

Standardní model částic a jejich interakcí

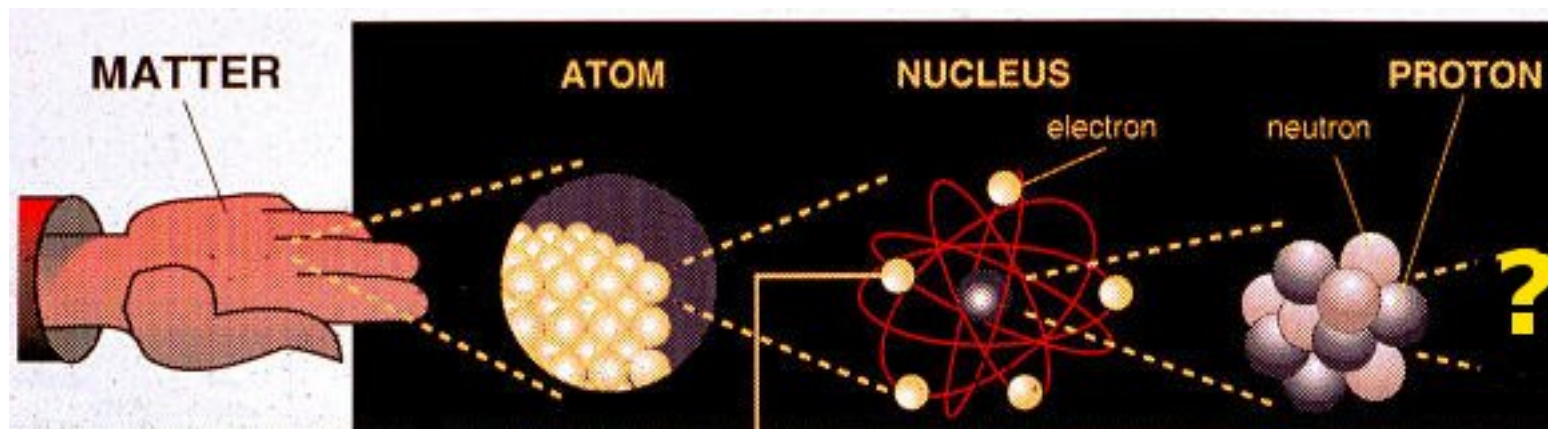
Jiří Rameš

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., Praha

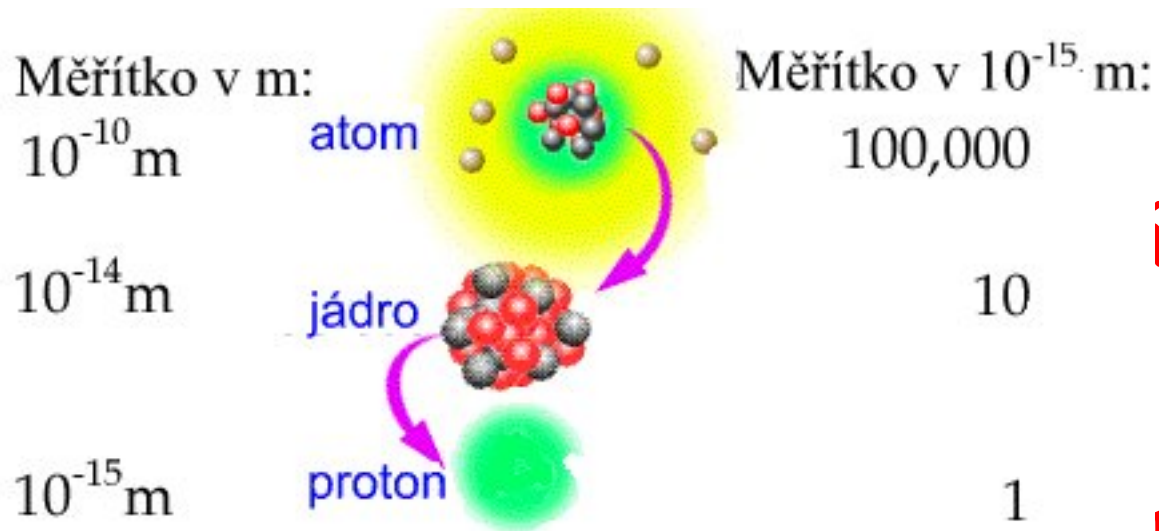
Přednáškové dopoledne „Částice, CERN, LHC, Higgs...“

24. 10. 2012

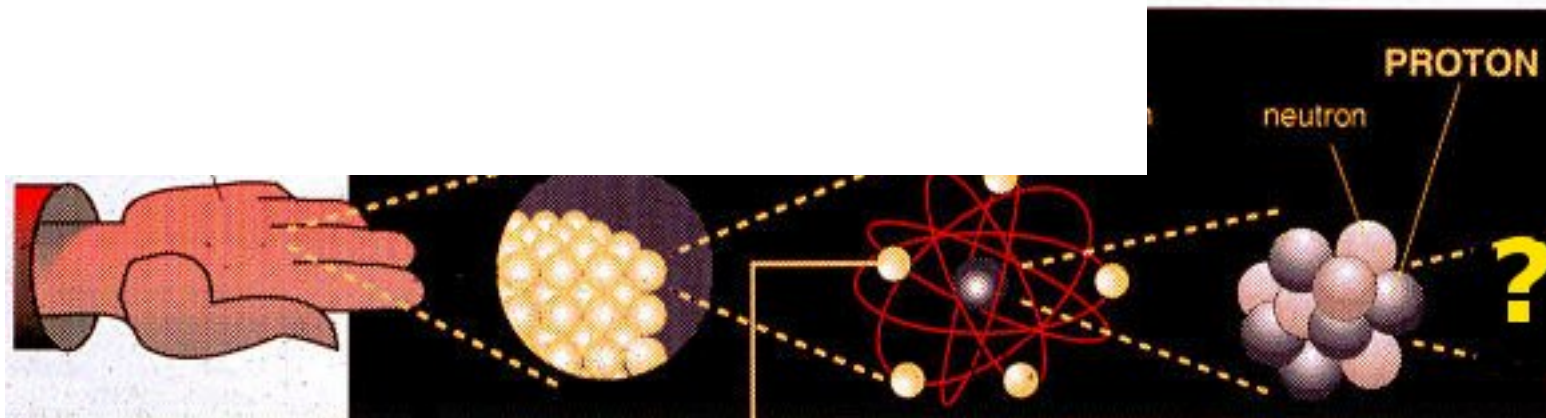
- Hmota se skládá z **atomů**
- Každý atom tvoří atomové **jádro** a obal z **elektronů**
- Jádro je složeno z **protonů** a **neutronů**



Je
to
vše
?



jádro a obal z
neutronů



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 síla
- slabá jaderná síla

Základní síly:

- gravitace

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

- elektromagnetická síla

- silná jaderná síla

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

- slabá jaderná síla

Může za radioaktivitu beta, kromě jiného za beta rozpad neutronu
neutron \rightarrow proton + elektron + neutrino

Hraje klíčovou roli v termojaderné fúzi ve Slunci (p-p cyklus)

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

Kdo si objednal
TOHLE !!?



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**, několik těžších partnerů protonu a neutronu (**hyperony**), a také řada částic nového typu zvaných **mezony**.

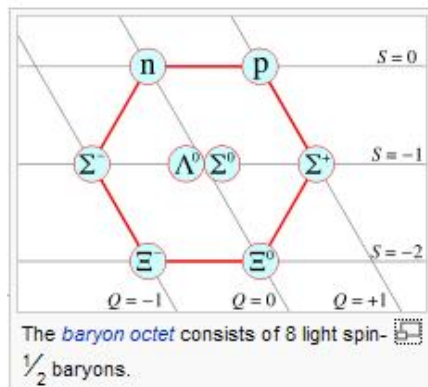
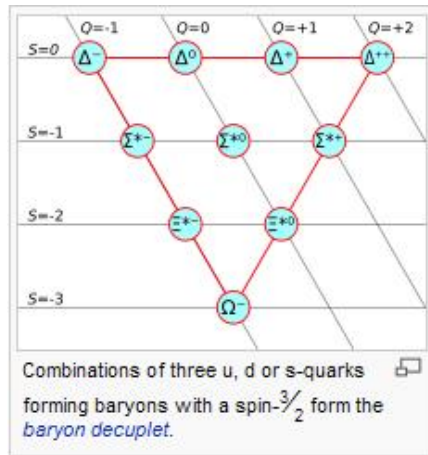
ČÁSTIC BYLO ČÍM DÁL VÍC

Přirozené otázky:

TO JSOU VŠECHNY STEJNĚ „ELEMENTÁRNÍ“?

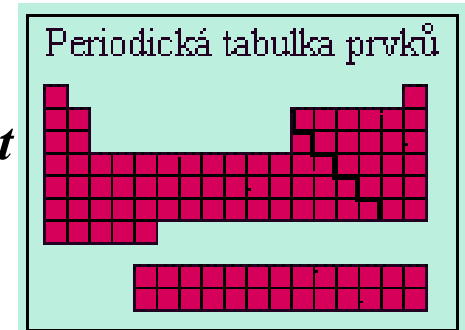
JE SVĚT TAKTO SLOŽITÝ?

Nejvíce přibývaly silně interagující částice (**HADRONY**)



Přelom: Podařilo se najít řád a uspořádat je do skupin podle určitých vlastností

Podobně zkrotil Mendělejev o 90 let dříve chemické prvky



Projevila se důležitá vlastnost

Odpověď na otázky

**TO JSOU VŠECHNY ČÁSTICE STEJNĚ
„ELEMENTÁRNÍ“?**

JE SVĚT TAKTO SLOŽITÝ?

(a zároveň současný pohled na svět subjaderných částic):

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

**Existuje něco ještě „základnějšího“, a
sice**

KVARKY

Jak to víme???

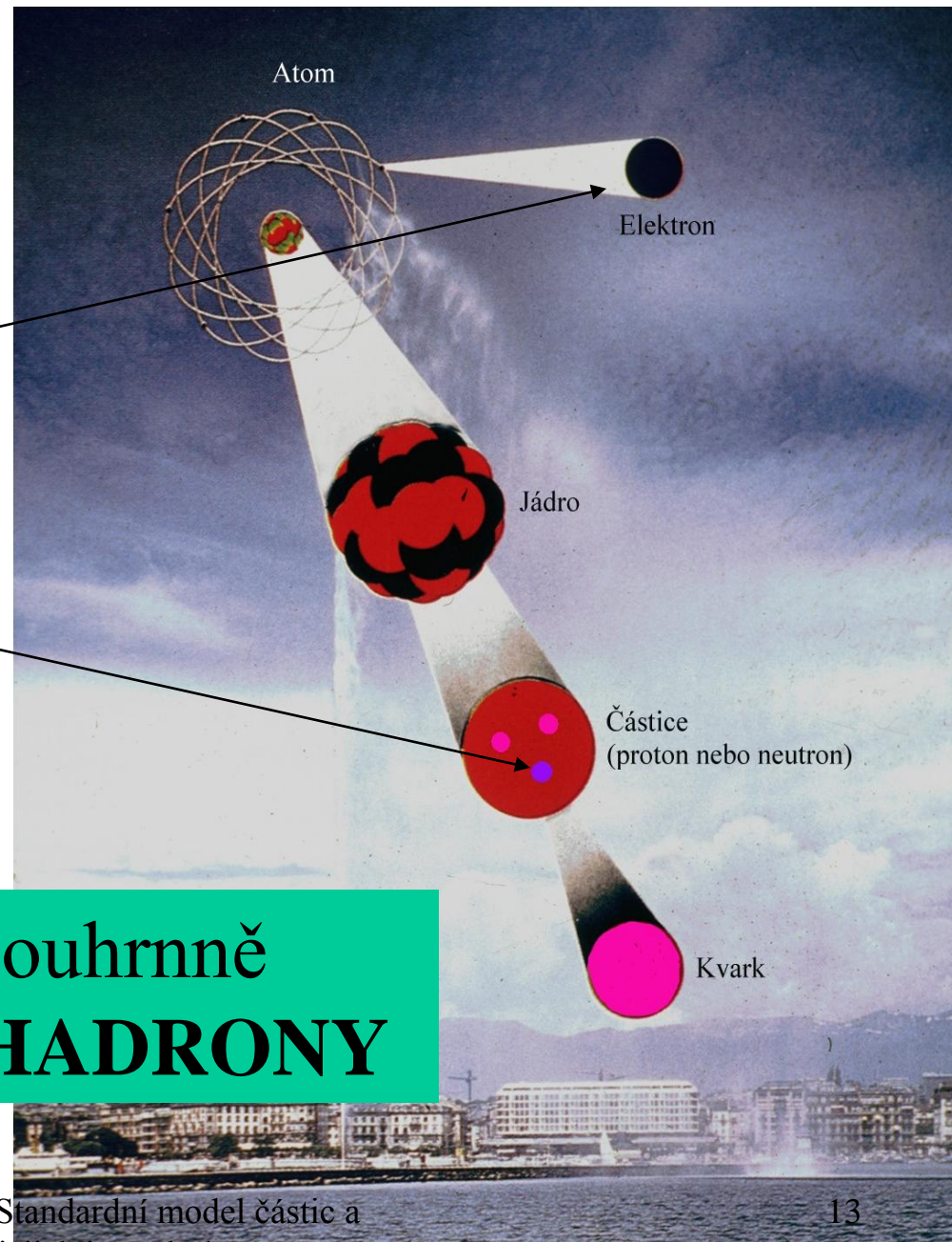
Z výsledků experimentů, jejich interpretace a teoretického zobecnění

