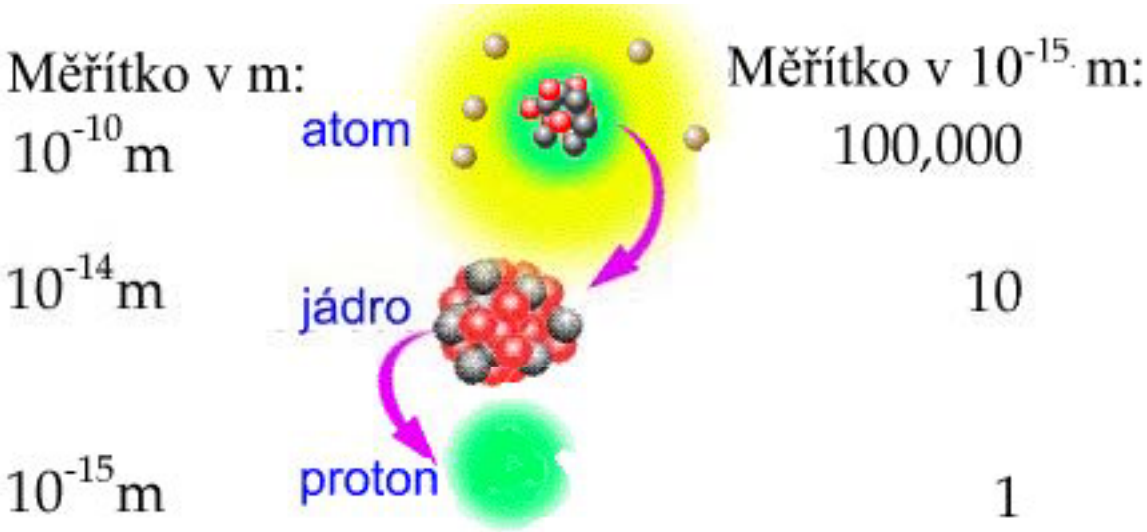
Standardní model elementárních částic a jejich interakcí

aneb

Cihly a malta, ze kterých je postaven náš svět ©CERN

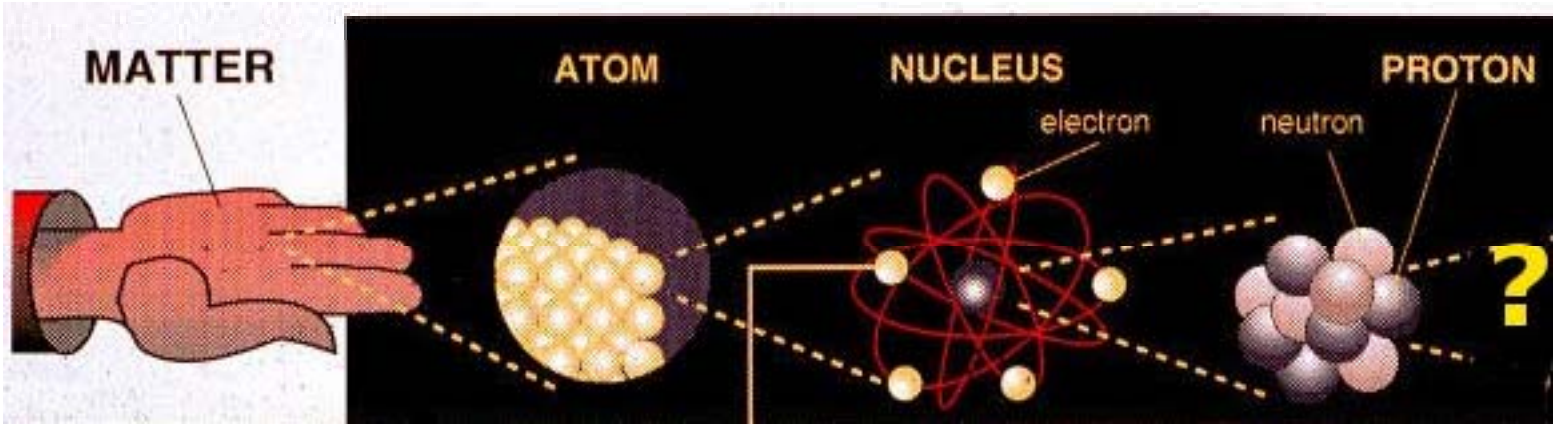
Jiří Rameš, Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.

Czech Teachers Programme, CERN, 3.-7. 3. 2008



Kdyby byl **atom** veliký jako fotbalové hřiště, bylo by **jádro** veliké zhruba míček na stolní tenis (a proton ještě desetkrát menší)

- Hmota se skládá z atomů
- Každý atom tvoří atomové jádro a obal z elektronů
- Jádro je složeno z protonů a neutronů



Je to vše ?

Lákavá představa (která se ve 30. letech 20. století mohla zdát velmi blízko skutečnosti):

• z několika základních druhů částic (elektron, proton, neutron a nemnoho dalších) by se dal poskládat **celý svět**

– jádra všech chemických prvků
– chemické vlastnosti (tj. elektronový obal)*
– jaderné vlastnosti a radioaktivita * ….

* k tomu by bylo třeba umět popsat i **síly** mezi částicemi - ale i to vypadalo nadějně

Základní síly:

- *gravitace*
- elektromagnetická síla
- silná jaderná sí
- slabá jaderná síla

V atomové fyzice odpovídá za vlastnosti elektronového obalu, určuje chemické vlastnosti

Drží pohromadě protony a neutrony v jádru, překonává elektrické odpuzování stejně nabitých protonů

Může za radioaktivitu beta, kromě jiného za beta rozpad neutronu

$neutron \rightarrow proton + elektron + neutrino$

Již ve 30. letech se však tento úhledný obraz světa začal hroutit.

Způsobily to objevy nových částic, jež nezapadaly do výše naznačeného schématu (byly pozorovány při **srážkových experimentech** - s částicemi kosmického záření a s postupem času i na urychlovačích).

Postupně byl objeven těžší „sourozenec“ elektronu **mion**, řada částic nového typu zvaných **mezony,** a také několik těžších partnerů protonu a neutronu (těžké baryony neboli **hyperony**).

Jednoduchý obraz světa přestával být jednoduchý. Bylo těžko představitelné, že základních „cihel“ světa je několik desítek druhů a stále přibývají.

JE SVĚT TAKTO SLOŽITÝ?

Odpověď (a současný pohled na svět subjaderných částic):

