

# Standardní model částic

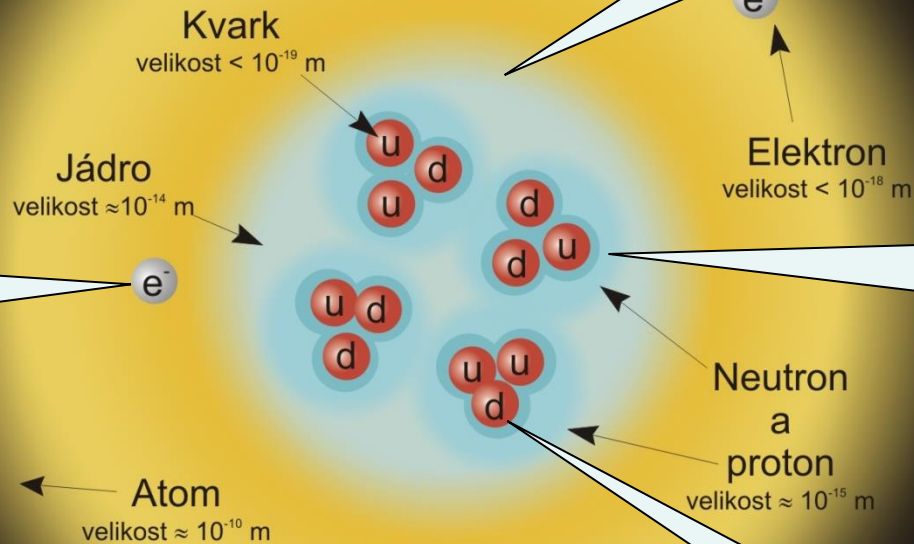
- shrnuje současné poznatky částicové fyziky
- říká, z jakých elementárních částic (nejmenších a nedělitelných stavebních kamenů z dnešního pohledu) se svět skládá
- popisuje a vysvětluje, jak elementární částice spolu interagují a speciálně jak drží atomy a jádra pohromadě
- zahrnuje **teorii silných interakcí** (kvantová chromodynamika neboli QCD, odpovídá např. za stavbu jader) a **sjednocenou teorii slabých a elektromagnetických interakcí** (tzv. elektroslabé interakce, odpovídá jak za strukturu atomu a makroskopické elektromagnetické jevy, např. funkci televize, tak např. za rozpady některých nestabilních částic v mikrosvětě).
- stranou stojí gravitace – je sice jednou ze základních interakcí a je naprosto podstatná pro makrosvět, ale **uspokojivou kvantovou teorii gravitace dosud nemáme**

# Atom a jeho části

Atomisté - představa o atomech jako o nedělitelných stavebních kamenech hmoty.

Objev jádra E. Ruthefordem v roce 1911  
(Jádro by mělo být nakreslené daleko menší, s průměrem menším než 0,0001 průměru atomu)

## Struktura atomu



Objev elektronu (Thomson 1897) - Thomsonův model atomu (1903).

Objev protonu (E. Rutheford 1916) a neutronu (J. Chadwick 1932).

Obrázek neodpovídá skutečným velikostním poměrům. Kdyby byla velikost protonů a neutronů na obrázku 10 cm, byly by kvarky a elektrony menší než 0,1 mm a celý atom by měřil 10 km.

Objev kvarků 1964.

# Kvarky

- fyzikové používali urychlovače ke studiu srážek, objevili postupně více než stovku dosud neznámých částic
- 1964 vyslovili Gell-Mann a Zweig novou revoluční myšlenku, že téměř všechny částice jsou složeny z malého počtu druhů ještě menších objektů nazvaných kvarky, které musí mít elektrické náboje  $+2/3$  a  $-1/3$  náboje protonu
- na konci šedesátých a na začátku sedmdesátých let 20. století ukázaly experimenty na urychlovačích, že **kvarky s předpokládanými vlastnostmi skutečně existují**, avšak zůstávají uvězněny uvnitř částic s celočíselným nábojem.

Kvarky		spin = 1/2	
Vůně		Přibližná hmotnost GeV/c <sup>2</sup>	Elektrický náboj
<b>u</b>	up	0.003	2/3
<b>d</b>	down	0.006	-1/3
<b>c</b>	charm	1.3	2/3
<b>s</b>	strange	0.1	-1/3
<b>t</b>	top	175	2/3
<b>b</b>	bottom	4.3	-1/3

- **Důvěrně známý svět kolem nás je složen téměř jen z kvarků *u* a *d*.**
- Existují i další čtyři kvarky – ***s*, *c*, *b* a *t***. Ty mají větší hmotnost, jsou nestabilní a rodí se jen na urychlovačích nebo ve srážkách působených kosmickým zářením.

# Leptony

- Vedle kvarků existuje **další třída šesti základních částic** nazývaných **leptony**. Jejich nejznámějším příslušníkem je **elektron**.
- Další dva nabité leptony, **mion** (m) a lepton **tau** (t, tauon), se liší od elektronu pouze tím, že mají mnohem větší hmotnost a jsou nestabilní.
- Další tři leptony jsou těžko polapitelná **neutrina**, která nemají elektrický náboj a mají velmi malou hmotnost.

**Elektron** je první objevená elementární částici vůbec. Je stabilní, nerozpadá se.

**Mion** se chová velmi podobně jako elektron. Jeho hmotnost je  $207m_e$ . Doba života mionu je přibližně  $2 \times 10^{-6}$  s, potom se rozpadá na elektron a neutrino:  
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$
Byl objeven v kosmickém záření za pomoci mlžné komory C. Andersonem v roce 1936.

Leptony		spin = 1/2	
Vůně	Hmotnost GeV/c <sup>2</sup>	Elektrický náboj	
$\nu_e$ elektronové neutrino	$<10^{-8}$	0	
e elektron	0.000511	-1	
$\nu_\mu$ mionové neutrino	$<0.0002$	0	
$\mu$ mion	0.106	-1	
$\nu_\tau$ tauonové neutrino	$<0.02$	0	
$\tau$ tauon	1.777	-1	

Všude tam, kde při různých slabých rozpadech částic vznikne elektron, vzniká i jeho neutrino (přesněji antineutrino).

Podobně jako elektronové neutrino doprovází při slabých rozpadech elektron, doprovází mionové neutrino mion a tauonové neutrino tauon. Tento fakt je příkladem zachování tzv. **leptonového čísla**.

**Tauon** je 3 484-krát těžší než elektron. Byl objeven v roce 1977 M. Perlem. Jde o nestabilní částici s dobou života  $3 \times 10^{-13}$  s. Rozpadá se na své lehčí dvojníky (elektron nebo mion) a neutrino.

# Fermiony

➤ Kvarky a leptony tvoří tři rodiny, vždy po dvou kvarcích a dvou leptonech. Leptony mají menší hmotnost než odpovídající kvarky. Obyčejná hmota je složená jen z kvarků *u* a *d* a elektronů, členů první rodiny.

➤ **Fermiony jsou tedy stavební kameny hmoty.**

Fermiony jsou částice se spinem 1/2, 3/2, ...

Spin je vnitřní moment hybnosti částice. Udává se v násobcích  $\hbar$ , což je kvantová jednotka momentu hybnosti, kde  $\hbar = h/2\pi = 6,58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1,05 \times 10^{-34} \text{ J s}$ .

