Standardní model

Jiří Dolejší, Olga Kotrbová, Univerzita Karlova v Praze

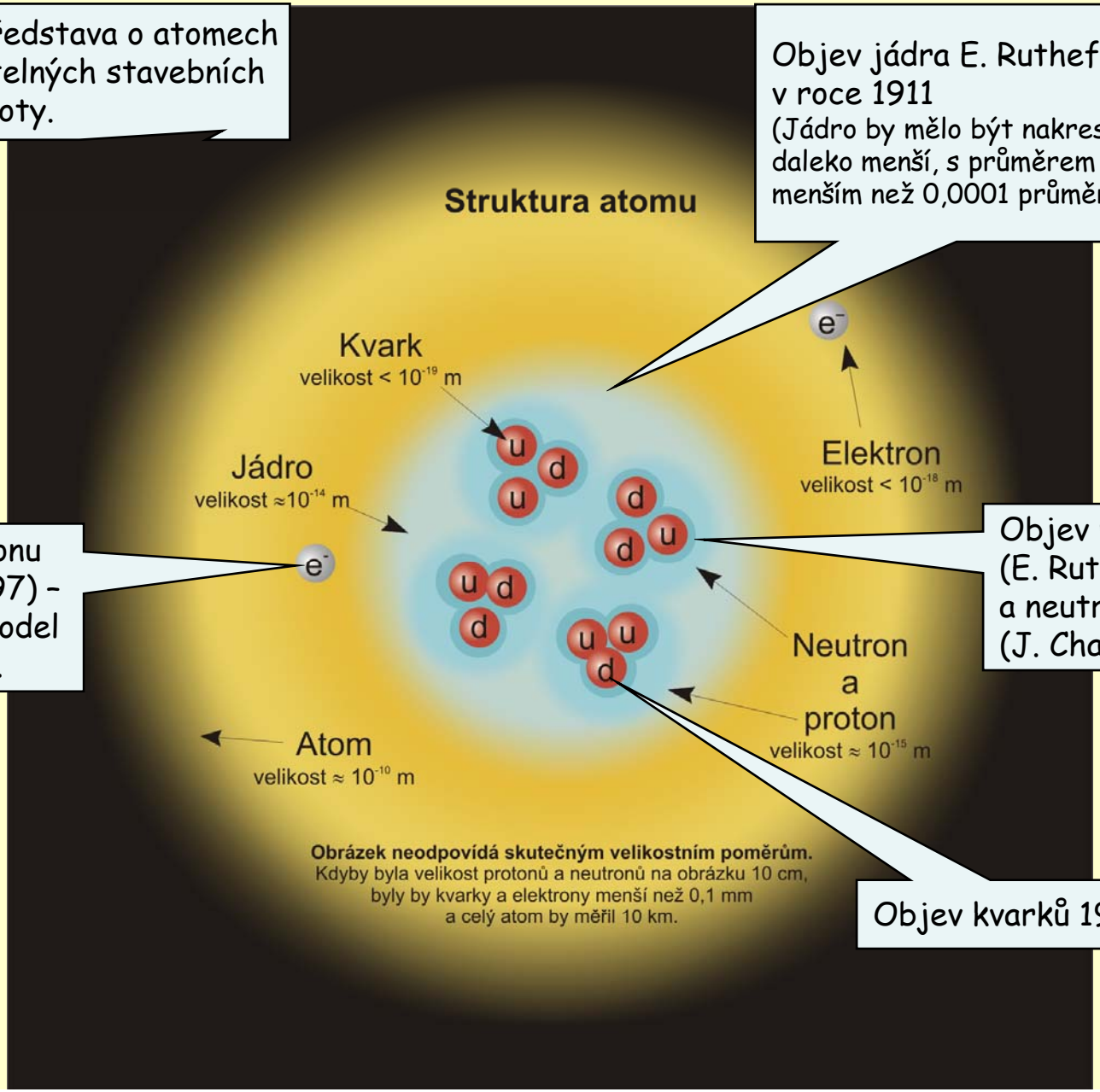
Současným představám o tom, z jakých nejelementárnějších kamínků je svět složen a proč je takový jaký je, říkáme **standardní model**.

Standardní model tedy shrnuje současné poznatky částicové fyziky. Zaprvé říká, z jakých elementárních částic (nejmenších a nedělitelných stavebních kamenů z dnešního pohledu) se svět skládá.
Zadruhé popisuje a vysvětluje, jak elementární částice spolu interagují a speciálně jak drží atomy a jádra pohromadě. Tento popis a vysvětlení poskytuje kvantová teorie, ke které vedlo více než tři desetiletí teoretického a experimentálního úsilí. Dnešní standardní model zahrnuje teorii silných interakcí (kvantová chromodynamika neboli QCD, odpovědná např. za stavbu jader) a sjednocenou teorii slabých a elektromagnetických interakcí (tzv. elektroslabé interakce, odpovědné jak za strukturu atomu a makroskopické elektromagnetické jevy, např. funkci televize, tak např. za rozpady některých nestabilních částic v mikrosvětě). Trochu 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)



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

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

Objev kvarků 1964.

Kvarky

Během let, kdy fyzikové používali urychlovače ke studiu srážek, objevili postupně více než stovku dosud neznámých částic. V roce 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. Pro takovéto zlomkové náboje nebyl tehdy znám žádný důkaz.

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

Teprve na konci šedesátých a na začátku sedmdesátých let ukázaly experimenty na urychlovačích, že kvarky s předpokládanými vlastnostmi skutečně existují, avšak zůstávají uvězněny uvnitř částic s celočíselným nábojem.

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** (μ) a lepton **tau** (τ), 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 2×10^{-6} s, potom se rozpadá na elektron a neutrina:
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$.
Byl objeven v kosmickém záření za pomoci mlžné komory C. Andersonem v roce 1936.

Leptony		spin = 1/2	
	Vůně	Hmotnost GeV/c^2	Elektrický náboj
ν_e	elektronové neutrino	$<10^{-8}$	0
e	elektron	0.000511	-1
ν_μ	mionové neutrino	<0.0002	0
μ	mion	0.106	-1
ν_τ	tauonové neutrino	<0.02	0
τ	tauon	1.777	-1

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

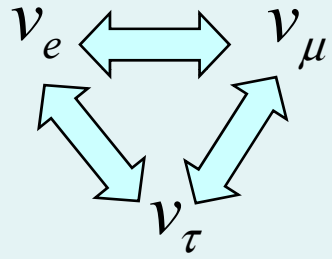
Podobně jako elektronové neutrino doprovází při slabých rozpadech elektron, doprovází mionové neutrino mion a tauonové neutrino tauon. Tento fakt je příkladem zachování tzv. **leptonového čísla**.

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

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

Neutrino předpověděl W. Pauli v roce 1930, aby vysvětlil β rozpad neutronu $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ a zvláště to, že elektron vylétal s různými energiemi. Raději předpověděl novou částici, než aby připustil nezachování energie a hybnosti. Existence neutrina byla potvrzena až v roce 1956 F. Reinesem a L. Cowanem pomocí inverzního rozpadu β: $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$, intenzívní tok antineutrin přicházel z jaderného reaktoru. Reines a Cowan pozorovali scintilace způsobené γ kvanty z anihilace pozitronu a navíc další foton doprovázející zachycení neutronu kadmiem. Terčem i detektorem bylo 5400 litrů roztoku vody a chloridu kademnatého.

Dlouho se předpokládalo, že neutrina mají nulovou hmotnost. Nesnadná měření udávala hranice, pod kterou hmotnosti jednotlivých neutrin leží. Další způsob, jak zjistit hmotnost neutrin, je sledovat jejich identitu, respektive změny jednoho typu neutrin na jiný (v tomto kontextu se mluví o **oscilaci neutrin**). Z kvantové teorie vyplývá, že mají-li neutrina různé hmotnosti, mohou se v letu ν_e, ν_μ, ν_τ navzájem měnit jedno v druhé.



Oscilace neutrin byla zjištěna ve velkých podzemních experimentech, které mimo jiné mohou detekovat neutrina produkovaná při průletu kosmického záření atmosférou. Tato neutrina proniknou celou Zemí a proto je detektory „vidí" přilétat ze všech směrů. Výsledky ukazují, že neutrina ν_μ vzniklá v atmosféře poblíž místa experimentu přicházejí s očekávanou frekvencí, zatímco neutrin přilétajících z velké vzdálenosti je méně. Zdá se, že tato neutrina mizí (jinak řečeno, oscilují na jiné typy neutrin).

Ve vesmíru je velké množství neutrin pocházejících jednak z jaderných reakcí ve hvězdách, jednak z procesů probíhajících při výbuších supernov. Další neutrina vznikají při interakcích částic kosmického záření v atmosféře i při dalších procesech. Nejbližším vydatným zdrojem neutrin je Slunce:

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 ħ, což je kvantová jednotka momentu hybnosti, kde $\hbar = h/2\pi = 6{,}58\times10^{-25}\ \mathrm{GeV\,s} = 1{,}05\times10^{-34}\ \mathrm{J\,s}$.

Leptony		spin = 1/2	
Vůně		Hmotnost GeV/c²	Elektrický náboj
ν_e	elektronové neutrino	$<10^{-8}$	0
e	elektron	0.000511	-1
ν_μ	mionové neutrino	<0.0002	0
μ	mion	0.106	-1
ν_τ	tauonové neutrino	<0.02	0
τ	tauon	1.777	-1

Kvarky		spin = 1/2	
Vůně		Přibližná hmotnost GeV/c²	Elektrický náboj
u	up	0.003	2/3
d	down	0.006	-1/3
c	charm	1.3	2/3
s	strange	0.1	-1/3
t	top	175	2/3
b	bottom	4.3	-1/3

Elektrický náboj se vyjadřuje v násobcích náboje protonu. V soustavě SI je elektrický náboj protonu $1{,}60\times10^{-19}$ 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**. Pro každý typ síly existuje jeden nebo více „nosičů", které zprostředkovávají interakci. Dobře známý foton je například boson, který zprostředkovává elektromagnetickou sílu.

