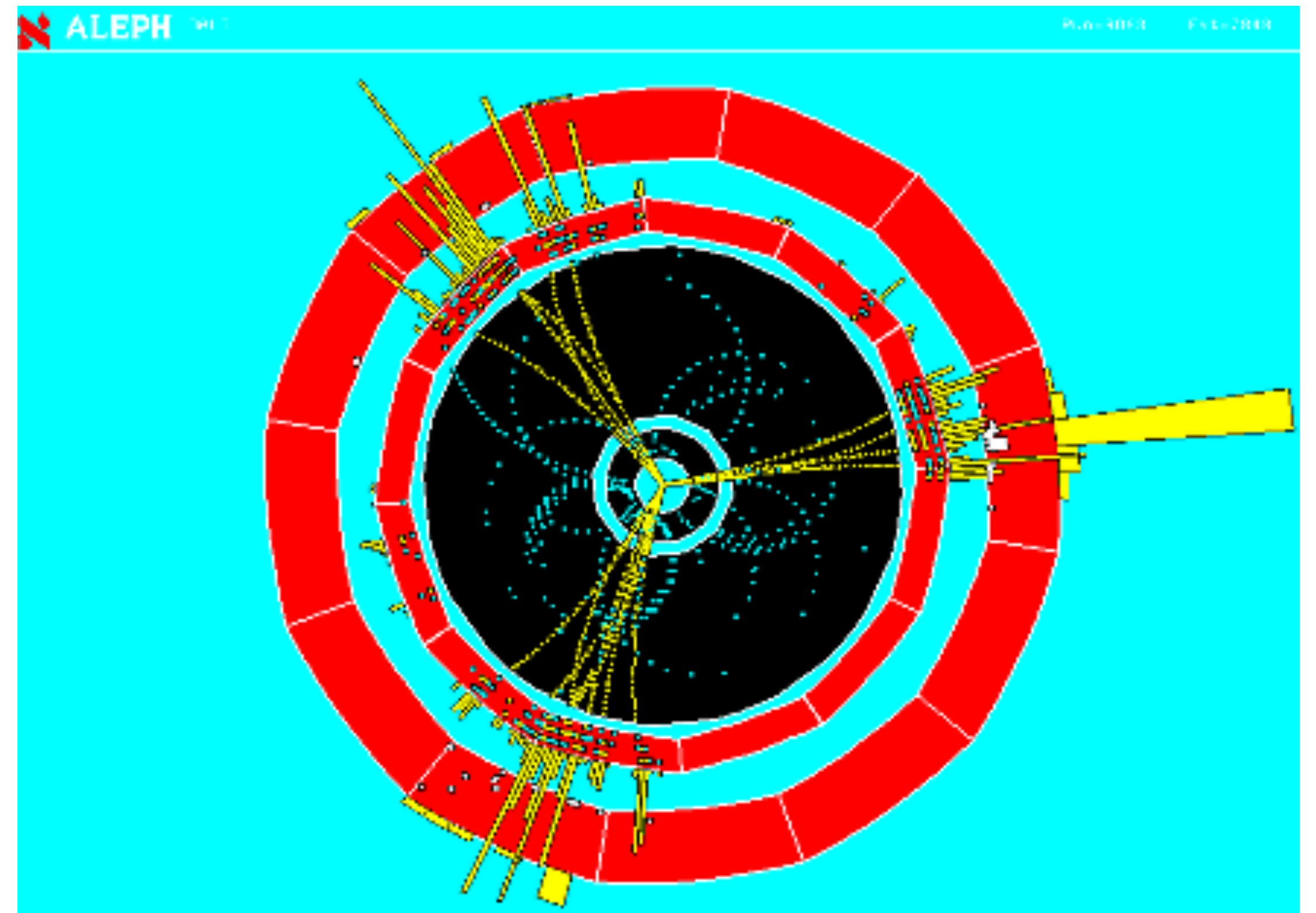


# Príklad nepriameho pozorovania kvarkov a gluónov na urýchľovači LEP

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

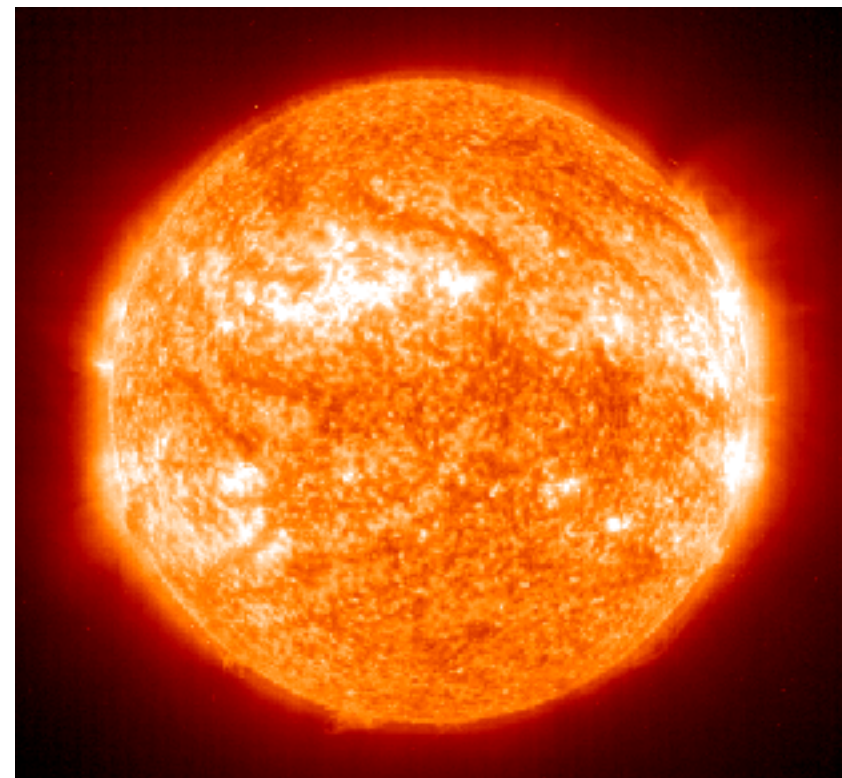


$$e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q} + g$$

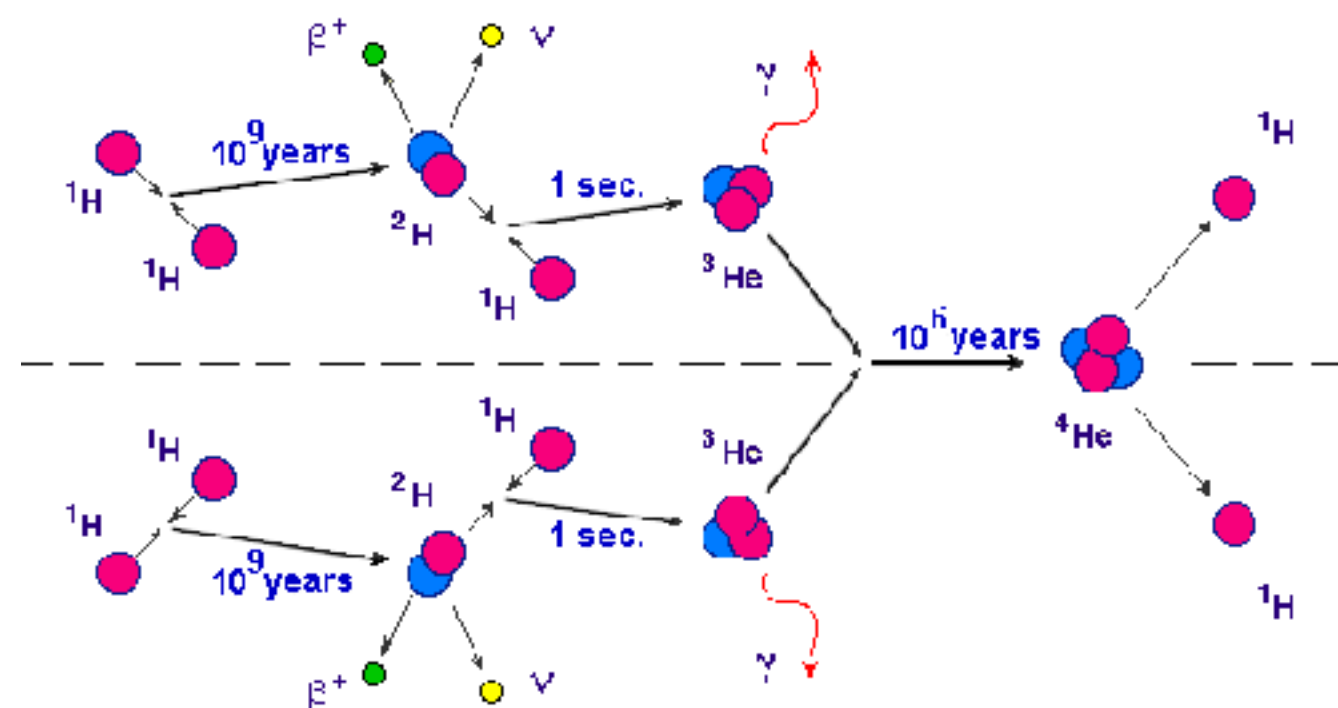


# Slabá interakcia

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)

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.

**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:**  $\sim 10^{-18}$  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	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	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
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	0	1
<b>QUARKS</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
					<b>GAUGE BOSONS</b>

Štandardný model nie je  
konečná stanica..