NĚKTERÉ ČÁSTICE (JAKO PROTON ČI NEUTRON) NEJSOU „FUNDAMENTÁLNÍ“

Existuje něco ještě „základnějšího“, a sice

KVARKY

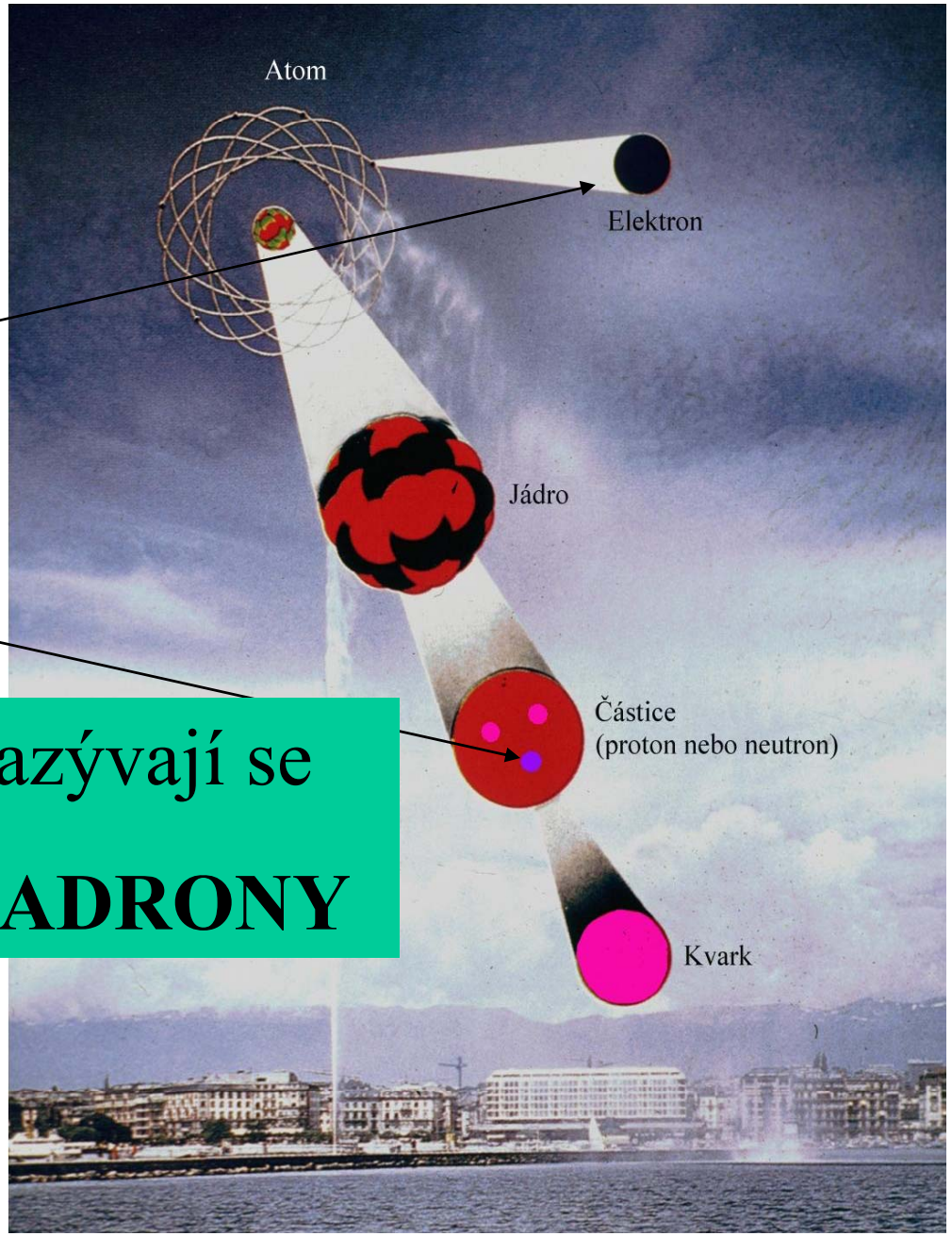
Základní částice hmoty jsou

- **leptony**
- **kvarky**

Částice tvořící jádr
(protony, neutrony)
a jim podobné se
skládají z několika
málo typů kvarků.

Nazývají se

HADRONY

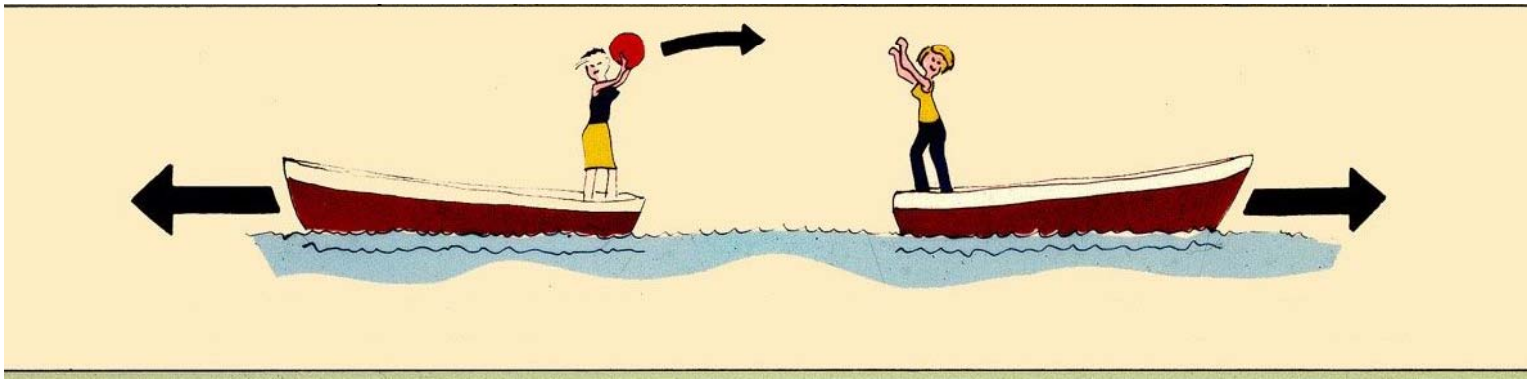


První částečná odpověď: Základní „cihly“ hmoty jsou leptony a kvarky.

Jak na sebe částice vzájemně působí?
Co drží kvarky pohromadě?

Na částice působí síly

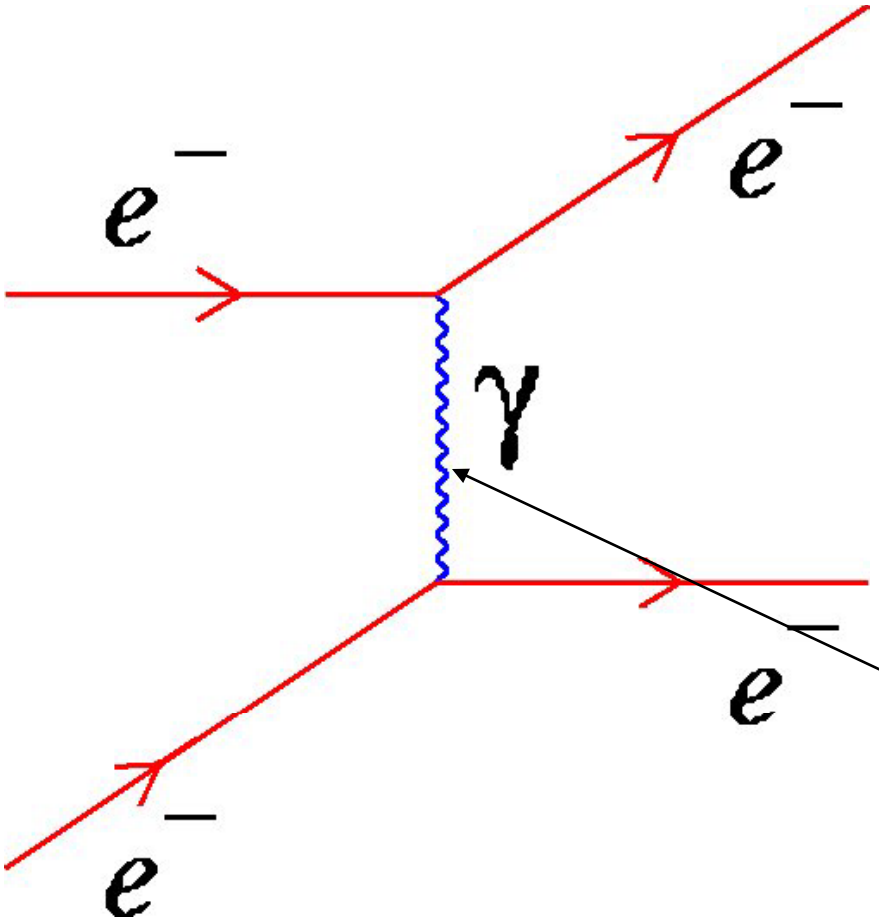
Ve světě částic se síly popisují jako vzá**interakce**
působení částic hmoty s jinými částicemi