Nosiče sil

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

Sjednocená elektroslabá spin=1		
Název	Hmotnost GeV/c^2	Elektrický náboj
γ foton	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.188	0

Silná (barevná) spin=1		
Název	Hmotnost GeV/c^2	Elektrický náboj
g gluon	0	0

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 nabité částice interagují tak, že si vyměňují fotony, v silných interakcích interagují barevně nabité 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 (Elektroslabá)	Silná: Základní	Silná: 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 nabité	kvarky, gluony	hadrony
Zprostředkující částice:	graviton (dosud neobjeven)	W^+ W^- Z^0	γ	gluony	mesony
Síla v poměru k elektromagnetické mezi dvěma u kvarky ve vzdálenosti 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	netýká se kvarků
Síla v poměru k elektromagnetické mezi dvěma u kvarky ve vzdálenosti 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
... a mezi dvěma protony v jádře	10^{-36}	10^{-7}	1	netýká se hadronů	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 mezonech a baryonech

Kvarky a gluony není možné od sebe odtrhnout, jsou uvězněny v barevně neutrálních částicích nazývaných **hadrony**. Toto uvěznění (vazba) je důsledkem mnohonásobné výměny gluonů mezi barevně nabitými kvarky i gluony samými. Když se barevně nabité 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** $q\bar{q}$ a **baryony** 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 GeV/c²	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
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Mezony $q\bar{q}$

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

Bosony

Symbol	Název	Kvarkové složení	Elektrický náboj	Hmotnost GeV/c²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	ro	$u\bar{d}$	+1	0.776	1
B^0	B-nula	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_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, γ 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 !

Baryon Summary Table

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the status of baryons in the Review. Only the baryons with 3- or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established as baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For N, Δ, and Ξ resonances, the partial wave is indicated by the symbol $L_{2I,2J}$, where L is the orbital angular momentum (S, P, D, ...), I is the isospin, and J is the total angular momentum. For Λ and Σ resonances, the symbol is $L_{I,2J}$.

p	P_{11}	****	$\Delta(1232)$	P_{33}	****	Λ	P_{01}	****	Σ^+	P_{11}	****	Ξ^0	P_{11}	****
n	P_{11}	****	$\Delta(1600)$	P_{33}	***	$\Lambda(1405)$	S_{01}	****	Σ^0	P_{11}	****	Ξ^-	P_{11}	****
$N(1440)$	P_{11}	****	$\Delta(1620)$	S_{31}	****	$\Lambda(1520)$	D_{03}	****	Σ^-	P_{11}	****	$\Xi(1530)$	P_{13}	****
$N(1520)$	D_{13}	****	$\Delta(1700)$	D_{33}	****	$\Lambda(1600)$	P_{01}	***	$\Sigma(1385)$	P_{13}	****	$\Xi(1620)$		*
$N(1535)$	S_{11}	****	$\Delta(1750)$	P_{31}	*	$\Lambda(1670)$	S_{01}	****	$\Sigma(1480)$		*	$\Xi(1690)$		***
$N(1650)$	S_{11}	****	$\Delta(1900)$	S_{31}	**	$\Lambda(1690)$	D_{03}	****	$\Sigma(1560)$		**	$\Xi(1820)$	D_{13}	***
$N(1675)$	D_{15}	****	$\Delta(1905)$	F_{35}	****	$\Lambda(1800)$	S_{01}	***	$\Sigma(1580)$	D_{13}	**	$\Xi(1950)$		***
$N(1680)$	F_{15}	****	$\Delta(1910)$	P_{31}	****	$\Lambda(1810)$	P_{01}	***	$\Sigma(1620)$	S_{11}	**	$\Xi(2030)$		***
$N(1700)$	D_{13}	***	$\Delta(1920)$	P_{33}	***	$\Lambda(1820)$	F_{05}	****	$\Sigma(1660)$	P_{11}	***	$\Xi(2120)$		*
$N(1710)$	P_{11}	***	$\Delta(1930)$	D_{35}	***	$\Lambda(1830)$	D_{05}	****	$\Sigma(1670)$	D_{13}	****	$\Xi(2250)$		**
$N(1720)$	P_{13}	****	$\Delta(1940)$	D_{33}	*	$\Lambda(1890)$	P_{03}	****	$\Sigma(1690)$		**	$\Xi(2370)$		**
$N(1900)$	P_{13}	**	$\Delta(1950)$	F_{37}	****	$\Lambda(2000)$		*	$\Sigma(1750)$	S_{11}	***	$\Xi(2500)$		*
$N(1990)$	F_{17}	**	$\Delta(2000)$	F_{35}	**	$\Lambda(2020)$	F_{07}	*	$\Sigma(1770)$	P_{11}	*			
$N(2000)$	F_{15}	**	$\Delta(2150)$	S_{31}	*	$\Lambda(2100)$	G_{07}	****	$\Sigma(1775)$	D_{15}	****	Ω^-		****
$N(2080)$	D_{13}	**	$\Delta(2200)$	G_{37}	*	$\Lambda(2110)$	F_{05}	***	$\Sigma(1840)$	P_{13}	*	$\Omega(2250)^-$		***
$N(2090)$	S_{11}	*	$\Delta(2300)$	H_{39}	**	$\Lambda(2325)$	D_{03}	*	$\Sigma(1880)$	P_{11}	**	$\Omega(2380)^-$		**
$N(2100)$	P_{11}	*	$\Delta(2350)$	D_{35}	*	$\Lambda(2350)$	H_{09}	***	$\Sigma(1915)$	F_{15}	****	$\Omega(2470)^-$		**
$N(2190)$	G_{17}	****	$\Delta(2390)$	F_{37}	*	$\Lambda(2585)$		**	$\Sigma(1940)$	D_{13}	***			
$N(2200)$	D_{15}	**	$\Delta(2400)$	G_{39}	**				$\Sigma(2000)$	S_{11}	*	Λ_c^+		****
$N(2220)$	H_{19}	****	$\Delta(2420)$	$H_{3,11}$	****				$\Sigma(2030)$	F_{17}	****	$\Lambda_c(2593)^+$		***
$N(2250)$	G_{19}	****	$\Delta(2750)$	$I_{3,13}$	**				$\Sigma(2070)$	F_{15}	*	$\Lambda_c(2625)^+$		***
$N(2600)$	$I_{1,11}$	***	$\Delta(2950)$	$K_{3,15}$	**				$\Sigma(2080)$	P_{13}	**	$\Lambda_c(2765)^+$		*
$N(2700)$	$K_{1,13}$	**							$\Sigma(2100)$	G_{17}	*	$\Lambda_c(2880)^+$		**
			$\Theta(1540)^+$		***				$\Sigma(2250)$		***	$\Sigma_c(2455)$		****
			$\Phi(1860)$		*				$\Sigma(2455)$		**	$\Sigma_c(2520)$		***
									$\Sigma(2620)$		**	Ξ_c^+		***
									$\Sigma(3000)$		*	Ξ_c^0		***
									$\Sigma(3170)$		*	$\Xi_c'^+$		***
												$\Xi_c'^0$		***
												$\Xi_c(2645)$		***
												$\Xi_c(2790)$		***
												$\Xi_c(2815)$		***
												Ω_c^0		***
												Ξ_{cc}^+		*
												Λ_b^0		***
												Ξ_b', Ξ_b^-		*

**** Existence is certain, and properties are at least fairly well explored.

*** Existence ranges from very likely to certain, but further confirmation is desirable and/or quantum numbers, branching fractions, etc. are not well determined.

** Evidence of existence is only fair.

* Evidence of existence is poor.

Dosud objevené baryony a mezony.
Ani tak moc nejde o to, jaké jsou a jaké mají vlastnosti, ale o poznání, že JE JICH MOC na to, abychom je všechny nazývali elementární částice.

Meson Summary Table

See also the table of suggested $q\bar{q}$ quark-model assignments in the Quark Model section.

• Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established.

† Indicates that the value of J given is preferred, but needs confirmation.

LIGHT UNFLAVORED ($S = C \neq B = 0$)

$I^G(J^{PC})$		$I^G(J^{PC})$	
• $\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	• $\pi_2(1670)$	$1^-(2^{-+})$
• π^0	$1^-(0^{-+})$	• $\phi(1680)$	$0^-(1^{--})$
• η	$0^+(0^{-+})$	• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^{--})$
• $f_0(600)$	$0^+(0^{++})$	• $\rho(1700)$	$1^+(1^{--})$
• $\rho(770)$	$1^+(1^{--})$	$a_2(1700)$	$1^-(2^{++})$
• $\omega(782)$	$0^-(1^{--})$	• $f_0(1710)$	$0^+(0^{++})$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^{-+})$	$\eta(1760)$	$0^+(0^{-+})$
• $f_0(980)$	$0^+(0^{++})$	• $\pi(1800)$	$1^-(0^{-+})$
• $a_0(980)$	$1^-(0^{++})$	$f_2(1810)$	$0^+(2^{++})$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^{--})$	• $\phi_3(1850)$	$0^-(3^{--})$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^{+-})$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^{-+})$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^{+-})$	$\rho(1900)$	$1^+(1^{--})$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^{++})$	$f_2(1910)$	$0^+(2^{++})$
• $f_2(1270)$	$0^+(2^{++})$	• $f_2(1950)$	$0^+(2^{++})$
• $f_1(1285)$	$0^+(1^{++})$	$\rho_3(1990)$	$1^+(3^{--})$
• $\eta(1295)$	$0^+(0^{-+})$	• $f_2(2010)$	$0^+(2^{++})$
• $\pi(1300)$	$1^-(0^{-+})$	$f_0(2020)$	$0^+(0^{++})$
• $a_2(1320)$	$1^-(2^{++})$	• $a_4(2040)$	$1^-(4^{++})$
• $f_0(1370)$	$0^+(0^{++})$	• $f_4(2050)$	$0^+(4^{++})$
$h_1(1380)$	$?^-(1^{+-})$	$\pi_2(2100)$	$1^-(2^{-+})$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^{-+})$	$f_0(2100)$	$0^+(0^{++})$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^{-+})$	$f_2(2150)$	$0^+(2^{++})$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^{++})$	$\rho(2150)$	$1^+(1^{--})$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^{--})$	$f_0(2200)$	$0^+(0^{++})$
$f_2(1430)$	$0^+(2^{++})$	$f_J(2220)$	$0^+(2^{++}$ or $4^{++})$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^{++})$		
• $\rho(1450)$	$1^+(1^{--})$	$\eta(2225)$	$0^+(0^{-+})$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^{-+})$	$\rho_3(2250)$	$1^+(3^{--})$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^{++})$	• $f_2(2300)$	$0^+(2^{++})$
$f_1(1510)$	$0^+(1^{++})$	$f_4(2300)$	$0^+(4^{++})$
• $f_2'(1525)$	$0^+(2^{++})$	• $f_2(2340)$	$0^+(2^{++})$
$f_2(1565)$	$0^+(2^{++})$	$\rho_5(2350)$	$1^+(5^{--})$
$h_1(1595)$	$0^-(1^{+-})$	$a_6(2450)$	$1^-(6^{++})$
• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^{-+})$	$f_6(2510)$	$0^+(6^{++})$
$a_1(1640)$	$1^-(1^{++})$		
$f_2(1640)$	$0^+(2^{++})$		
• $\eta_2(1645)$	$0^+(2^{-+})$		
• $\omega(1650)$	$0^-(1^{--})$		
• $\omega_3(1670)$	$0^-(3^{--})$		