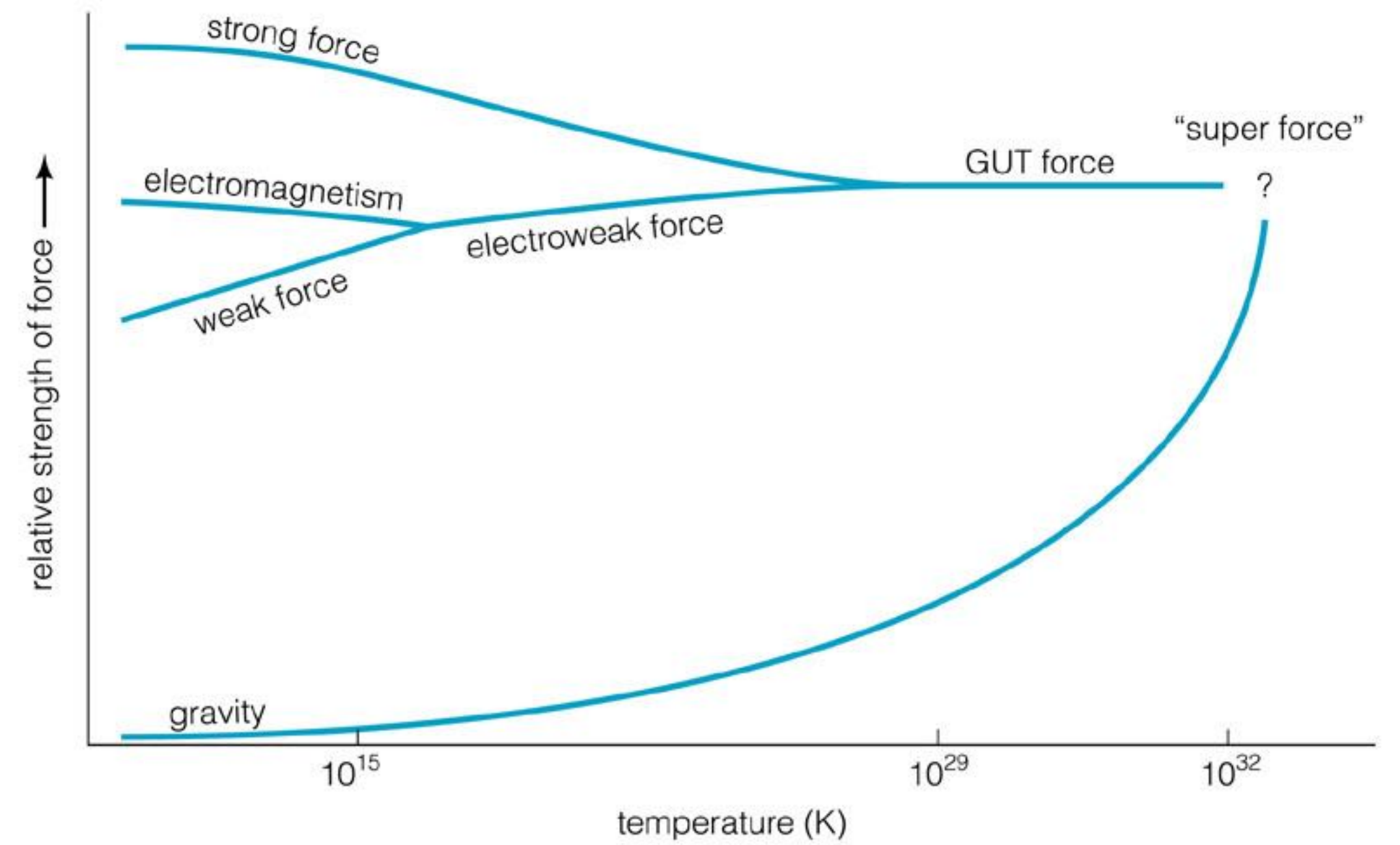
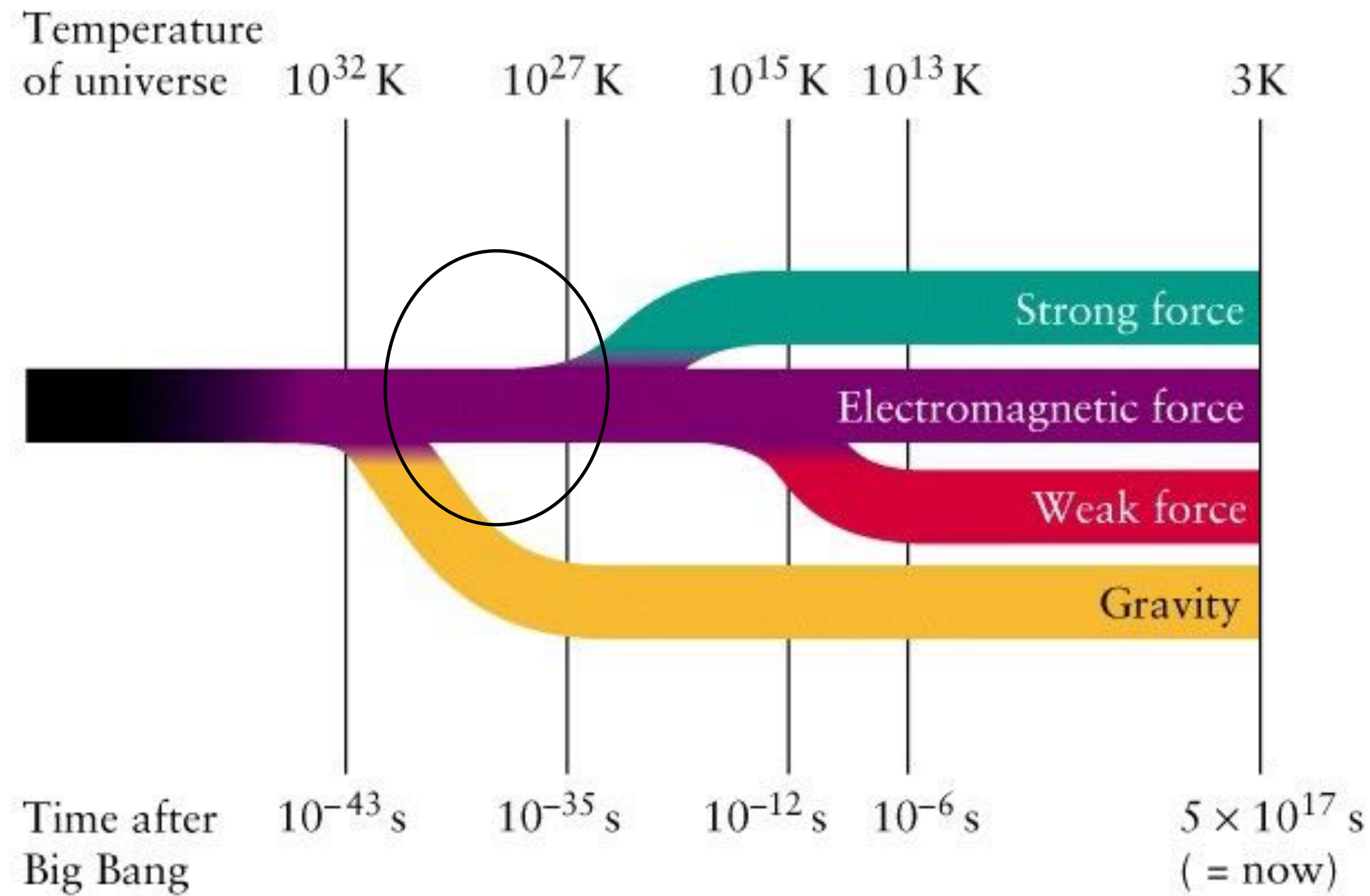
# Problém so Štandardným modelom