Leptony		spin = 1/2	
Vůně	Hmotnost GeV/c <sup>2</sup>	Elektrický náboj	
$\nu_e$ elektronové neutrino	<10 <sup>-8</sup>	0	
<b>e</b> elektron	0.000511	-1	
$\nu_\mu$ mionové neutrino	<0.0002	0	
<b><math>\mu</math></b> mion	0.106	-1	
$\nu_\tau$ tauonové neutrino	<0.02	0	
<b><math>\tau</math></b> tauon	1.777	-1	

Kvarky		spin = 1/2	
Vůně	Přibližná hmotnost GeV/c <sup>2</sup>	Elektrický náboj	
<b>u</b> up	0.003	2/3	
<b>d</b> down	0.006	-1/3	
<b>c</b> charm	1.3	2/3	
<b>s</b> strange	0.1	-1/3	
<b>t</b> top	175	2/3	
<b>b</b> bottom	4.3	-1/3	

Elektrický náboj se vyjadřuje v násobcích náboje protonu. V soustavě SI je elektrický náboj protonu  $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

# Bosony

- Kvarky a leptony jsou základní stavební kameny hmoty. Jaké síly je však drží pohromadě? Všechny síly jsou projevem interakcí částic.
- Existují **čtyři základní typy interakcí**: **gravitační**, **elektromagnetická**, **silná** a **slabá**.
- **Síly jsou důsledkem výměny dalších fundamentálních částic nazývaných bosony.**
- Dobře známý **foton je například boson**, který **zprostředkovává elektromagnetickou sílu.**

Sjednocená elektroslabá spin=1		
Název	Hmotnost GeV/c <sup>2</sup>	Elektrický náboj
$\gamma$ foton	0	0
$W^-$	80.4	-1
$W^+$	80.4	+1
$Z^0$	91.188	0

Nosiče sil

Silná (barevná) spin=1		
Název	Hmotnost GeV/c <sup>2</sup>	Elektrický náboj
<b>g</b> gluon	0	0

Bosony jsou částice se spinem 0, 1, 2, ...

Na konci šedesátých let se podařilo vytvořit teorii sjednocující elektromagnetické a slabé interakce, odpovídající např. za radioaktivitu beta - **teorii elektroslabých interakcí.**

Každý kvark nese jednu ze tří hodnot „silného náboje“, kterému se také říká „**barevný náboj**“. Tyto barevné náboje nemají nic společného s barvami ve viditelném světle. **Gluony mají osm možných hodnot barevného náboje.** Stejně jako elektricky nabitě částice interagují tak, že si vyměňují fotony, v silných interakcích interagují barevně nabitě částice prostřednictvím výměny gluonů. Leptony, fotony, W a Z bosony silně neinteragují a nemají tedy žádný barevný náboj.

# Síly a interakce

Zodpovědná za většinu rozpadů v přírodě.

Typická pro atomy, molekuly, strukturu pevných látek, je také schopna produkovat nové částice a způsobit rozpad některých částic.

Typická pro produkci nových částic nebo pro velmi rychlé rozpady, jádro drží pohromadě díky silné interakci.

Vlastnosti	Interakce	Gravitační	Slabá (Elektroslabá)	Elektromagnetická	Silná	
					Základní	Zbytková
„Náboj“, na který působí:		hmota	vůně	elektrický náboj	barevný náboj	viz. odstavec o zbytkové silné interakci
Částice, které ji cítí:		všechny	kvarky, leptony	elektricky nabitě	kvarky, gluony	hadrony
Zprostředkující částice:		graviton (dosud neobjeven)	$W^+ W^- Z^0$	$\gamma$	gluony	mesony
Síla v poměru k elektromagnetické mezi dvěma u kvarky ve vzdálenosti $10^{-18}$ m ... a mezi dvěma protony v jádře $3 \times 10^{-17}$ m		$10^{-41}$ $10^{-41}$ $10^{-36}$	0.8 $10^{-4}$ $10^{-7}$	1 1 1	25 60 netýká se hadronů	netýká se kvarků 20

Působí mezi všemi částicemi, ale v mikrosvětě je zanedbatelná.

Působí mezi všemi kvarky a leptony, ale pouze na velmi krátkých vzdálenostech, menších než  $10^{-18}$  m.

Působí jen mezi nabitými částicemi. Zprostředkující částicí je nehmotný foton a proto mají elektromagnetické síly nekonečný dosah.

Silná vazba barevně neutrálních protonů a neutronů tvořících jádro je způsobena **zbytkovou silnou interakcí** mezi jejich barevnými složkami. Je to podobné jako zbytková elektromagnetická interakce, která váže elektricky neutrální atomy do molekul. Lze ji také chápat jako výměnu mezonů mezi hadrony.

Při popisu vzájemného působení objektů v makrosvětě se osvědčil pojem síly. **V mikrosvětě častěji používáme univerzálnější pojem interakce**, abychom mohli mluvit o celé plejádě procesů, které ve srážkách částic nastávají.

# Kvarky uvězněné v hadronech: mezonech a baryonech

- **Kvarky a gluony není možné od sebe odtrhnout**, jsou uvězněny v barevně neutrálních částicích nazývaných **hadrony**.
- Když se barevně nabitě částice (kvarky, gluony) pokusíme oddělit, energie gluonového pole mezi nimi roste. Tato energie se nakonec přemění na další pár kvark-antikvark.
- **Kvarky a antikvarky nakonec vytvoří hadrony**, které pozorujeme.
- V přírodě existují dva typy hadronů: **mezony (středně těžké)  $q\bar{q}$**  a **baryony (těžké)  $qqq$** .

**Fermiony**

**Baryony  $qqq$  a antibaryony  $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$**

Baryony jsou hadrony s poločíselným spinem.  
Existuje okolo 120 druhů baryonů.

Symbol	Název	Kvarkové složení	Elektrický náboj	Hmotnost $\text{GeV}/c^2$	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	$sss$	-1	1.672	3/2

**Bosony**

**Mezony  $q\bar{q}$**

Mezony jsou hadrony s celočíselným spinem (bosony).  
Existuje okolo 140 druhů mezonů.

Symbol	Název	Kvarkové složení	Elektrický náboj	Hmotnost $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	ro	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
$B^0$	B-nula	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Ke každému typu **částice** existuje odpovídající typ **antičástice** (označená pruhem nad příslušným symbolem dané částice). Částice a antičástice mají **stejnou hmotnost a spin**, ale **opačné náboje**. Některé elektricky neutrální bosony (např.  $Z^0$ ,  $\gamma$  a  $\eta_c = c\bar{c}$ , avšak nikoli  $K^0 = d\bar{s}$ ) jsou samy sobě antičásticí.