Vedle základních částic hmoty (jako elektrony, kvarky…) existují

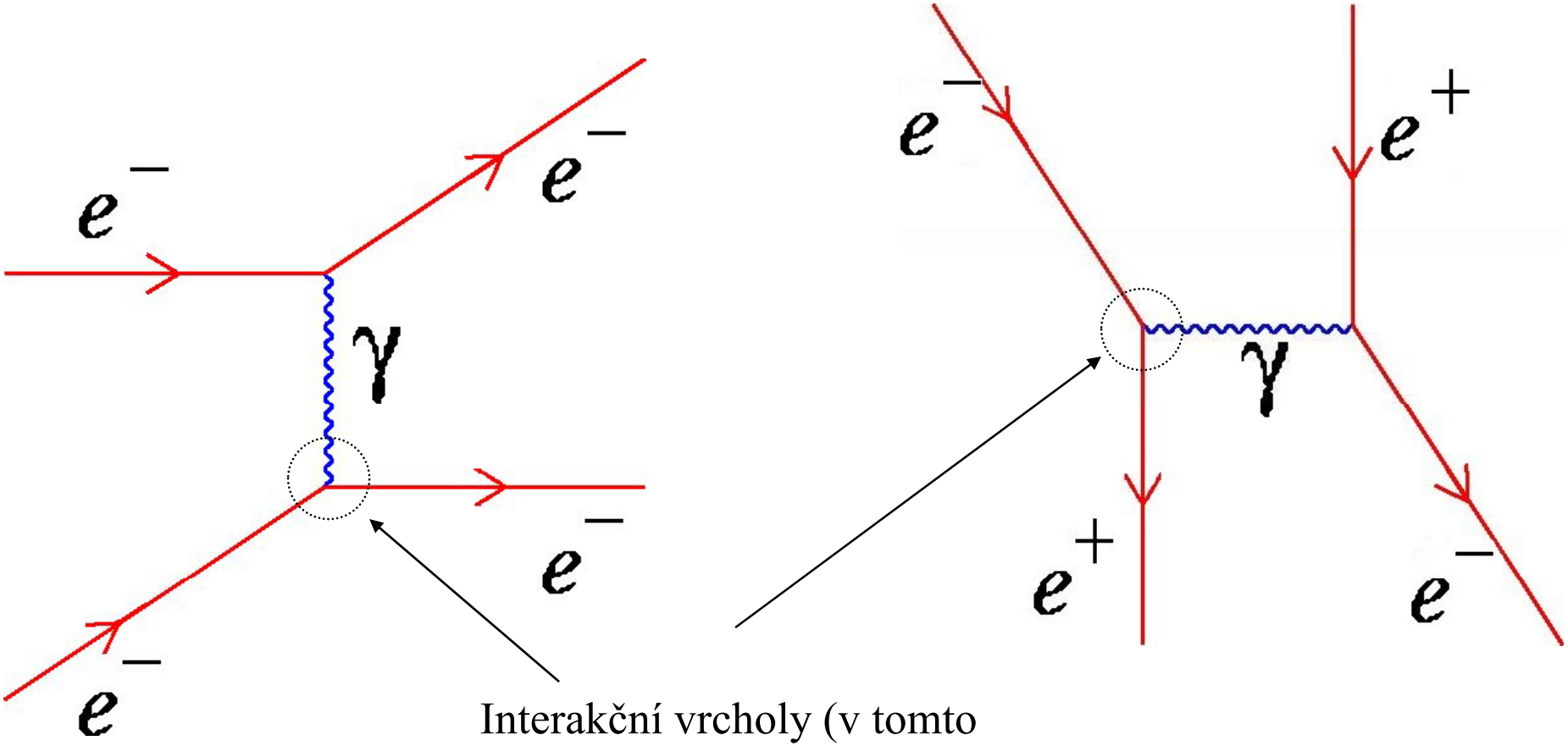
částice-nosiče síly

Jednoduchý proces: interakce elektronu s elektronem



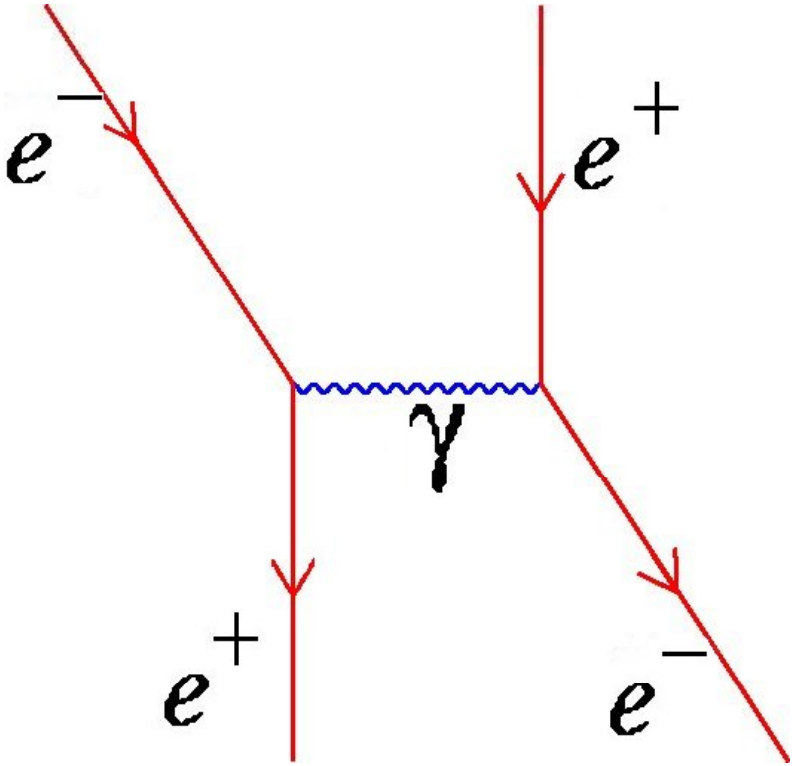
Pozor! Varování! Přirovnání k házení míčem **nelze vůbec brát doslova**