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

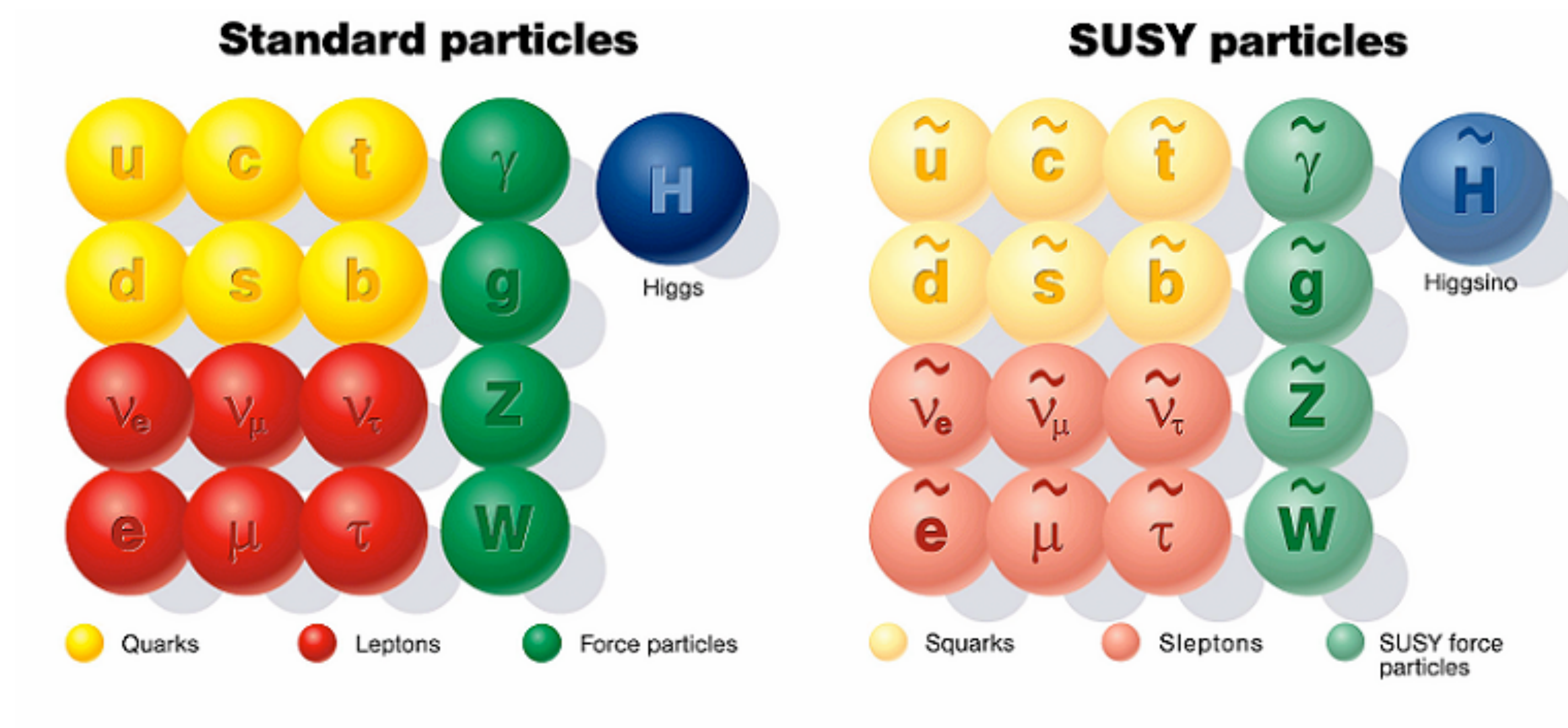


Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

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..