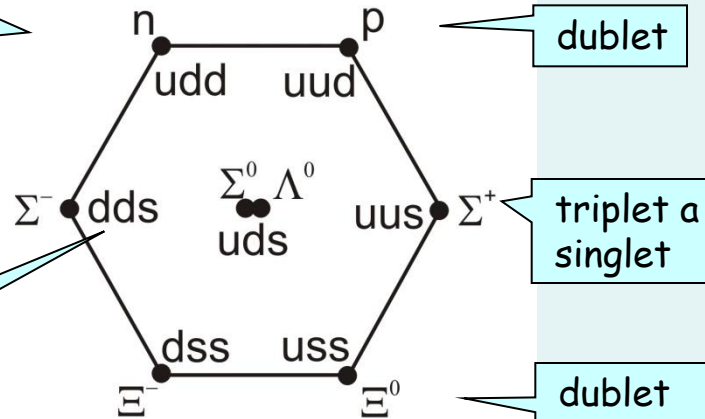


## Stránky pro experty! Můžete je přeskočit, ale co to zkusit !

Postupně bylo objeveno velké množství baryonů a mezonů, viz. tabulky na předchozí straně. Fyzici se snažili v tomto „zvěřinci“ najít nějaký řád, podobně jako například periodickou tabulku prvků u atomů. Všimli si, že některé částice - například nám dobře známý neutron a proton - s podobnými vlastnostmi (stejný spin, téměř stejné hmotnosti, ale různý náboj) se chovají stejně v silných interakcích. Vzhledem k této interakci by tedy existovala pouze „jedna“ částice - nukleon. Podobně se chová i trojice pionů  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  a  $\pi^+$ . Takovými malým rodinám částic se říká multiplety - existují singlety, dublety (n, p), triplety (piony), ... V roce 1963 se podařilo tyto malé rodiny částic, jejichž hmotnosti se téměř neliší, uspořádat ještě do větších společenství - supermultipletů, ve kterých jsou hmotnosti částic stále velmi blízké. Kromě blízkých hmotností mají částice v těchto společenstvích vždy stejný spin. Uspořádání do těchto společenství lze dát hlubší matematický význam v rámci teorie grup a jejich reprezentací. Grupa, která se zde hodí, je SU(3).

Jedním z takovýchto „společenství“ je **baryonový oktet a singlet**. Tvoří ho částice se spinem 1/2.

kvarkové složení



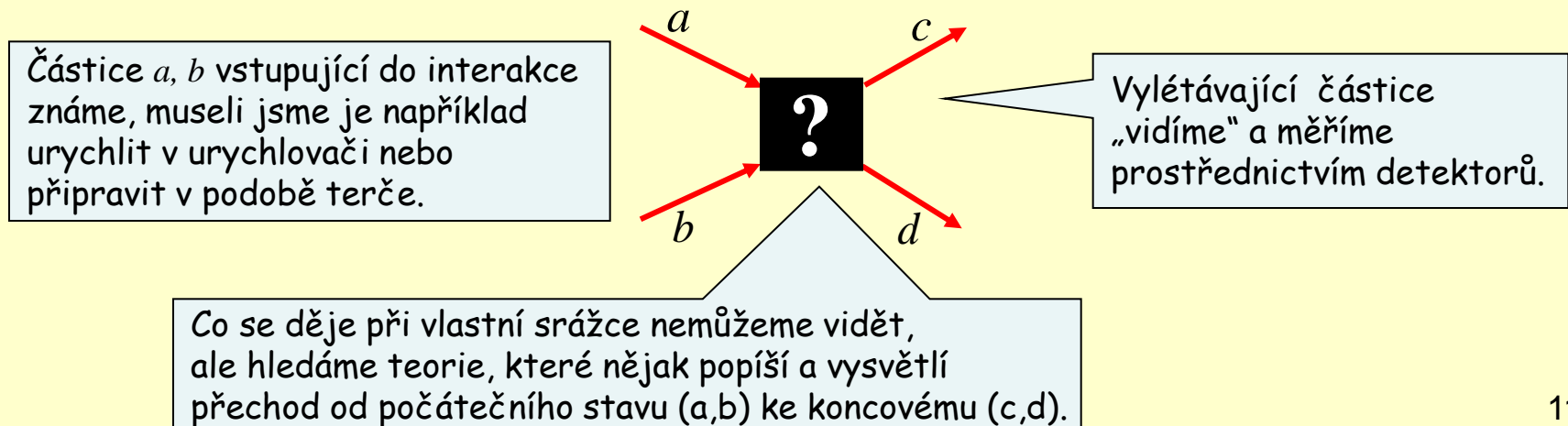
Jednotlivé rodiny se liší podivností\*. Rozdíl hmotností mezi jednotlivými rodinami je maximálně 35%.

Podivnost je další vlastnost resp. kvantové číslo, které některé částice mají. V kvarkovém modelu je spojeno s kvarkem s.

# Feynmanovy diagramy

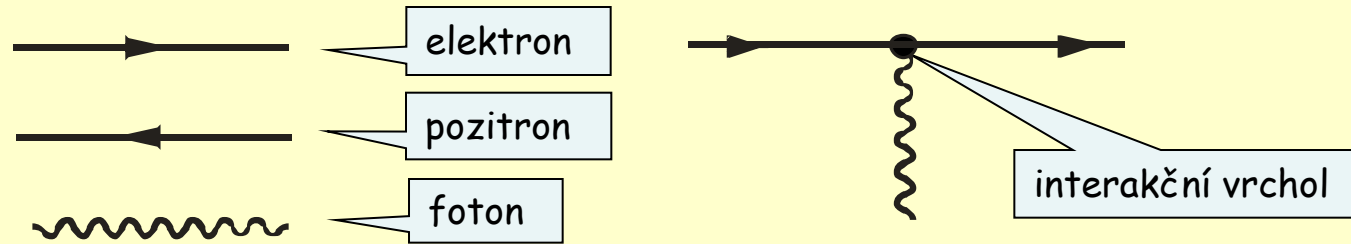
Na předcházejících stránkách jsme už napsali, že existují čtyři základní interakce, které jsou zprostředkovány výměnou částic, tzv. nosičů. Nijak moc jsme to nevysvětlili. Nevysvětlíme to ani teď, neboť standardní cesta k pořádnému pochopení těchto témat vede přes kvantovou mechaniku ke kvantové teorii pole a specifickým teoriím pro jednotlivé interakce. Zájemci, kteří tato témata studují, se do obrazu dostávají zpravidla ke konci vysokoškolského studia. Nic nám ale nebrání jednoduše okomentovat, o co jde a jak se obvykle postupuje.

Interakce  $a + b \rightarrow c + d$  probíhá tak, že do interakční oblasti vlétají částice  $a, b$  a vylétají z ní částice  $c, d$ . To, co se děje v interakční oblasti v rozměrech rádu  $10^{-15}$  m, je našemu bezprostřednímu pozorování nedostupné a proto interakční oblast znázorníme černou skříňkou.