OTHER LIGHT

Further States

STRANGE ($S = \pm 1$, $C = B = 0$)

$I(J^P)$	
• $K^\pm$	$1/2(0^-)$
• K^0	$1/2(0^-)$
• K_S^0	$1/2(0^-)$
• K_L^0	$1/2(0^-)$
$K_0^*(800)$	$1/2(0^+)$
• $K^*(892)$	$1/2(1^-)$
• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$
• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1410)$	$1/2(1^-)$
• $K_0^*(1430)$	$1/2(0^+)$
• $K_2^*(1430)$	$1/2(2^+)$
$K(1460)$	$1/2(0^-)$
$K_2(1580)$	$1/2(2^-)$
$K(1630)$	$1/2(?^?)$
$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$
• $K^*(1680)$	$1/2(1^-)$
• $K_2(1770)$	$1/2(2^-)$
• $K_3^*(1780)$	$1/2(3^-)$
• $K_2(1820)$	$1/2(2^-)$
$K(1830)$	$1/2(0^-)$
$K_0^*(1950)$	$1/2(0^+)$
$K_2^*(1980)$	$1/2(2^+)$
• $K_4^*(2045)$	$1/2(4^+)$
$K_2(2250)$	$1/2(2^-)$
$K_3(2320)$	$1/2(3^+)$
$K_5^*(2380)$	$1/2(5^-)$
$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$
$K(3100)$	$?^?(?^{??})$

CHARMED ($C = \pm 1$)

$I(J^P)$	
• $D^\pm$	$1/2(0^-)$
• D^0	$1/2(0^-)$
• $D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$
• $D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$
$D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$
$D_1(2420)^\pm$	$1/2(?^?)$
• $D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$
• $D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$
$D^*(2640)^\pm$	$1/2(?^?)$

CHARMED, STRANGE ($C = S = \pm 1$)

• $D_s^\pm$	$0(0^-)$
• $D_s^{*\pm}$	$0(?^?)$
• $D_{sJ}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$
• $D_{s1}(2460)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s1}(2536)^\pm$	$0(1^+)$
• $D_{s2}(2573)^\pm$	$0(?^?)$

BOTTOM ($B = \pm 1$)

$I^G(J^{PC})$	
• $B^\pm$	$1/2(0^-)$
• B^0	$1/2(0^-)$
• $B^\pm/B^0$ ADMIXTURE	
• $B^\pm/B^0/B_s^0$/b-baryon ADMIXTURE	
V_{cb} and V_{ub} CKM Matrix Elements	
• B^*	$1/2(1^-)$
$B_J^*(5732)$	$?(?^?)$

BOTTOM, STRANGE ($B = \pm 1$, $S = \mp 1$)

• B_s^0	$0(0^-)$
B_s^*	$0(1^-)$
$B_{sJ}^*(5850)$	$?(?^?)$

BOTTOM, CHARMED ($B = C = \pm 1$)

• $B_c^\pm$	$0(0^-)$

$c\bar{c}$

• $\eta_c(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $J/\psi(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{c0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{c1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
$h_c(1P)$	$?^?(?^{??})$
• $\chi_{c2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
$\eta_c(2S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\psi(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(3770)$	$0^-(1^{--})$
$\psi(3836)$	$0^-(2^{--})$
$X(3872)$	$?^?(?^{?})$
• $\psi(4040)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(4160)$	$0^-(1^{--})$
• $\psi(4415)$	$0^-(1^{--})$

$b\bar{b}$

$\eta_b(1S)$	$0^+(0^{-+})$
• $\Upsilon(1S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b0}(1P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(1P)$	$0^+(1^{++})$
• $\chi_{b2}(1P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(2S)$	$0^-(1^{--})$
• $\chi_{b0}(2P)$	$0^+(0^{++})$
• $\chi_{b1}(2P)$	$0^+(1^{++})$
• $\chi_{b2}(2P)$	$0^+(2^{++})$
• $\Upsilon(3S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(4S)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(10860)$	$0^-(1^{--})$
• $\Upsilon(11020)$	$0^-(1^{--})$

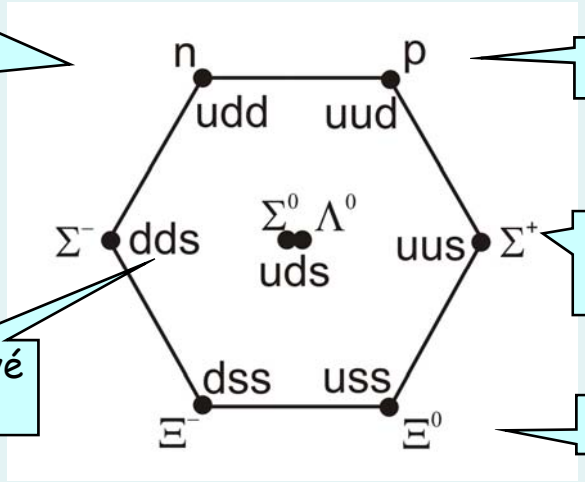
NON-$q\bar{q}$ CANDIDATES

NON-$q\bar{q}$ CANDIDATES

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 π^-, π^0 a π^+. Takovýmto 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.



dublet

triplet a singlet

dublet

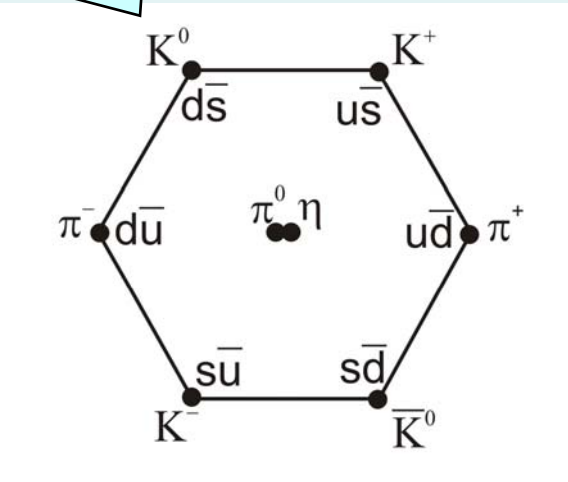
kvarkové složení

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

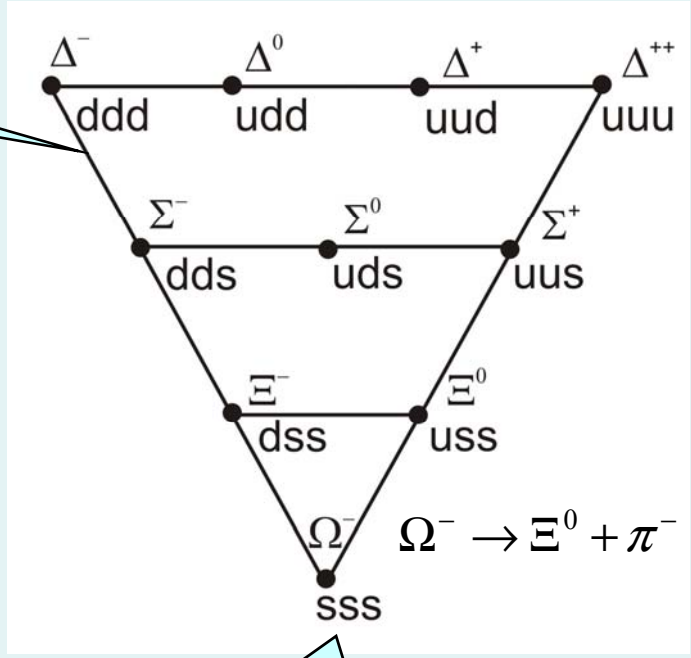
Podivnost je další vlastnost resp. kvantové číslo, které některé částice mají. V kvarkovém modelu je spojeno s kvarkem s.

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

Mezonový oktet tvoří částice se spinem 0.



Baryonový dekuplet, spin 3/2.



Tato částice s podivností 3 byla předpovězena a pak teprve objevena v roce 1964 v Brookhavenu, což znamenalo potvrzení kvarkového modelu.