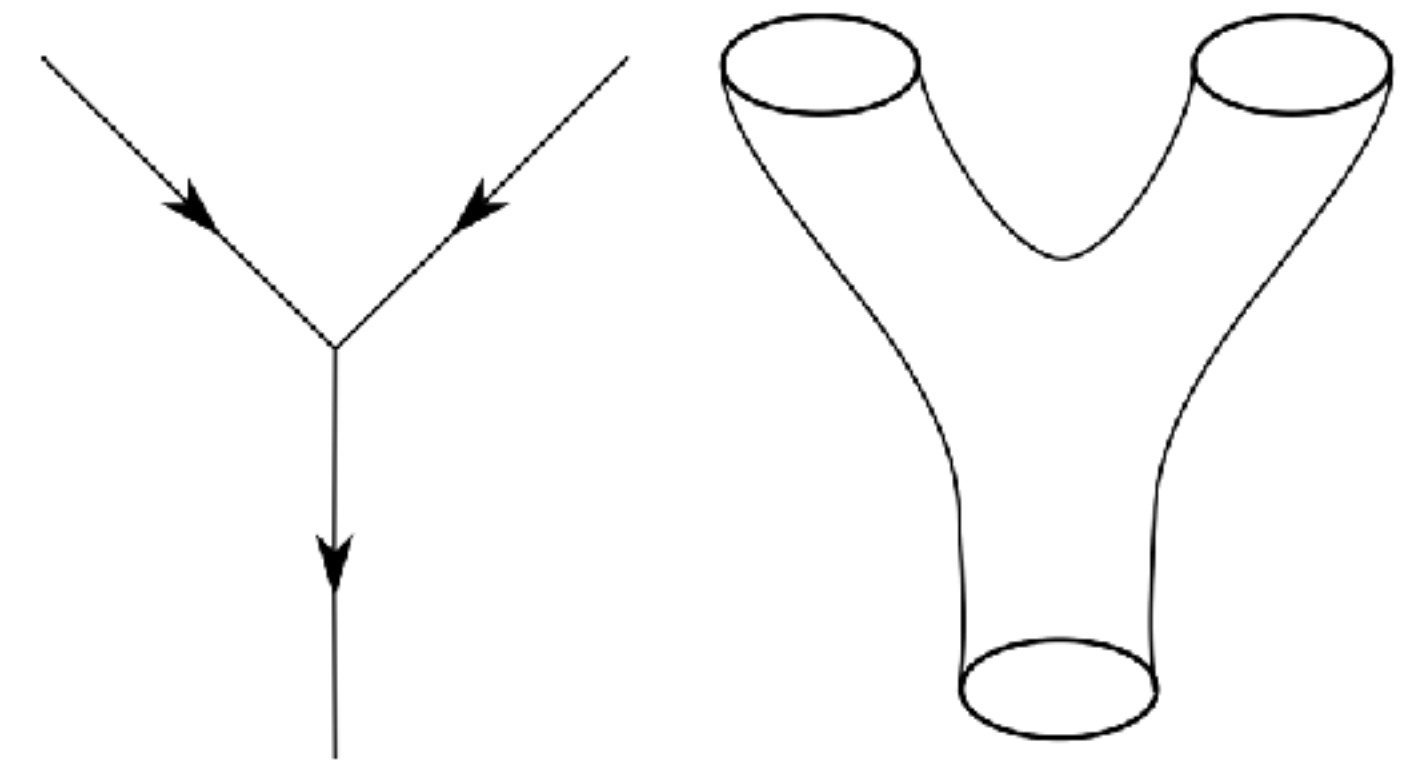


# Teória superstrún

- 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