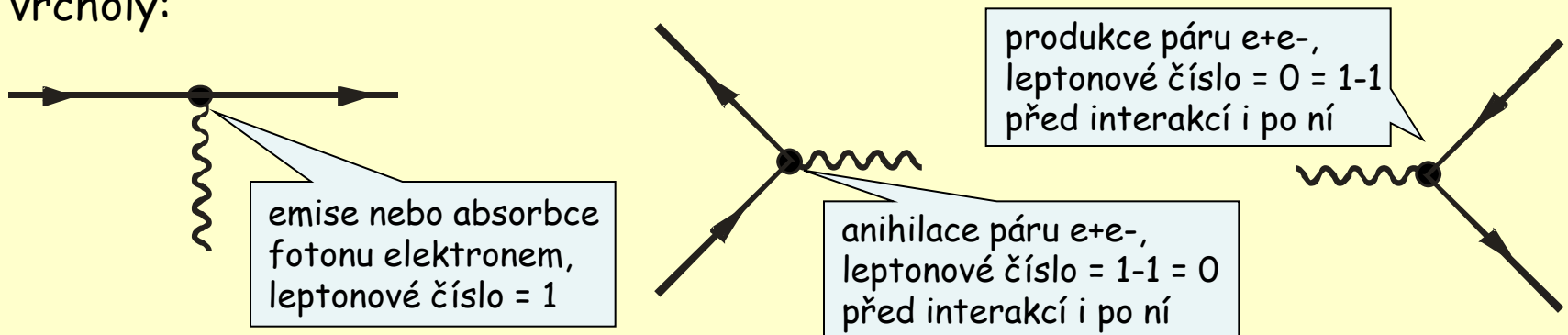


# Feynmanovy diagramy - elektromagnetická interakce

Vidíme, že „konstrukční prvky“ Feynmanových diagramů jsou:



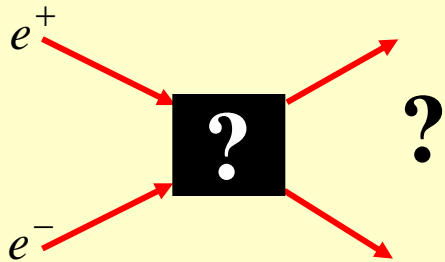
Feynmanovy diagramy se skládají z vnějších čar reprezentujících částice vstupující do interakce a vystupující z ní, vrcholů a případně dalších vnitřních čar spojujících vrcholy. Všimněte si, že fotony - zprostředkující částice - se rodí a zanikají na rozdíl od elektronů, které se zachovávají, přesněji: zachovává se počet elektronů-počet pozitronů = leptonové číslo. Ve vrcholech se zachovává i energie a hybnost. Podívejte, co všechno mohou popisovat vrcholy:



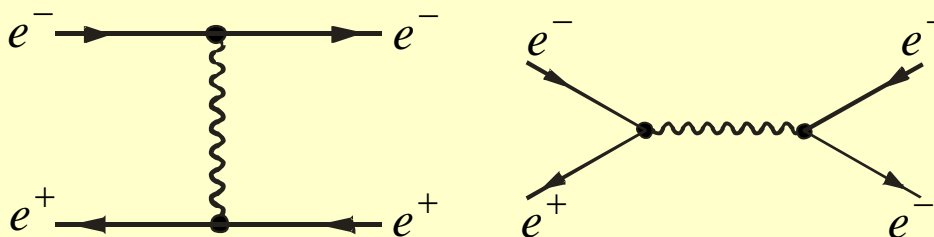
Tyto diagramy neodpovídají žádným reálným dějům, jak jsme viděli při diskusi anihilace v kapitole o experimentování na str. 42, nelze totiž splnit zákon zachování hybnosti a energie

# Feynmanovy diagramy - elektromagnetická interakce

Dalším příkladem elektromagnetické interakce je srážka elektronu a pozitronu. Jaký může být koncový stav této interakce?

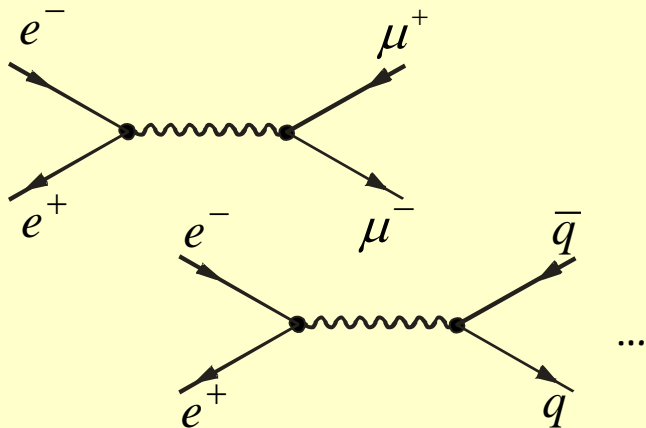


1) V koncovém stavu může být zase jeden elektron a jeden pozitron, navenek je to pružný rozptyl

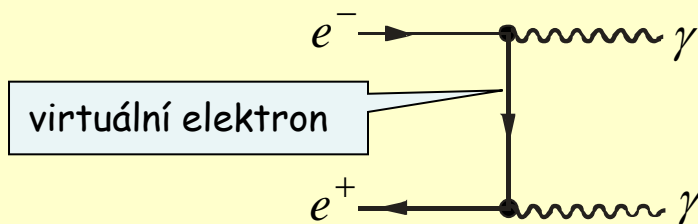


2) V koncovém stavu může být pár lepton-antilepton i jiný než  $e^+e^-$ , pár kvark-antikvark, ... Musíme ale na to mít dostatek energie.

Anihilací elektronu a pozitronu vzniká virtuální foton, a z něho opět elektron a pozitron. Částice stejného druhu jsou nerozlišitelné a tak nikdo nepozná, že to nejsou původní elektron a pozitron.

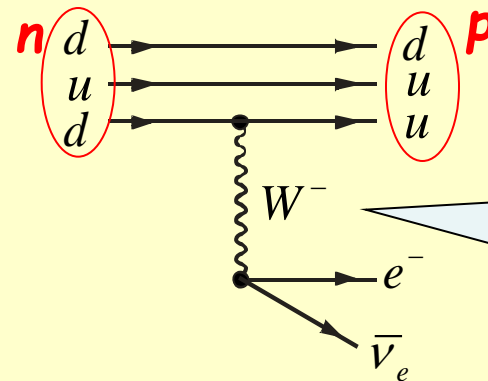
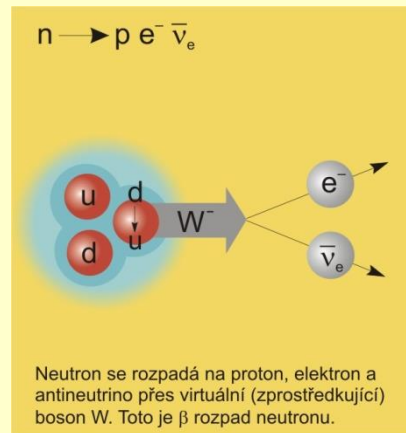


3) Výsledkem může být anihilace elektronu a pozitronu na dva fotony:



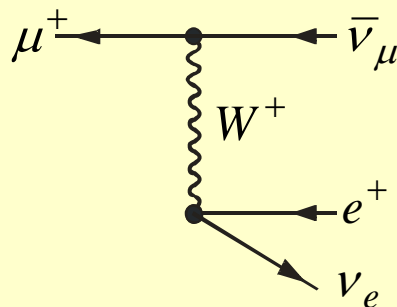
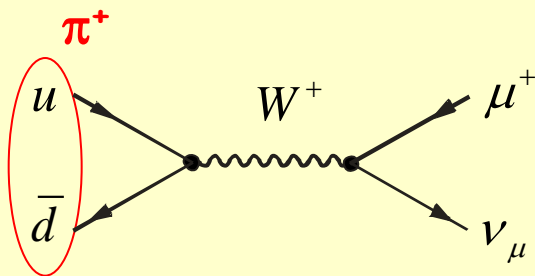
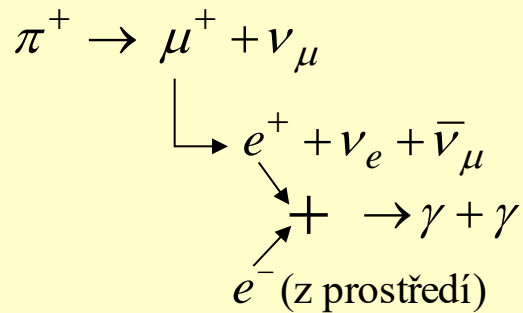
# Feynmanovy diagramy - elektroslabá interakce

Pro ilustraci je na obrázku znázorněn příklad slabé interakce - **rozpad neutronu**.