Základní částice
hmoty jsou

- leptony
- kvarky

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

souhrnně
HADRONY



Základní
hmoty jsou

•leptony

•kvarky

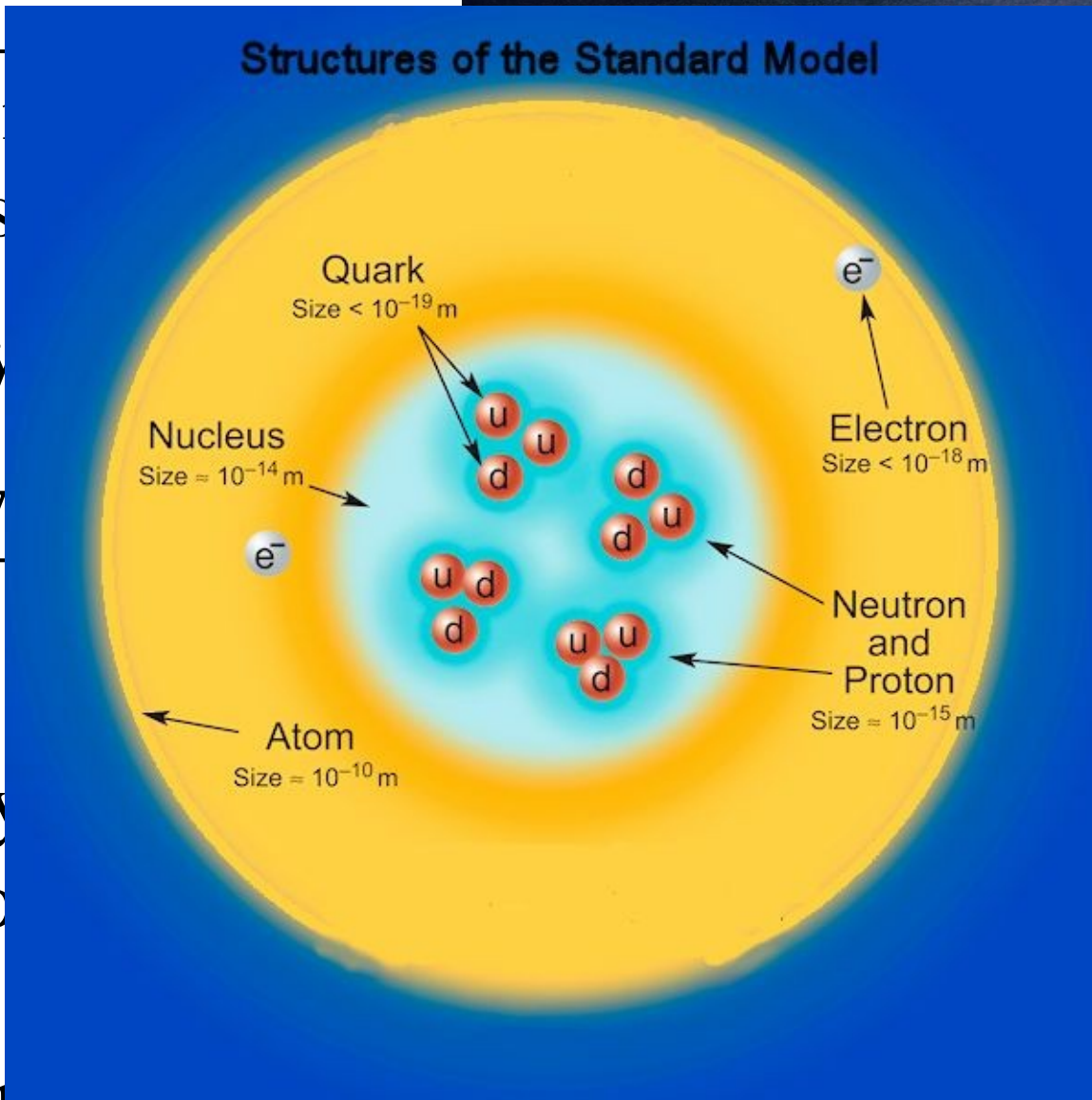
Částice

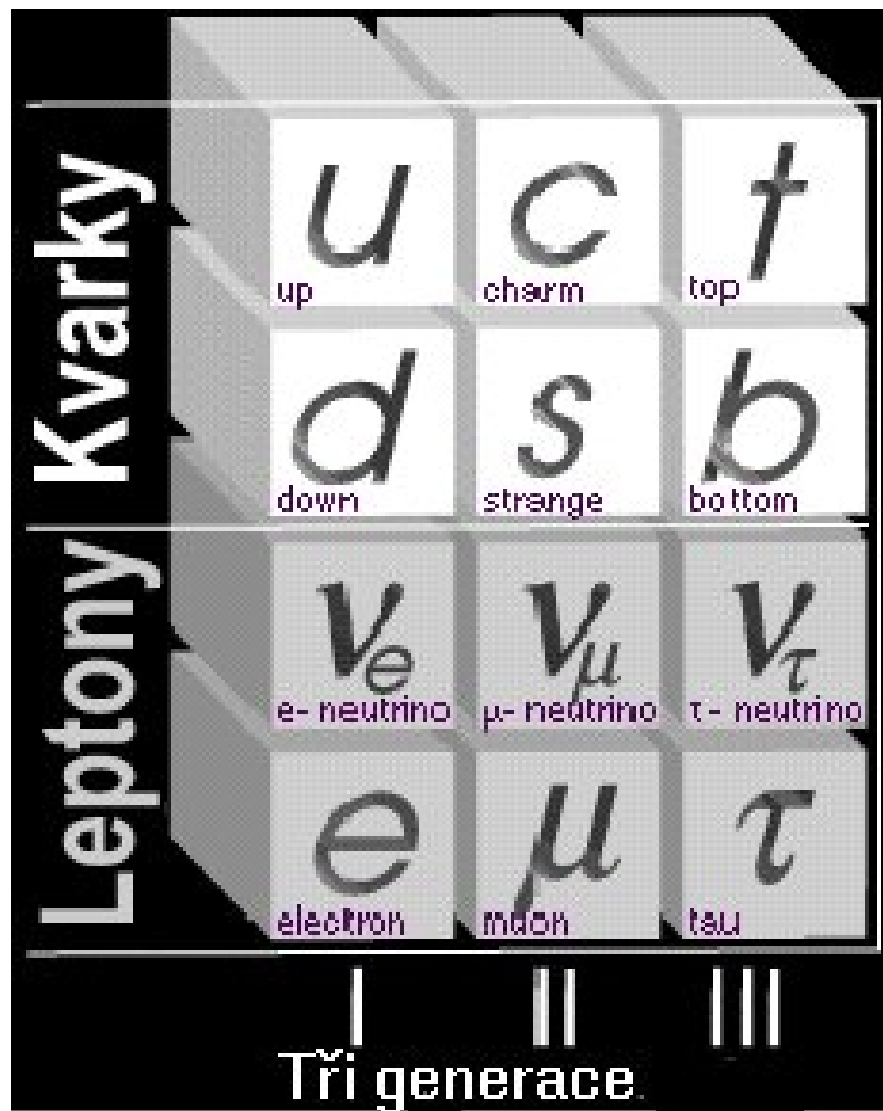
(protony

a jim podobné)

se skládají

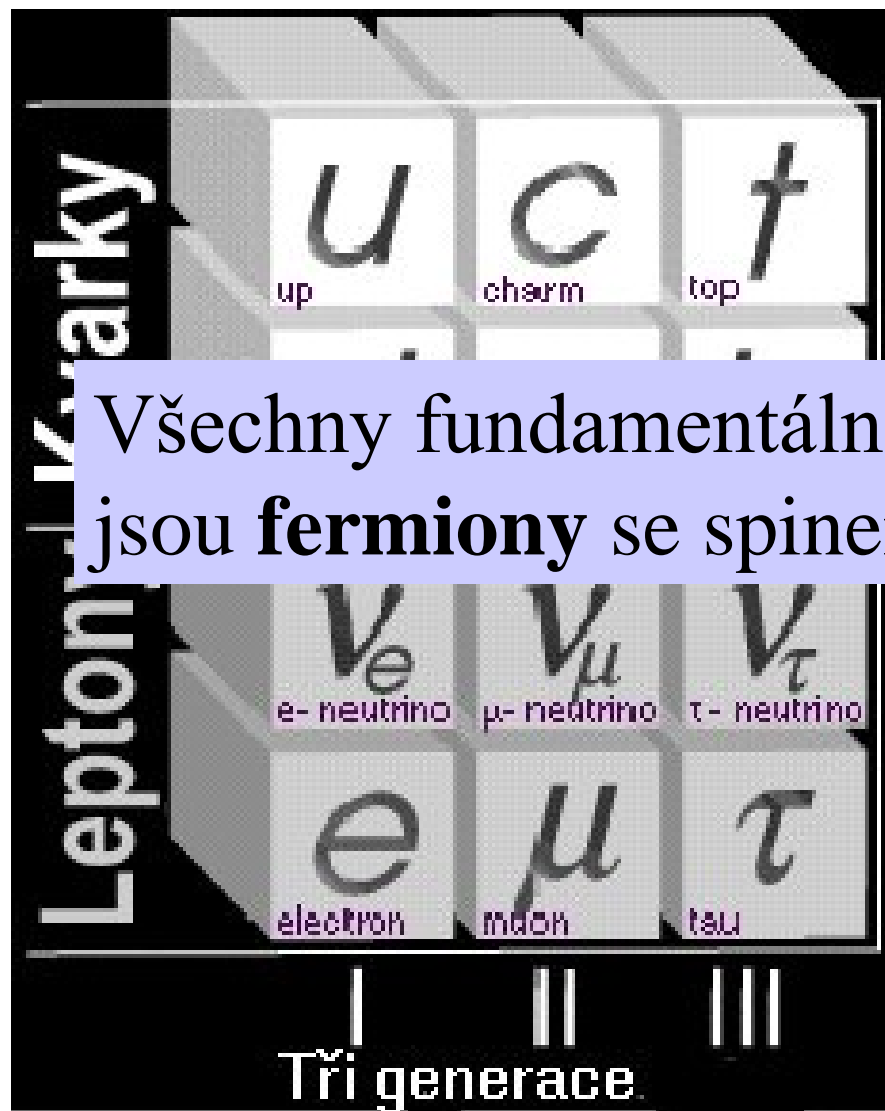
z málo typů kvarků.





Fundamentální částice hmoty

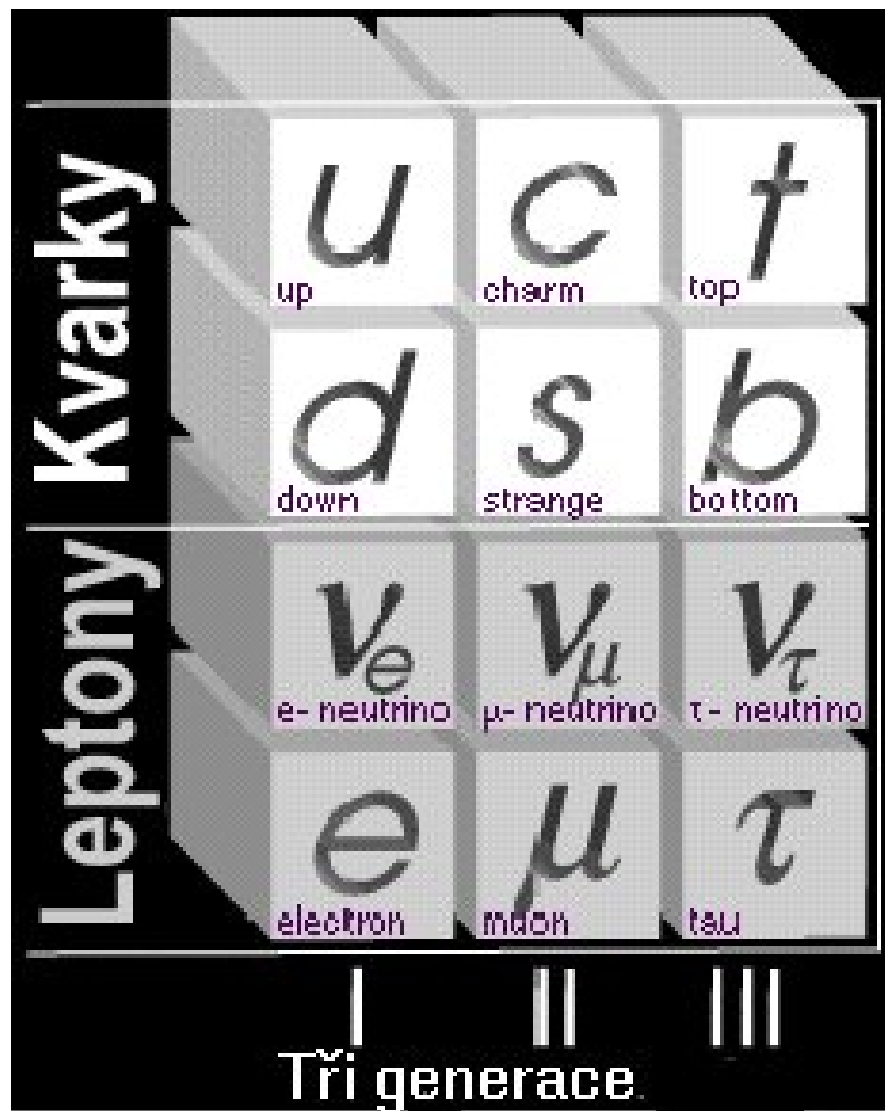
- 3 rodiny/generace
- každou generaci tvoří dvojice kvarků a dvojice leptonů
- kvarky se nevyskytují jako volné částice, skládají se z nich **hadrony**