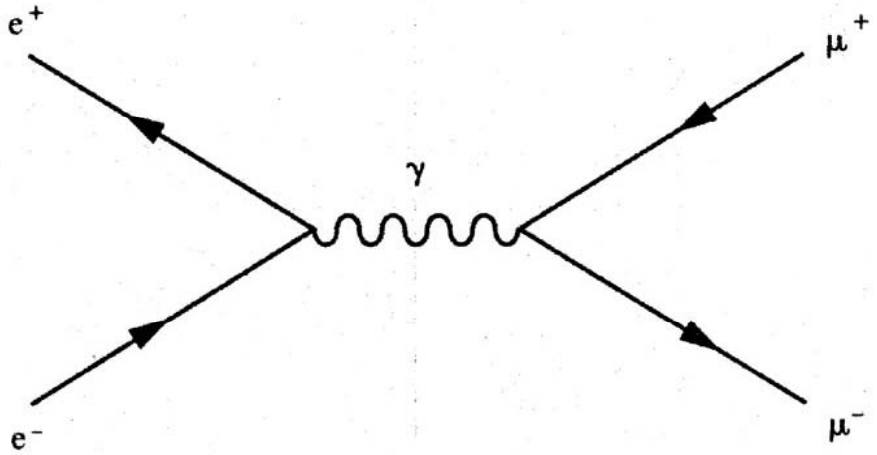
vyměňují si foton



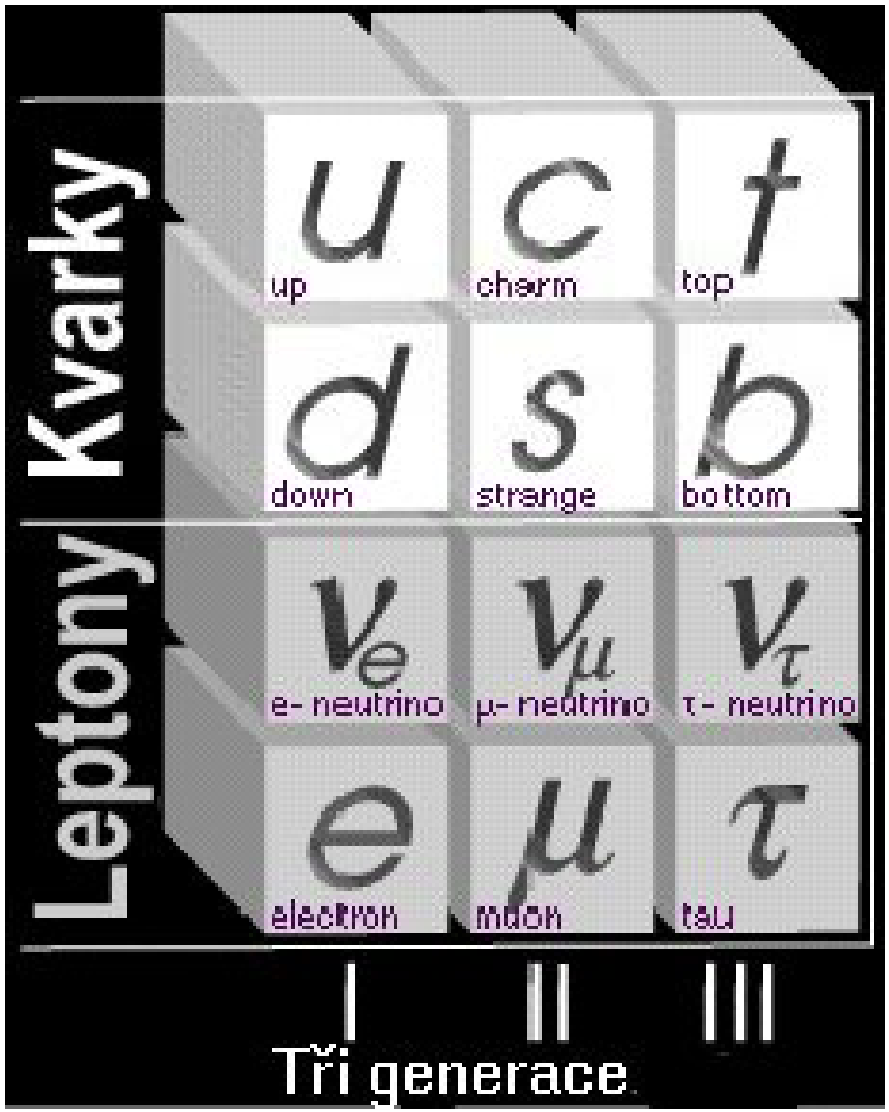
Interakční vrcholy (v tomto případě ***eeγ***)

Popsat síla znamená v mikrosvětě popsat interakci částic hmoty s nosiči síly





S nosiči síly ovšem může interagovat více druhů částic hmoty (v daném případě elektrony, miony, kvarky…



Fundamentální částice hmoty

- 3 rodiny/generace
- každou generaci tvoří dvojice kvarků a dvojice leptonů
- kvarky se nevyskytují jako volné částice, skládají se z nich **hadrony**

Všechny fundamentální částice hmoty jsou jednoho typu (tzv. **fermiony** se spinem ½)