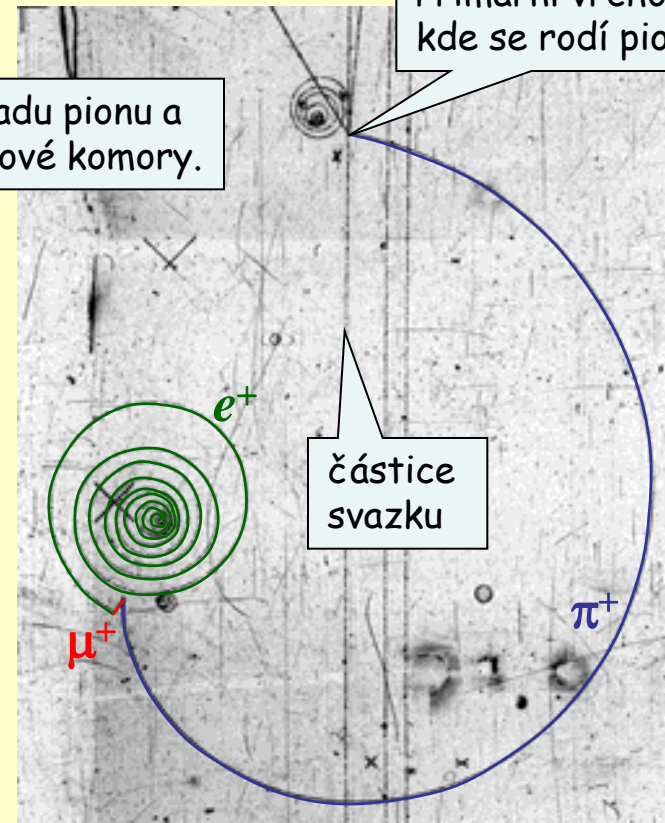


Neutron se rozpadá emisí  $W^-$ , který vytvoří elektron a neutrino.

Další příklad slabé interakce:



Obrázek rozpadu pionu a mionu z bublinové komory.



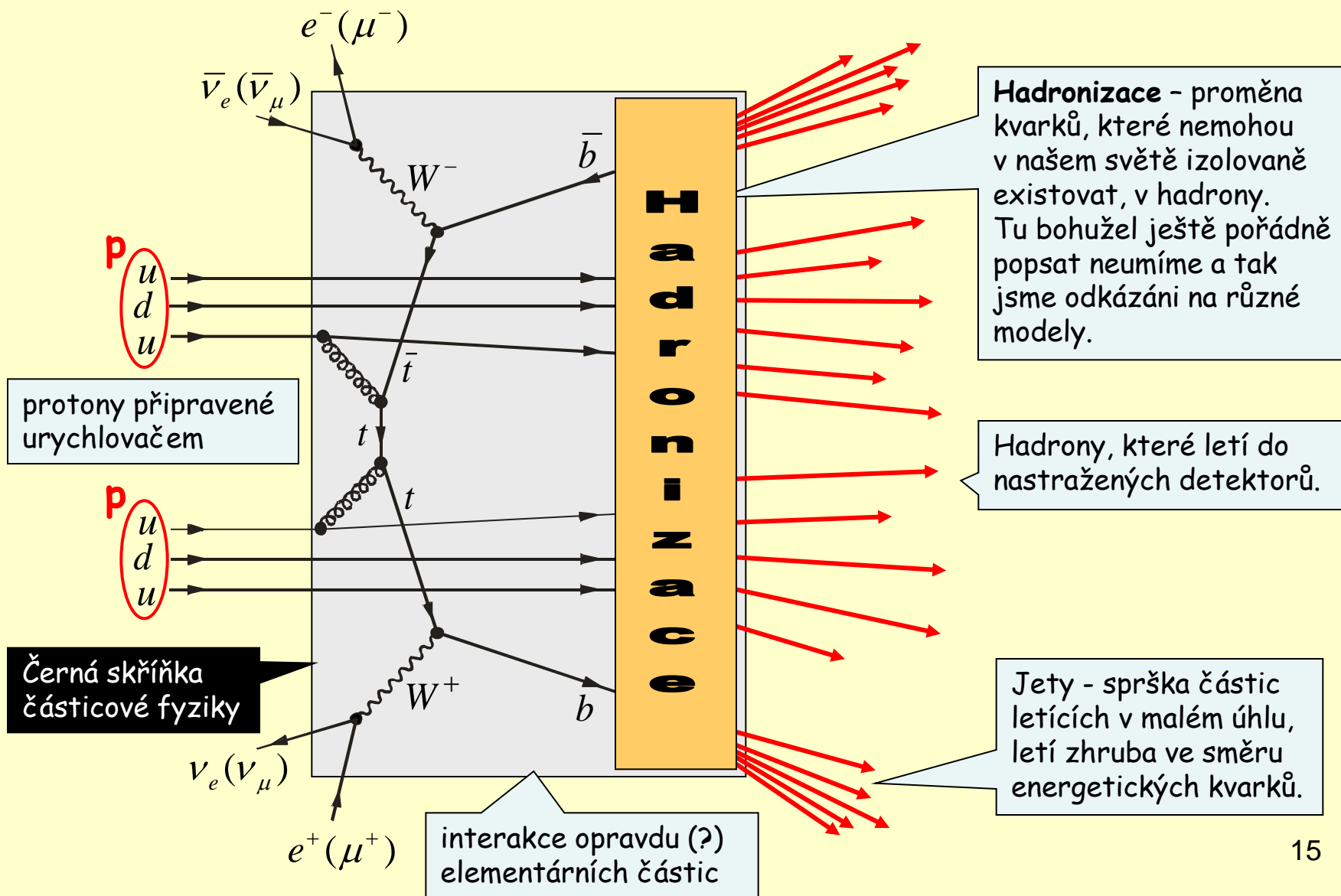
Primární vrchol, kde se rodí pion.