Všechny fundamentální částice hmoty jsou **fermiony** se spinem $1/2$

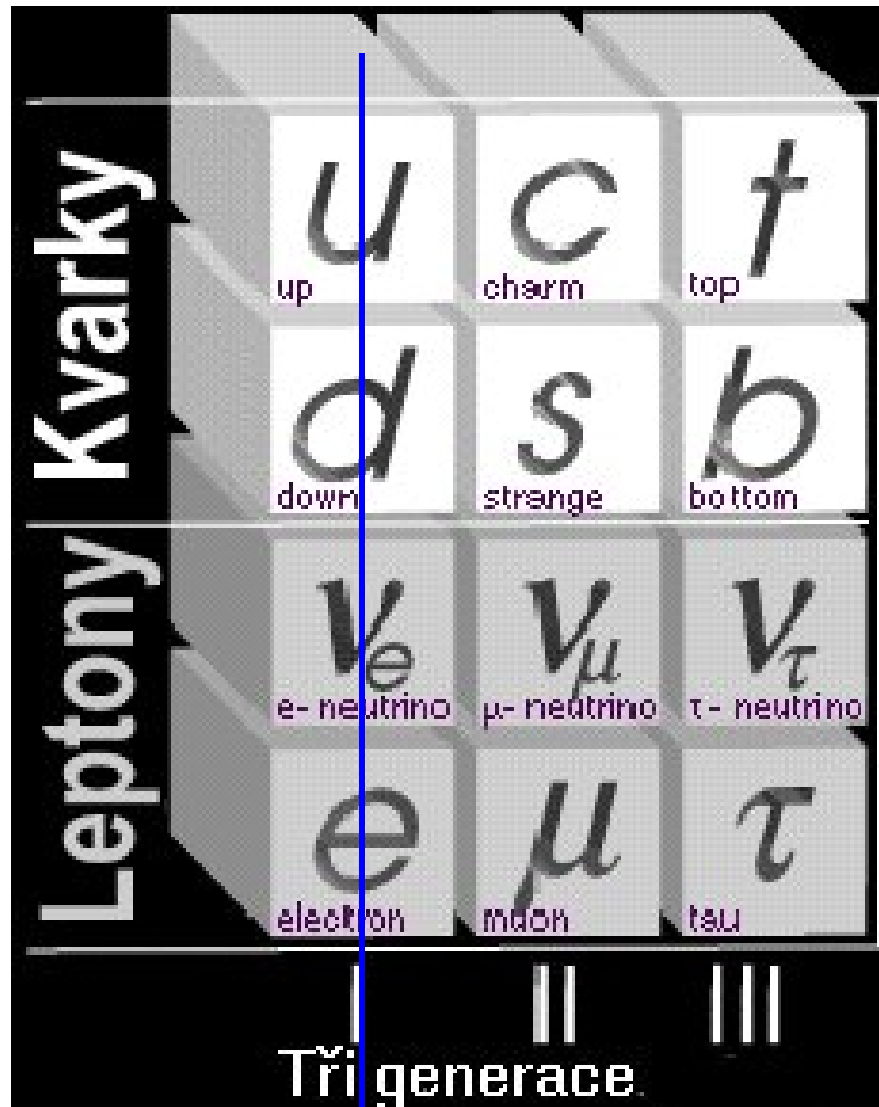
Fundamentální částice hmoty

- leptony „necítí“ silnou sílu
- leptony mají nulovou hmotnost a 0 elektrický náboj
- kvarky mají el. náboje $-1/3$ nebo $2/3$ náboje protonu



Fundamentální částice hmoty

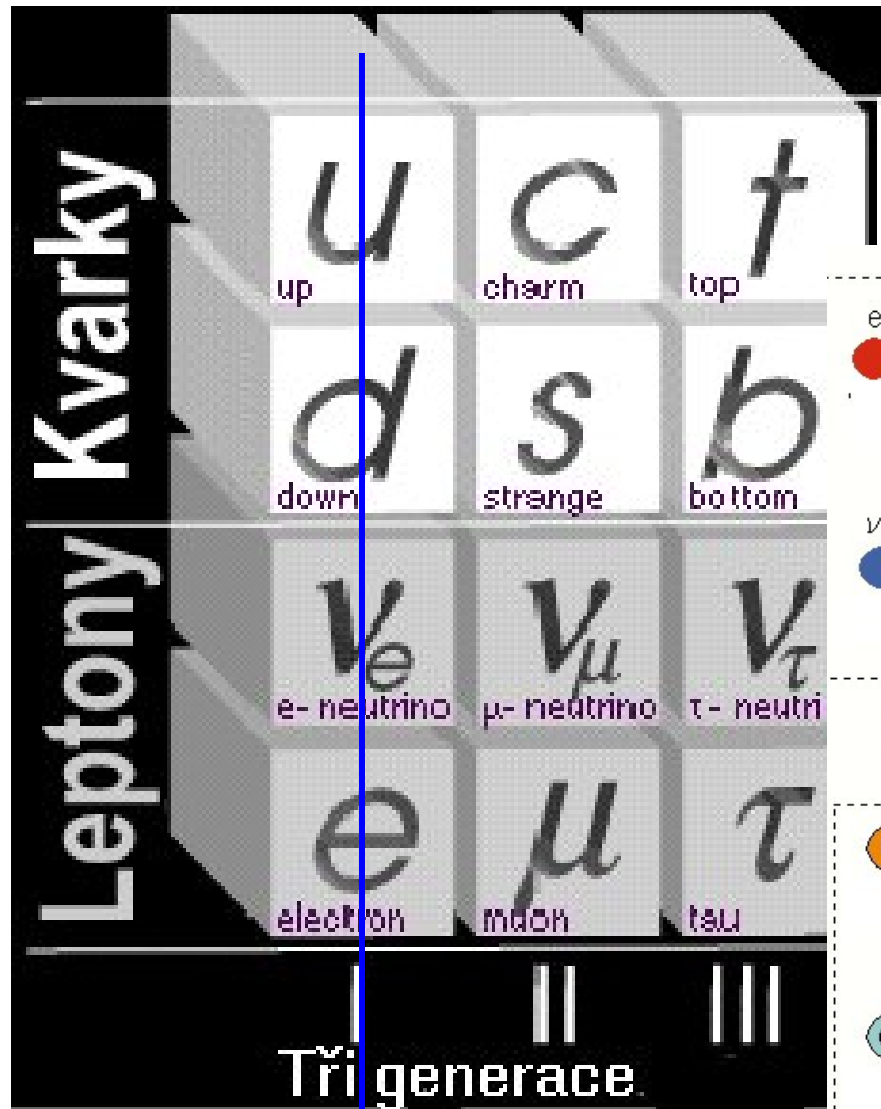
- leptony „necítí“ silnou sílu
- neutrino mají velmi malou hmotnost a 0 elektrický náboj
- kvarky mají el. náboje $-1/3$ nebo $2/3$ náboje protonu



První generace

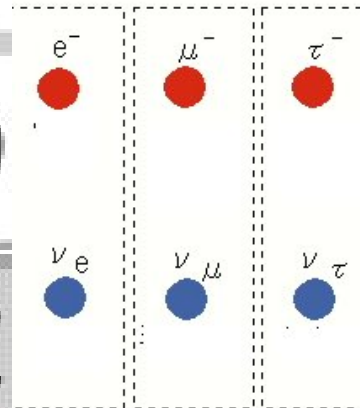
Fundamentální částice hmoty

- všechny „běžnou“ hmotu okolo nás tvoří částice z první generace
- ke každé částici hmoty existuje **antičástice**

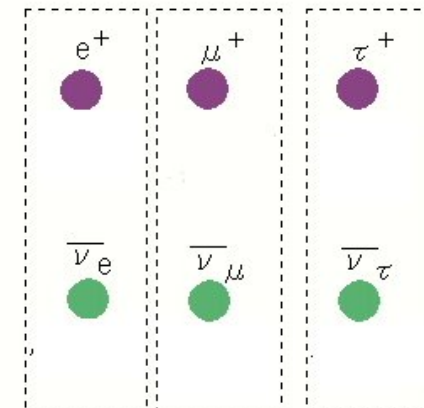
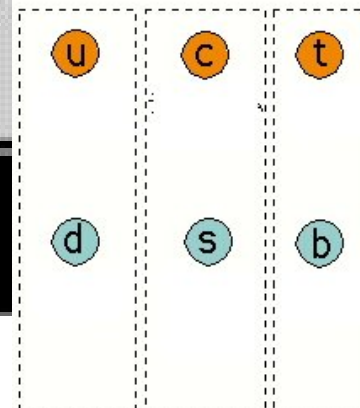


První generace

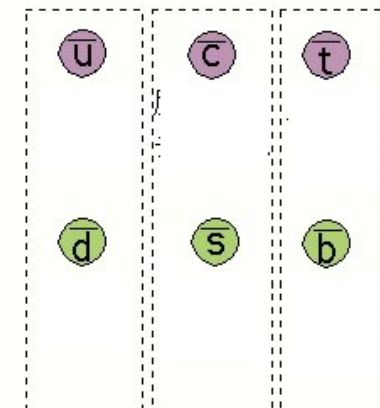
Fundamentální částice hmoty



Částice



Antičástice



Základní „**cihly**“ hmoty jsou **leptony**
a **kvarky**.

Co funguje jako „**malta**“?

Jak na sebe částice vzájemně
působí?

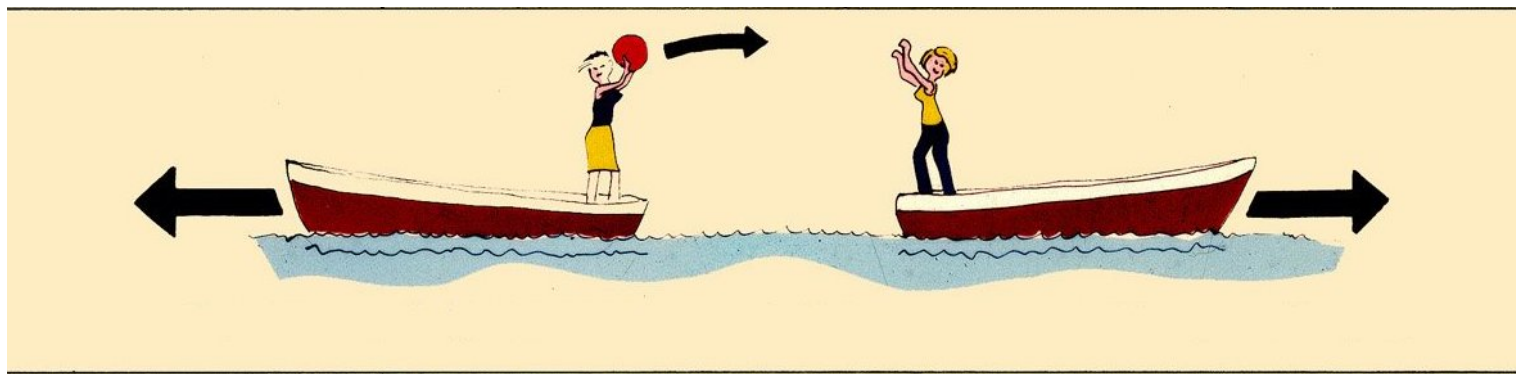
Co drží **kvarky** (a **protony** s
neutrony a **atomy**) pohromadě?

Síly

interakce

Ve světě částic se síly popisují jako vzájemné působení částic hmoty s jinými částicemi

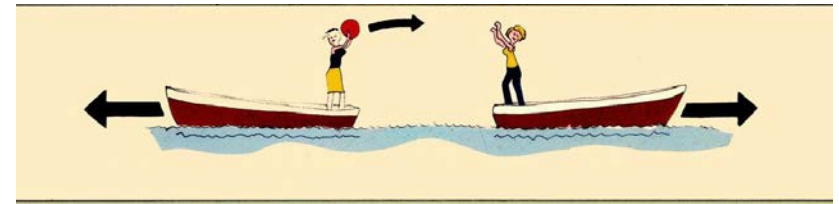
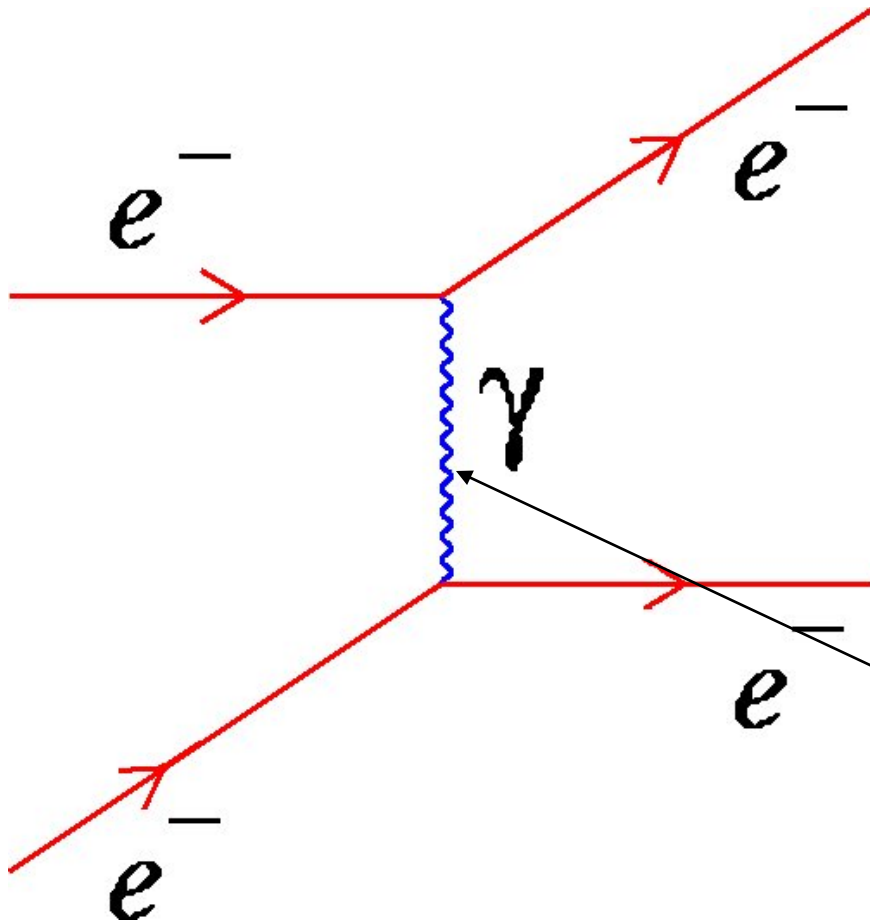
! Důležité a nesamozřejmé !