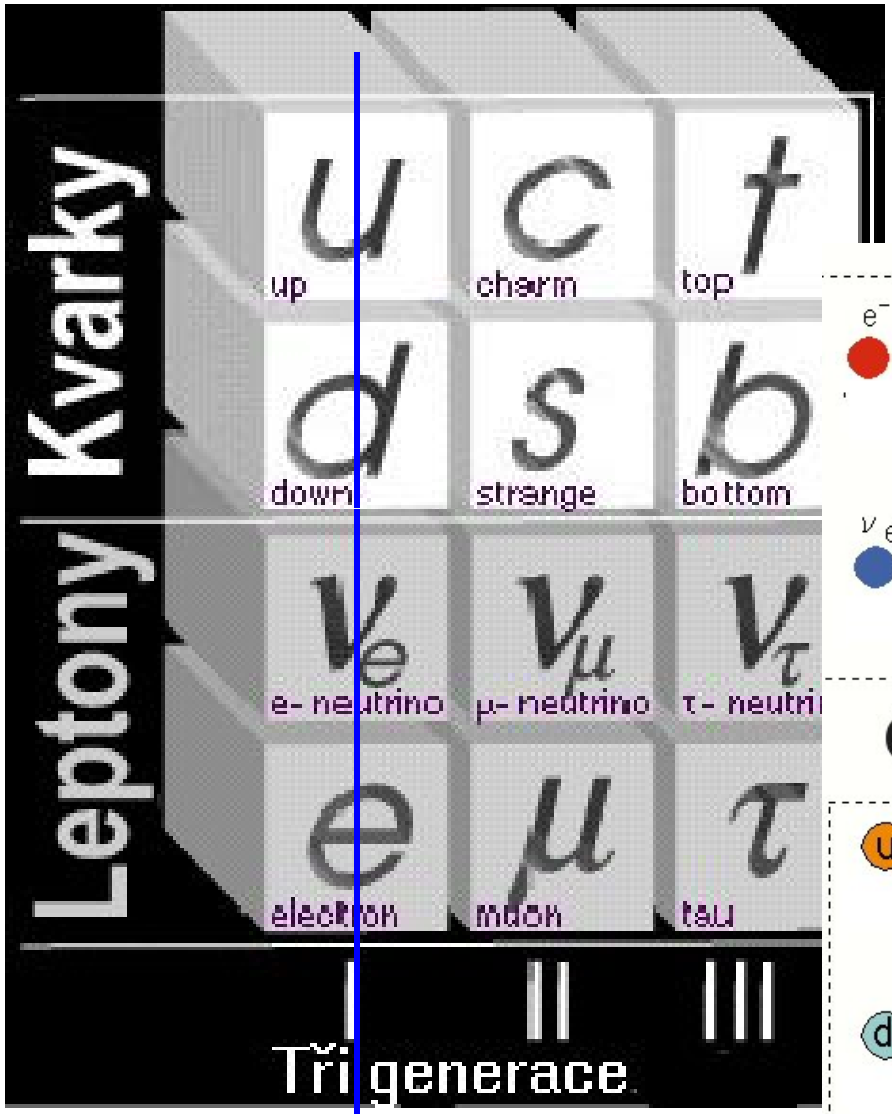
Fundamentální částice hmoty

•leptony „necítí“ silnou sílu

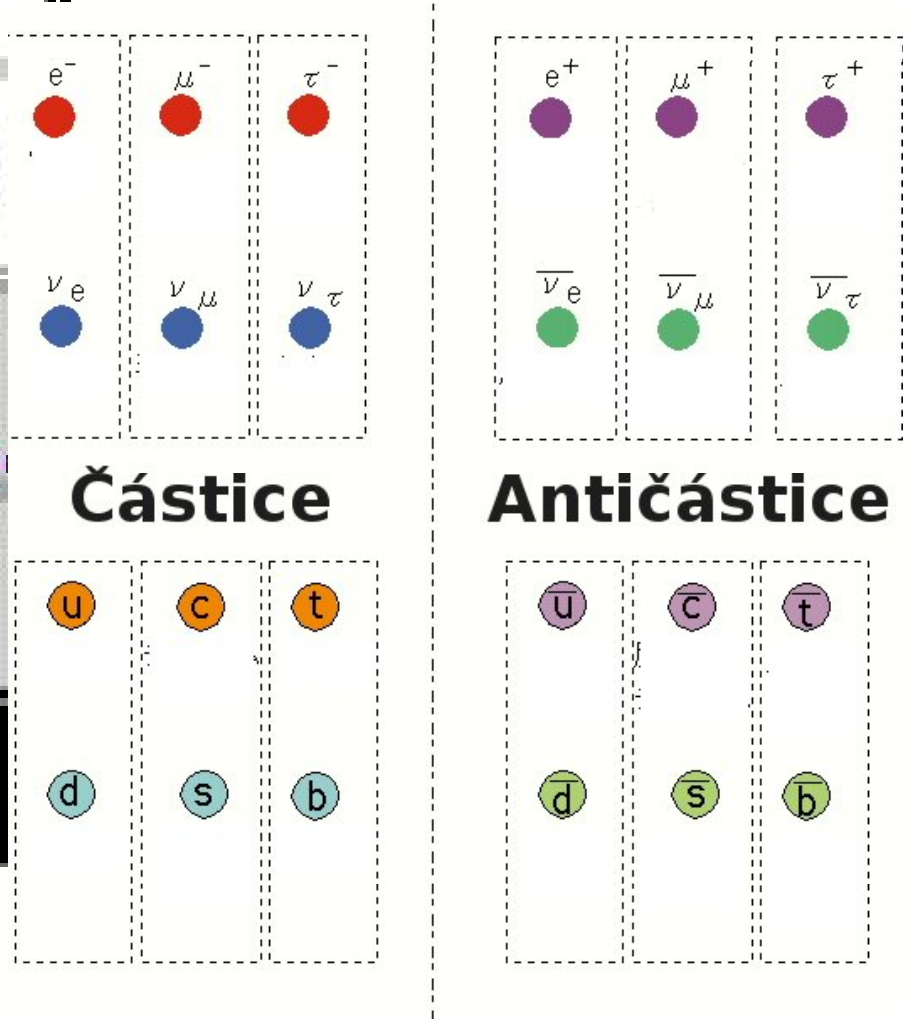
elektrický náboj

•kvarky mají el. náboje -1/3 nebo 2/3 náboje protonu

Fundamentální částice hmoty



První generace



Základní síly:

- gravitace
- elektromagnetická síla
- silná jaderná sí
- slabá jaderná síla

V atomové fyzice odpovídá za vlastnosti elektronového obalu, určuje chemické vlastnosti

Drží pohromadě protony a neutrony v jádru, překonává elektrické odpuzování stejně nabitých protonů

Může za radioaktivitu beta, kromě jiného za beta rozpad neutronu

$$neutron \rightarrow proton + elektron + neutrino$$

Základní síly:

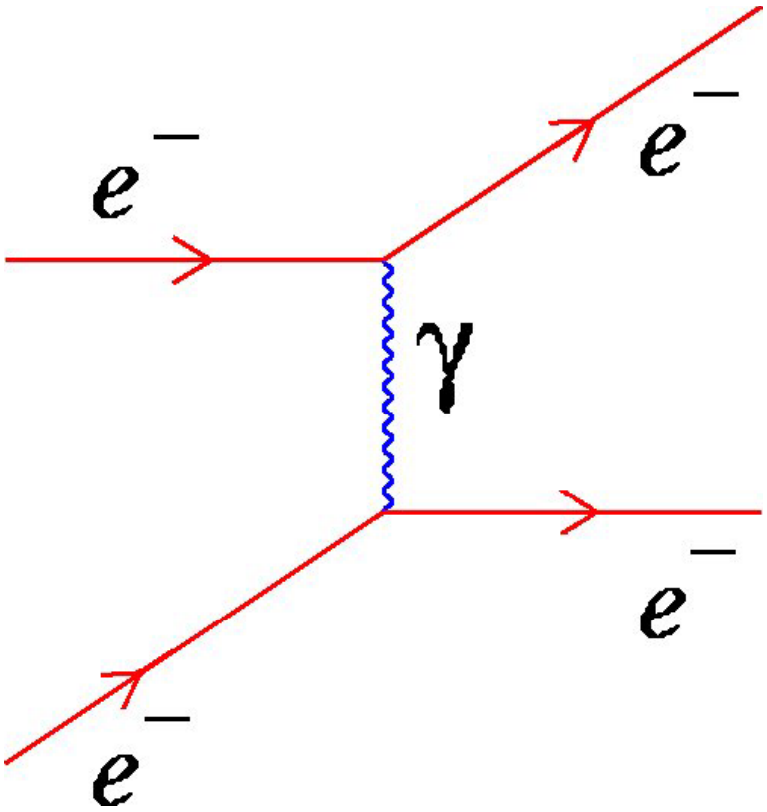
- gravitace
- elektromagnetická síla
- silná jaderná síla
- slabá jaderná síla

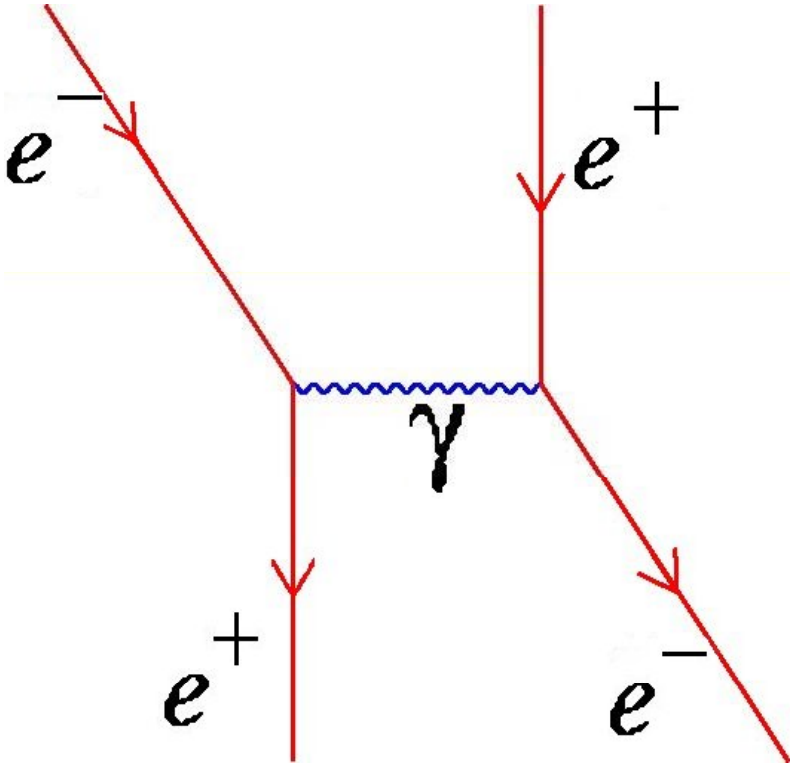
nosič: foton
náboj: elektromagnetický
působí na všechny částice kromě neutrin
kvantová elektrodynamika

nosič: gluony
náboj: barevný
působí na kvarky
kvantová chromodynamika

nosiče: částice W a Z
náboj: slabý

Částice-nosiče těchto tří základních sil jsou též jedoho typu (**bosony** se spinem 1)