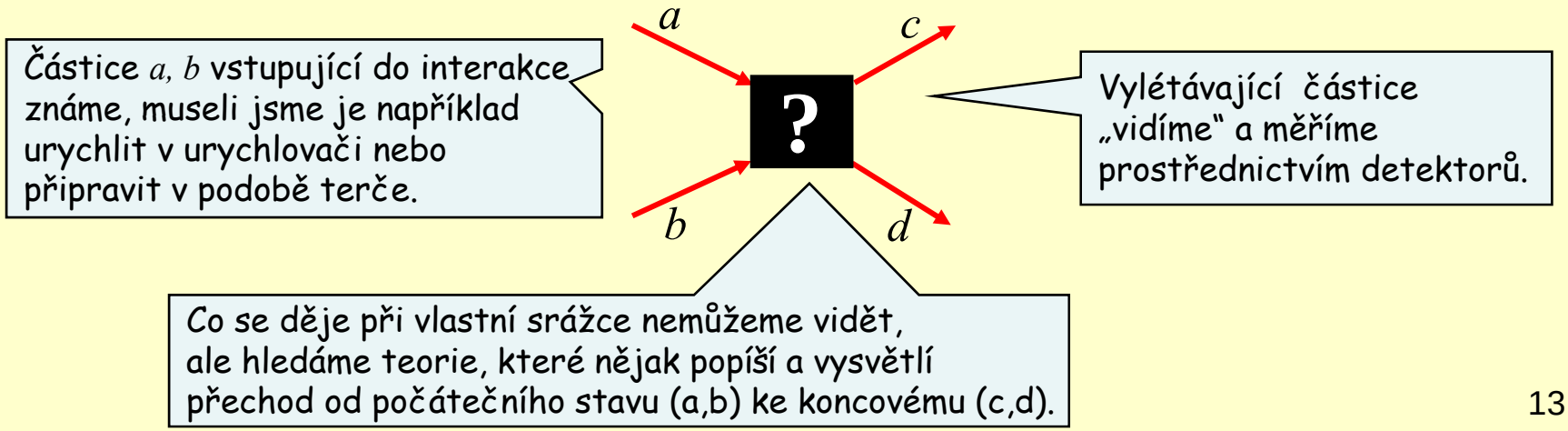
Jak jsme již řekli. uspořádání do těchto společenství, resp. poskládání hadronů z kvarků, je popsatelné pomocí teorie grup - reprezentace grupy SU(3) nabízejí oktety a singlet. Právě proto je grupa SU(3) vhodná pro popis osmičlenných společenství částic. Předpovídá ale i další multiplety, např. baryonový dekuplet. Symetrie neplatí úplně přesně, mezi hmotnostmi v oktetech jsou malé rozdíly.

Kvarkový model, tj. „skládačka" hadronů s podtextem grupy symetrie SU(3) se postupně rozvinul do dynamické teorie silných interakcí – kvantové chromodynamiky, o které se ještě zmíníme dále.

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

Když pořádně nevíme, co se v interakční oblasti děje, můžeme (a musíme) se spokojit s předpovědí toho, co bude výsledkem, tj. jaké částice z interakce vyletí a jaké budou jejich hybnosti. V kvantovém světě to nebudou striktní výpovědi, ale pravděpodobnosti. S tím ale už dávno umíme pracovat, pro srovnávání předpovědí teorie a výsledků experimentu používáme účinné průřezy.

Jakékoli výpočty v kvantové teorii pole jsou technicky velmi náročné. Ale i většina jiných vzrušujících lidských výtvorů dá spoustu práce. Například vytvořit realistickou sochu jistě není vůbec triviální. Sochař asi nejdřív uplácá cosi, co připomíná postavu a pak upřesňuje podobu, výraz, detaily. Řečeno fyzikální hantýrkou, postupuje **poruchově**. Nejdřív je tu **první aproximace**, hrubá představa. Pak **první oprava**, korekce, upřesnění (např. dáma, pán). Pak další a další korekce, opravy, **„členy poruchové řady"**. Snazší je situace, kdy několik málo oprav stačí k uspokojivému výsledku (**„poruchová řada rychle konverguje"**), může se ale také stát, že ani nekonečné opravy nedávají hotové dílo (**„poruchová řada nekonverguje"**).

Výpočty v kvantové teorii pole dramaticky ovlivnil Richard Feynman, který navrhl grafickou řeč ke znázorňování jednotlivých členů poruchového rozvoje – **Feynmanovy diagramy**. Jednotlivé členy reprezentují příspěvky při výpočtu pravděpodobnosti interakce.

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

Jednoduchým příkladem **poruchové řady** je Taylorův rozvoj, kterým můžeme rozvinout například funkci sinus v okolí 0 do nekonečné řady:

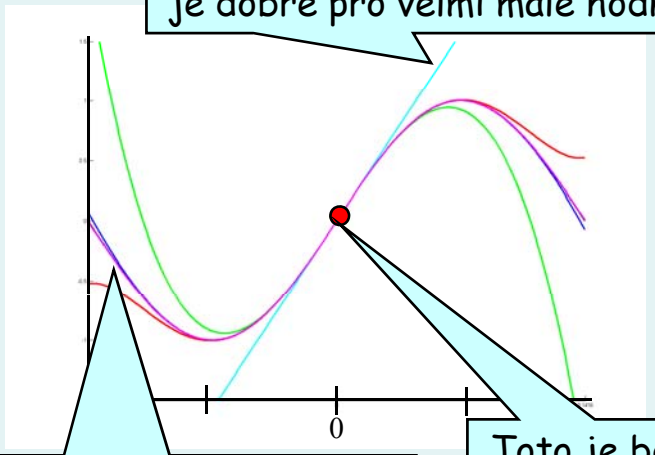
$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \frac{x^9}{9!} - \frac{x^{11}}{11!} + \dots$$

1. přiblížení

1. oprava

•••

Vidíme, že 1. přiblížení je dobré pro velmi malé hodnoty x.



5. přiblížení je velmi přesné na <-π,π>

Toto je bod, v jehož okolí sinus rozvíjíme.

Pro představu si dosaďme za x 60° do prvních pěti členů rozvoje:

$$\sin 60° = \sin \pi/3 \cong \sin 1{,}047198 \cong$$

$$\begin{aligned} &\cong 1{,}047\,198 \\ &- 0{,}191\,397 \\ &+ 0{,}010\,495 \\ &- 0{,}000\,274 \\ &+ 0{,}000\,004 \end{aligned}$$

3. přiblížení je už velmi dobré s přesností 1%.

5. přiblížení máme s přesností 10^{-6}.

Podobně můžeme napsat několik dalších rozvojů:

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots \qquad e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

$$\operatorname{tg} x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \frac{17x^7}{315} + \dots$$

logaritmus i odmocninu rozvineme v okolí 1:

$$\ln(1+x) = \frac{x}{1} - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$$

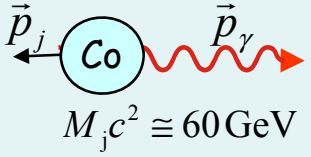
$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} - \frac{5x^4}{128} + \dots$$

Odvážní a poučení si spočítají rozvoj pro libovolnou funkci v bodě x_0:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \frac{f'''(x_0)}{3!}(x - x_0)^3 + \dots$$

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

Řešení poruchovou metodou si můžeme zkusit i na velmi jednoduchém příkládku: Jakou energii má foton vyzářený při přechodu mezi dvěma stavy jádra (A=60) s rozdílem energií ΔE=2 MeV?



No to je přece jasné: Eγ = ΔE = 2 MeV! To je jistě dobrá aproximace, ale foton má přece hybnost, hybnost se zachovává, jádro se odrazí na druhou stranu a na to spotřebuje kousínek energie. Pojďme spočítat **opravu k našemu prvnímu přiblížení.** Když foton odnáší energii Eγ = ΔE, pak také nese hybnost $p_\gamma = E_\gamma/c = \Delta E/c.$
Tuto hybnost odnáší také jádro $p_j = p_\gamma$ a jeho kinetická energie je:

$$E_j = \frac{p_j^2}{2M_j} = \frac{E_\gamma^2}{2M_j c^2}.$$

Díky tomu foton neodnese celou ΔE, ale jen

$$E_{\gamma,2} = \Delta E - \frac{E_{\gamma,1}^2}{2M_j c^2} = 2\,\mathrm{MeV} - \frac{2^2}{2\cdot 60\cdot 10^3}\,\mathrm{MeV} = 2\,\mathrm{MeV} - 0{,}000\,03\,\mathrm{MeV}.$$

zanedbatelné vůči 1. členu

Je vidět, že oprava je opravdu malá, „první přiblížení" nebylo vůbec špatné.

Standardní školní přístup je samozřejmě trochu jiný. Ideální student (chachacha) si situaci pořádně rozmyslí a hned vezme v úvahu všechny potřebné efekty. Napíše správně zákon zachování hybnosti a energie a příslušnou sadu rovnic hbitě vyřeší.