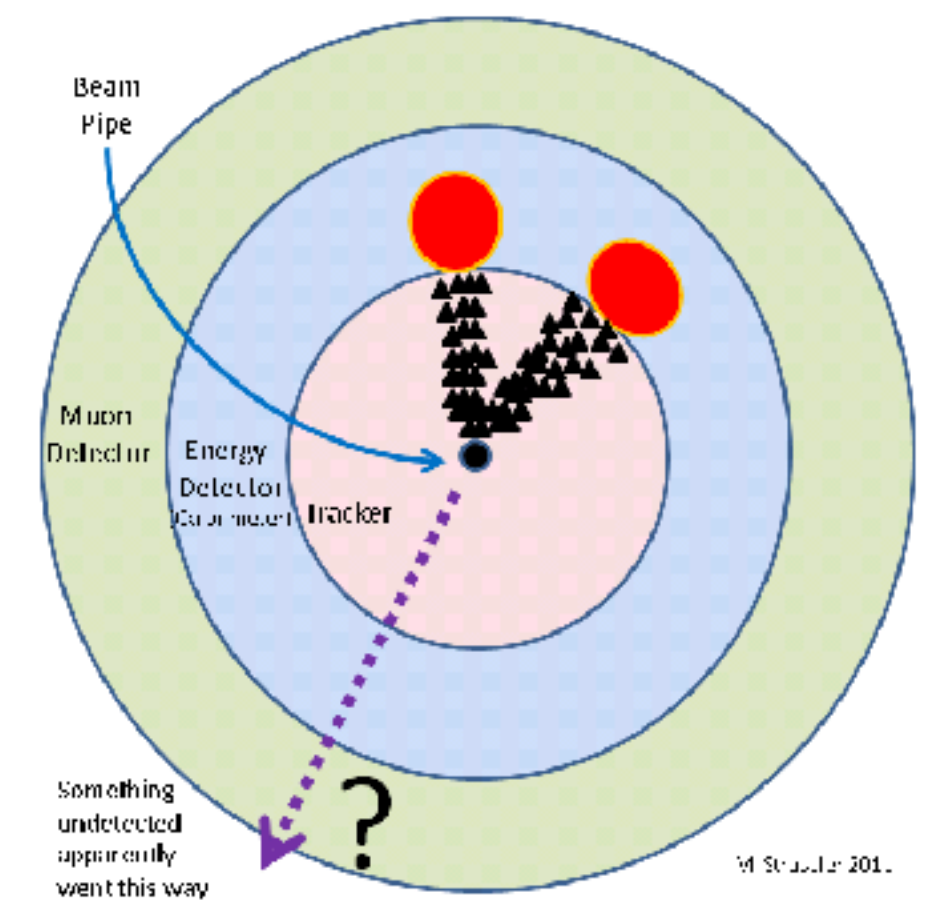
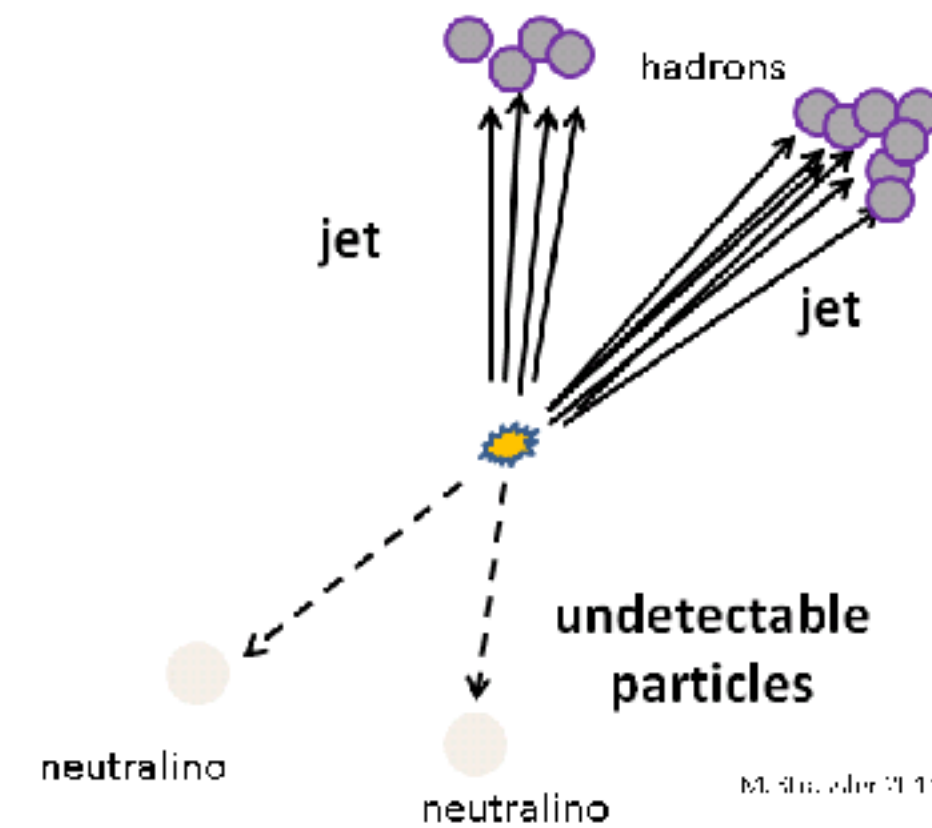
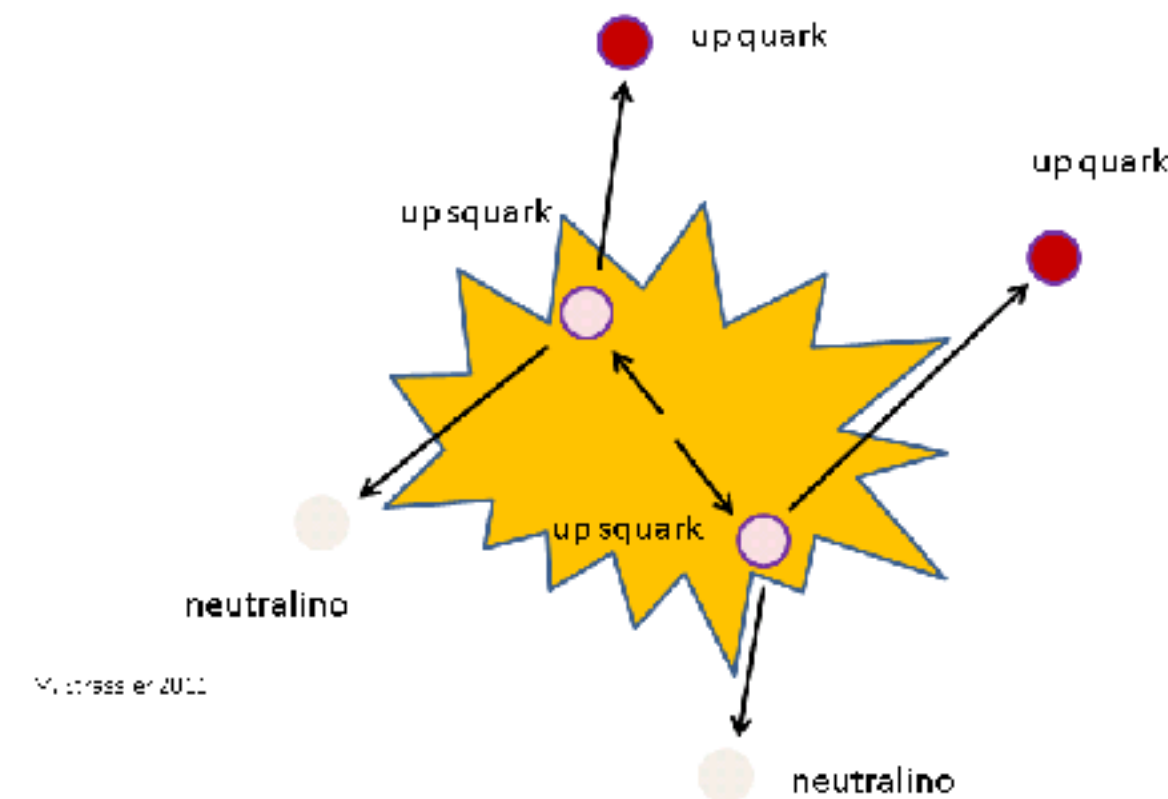