částice svazku

$e^+$   
 $\mu^+$

$\pi^+$

# Jedna srážka protonů na LHC



# CERN - LHC





# LHC – Large Hadron Collider

## Velký hadronový srážeč

- *Uvedení do provozu:* 10.9.2008
- *Území:* Francie (90 %) a Švýcarska
- *Obvod:* cca 27 km (průměr: 8,6 km)
- *Hloubka tunelu pod zemí:* 50 – 170 m (postaven 1980)
- *Počet srážek:* z 200 miliard vystřelených částic se jich srazí 20 (pravděpodobnost srážky je 1 :  $10^{10}$ ); **za 1 s se ale stane  $30 \cdot 10^6$  srážek**
- *Rychlost částic:* 99,999 999 1  $c$
- *Frekvence oběhu protonu:* 11 245 oběhů za 1 s
- *Koncová energie po urychlení:* 7 TeV (klid. energie 938 MeV, 7500 x menší, jako kdyby se člověk pohyboval místo 5 km/hod rychlostí 37 500 km/h – Saturn, sonda Deep Impact na kometu Tempel 1 v roce 2005); energie srážky 14 TeV
- 1800 supravodivých magnetů vytvářejících mag. pole až 8 T
- *Informace:* každý rok z CD 20 km vysoký sloup ( $15 \cdot 10^6$  GB)
- *Detektory:* ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf , TOTEM
- *Cena:* 8 miliard USD, roční provoz: 20 miliónů EUR

# LHC – experimenty

- Měření *rychlosti, hmotnosti a el. náboje* kolidujících i *vznikajících částic*
- Výsledky experimentů nám mohou pomoci objasnit principy a vlastnosti
  - a) **hmoty, energie, vesmíru a času**
  - b) **temné energie a temné hmoty**
  - c) **antihmoty**
  - d) **Higgsova bosonu** – potvrzení existence (4.7.2012 experiment, 14.3.2013 potvrzeno); potvrzení správnosti standardního modelu částic
  - e) **kvarků a leptonů** – jsou opravdu elementární?
- Experimenty:
  - ALICE** – srážka Pb iontů – simulace podmínek BB – quark-gluonové plasma
  - ATLAS, CMS** – pátrání po Higgsově bosonu, extra dimenzích, částicích DM (polovina detektorů vyvinuta Tesla Rožnov p.R. + FÚ AV ČR)
  - LHCb** – studium b-kvarku a vlastností antihmoty
  - LHCf** – simulace kosmického záření v lab. Podmínkách
  - TOTEM** – sběr dat ze všech experimentů

# CERN - LHC

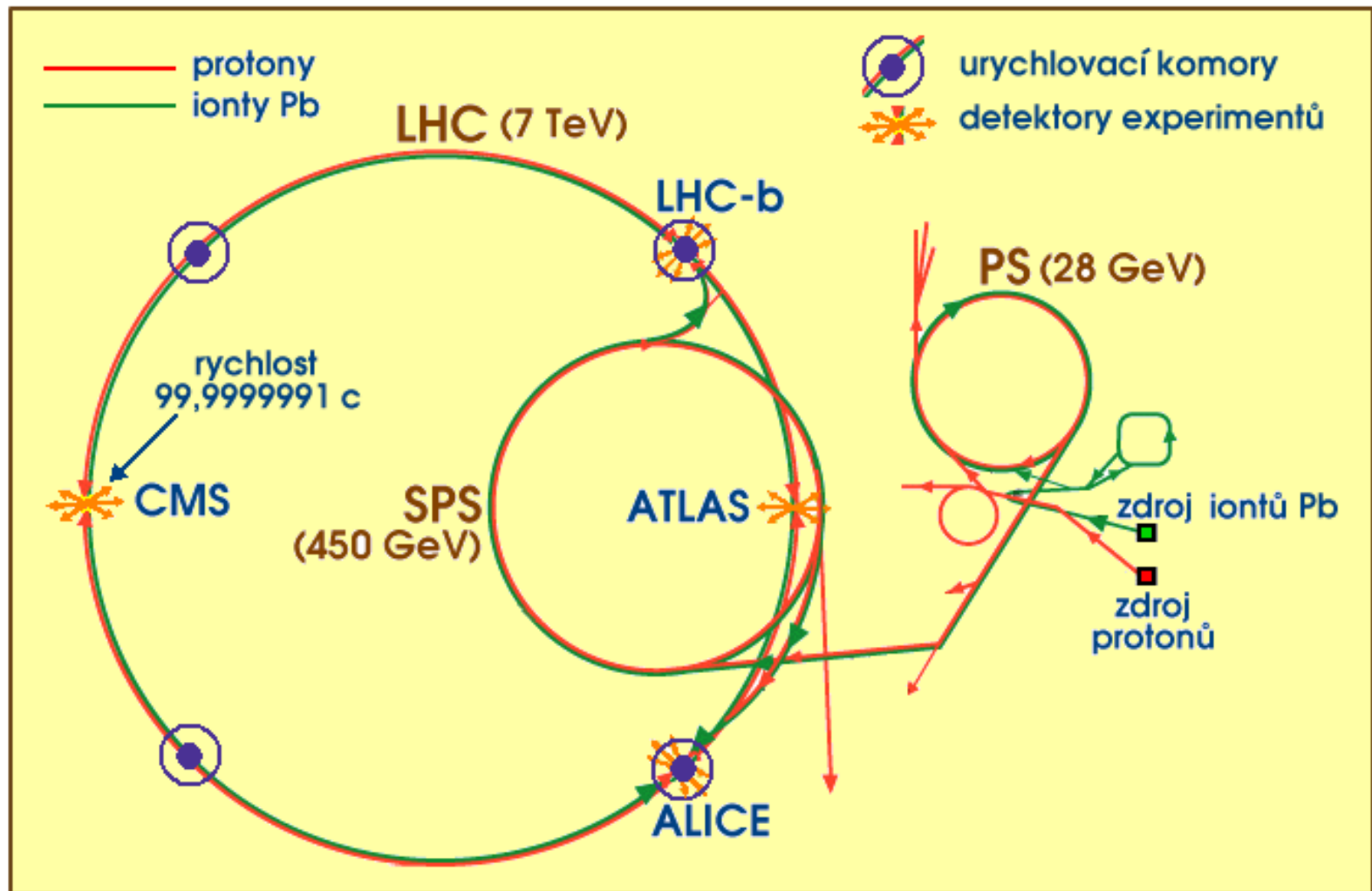


Schéma uspořádání urychlovače LHC:

Protóny a ionty olova postupně získají v urychlovačích PS, SPS a LHC energii 7 TeV. Na čtyřech místech urychlovacího tunelu jsou mohutné detektory experimentů ATLAS, LHC-b, ALICE a CMS.

# CMS – Compact Muon Solenoid

## Kompaktní mionová cívka

Kompaktní detektor mionů (angl. muons) využívající solenoidů pro detekci částic.

- Délka: 22 m
- Výška: 15 m
- Šířka: 15 m
- Hmotnost: 14 000 t
- Mag. indukce:  $B = 4 \text{ T}$  (100 000 x větší než  $B_{\text{Země}}$ )
- Obsluha: 3800 lidí ze 199 vědeckých institucí 43 států
  
- jediný sestaven na povrchu, pak po částech přemístěn pod zem
- Zkoumání mionů (200 x těžší než elektron)
- 2012 – zachycení Higgsova bosonu