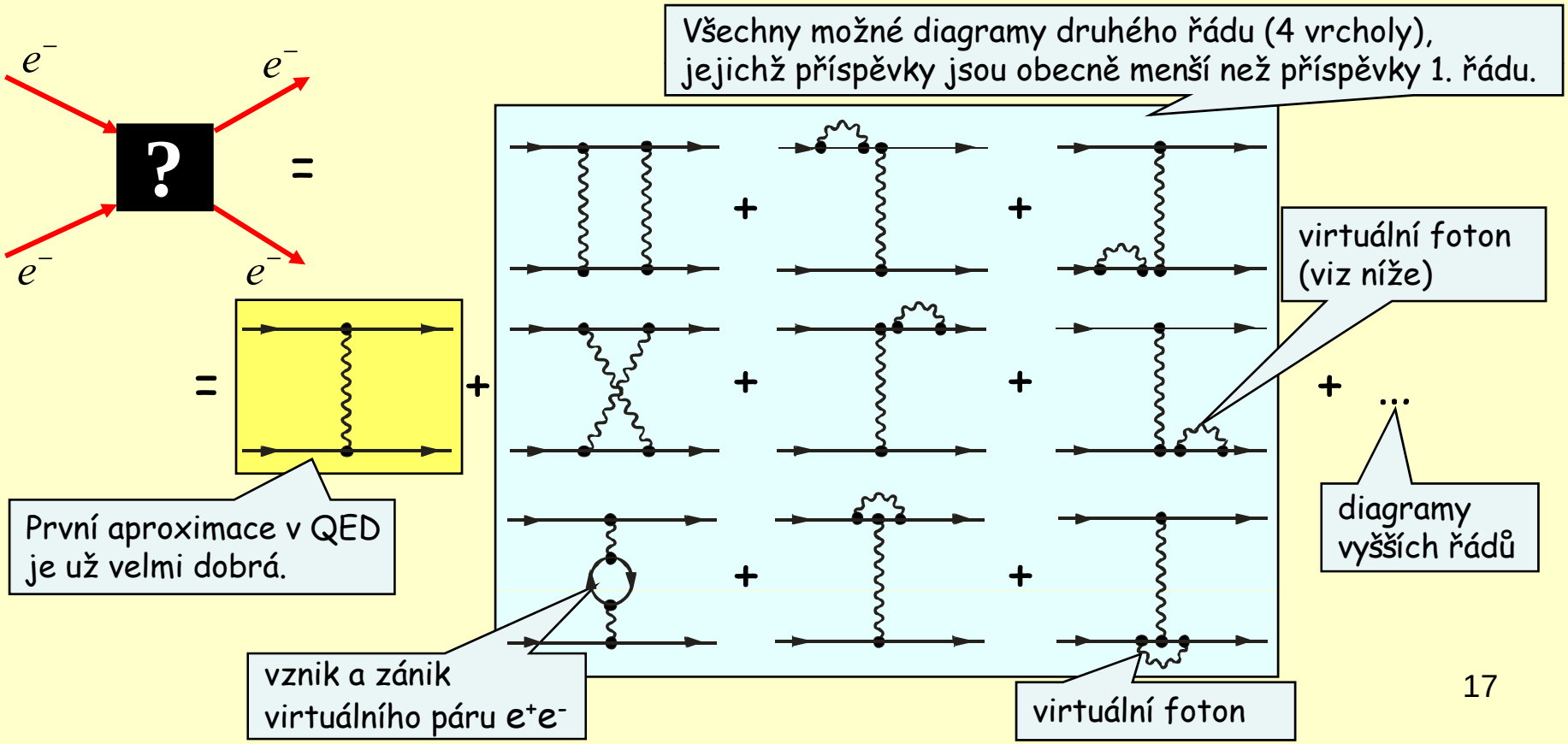
$$p_j = p_\gamma = E_\gamma/c$$
$$\Delta E = E_\gamma + E_j = E_\gamma + \frac{p_j^2}{2M_j} = E_\gamma + \frac{E_\gamma^2}{2M_j c^2} \quad \rightarrow \quad E_\gamma = M_j c^2\left(-1 \pm \sqrt{1 + \frac{2\Delta E}{M_j c^2}}\right)$$

Dosadí otrocky do obecného výsledku zadané hodnoty, vybere si kladné řešení a dostane správný výsledek $E_\gamma = 1{,}999\,97$ MeV. My raději rozvineme obecný výsledek podle vzorečku pro odmocninu na předcházejícím snímku a vidíme, že dostáváme opět první přiblížení, malou první korekci a další korekce, které je už zbytečné počítat.

$$E_\gamma \cong M_j c^2\left[-1 \oplus \left(1 + \frac{\Delta E}{M_j c^2} - \frac{\Delta E^2}{2M_j^2 c^4} + \ldots\right)\right] = \Delta E - \frac{\Delta E}{2M_j c^2} + \ldots$$

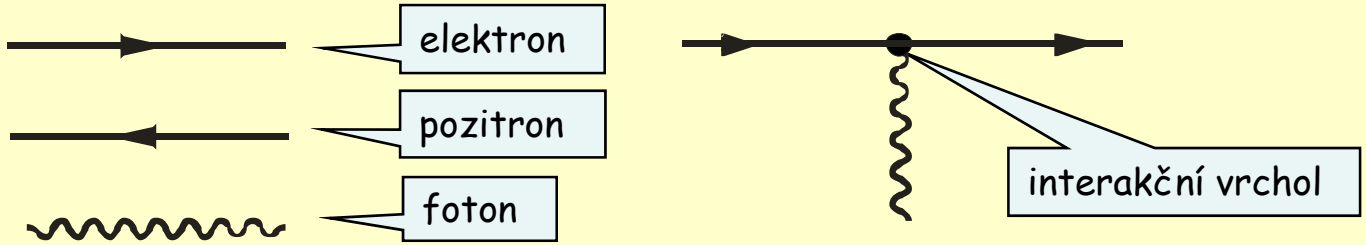
Feynmanovy diagramy – elektromagnetická interakce

Příkladem interakce, která dovoluje poruchový přístup a na které se celá tato technika ve čtyřicátých letech minulého století zrodila, jsou elektromagnetické interakce. Jejich teorii se říká kvantová elektrodynamika (QED).
Nejjednodušším příkladem děje, který musí kvantová elektrodynamika popsat, je interakce dvou elektronů. Podívejme se tedy na Feynmanovy diagramy, které vyplňují černou skříňku, do které dva elektrony vstupují a dva vystupují:

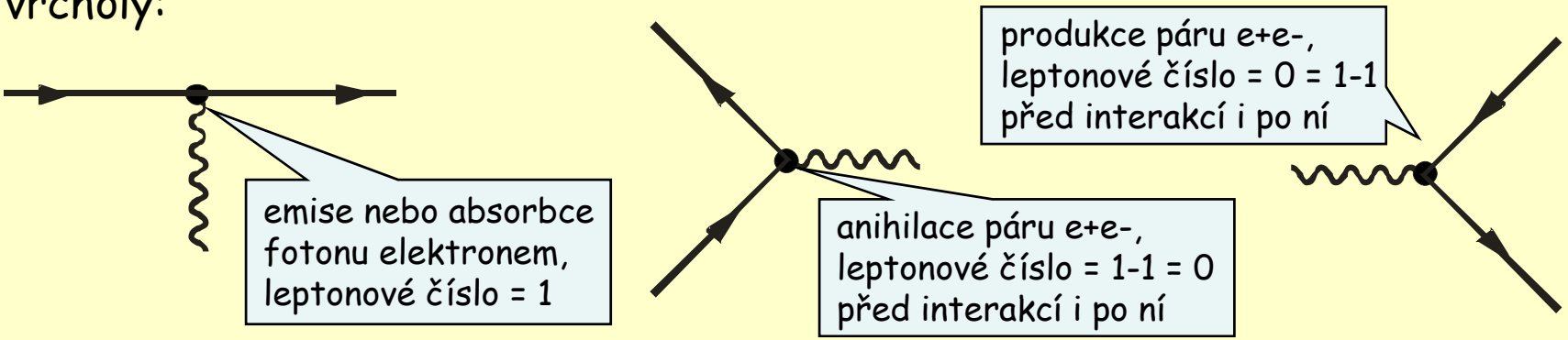


Feynmanovy diagramy – elektromagnetická interakce

Vidíme, že „konstrukční prvky" Feynmanových diagramů jsou:



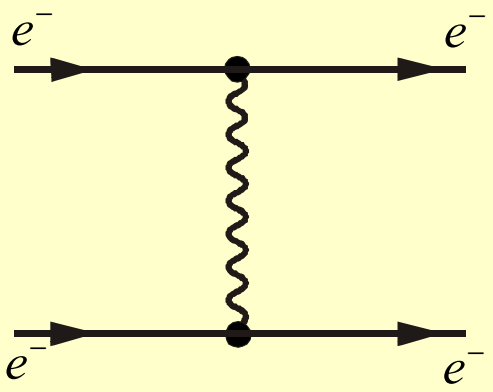
Feynmanovy diagramy se skládají z vnějších čar reprezentujících částice vstupující do interakce a vystupující z ní, vrcholů a případně dalších vnitřních čar spojujících vrcholy. Všimněte si, že fotony – zprostředkující částice – se rodí a zanikají na rozdíl od elektronů, které se zachovávají, přesněji: 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 – pružný rozptyl elektronů

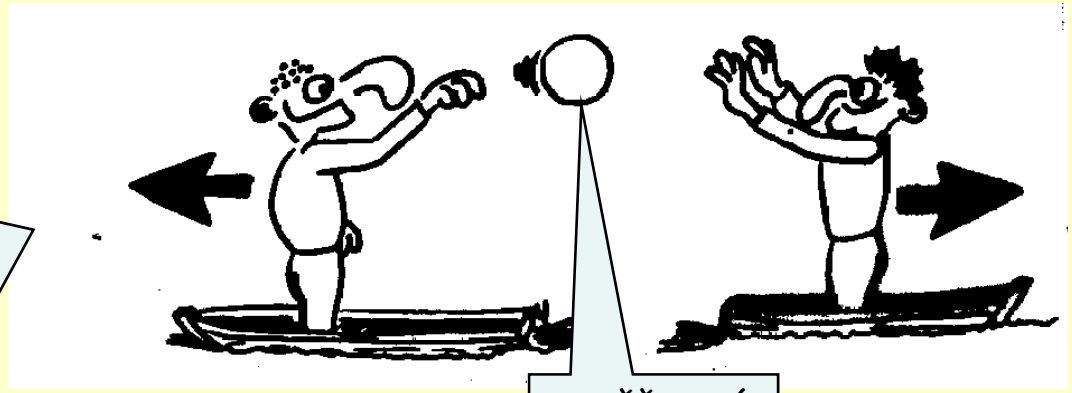
Elektronové čáry jsou spojené fotonovou čárou, proto říkáme, že **si elektrony vyměňují foton**. Jinak řečeno, jeden elektron vyzáří foton a druhý ho absorbuje, čímž se oba elektrony rozptýlí.