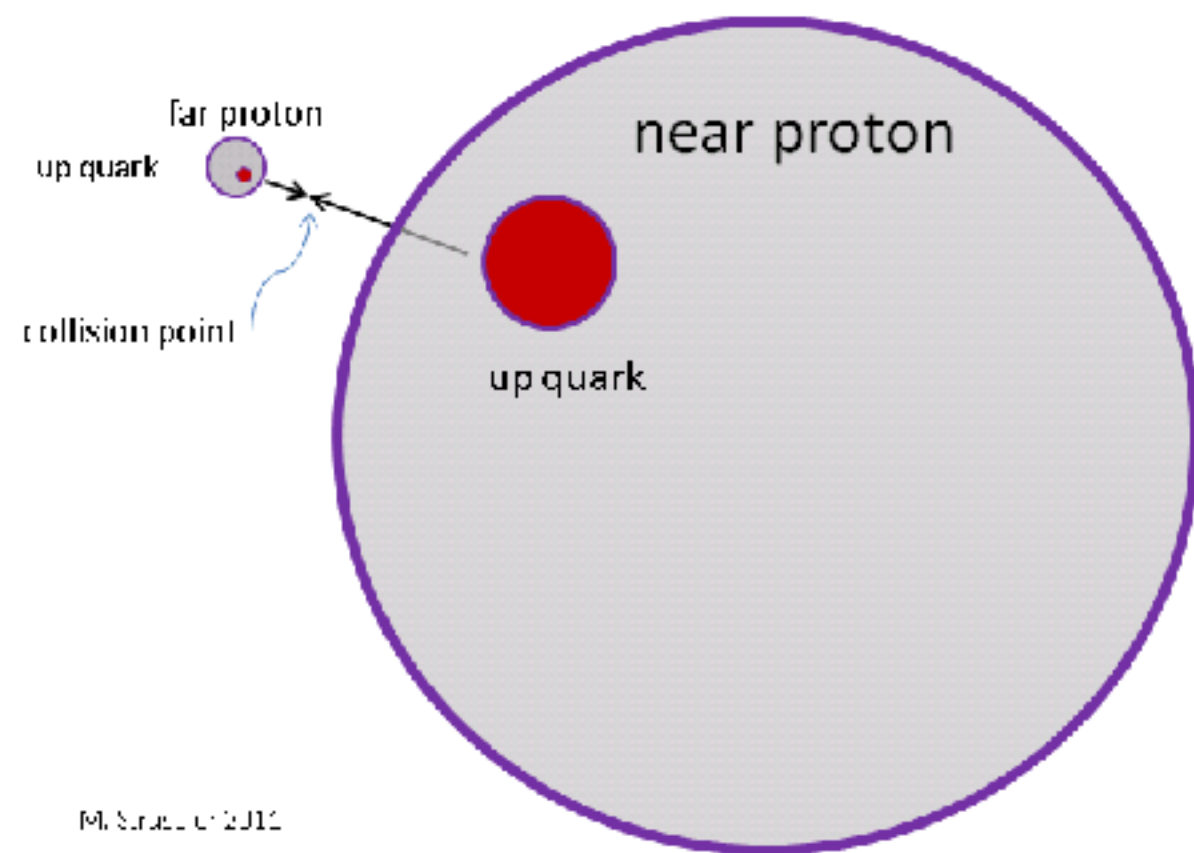
By Xoneca - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=26564716>