# CMS – struktura

## CMS Detector

### SILICON TRACKER

Pixels ( $100 \times 150 \mu\text{m}^2$ )  
~1m<sup>2</sup> ~66M channels

Microstrips (80-180 $\mu\text{m}$ )  
~200m<sup>2</sup> ~9.6M channels

### CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)

~76k scintillating PbWO<sub>4</sub> crystals

### PRESHOWER

Silicon strips  
~16m<sup>2</sup> ~137k channels

### STEEL RETURN YOKE

~13000 tonnes

### SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium-titanium coil  
carrying ~18000 A

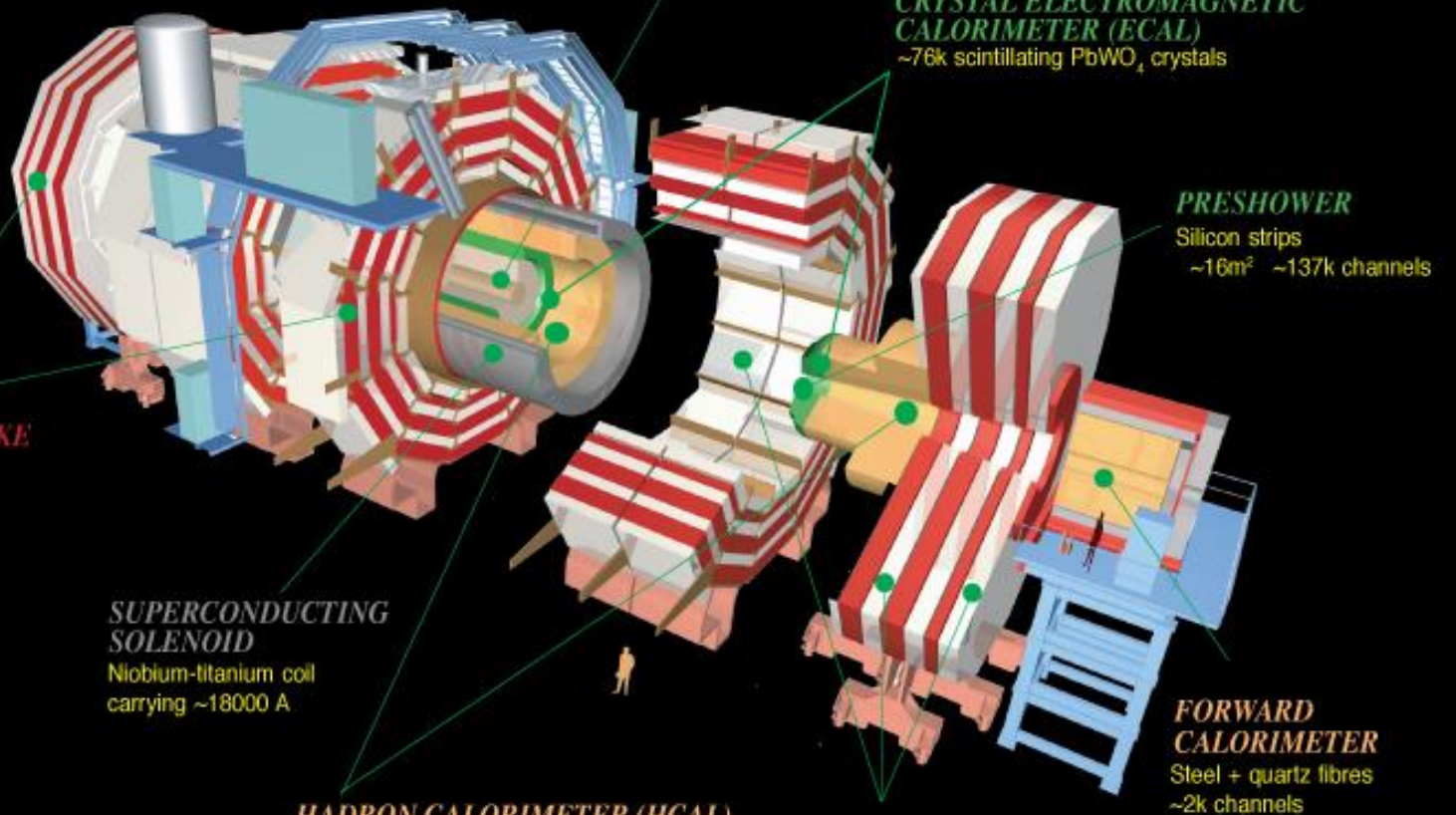
### HADRON CALORIMETER (HCAL)

Brass + plastic scintillator  
~7k channels

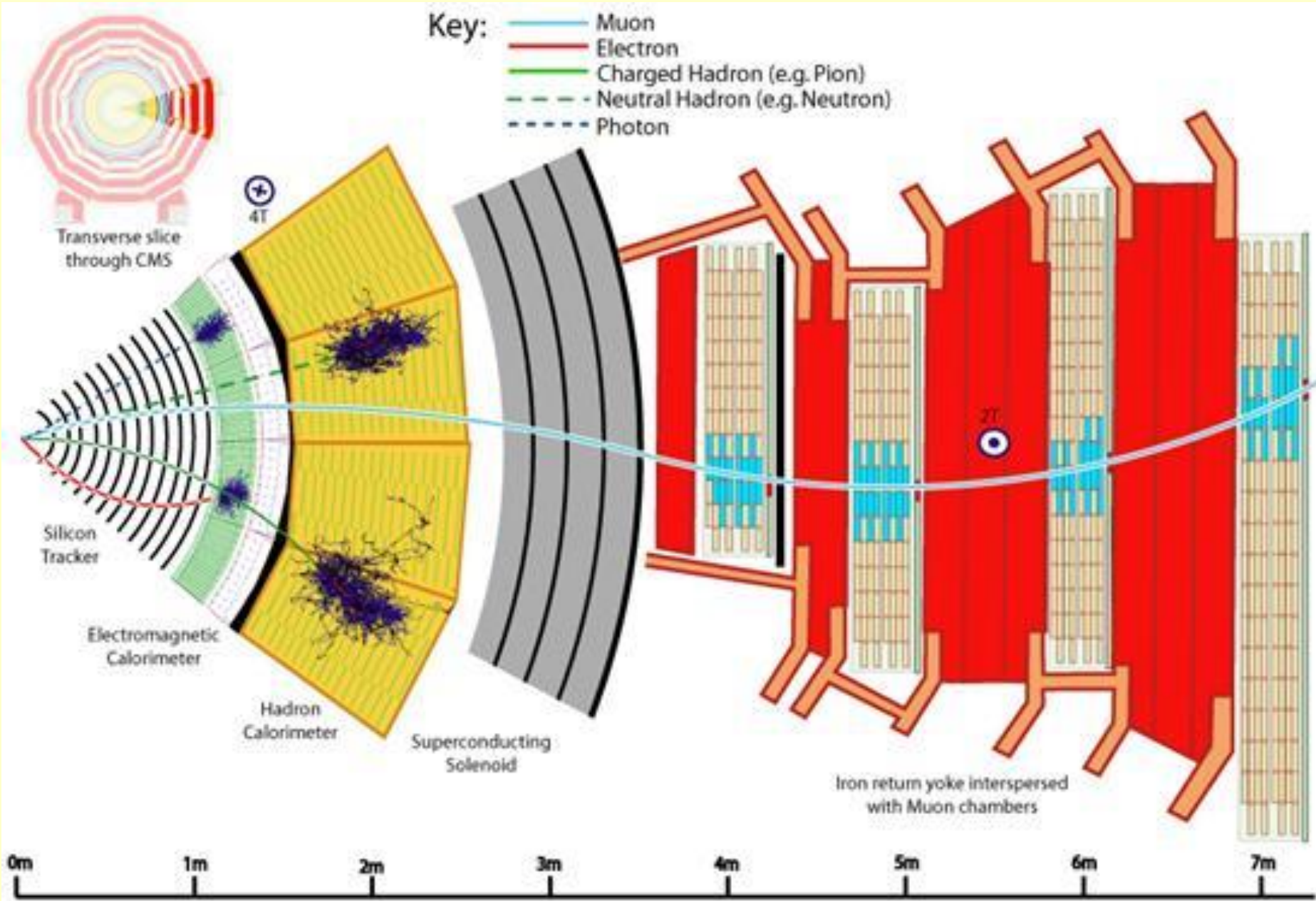
### MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube & 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 473 Cathode Strip & 432 Resistive Plate Chambers