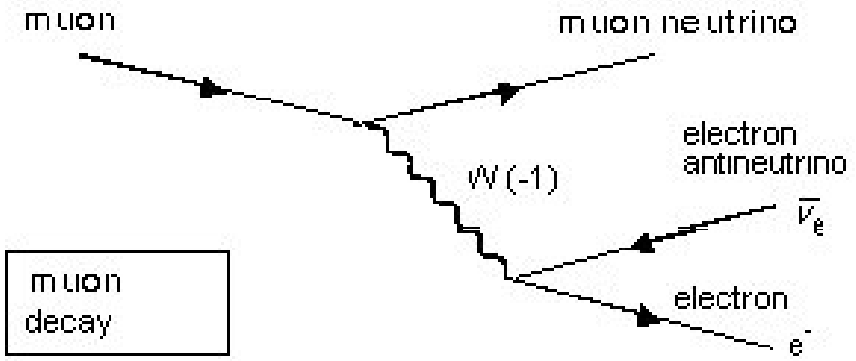




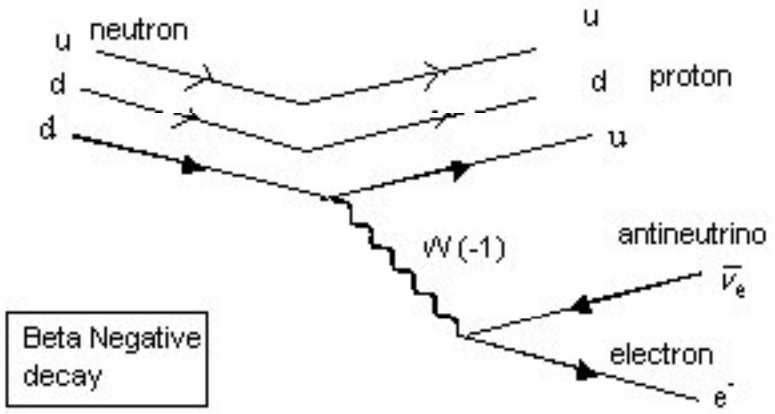
Popsat sílu znamená v mikrosvětě popsat interakci částic hmoty s nosiči síly