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)

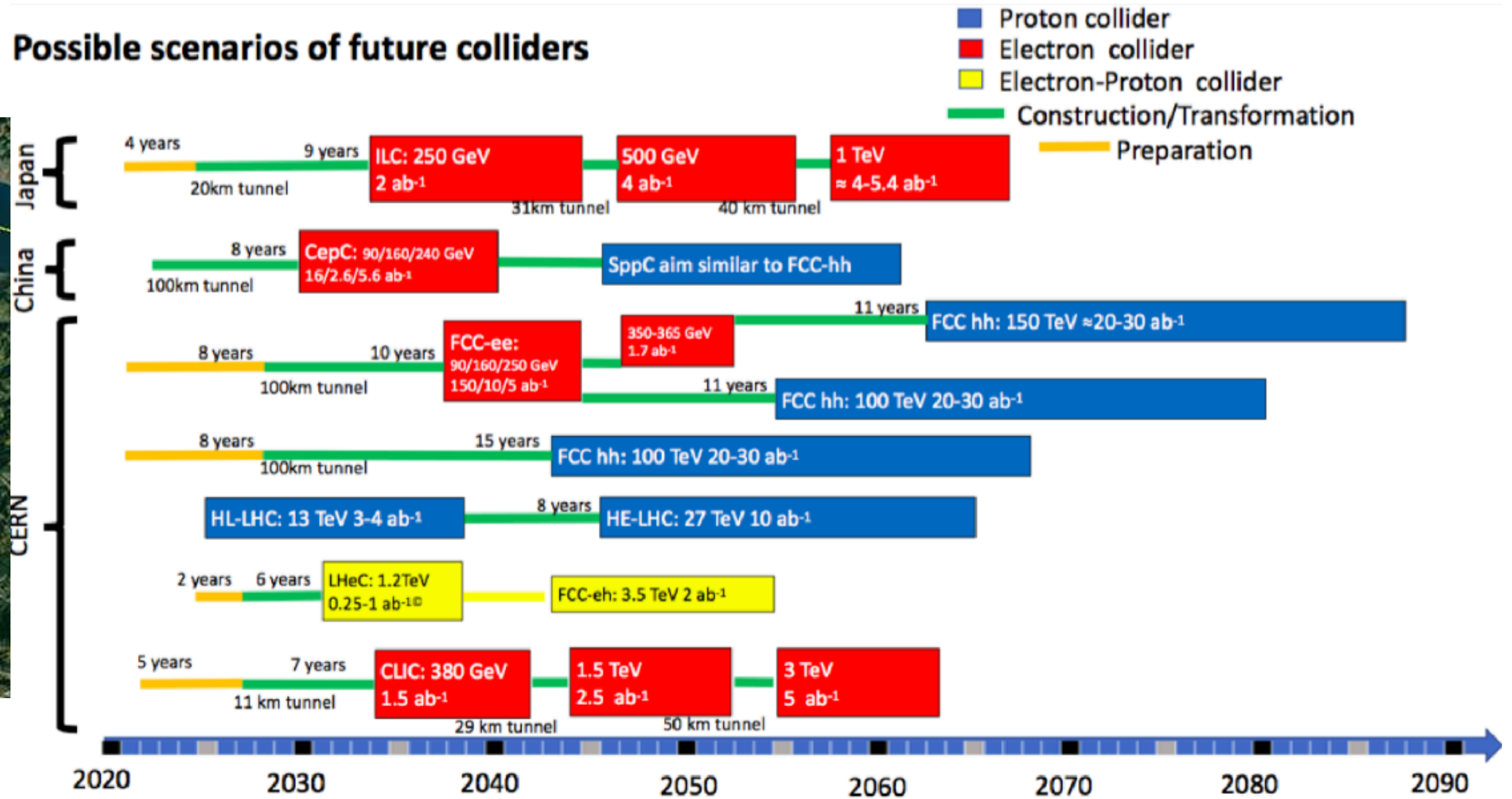
- Spôsoby hľadania novej fyziky:
  - nepriamo v zriedkavých rozpadoch častíc a porovnaním s predpoveďami ŠM
  - priamo v zrážkach častíc na urýchľovačoch (hlavne LHC):



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! 😊