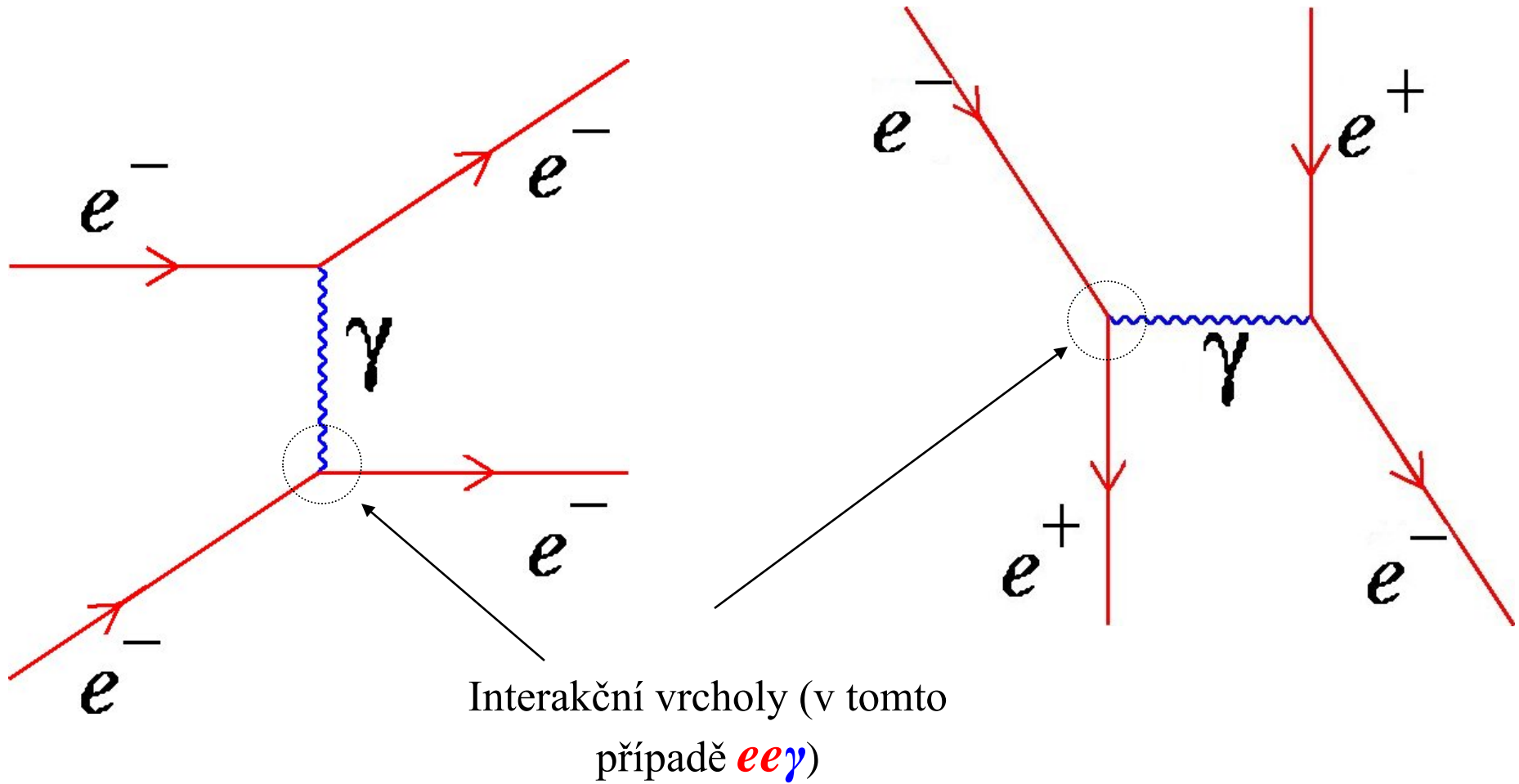
Vedle základních částic hmoty (jako elektrony, protony...) existují

částice-nosiče síly

Jednoduchý proces: interakce elektronu s elektronem



vyměňují si
foton



Popsat **sílu** znamená v mikrosvětě popsát **interakci** částic hmoty s **nosiči síly**

Základní síly:

- gravitace

nosič: foton

náboj: elektromagnetický

působí na všechny částice kromě neutrin

kvantová elektrodynamika

- elektromagnetická síla

- silná jaderná síla

nosič: gluony

náboj: barevný

působí na kvarky

kvantová chromodynamika

- slabá jaderná síla

nosiče: částice W a Z

náboj: slabý

působí na všechny částice

elektroslabá teorie

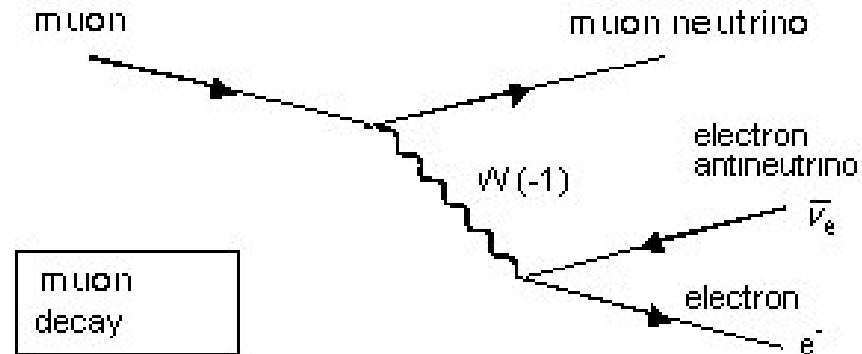
Částice-nosiče těchto tří základních sil jsou **bosony** se spinem 1

Jak to víme???

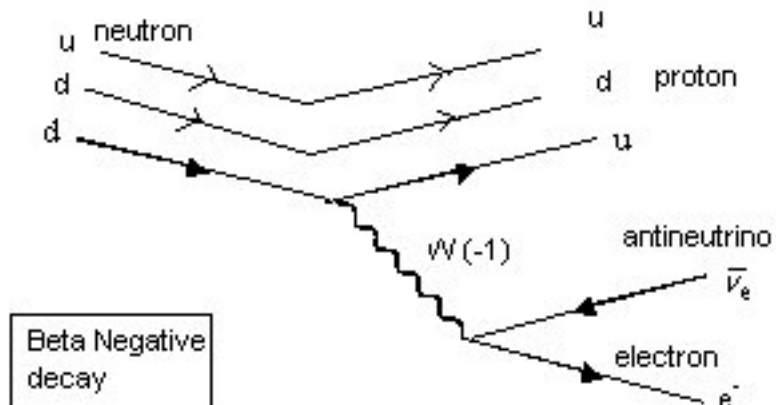
Z výsledků experimentů, jejich interpretace a teoretického zobecnění

Rozpady částic

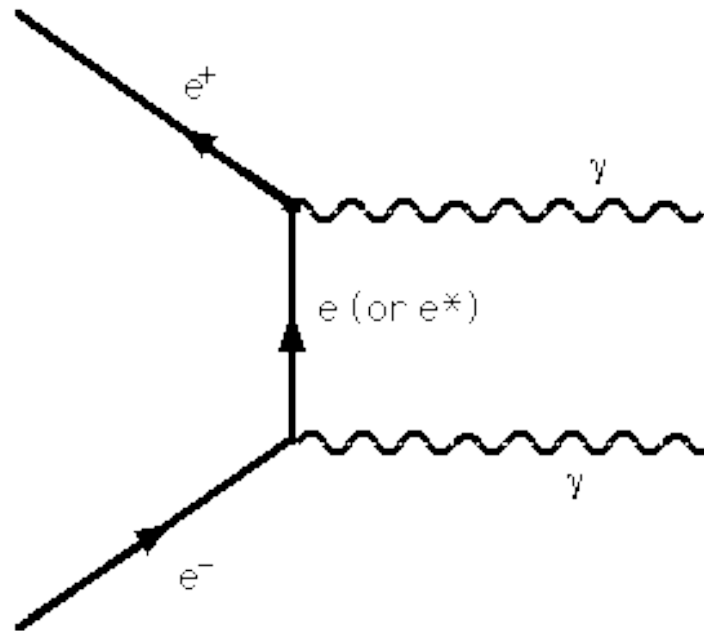
rozpad mionu



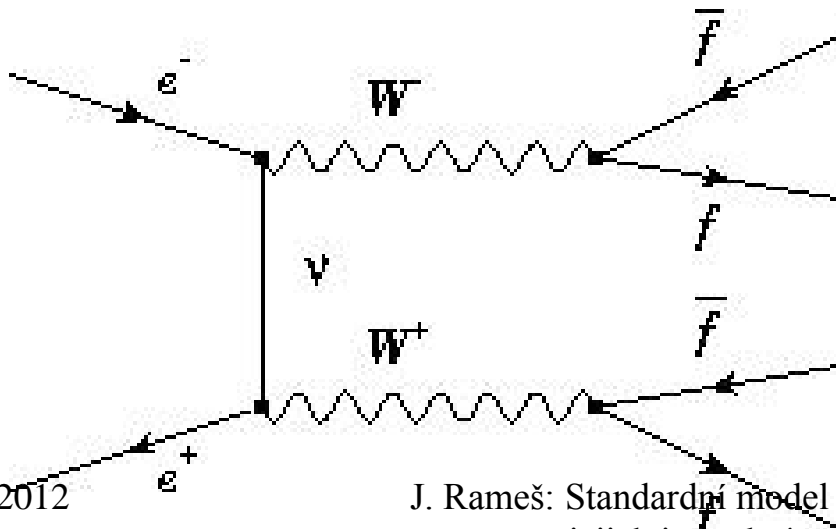
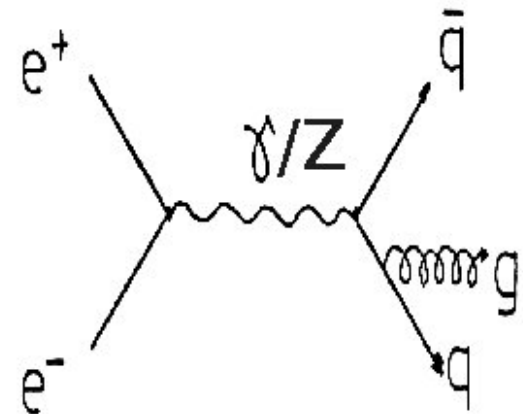
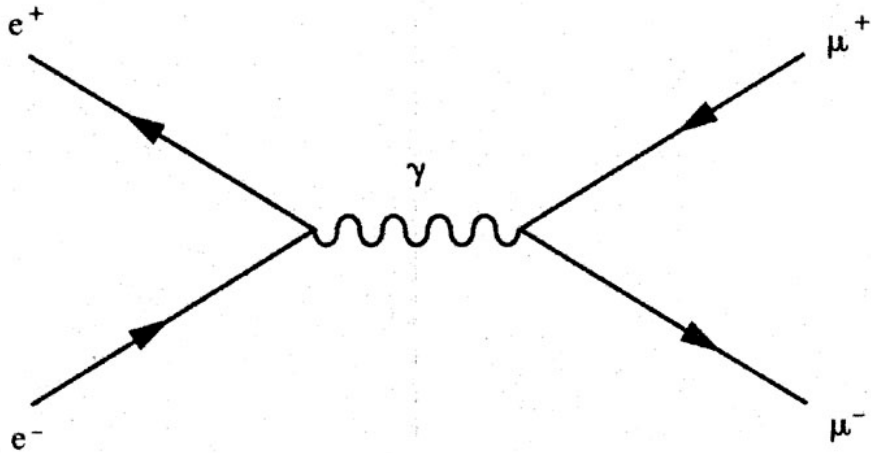
beta rozpad
neutronu



Anihilace



Vytváření nových částic



Odbočka: Kde se obrázky vzaly?
K čemu jsou dobré?