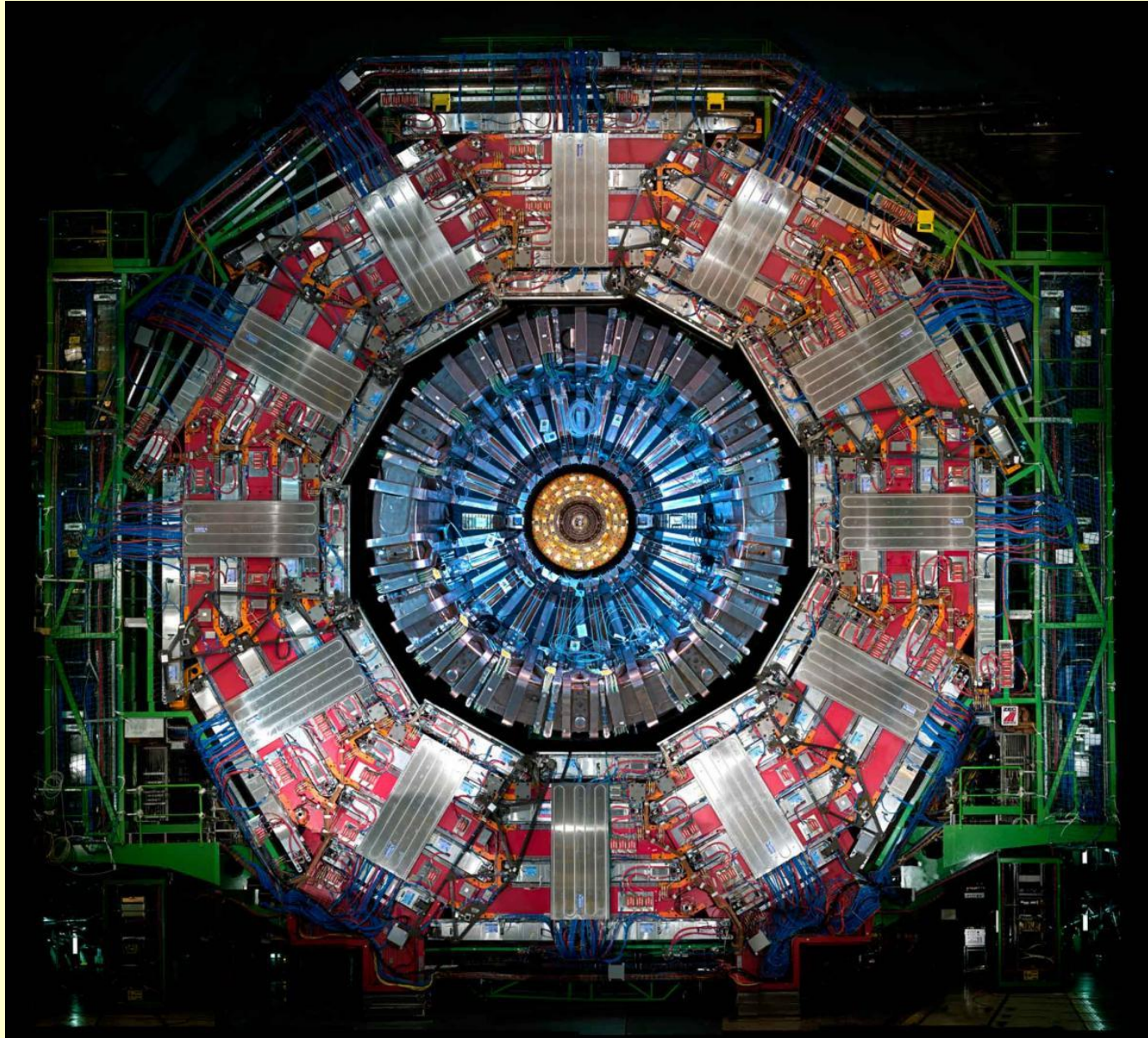
Total weight : 14000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T



# CMS – výsekový řez

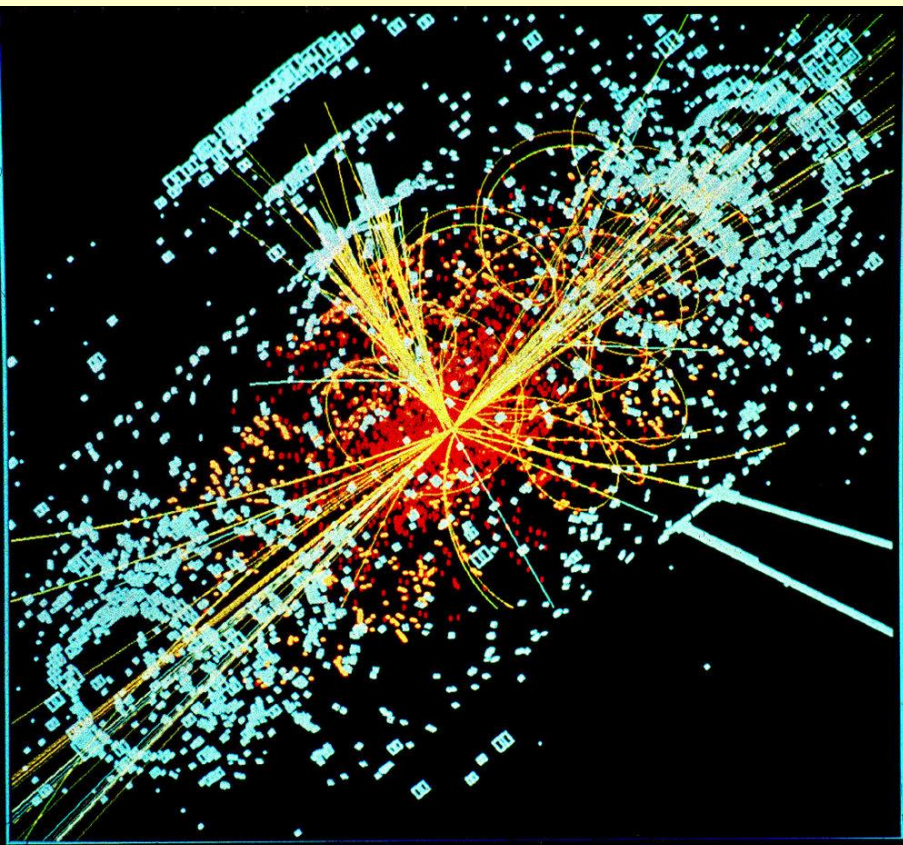


# CMS – čelní pohled



# Higgsův boson

- hmotná elementární částice jejíž existence vysvětluje hmotnosti všech ostatních elementárních částic
- objev 2012 na CMS v LHC
- Teorie: 1964 Peter Higgs
- nelze pozorovat přímo



## HIGGS BOSON