Rozpady častic

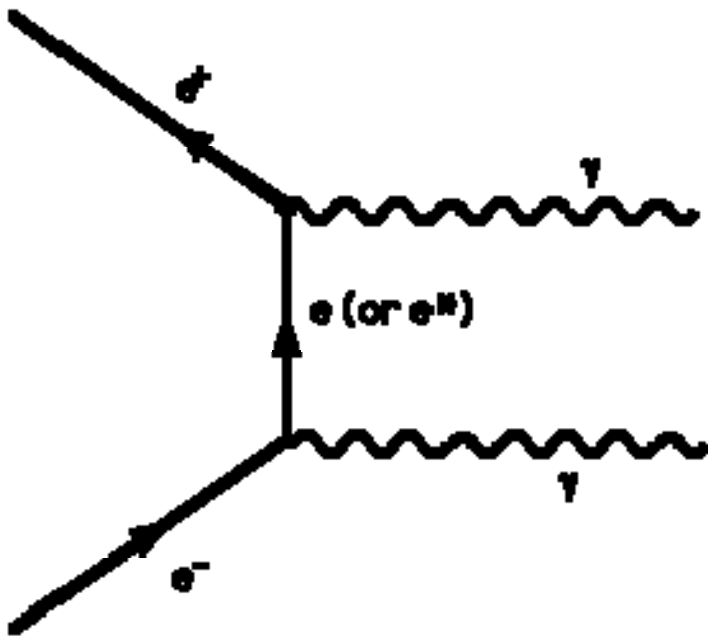
rozpad mionu



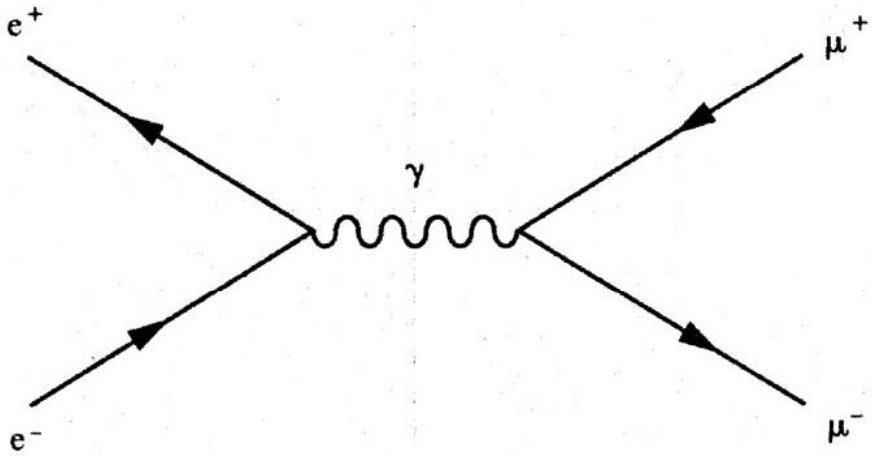
beta rozpad neutronu

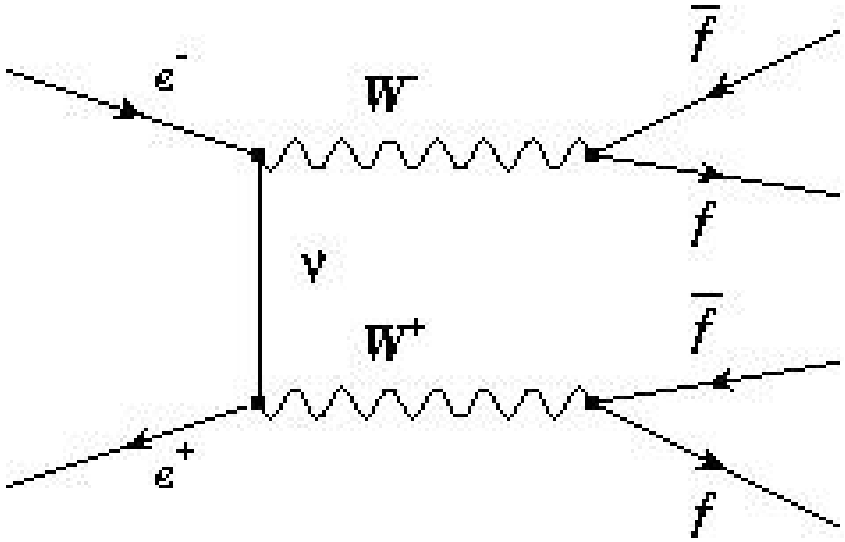


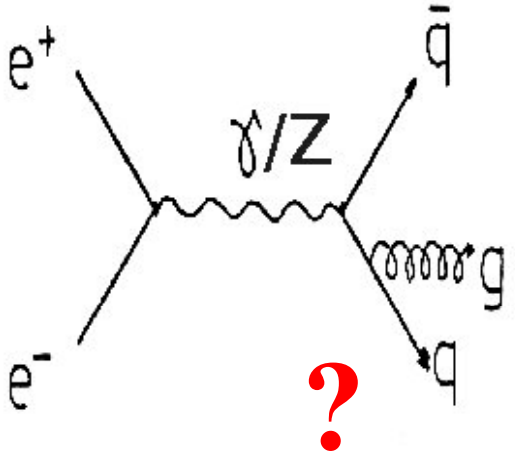
Anihilace



Vytváření nových částic

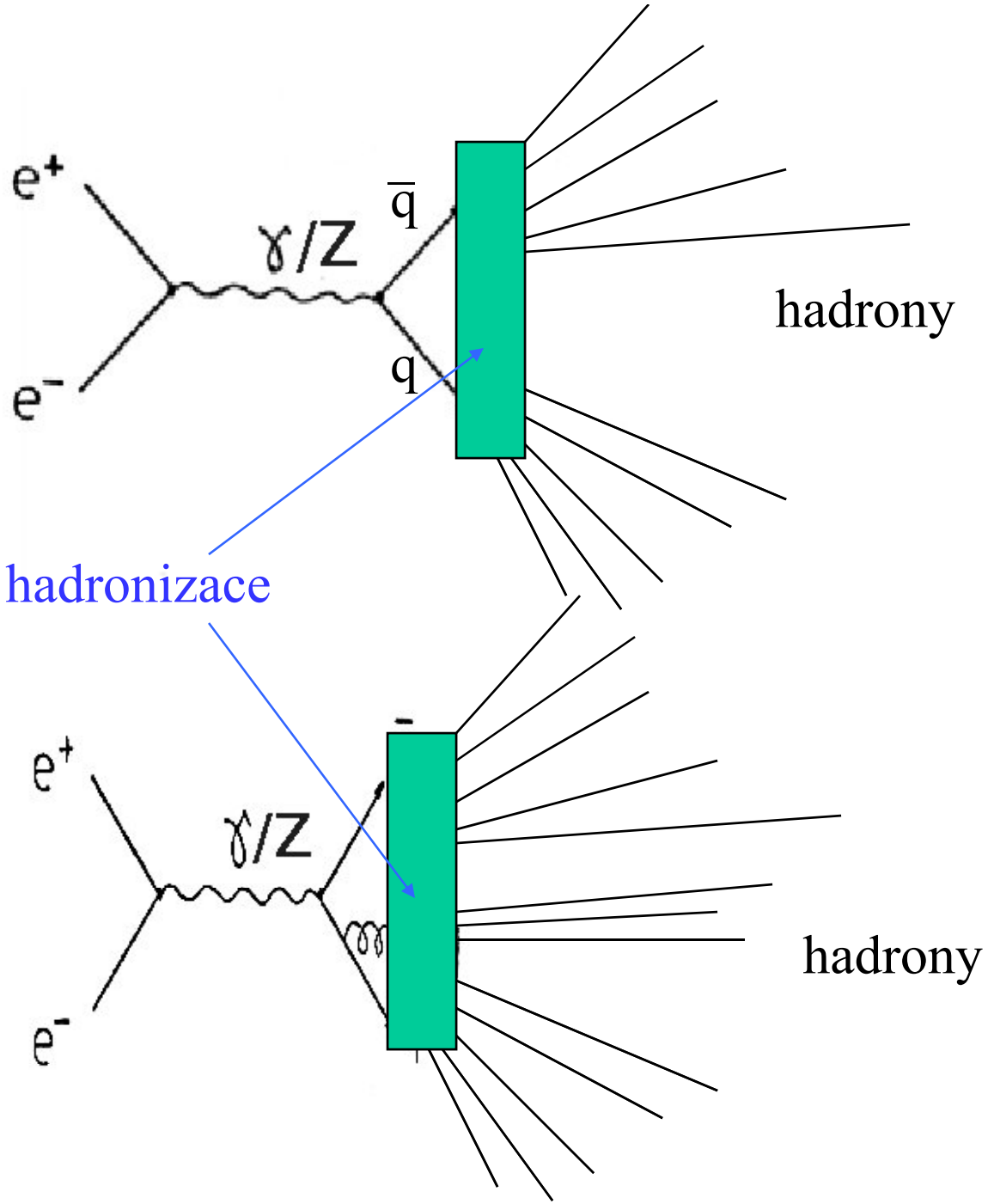


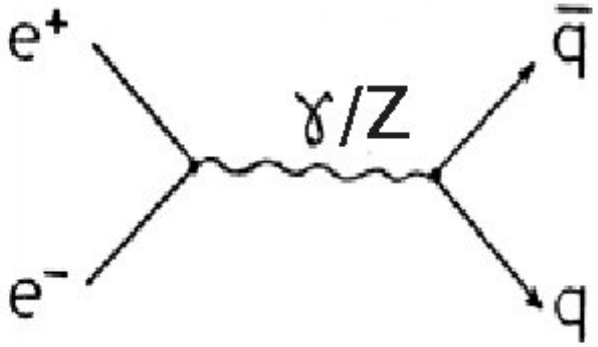




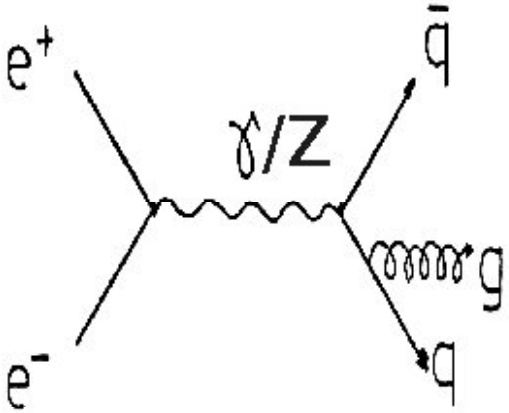
?

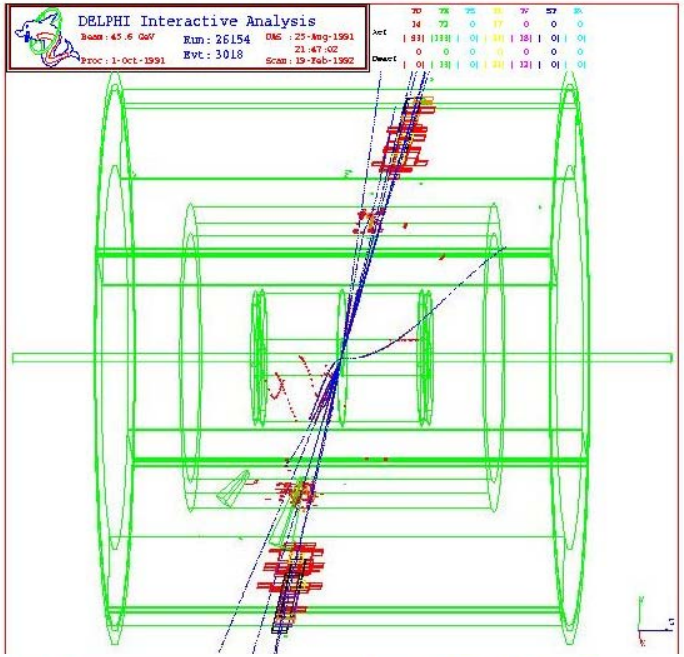
Kvarky nepozorujeme jako volné!