Základní matematický formalismus teorie - **lagrangián**

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + h.c. \\ & + \bar{\Psi}_i\gamma_{ij}\Psi_j\Phi + h.c. \\ & + |D_\mu\Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

V této maximálně zhuštěné formě se dá vytisknout na tričko, **ale...**

$$\begin{aligned}
L(\dots) = & -\frac{1}{4g_s^2} G_A^{\mu\nu}(x) G_{A\mu\nu}(x) - \frac{1}{4g_w^2} W_a^{\mu\nu}(x) W_{a\mu\nu}(x) - \frac{1}{4g_y^2} V^{\mu\nu}(x) V_{\mu\nu}(x) + \\
& + [D_\mu^{(W,V)} \phi(x)]^\dagger D^{(W,V)\mu} \phi(x) - \lambda(\phi^\dagger(x) \phi(x) - \phi_o^2)^2 + \\
& + \bar{\psi}_{Li}^{(f)}(x) i\gamma^\mu (\partial_\mu + W_{a\mu}(x) T_w^a + V_\mu(x) Y_w) \psi_{Li}^{(f)}(x) + \\
& + \bar{\psi}_{Ri}^{(f)}(x) i\gamma^\mu (\partial_\mu + V_\mu(x) Y_w) \psi_{Ri}^{(f)}(x) + \\
& + \bar{\psi}_{Li}^{(f)}(x) \cdot \frac{\phi(x)}{\phi_o} M_{ij}^{(f)} \psi_{Rj}^{(f)}(x) + \bar{\psi}_{Ri}^{(f)}(x) M_{ij}^{(f)\dagger} \frac{\phi^\dagger(x)}{\phi_o} \cdot \psi_{Lj}^{(f)}(x) + \\
& + \bar{\psi}_{Li}^{(g)}(x) i\gamma^\mu (\partial_\mu + W_{a\mu}(x) T_w^a + V_\mu(x) Y_w + G_{A\mu}(x) T_s^A) \psi_{Li}^{(g)}(x) + \\
& + \bar{\psi}_{Ri}^{(g)}(x) i\gamma^\mu (\partial_\mu + V_\mu(x) Y_w + G_{A\mu}(x) T_s^A) \psi_{Ri}^{(g)}(x) + \\
& + \bar{\psi}_{Ri}^{(g)}(x) i\gamma^\mu (\partial_\mu + V_\mu(x) Y_w + G_{A\mu}(x) T_s^A) \tilde{\psi}_{Ri}^{(g)}(x) + \\
& + \bar{\psi}_{Li}^{(g)}(x) \cdot \frac{\phi(x)}{\phi_o} M_{ij}^{(g)} \psi_{Rj}^{(g)}(x) + \bar{\psi}_{Ri}^{(g)}(x) M_{ij}^{(g)\dagger} \frac{\phi^\dagger(x)}{\phi_o} \cdot \psi_{Lj}^{(g)}(x) + \\
& + \bar{\psi}_{Li}^{(g)}(x) \cdot \frac{\tilde{\phi}(x)}{\phi_o} \tilde{M}_{ij}^{(g)} \tilde{\psi}_{Rj}^{(g)}(x) + \bar{\psi}_{Ri}^{(g)}(x) \tilde{M}_{ij}^{(g)\dagger} \frac{\tilde{\phi}^\dagger(x)}{\phi_o} \cdot \psi_{Lj}^{(g)}(x) + \\
& + \theta \frac{g_s}{32\pi^2} G_{A\mu\nu}(x) \tilde{G}_A^{\mu\nu}(x)
\end{aligned}$$

IMG by M. Di Piero

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \\
& \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \\
& \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
& \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - igs_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
& \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - \\
& A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + \\
& H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + \\
& 2(\phi^0)^2 H^2] - gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
& \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g[W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \\
& \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \\
& \phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
& \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \\
& \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - \\
& W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \\
& \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \\
& \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
& 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
& \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \\
& \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} [H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \\
& \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
& \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
& \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + \\
& igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM[\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
& \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igMs_w[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
& \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
\end{aligned}$$

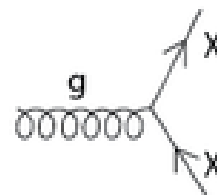
Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



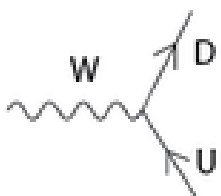
X is any fermion in the Standard Model.



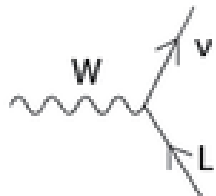
X is electrically charged.



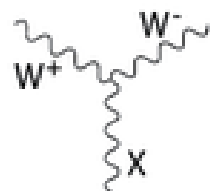
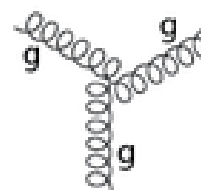
X is any quark.



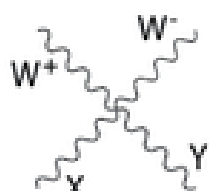
U is a up-type quark;
D is a down-type quark.



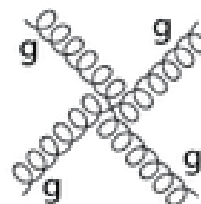
L is a lepton and ν is the corresponding neutrino.



X is a photon or Z-boson.



X and Y are any two electroweak bosons such that charge is conserved.



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

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

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

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

(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

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

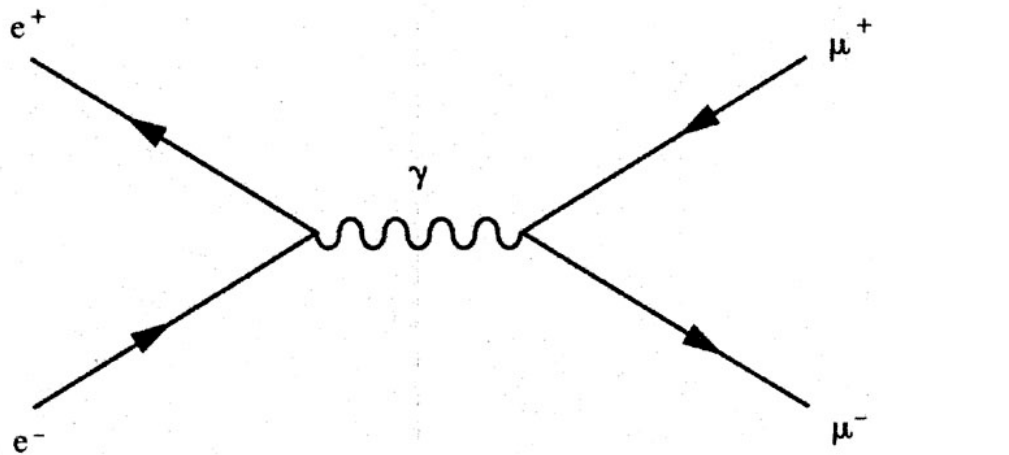
Similarly, one can calculate a corresponding quantity for the antineutrino process described by the graph in Fig. 16b. One gets

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

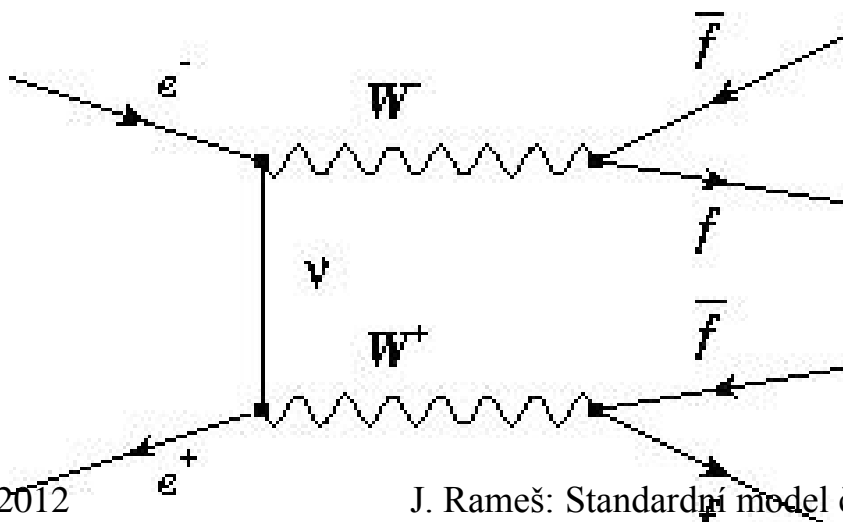
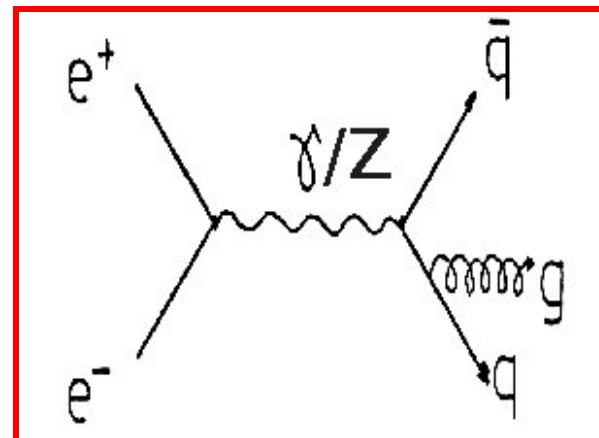
(of course, the result (5.68) can also be obtained directly from (5.66) by employing the crossing symmetry, i.e. interchanging the s and u variables). Using...

(Konec odbočky)

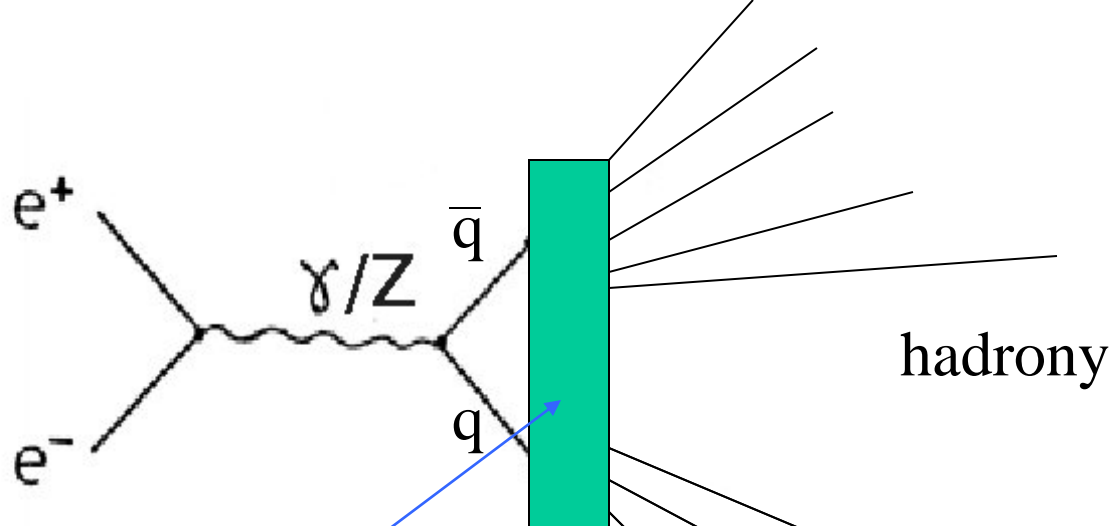
Vytváření nových částic



?? Kvarky
nepozorujeme
jako volné!

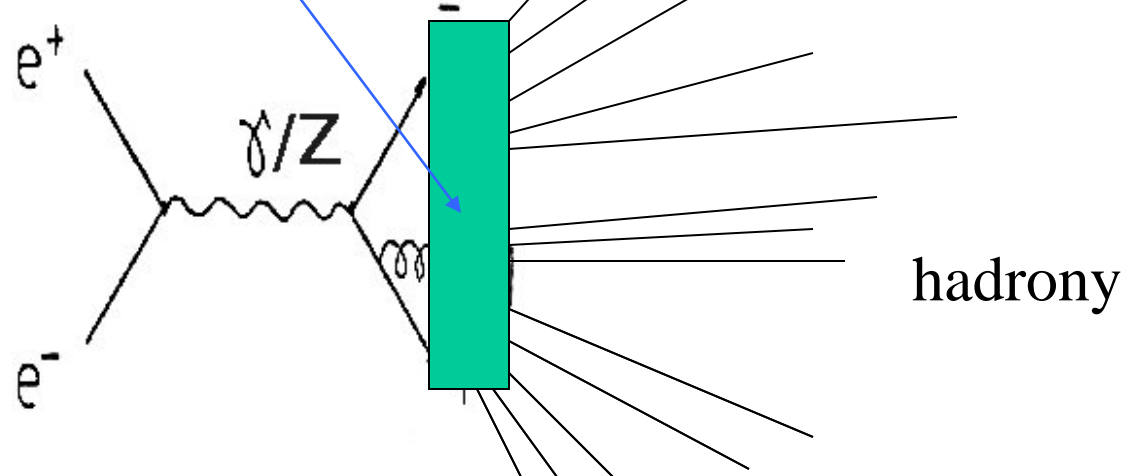


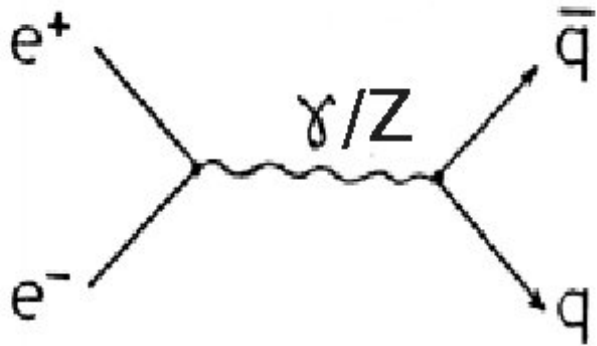
Produkty srážek jsou
částice jako protony,
různé mezony...
- **hadrony**