Částicím, které odpovídají vnitřním čarám, říkáme **virtuální částice**. Zde máme virtuální foton. **Virtuální částice žijí v černé krabičce a tedy nejsou vidět.** Řada diagramů na straně 17 ukazuje, že virtuálních částic může přispívat různý počet.
Virtuální částice trochu připomínají postavy v našich představách či snech. Poznáme je, můžeme o nich diskutovat, ovlivňují náš život, nemusí mít však všechny vlastnosti úplně reálné. Existují nebo neexistují? Do výpočtů kvantové teorie pole virtuální částice bezpochyby patří.

Oblíbenou a často používanou analogií výměny částice mezi dvěma objekty, která zprostředkovává interakci – předává hybnost a energii, je házení míče mezi dvěma chlapíky – hybnost udělená míči jedním je předána druhému (jestliže míč chytí nebo je jím trefen). Tak se díky přehazování míče chlapíci odpuzují.

Na vysvětlení přitažlivé síly je ovšem tato analogie krátká.



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

Počítání s Feynmanovými diagramy (Zde se opravdu, ale opravdu nelekejte!)

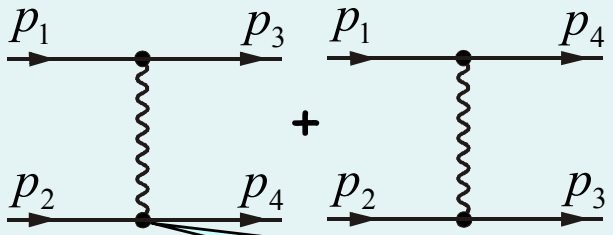
Na předchozích stránkách jsme viděli, že konkrétní Feynmanův diagram odpovídá určitému řádu poruchového rozvoje. Každý diagram představuje dílčí příspěvek k „elementu S-matice". Úplná S-matice je formálně součtem všech relevantních diagramů. Kvadrát absolutní hodnoty elementu S-matice vyjadřuje pravděpodobnost, že uvažovaný proces proběhne a lze z ní poměrně jednoduše vyjádřit nám již dobře známý účinný průřez.

pravděpodobnost rozptylu

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} = konst\,\frac{|S|^2}{(E_1+E_2)^2}$$

kvadrát energie elektronů

Jen pro ilustraci se podívejte, jak vypadá S-matice 1. řádu pro rozptyl dvou elektronů. Ještě se musíme přiznat k další komplikaci – kvůli nerozlišitelnosti elektronů musíme počítat ještě s diagramem, který má přehozené hybnosti.



Každému vrcholu odpovídá vazbová konstanta $g = \sqrt{\frac{e^2}{\varepsilon_0 \hbar c}} \approx 0{,}3$

integrace přes všechny hybnosti

člen odpovídající virtuálnímu fotonu

člen odpovídající elektronové čáře $p_1 - p_3$

člen odpovídající elektronové čáře $p_2 - p_4$

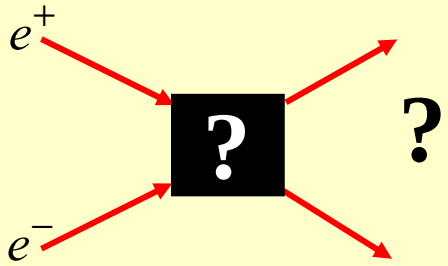
$$S = \int \frac{\mathrm{d}^4 k}{(2\pi)^4} \frac{-ig_{\mu\nu}}{k^\alpha k_\alpha + i\varepsilon}$$

$$\{\bar{u}(p_3,s_3)(-ig)(2\pi)^4\delta^4(p_1-p_3-k)\gamma^\mu u(p_1,s_1)\cdot\bar{u}(p_4,s_4)(-ig)(2\pi)^4\delta^4(p_2-p_4'+k)\gamma^\nu u(p_2,s_2) -$$
$$-\bar{u}(p_4,s_4)(-ig)(2\pi)^4\delta^4(p_1-p_2'-k)\gamma^\mu u(p_1,s_1)\cdot\bar{u}(p_3,s_3)(-ig)(2\pi)^4\delta^4(p_2-p_1'+k)\gamma^\nu u(p_2,s_2)\}$$

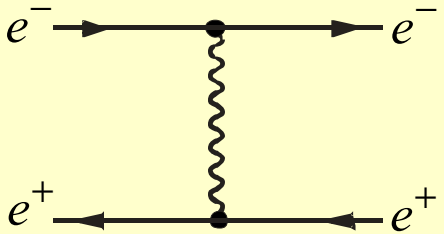
první řádka odpovídá prvnímu grafu, druhá druhému

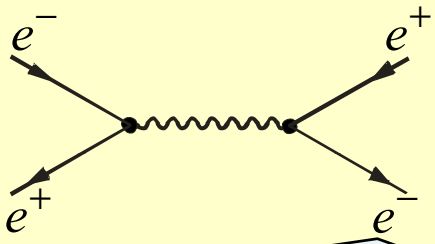
Feynmanovy diagramy – elektromagnetická interakce

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



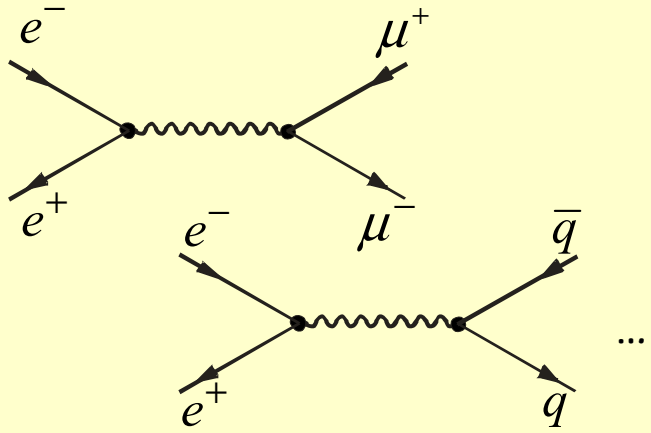
1) V koncovém stavu může být zase jeden elektron a jeden pozitron, navenek je to pružný rozptyl



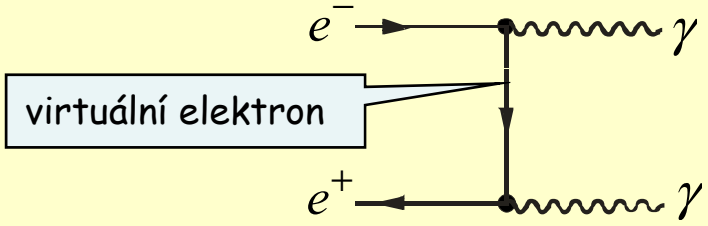


Anihilací elektronu a pozitronu vzniká virtuální foton, a z něho opět elektron a pozitron. Částice stejného druhu jsou nerozlišitelné a tak nikdo nepozná, že to nejsou původní elektron a pozitron.

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

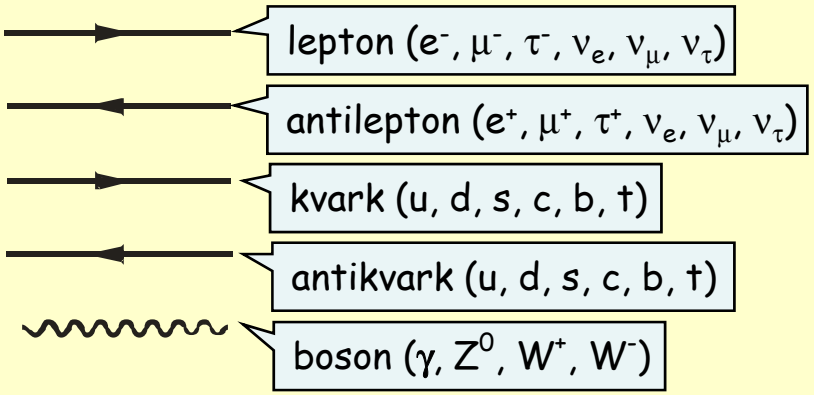


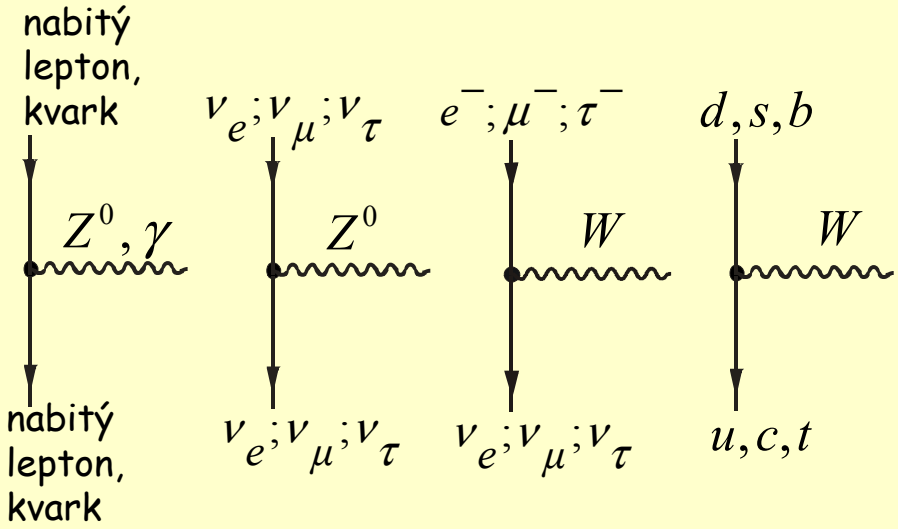
3) Výsledkem může být anihilace elektronu a pozitronu na dva fotony:

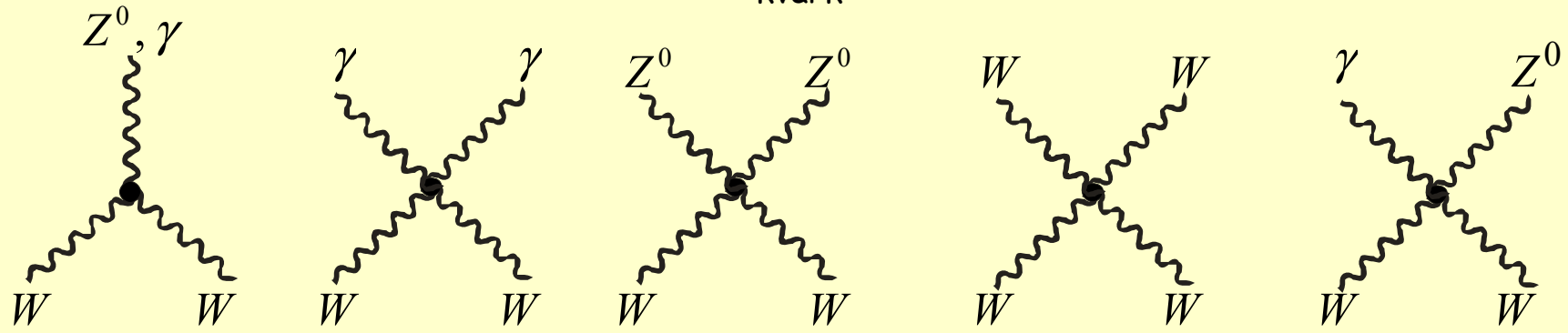


Feynmanovy diagramy – elektroslabá interakce

V teorii slabých (přesněji elektroslabých interakcí) hrají roli zprostředkujících částic γ, Z^0, W^+, W^-. Podívejme se na „konstrukční prvky" Feynmanových diagramů pro elektroslabou interakci:



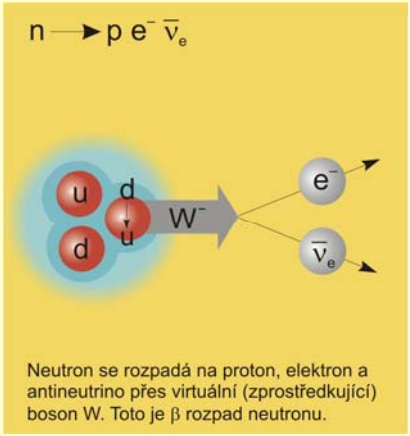


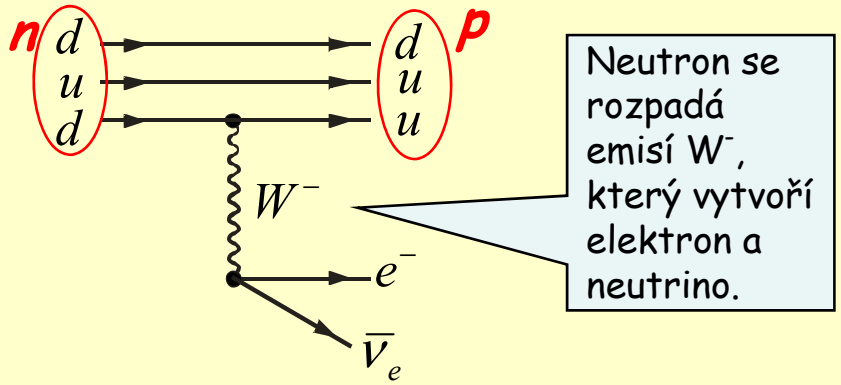


Znaménka bosonů W+ a W– jsou taková, aby se ve vrcholech zachovával elektrický náboj.

Feynmanovy diagramy – elektroslabá interakce

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





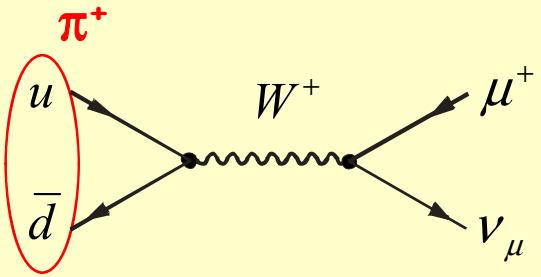
Další příklad slabé interakce:

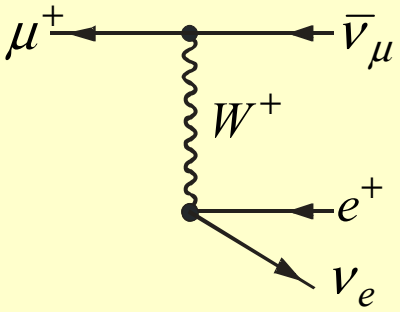
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

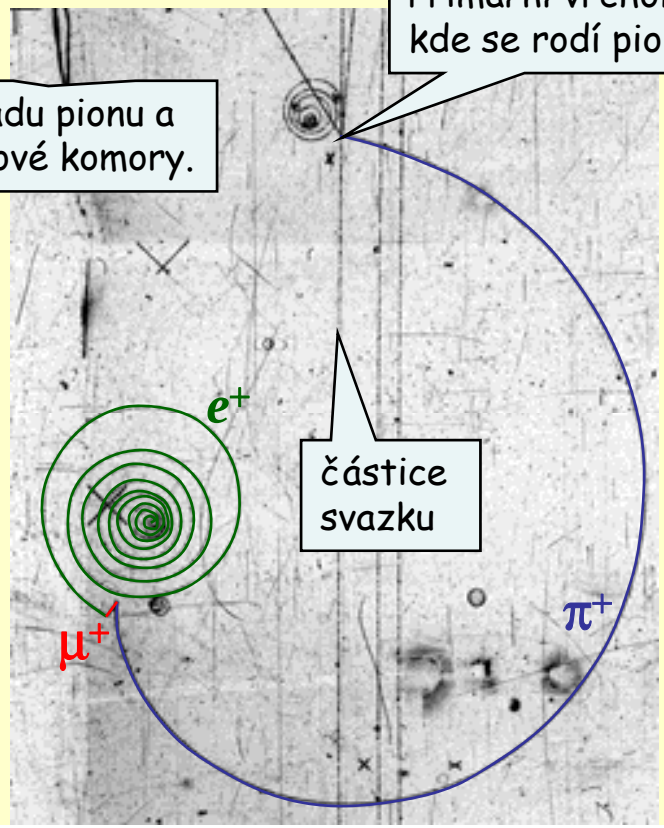
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

e^- (z prostředí)

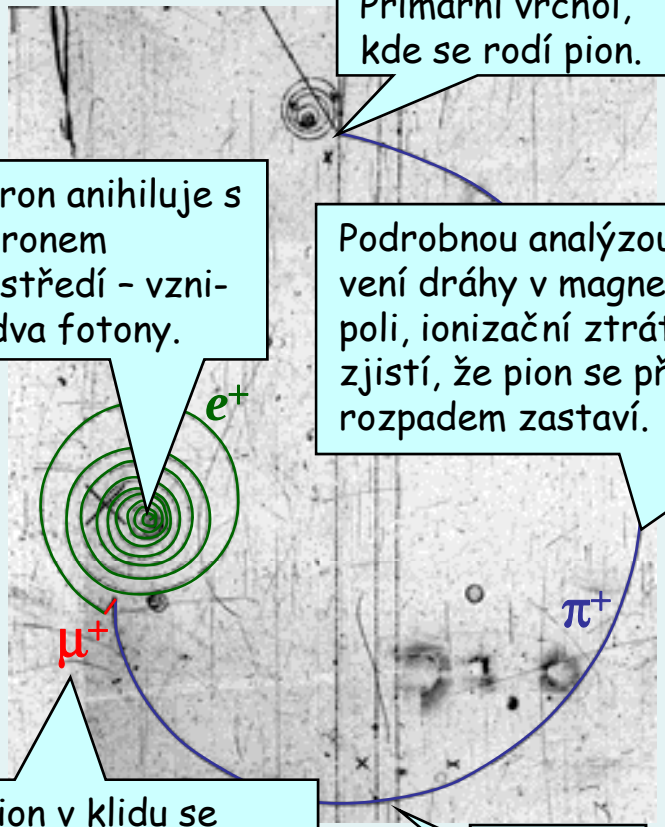






Stránky pro experty! Můžete je přeskočit, ale co to zkusit !

Podívejme se podrobněji na rozpad pionu na snímku z bublinové komory. Komora je umístěna v magnetickém poli, proto jsou dráhy nabitých částic zakřivené (částice ve svazku mají velkou energii, proto není zakřivení patrné).



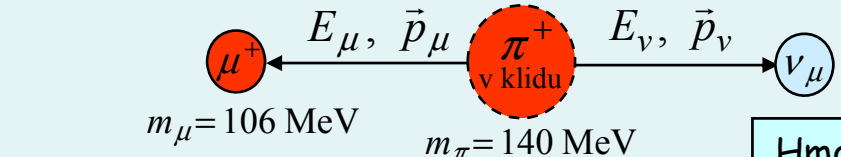
Primární vrchol, kde se rodí pion.

Pozitron anihiluje s elektronem z prostředí – vznikají dva fotony.

Podrobnou analýzou (zakřivení dráhy v magnetickém poli, ionizační ztráty) se zjistí, že pion se před rozpadem zastaví.

Pion v klidu se rozpadá na mion a mionové neutrino.

částice svazku



Pion je v klidu.

$$0 = \vec{p}_\mu + \vec{p}_\nu$$

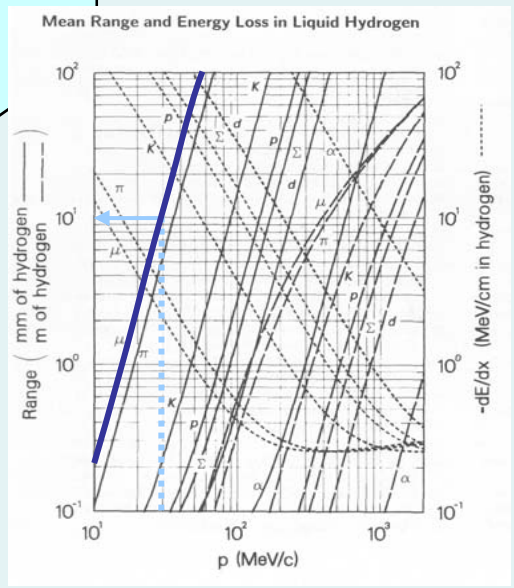
$$m_\pi c^2 = E_\mu + E_\nu = E_\mu + p_\nu c$$

Hmotnost neutrina je zanedbatelná

$$p_\nu = p_\mu$$

$$m_\pi c^2 = \sqrt{m_\mu^2 c^4 + p_\mu^2 c^2} + p_\mu c$$

$$p_\mu c = \frac{m_\pi^2 c^4 - m_\mu^2 c^4}{2 m_\pi c^2} \cong 30 \text{ MeV}$$



Mion i neutrino vylétávají z rozpadu s hybností 30 MeV.