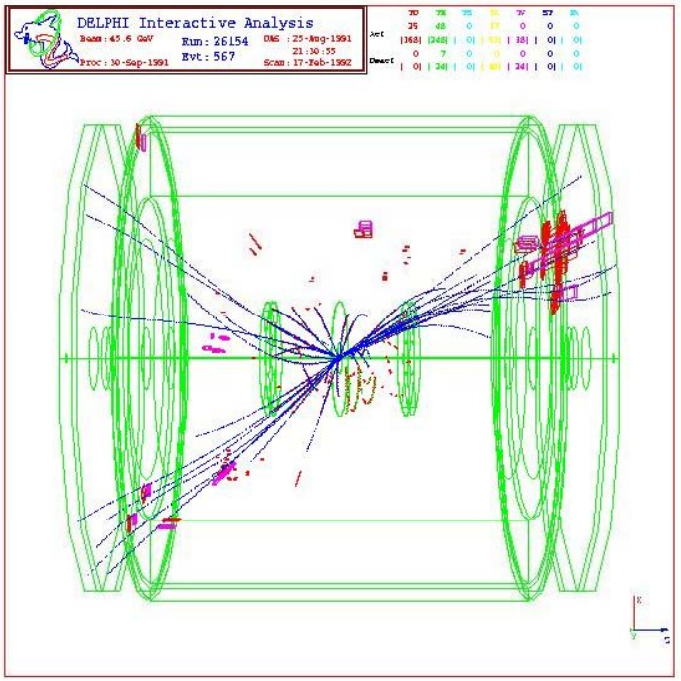

e+
e-
γ/Z
q̄
q
hadrony
hadronizace
e+
e-
γ/Z
hadrony



Hadronové jety







Teoretický obraz s

•leptony a kvarky, fermiony se spinem 1/2, jako základními částicemi hmoty a

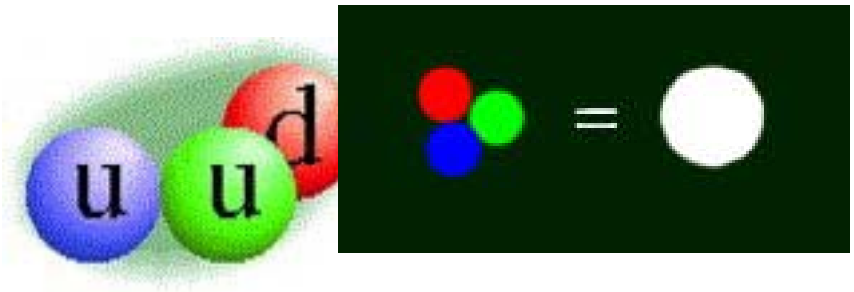
•silami zprostředkovanými nosiči - bosony se spinem1, jež jsou popsány

- **•elektroslabou teorií** (fotony, částice W a Z) - elektromagnetické a slabé interakce
- **•kvantovou chromodynamikou** (gluony) - silné interakce mezi kvarky

dostal jméno **STANDARDNÍ MODEL**

Standardní model popisuje silné interakce mezi kvarky, v experimentech pozorujeme hadrony.

Kvarky nemohou existovat jako samostatné částice. Vlastnosti kvantové chromo-dynamiky jsou takové, že kvarky tvoří pouze *barevně neutrální* („bílé“) kombinace - což jsou „běžné“ hadrony.



Ve prospěch kvarkového obrazu hadronů mluví model *konstituentních* kvarků, jenž umožňuje uspořádávat hadrony do skupin podle jejich vlastností a předpovídat další vlastnosti nebo dokonce částice (v jistém smyslu podobné přístupu Mendělejeva), ale i

srážkové experimenty a dynamika

After some simple manipulations and using the formulae (A.51) one gets from (5.64)

$$\begin{aligned}\overline{|\mathcal{M}_a|^2} &= \frac{1}{2}G_F^2\rho^2[(v^2+a^2)\mathrm{Tr}(\not{k}'\gamma_\alpha\not{k}\gamma_\beta)\cdot\mathrm{Tr}(\not{p}'\gamma^\alpha\not{p}\gamma^\beta)\\ &\quad + 2va\mathrm{Tr}(\not{k}'\gamma_\alpha\not{k}\gamma_\beta\gamma_5)\cdot\mathrm{Tr}(\not{p}'\gamma^\alpha\not{p}\gamma^\beta\gamma_5)]\\ &= 16G_F^2\rho^2[(v^2+a^2)\left((k\cdot p)(k'\cdot p')+(k\cdot p')(k'\cdot p)\right)\\ &\quad + 2va\left((k\cdot p)(k'\cdot p')-(k\cdot p')(k'\cdot p)\right)]\\ &= 16G_F^2\rho^2[(v+a)^2(k\cdot p)(k'\cdot p')+(v-a)^2(k\cdot p')(k'\cdot p)] \qquad (5.65)\end{aligned}$$

The last expression can be rewritten in terms of the Mandelstam invariants $s=(k+p)^2$ and $u=(k-p')^2$ as

$$\overline{|\mathcal{M}_a|^2} = 4G_F^2\rho^2[(v+a)^2s^2+(v-a)^2u^2] \qquad (5.66)$$

(let us stress again that we neglect systematically the electron mass). Alternatively, one may introduce the dimensionless invariant $y=p\cdot q/p\cdot k$ which in the considered massless case satisfies a simple relation $u=-s(1-y)$ (cf. Appendix B); one thus obtains

$$\overline{|\mathcal{M}_a|^2} = 4G_F^2\rho^2s^2[(v+a)^2+(v-a)^2(1-y)^2] \qquad (5.67)$$

Similarly, one can calculate a corresponding quantity for the antineutrino process described by the graph in Fig. 16b. One gets

$$\overline{|\mathcal{M}_b|^2} = 4G_F^2\rho^2s^2[(v+a)^2(1-y)^2+(v-a)^2] \qquad (5.68)$$

(of course, the result (5.68) can also be obtained directly from (5.66) by employing the crossing symmetry, i.e. interchanging the s and u variables). Using

Příkladem třídy takových veličin jsou **rozpadové poměry** určité částice na jednotlivé **rozpadové kanály**

V rámci dnešního programu si vyzkoušíte

měření rozpadových poměrů částice Z^0 ze skutečných experimentálních dat

STANDARDNÍ MODEL

- pomocí malého počtu základních principů, základních stavebních prvků a základních parametrů popisuje svět nejmenších částic
- je až překvapivě úspěšný, přes 30 let odolává stále tvrdším experimentálním prověrkám
- abychom mohli odhalit nové částice a jevy, musíme umět dobře popsat ty běžné - „odrazový můstek“ pro novou fyziku

Standardní model a experimenty v CERN

•objev nového typu slabých procesů, které elektroslabá teorie předpověděla (zprostředkovaných částicí Z) (1973)

•objev nosičů slabých interakcí W a Z (1983)

(Za tento objev získali **C. Rubbia** a **S. Van der Meer** v roce 1984 Nobelovu cenu)

•všestranná prověrka standardního modelu, přesné změření jeho parametrů v experimentech na urychlovači LEP (1989-2000)

LHC

Je **STANDARDNÍ MODEL** konečné řešení ?

Těžko:

- základní problém: „malý počet“ základních principů a základních parametrů není dost malý
- odkud se berou hmotnosti částic? / Higgsova částice
- **SM** nemá co říci ke gravitaci

Teoretikové mají různé nápady a nabízejí různá řešení

Jedině budoucí experimenty napoví, kterým směrem se dát

Mohou pochopitelně přinést i něco, co fyzikové vůbec nečekají a co je totálně překvapí

Další otevřené problémy:

- proč jsou právě 3 generace
- otázky kolem hmotností neutrin
- proč není ve vesmíru stejně hmoty jako antihmoty
- temná hmota a energie ve vesmíru - až 95% hmoty a energie ve vesmíru je „něco jiného“
- …….

Na standardním modelu je patrně nejpozoruhodnější, že mnohonásobně překonal očekávání, která měli jeho tvůrci v době jeho vzniku.

Standardní model ještě dlouho nebude patřit do „starého železa“ (nejspíš nikdy, jako třeba Newtonův gravitační zákon). Při hledání nové fyziky v příští generaci experimentů budou fyzikové tím úspěšnější, čím lépe budou rozumět *pozadí* - „obyčejným“ procesům popsaným SM. Jeho důkladná prověrka a přesné změření parametrů jsou důležité pro hledání nových jevů.