hadronizace

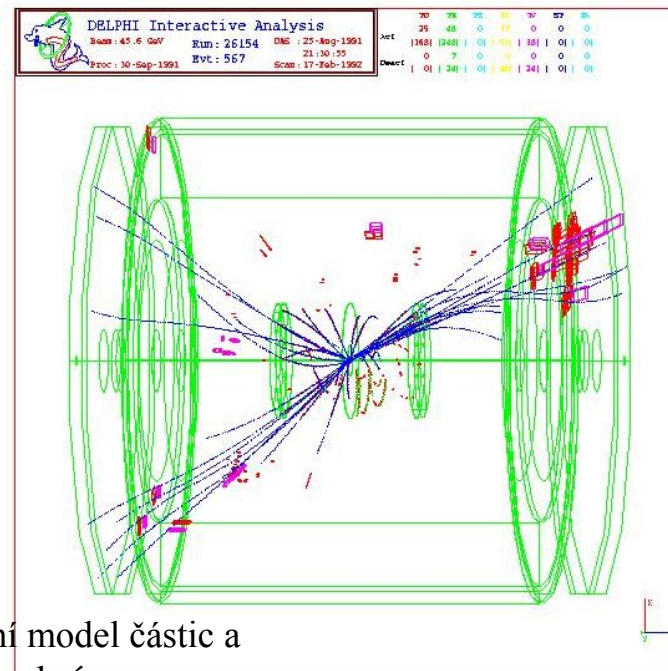
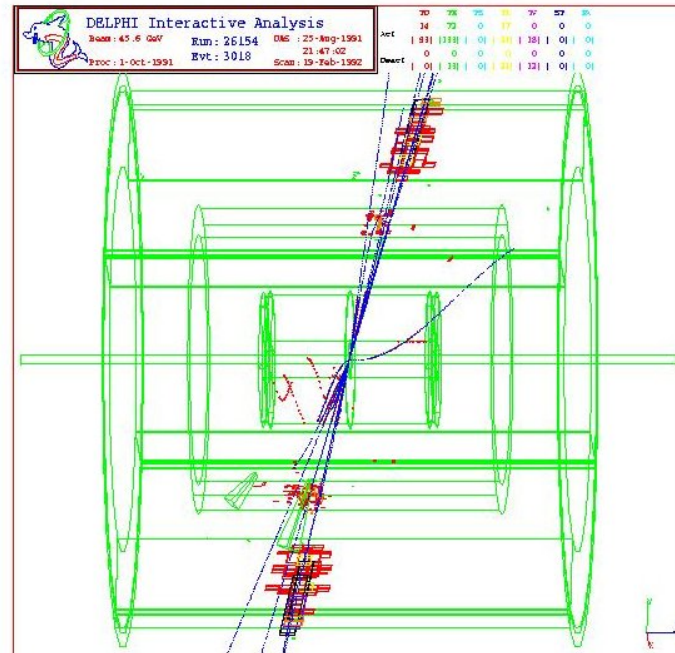
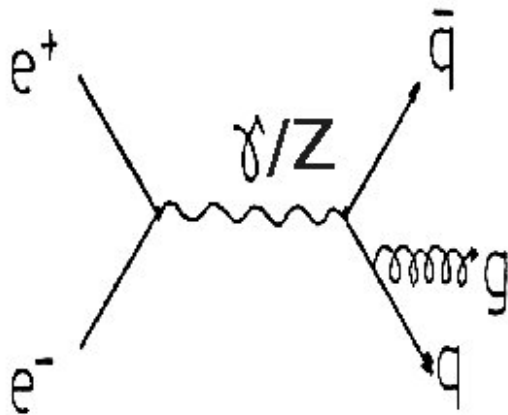
Důležitá skutečnost:
 Hadrony si „pamatují“
 informace o původních
 kvarcích

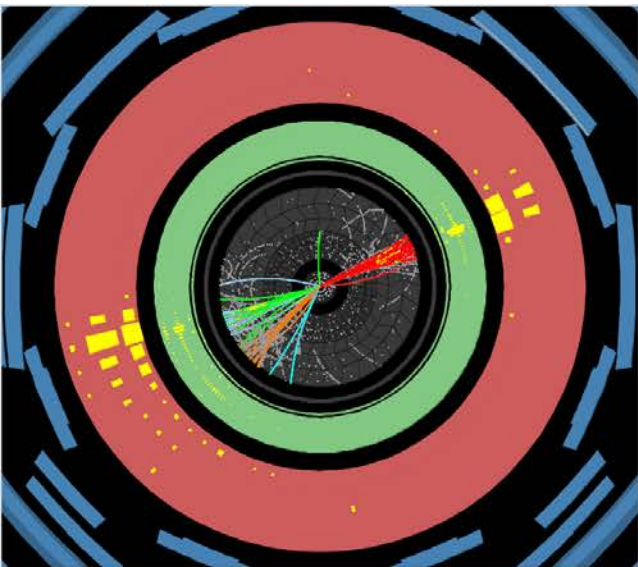




Hadronové jety

(„výtrysky“)

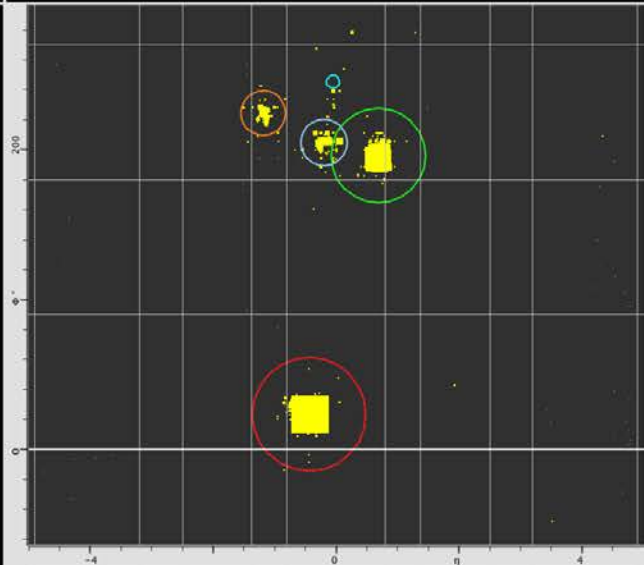
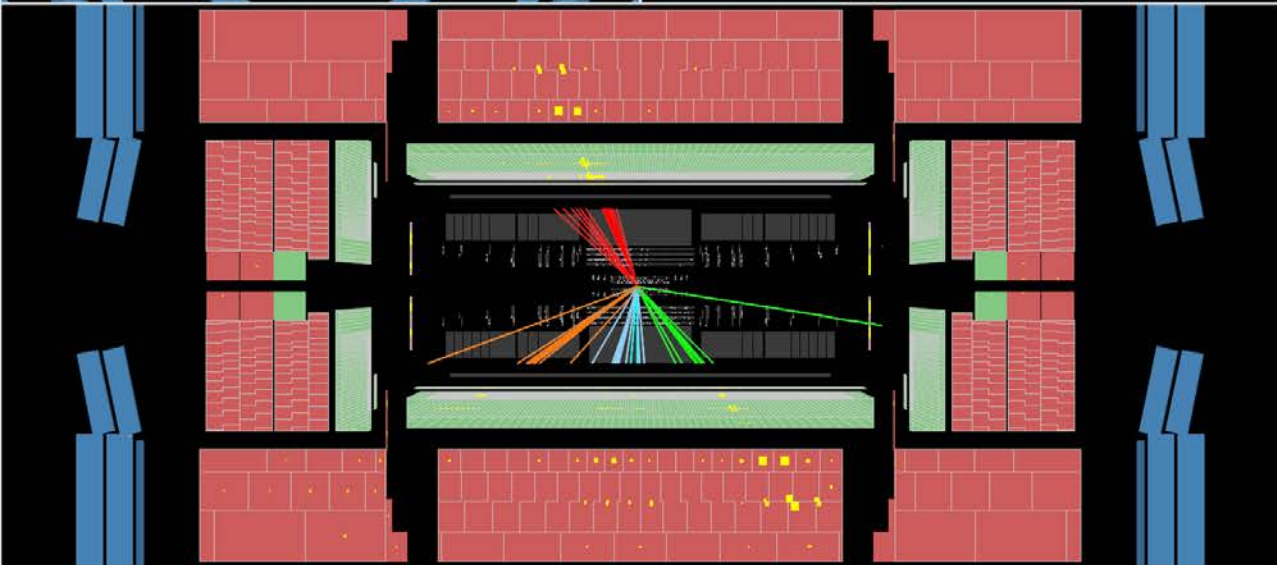
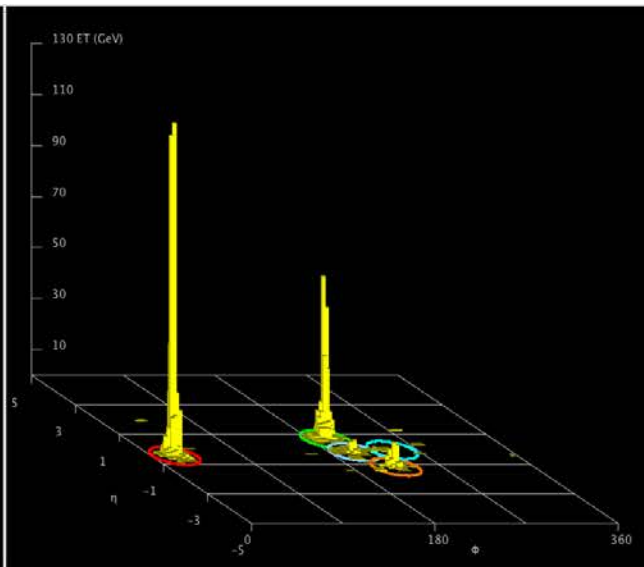