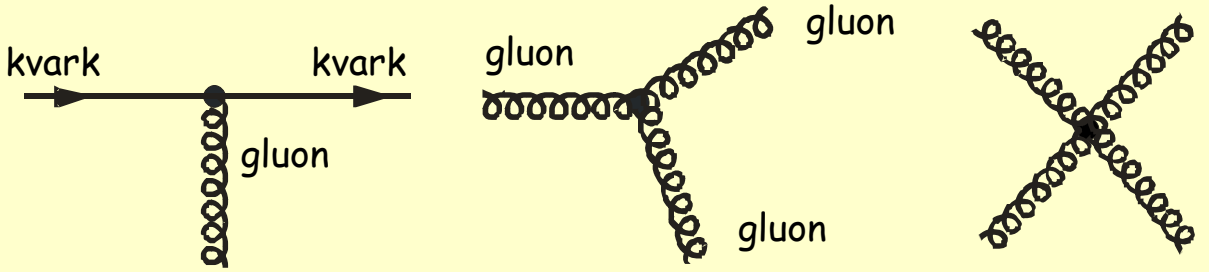
Z grafu doletu můžeme odhadnout, že mion s touto hybností urazí ve vodíkové komoře dráhu přibližně jen jeden milimetr.

Feynmanovy diagramy – silná interakce

Interakci mezi kvarky zprostředkovává 8 druhů gluonů. Gluony jsou většinou „dvoubarevné" – nosí jednu barvu a jednu antibarvu na rozdíl od fotonů, které nepřenáší žádný náboj, dva jsou ale komplikovaněji „zmalované", neboť teorie silné interakce - kvantová chromodynamika (QCD) – je přece jen trochu komplikovanější než povídání o barvách.

Ve srovnání s předcházejícími teoriemi je počítání v QCD obtížnější: Poruchový přístup je použitelný jedině ve specifických podmínkách, speciálně v procesech, kde si kvarky vyměňují velkou hybnost. Tehdy můžeme pracovat opět s Feynmanovými diagramy:

Základní vrcholy QCD:

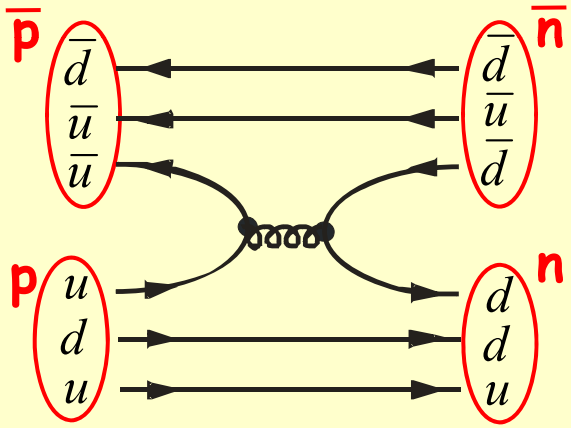


Takové problémy, jako například popis silná interakce nukleonů v jádrech a jaderných reakcích nebo vysvětlení struktury hadronů, poruchově zvládnutelné nejsou a jen pomalu se nacházejí a zdokonalují techniky, jak tyto problémy řešit.

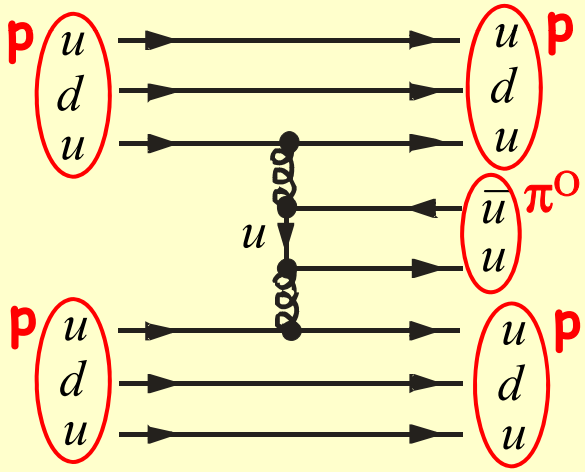
Feynmanovy diagramy – silná interakce

Podstatné je to, že například proton není jen trojice kvarků, ale spíše komplikovaný slepenec kvarků, gluonů a virtuálních kvark-antikvarkových párů, kde všechno se vším interaguje. Následující ilustrační diagramy tak mají jednoduchou poruchovou část, ve které vystupují tři kvarky v protonu, a symbolické červené oválky pro hadrony, jejichž nitru ne úplně rozumíme.

$p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{n}$

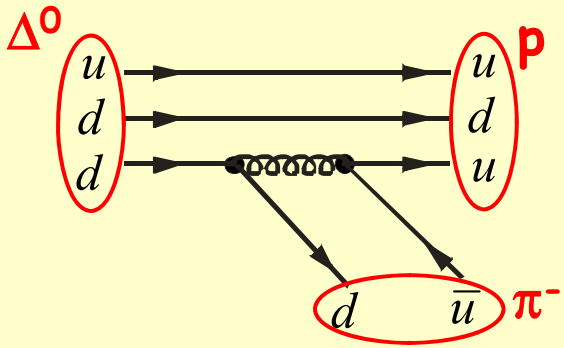


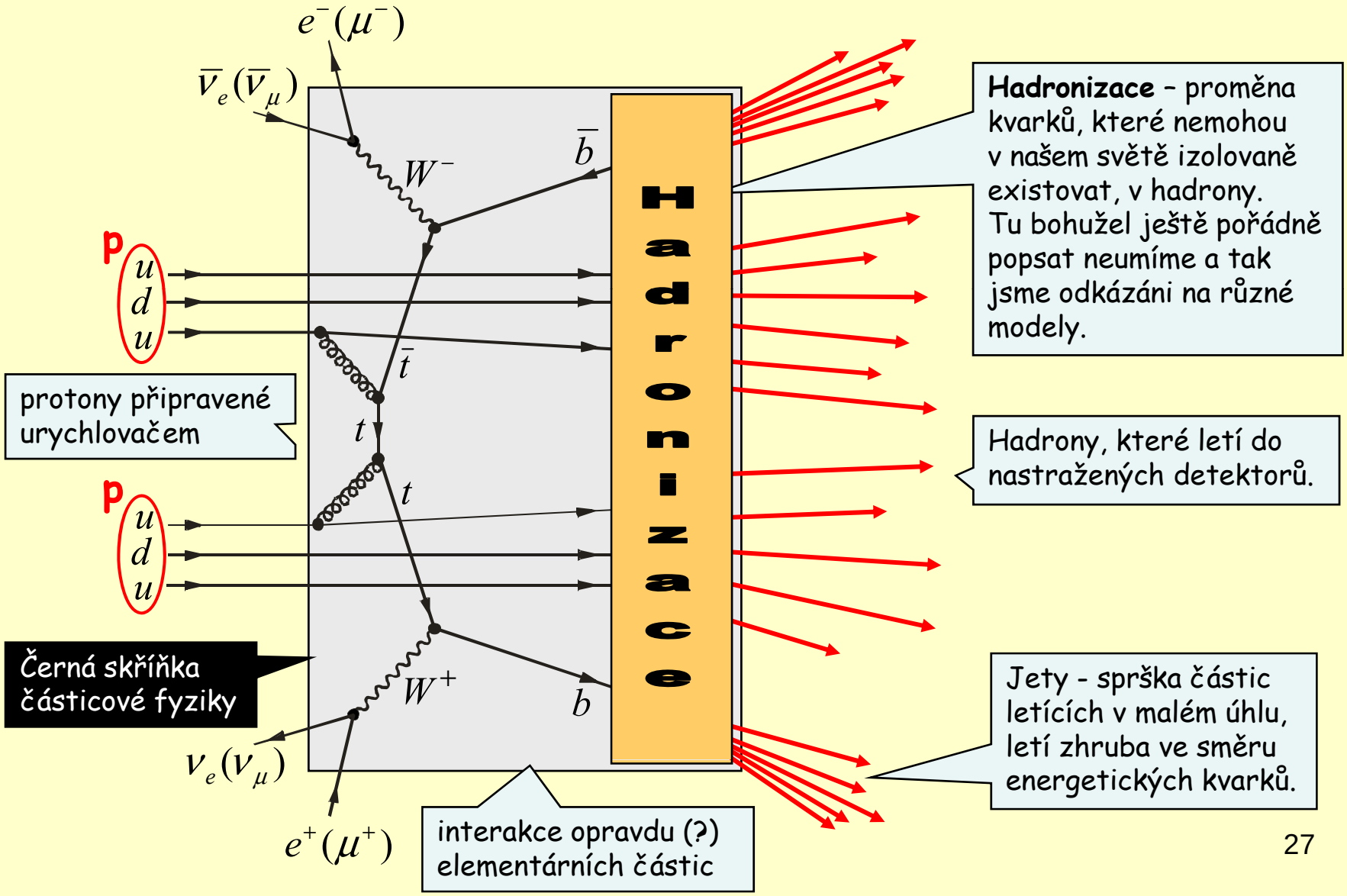
$p + p \rightarrow p + p + \pi^0$



Produkce pionu ve srážce dvou protonů.

$\Delta^0 \rightarrow p + \pi^-$



Částice se mohou rozpadat díky slabé, elektromagnetické i silné interakci.
Δ^0 se rozpadá silně, proto velmi rychle, řádově za 10^{-23} s.

Jedna srážka protonů na LHC