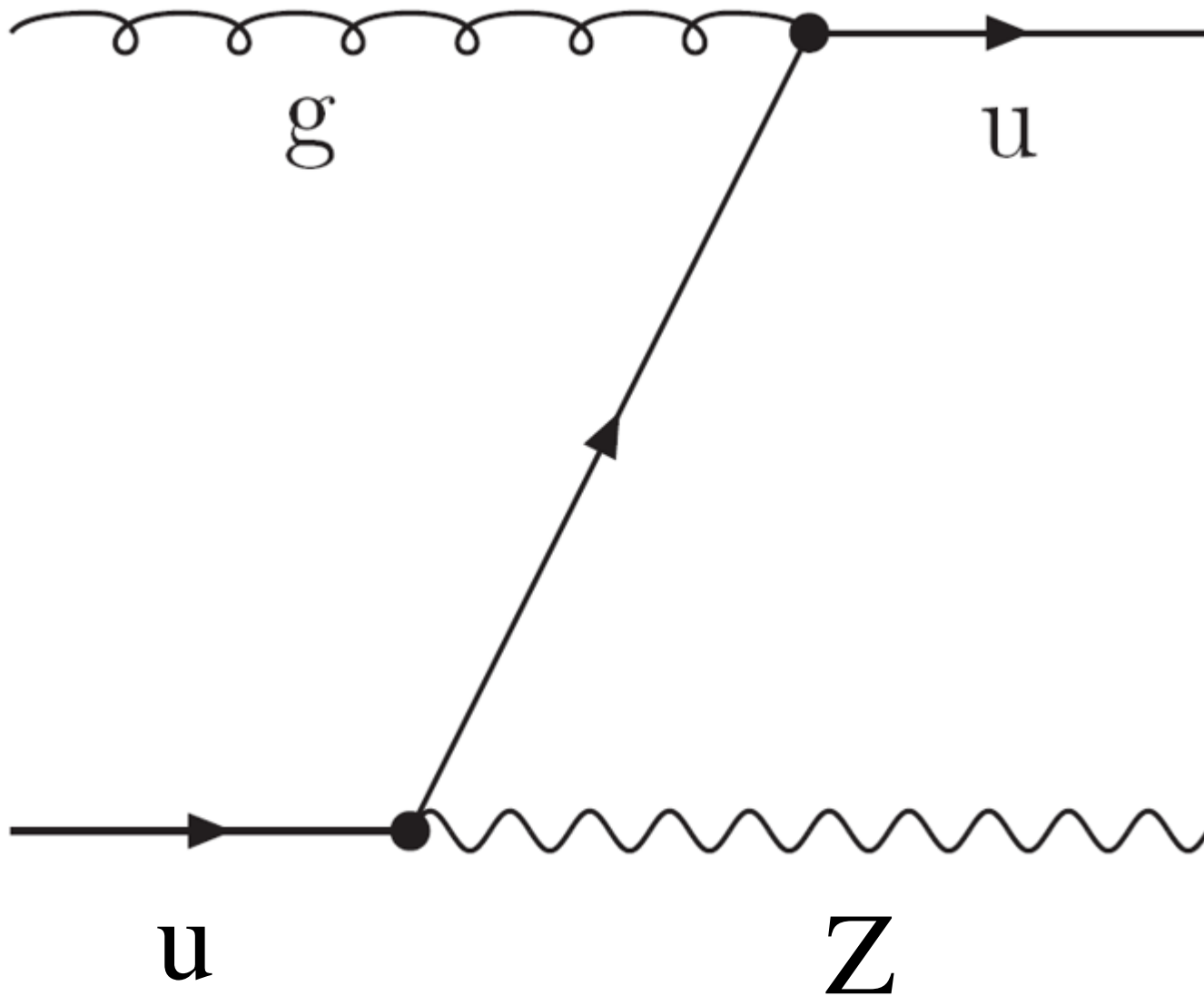



ATLAS
EXPERIMENT

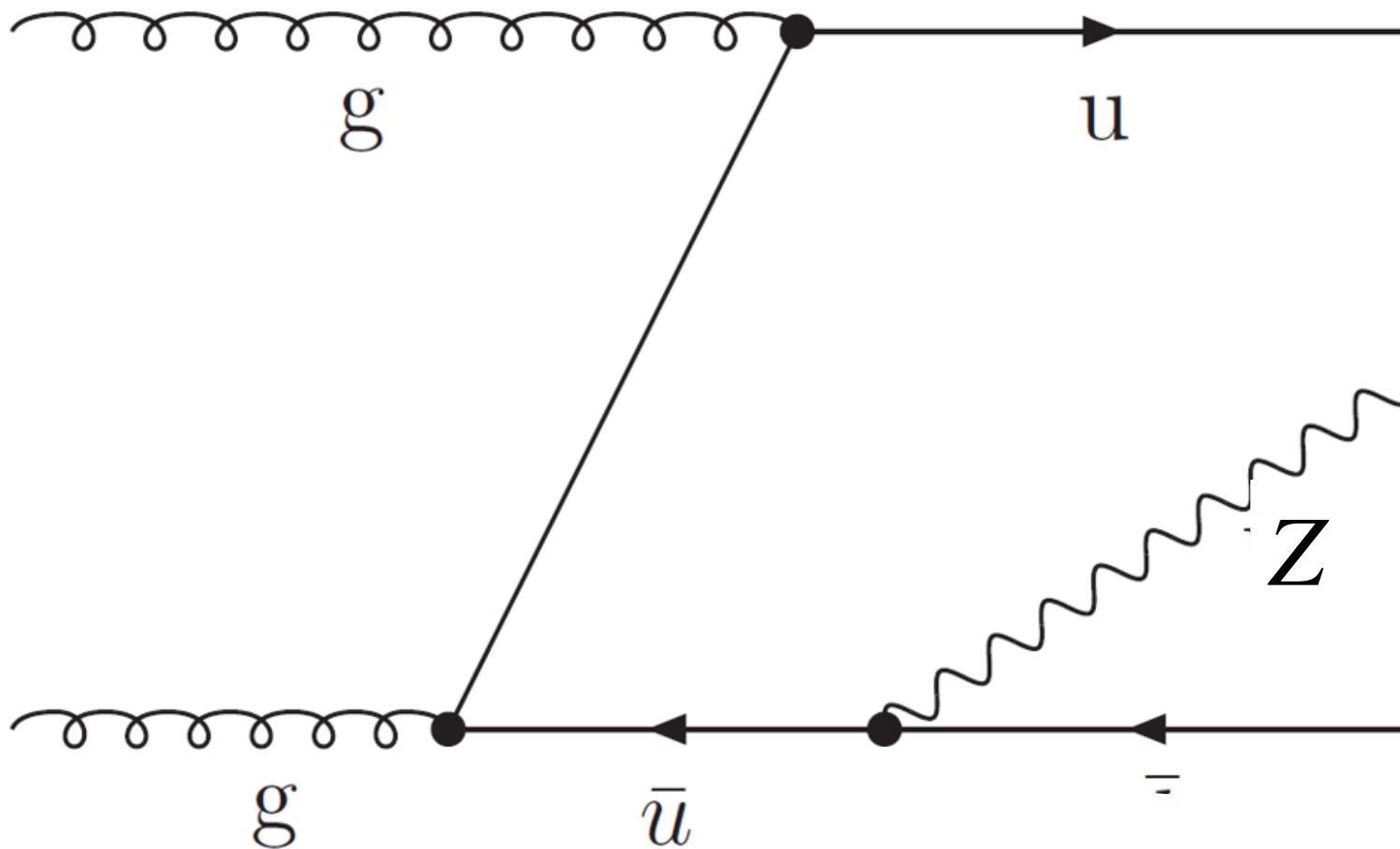
Run Number: 158548, Event Number: 2486978
 Date: 2010-07-04 06:46:45 CEST

**Multijet Event in
 7 TeV Collisions**

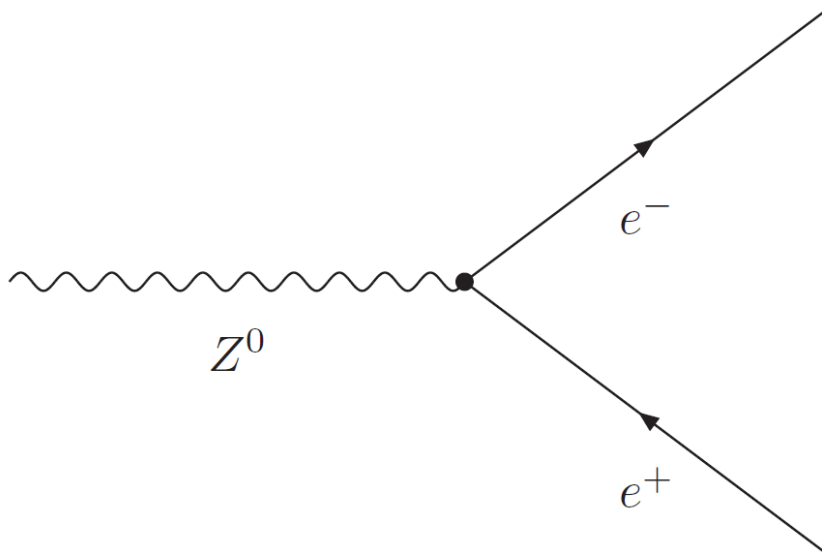




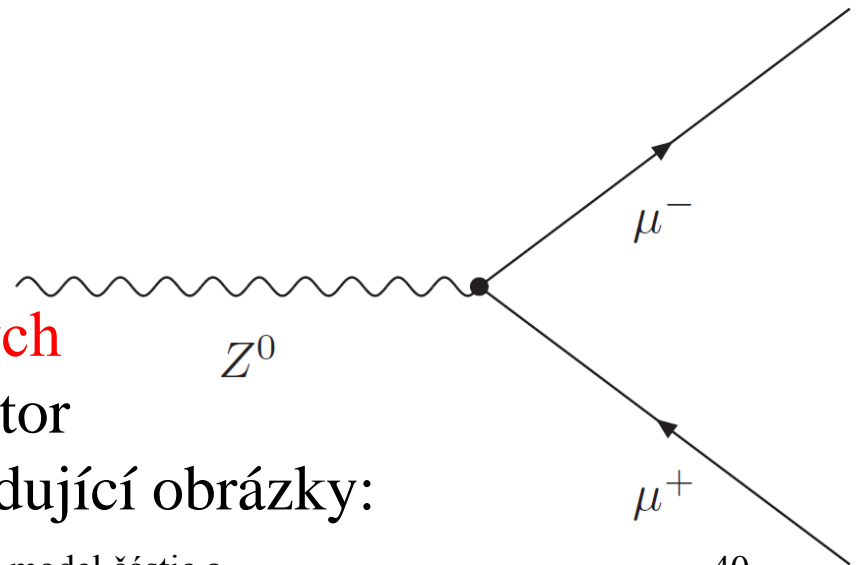
Příklad jiného procesu: při srážce **protonů** interagují **kvarky** a **gluony** uvnitř nich, vzniká (mimo jiné) **částice Z**

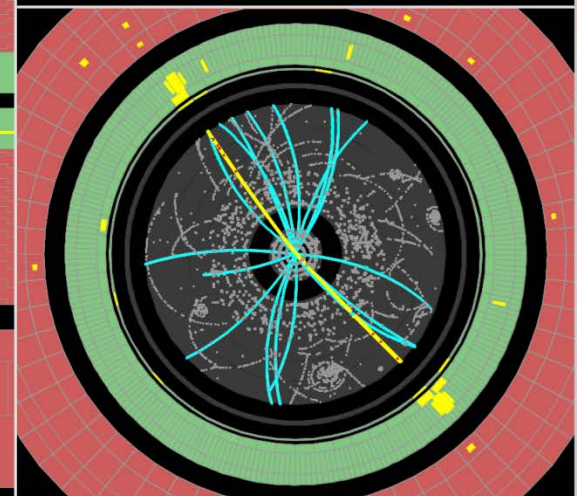
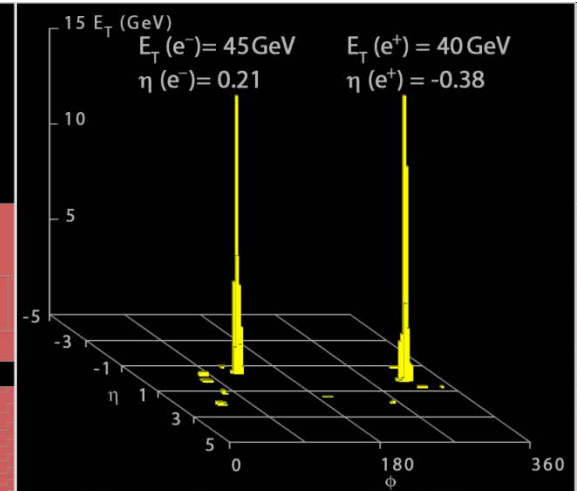
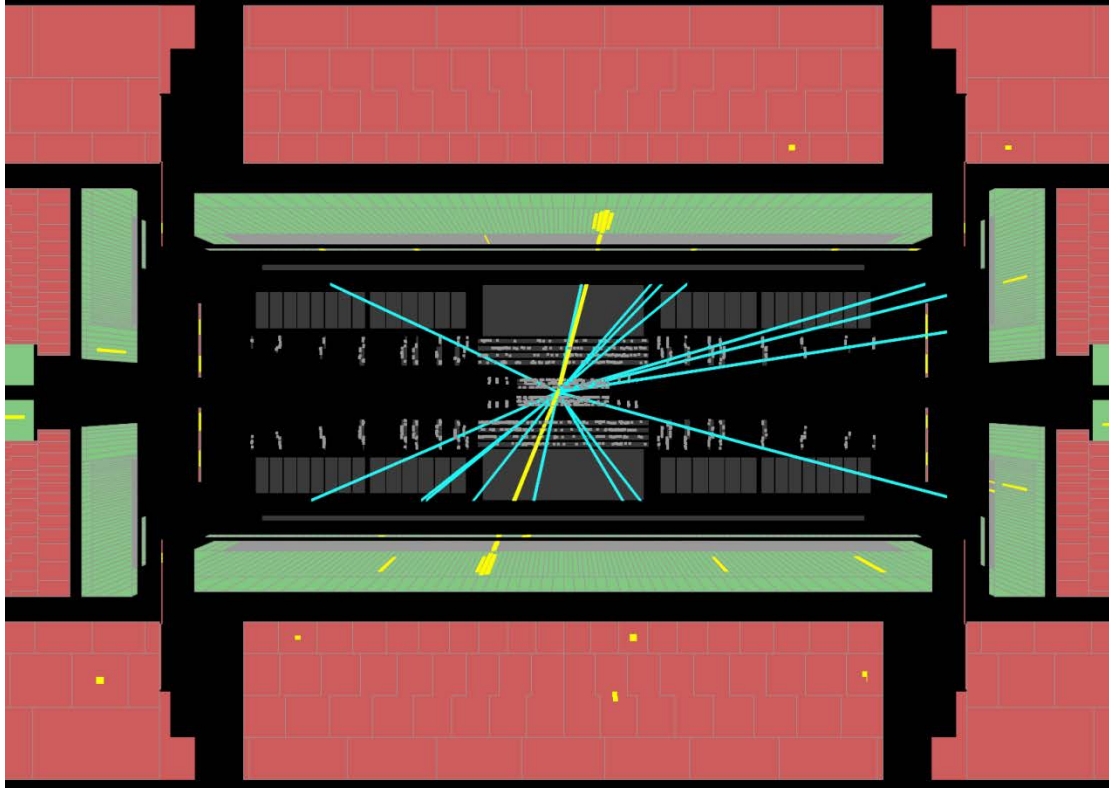


Další možný mechanismus vzniku částice Z ve srážce pp



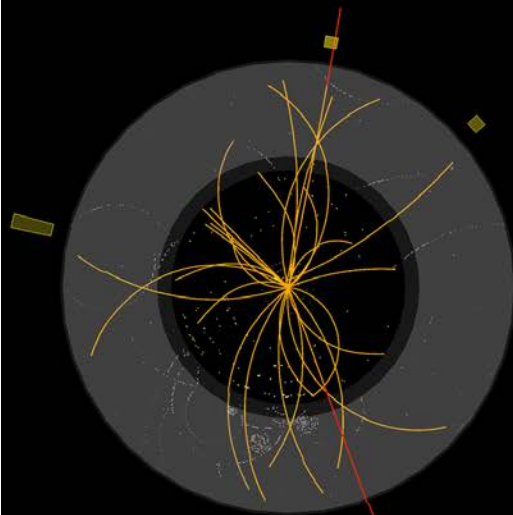
Částice Z se podle standardního modelu může rozpadat také způsobem znázorněným na diagramech – na **pár opačně nabitých leptonů**. Takové páry dokáže detektor jako **ATLAS** pozorovat – viz následující obrázky:





ATLAS EXPERIMENT

Run: 154822, Event: 14321500
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST

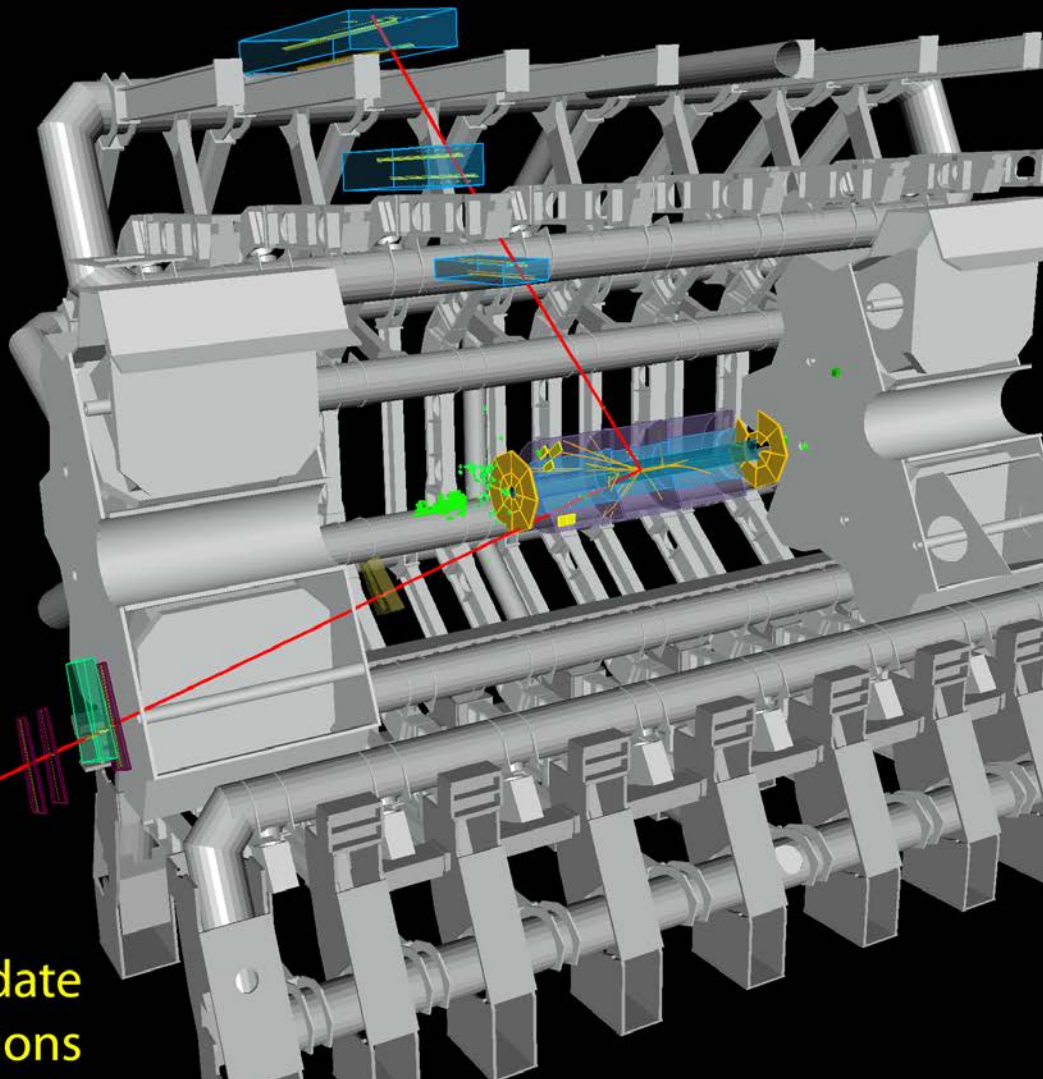


$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^-) = 0.7$
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^+) = 2.2$

$M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$



**Z $\rightarrow\mu\mu$ candidate
in 7 TeV collisions**



Higgsova částice (Higgsův boson) úzce souvisí s mechanismem, díky němuž *fundamentální* částice SM mohou mít nenulovou klidovou hmotnost

Nosiče slabých interakcí W a Z musí mít nenulovou hmotnost, aby teorie popisovala to, co se pozoruje. Zařít to na úrovni teorie tak, aby nebyla vnitřně rozporná, je nesnadné.

Z jiných důvodů, ale stejně obtížné je zabudovat do teorie slabých interakcí hmotnosti fermionů.

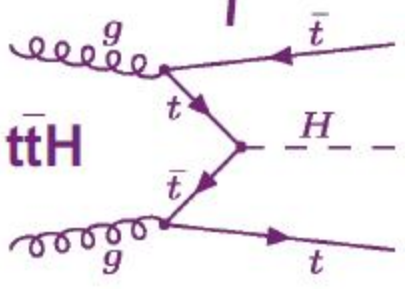
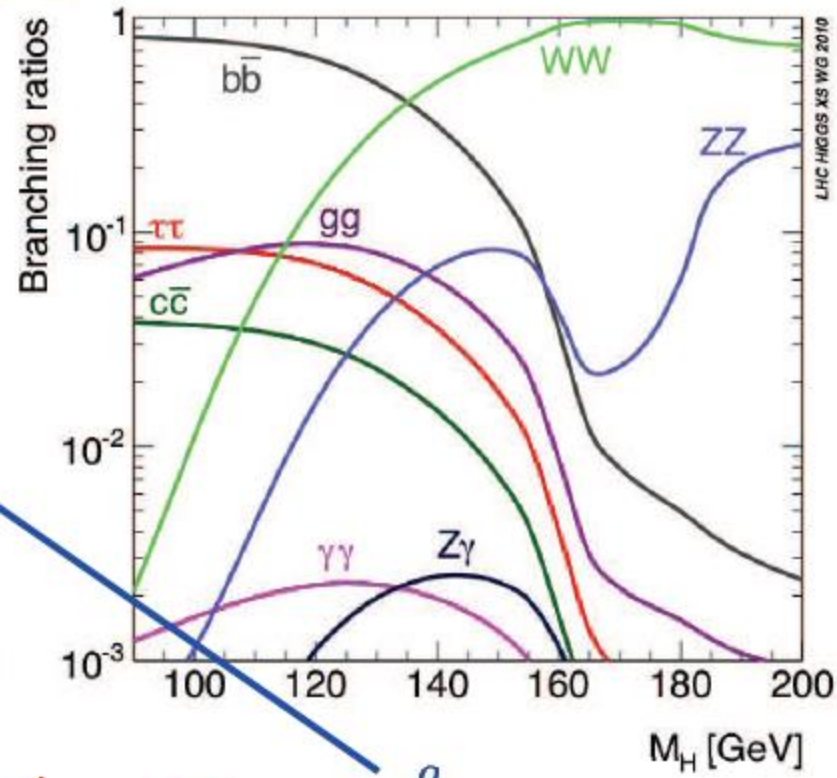
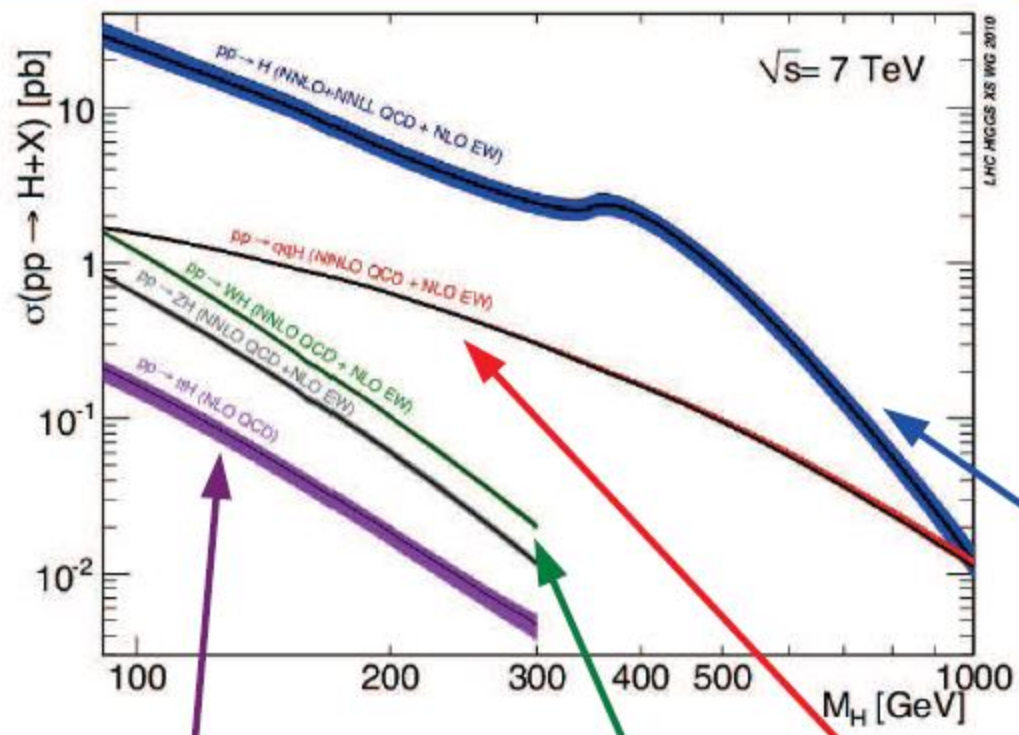
Návrh řešení – P. Higgs a další v roce 1964

Řešení: Zavést do teorie novou třídu částic vhodných vlastností (tzv. skalárních) a nové interakce těchto částic.

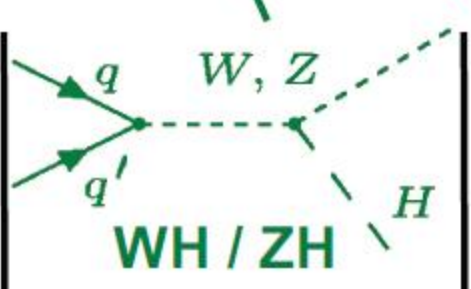
Po sérii velmi netriviálních kroků získáme **nerozpornou** teorii s „běžnými“ částicemi s hmotností a jednou **částicí navíc** – **Higgsovým bosonem**.

SM předpovídá detailně různé vlastnosti a interakce Higgsova bosonu, ale **nikoli jeho hmotnost m_H**

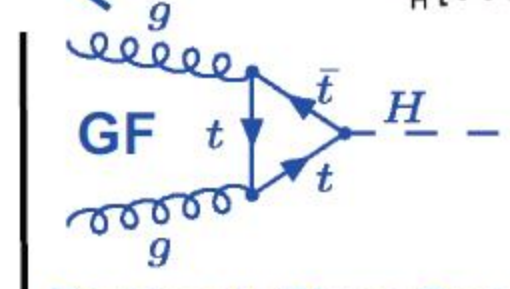
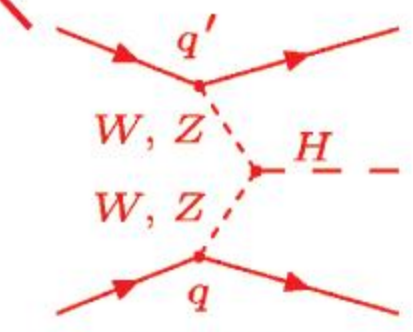
Standard Model Higgs at the LHC



Not used as signature so far, but xsec is included



Used in WH/ZH ($H \rightarrow b\bar{b}$) search



Dominant: Gluon Fusion
 $H \rightarrow \gamma\gamma$ (incl.)
 $H \rightarrow WW + 0/1 \text{ jet}$
 $H \rightarrow ZZ$ (incl.)

THE HIGGS MECHANISM

ILLUSTRATION COURTESY OF CERN

① TO UNDERSTAND THE HIGGS MECHANISM, IMAGINE THAT A ROOM FULL OF PHYSICISTS QUIETLY CHATTERING IS LIKE SPACE FILLED ONLY WITH THE HIGGS FIELD.



A WELL KNOWN SCIENTIST, ALBERT EINSTEIN, WALKS IN, CREATING A DISTURBANCE AS HE MOVES ACROSS THE ROOM, AND ATTRACTING A CLUSTER OF ADMIRERS WITH EACH STEP.

THIS INCREASES HIS RESISTANCE TO MOVEMENT - IN OTHER WORDS, HE ACQUIRES MASS, JUST LIKE A PARTICLE MOVING THROUGH THE HIGGS FIELD.



IF A RUMOUR CROSSES THE ROOM ...



IT CREATES THE SAME KIND OF CLUSTERING, BUT THIS TIME AMONG THE SCIENTISTS THEMSELVES. IN THIS ANALOGY, THESE CLUSTERS ARE THE HIGGS PARTICLES.

ukce

ostí

ce

Řešen
vhodn
těchto

Po sér
nerozp
a jedn

SM p
Higgs

Shrnutí: Teoretický obraz, v němž

- základní částice hmoty tvoří 3 generace **leptonů** a **kvarků** (částic se spinem $\frac{1}{2}$)
- na síly lze pohlížet jako na **interakce** s nosiči (částicemi se spinem 1)
- 3 ze 4 základních interakcí popisují teorie zvané
 - elektroslabá** (nosiče - **fotony**, částice **W** a **Z**)
(*elektromagnetická a slabá interakce*)
 - kvantová chromodynamika** (nosiče - **gluony**) (*silná interakce mezi kvarky*)

dostal jméno **STANDARDNÍ MODEL**

STANDARDNÍ MODEL

- pomocí malého počtu základních principů, základních stavebních prvků a základních parametrů úspěšně popisuje svět nejmenších částic
- téměř 40 let odolává stále tvrdším experimentálním prověrkám při stále vyšších energiích částic
- jeho úspěšnost daleko překonala očekávání tvůrců

- předpovídá **kvantitativní** vztahy mezi **měřitelnými** veličinami
(tj. ze změřených hodnot několika veličin lze spočítat hodnoty jiných veličin, nezávisle je změřit a porovnat s výpočtem)

Příklad:

Veličina	Změřená (GeV)	Předpověď SM (GeV)
Hmotnost W	80.387 ± 0.019	80.390 ± 0.018
Hmotnost Z	91.1876 ± 0.0021	91.1874 ± 0.0021

- jevy popisované standardním modelem tvoří **pozadí** při pátrání po „**nové fyzice**“

Schopnost činit přesné předpovědi s pomocí standardního modelu zlepšuje citlivost experimentů při hledání efektů, které by vybočovaly za jeho hranice

- zdá se, že se blíží rozuzlení záhady „posledního **chybějícího článku**“ standardního modelu – otázky existence **Higgsova bosonu** a mechanismu generování hmotností částic

Je **STANDARDNÍ MODEL** teorií „všeho“ ?

Určitě není:

- **SM** nemá co říci ke gravitaci
- problém: „malý počet“ **základních principů** a **základních parametrů** není „dostatečně malý“
- odkud se berou konkrétní **hodnoty** parametrů?

Další otevřené problémy:

- proč jsou právě 3 generace částic
- záhada velkých rozdílů v hmotnostech
- hmotnosti neutrin
- proč není ve vesmíru stejně hmoty jako antihmoty
- **temná hmota a energie ve vesmíru – cca 96% hmoty a energie ve vesmíru je „něco jiného“ - ~26% t. h. a 70% t. e.**

Nápady teoretických fyziků nevysychají:

SUSY částice, superstruny, vyšší dimenze,
mikroskopické černé díry, ..., ...

Co experiment?

Zatím se zdá, že příroda nás nechce rozmazlovat příliš „snadno dostupnými“ objevy

Pro „nesnadné“ objevy je třeba více dat. Teprve další měření ukáže

„Finding the Higgs will be a discovery, not finding the Higgs and ruling it out will also be a major discovery“

(Nalezení Higgsovy částice bude objev, nenalezení Higgsovy částice a její vyloučení bude také významný objev)

R. Heuer, generální ředitel CERN, srpen 2011



Higgsovu částici fyzikové možná našli, ale platí to obecně - i pro další částice a jevy