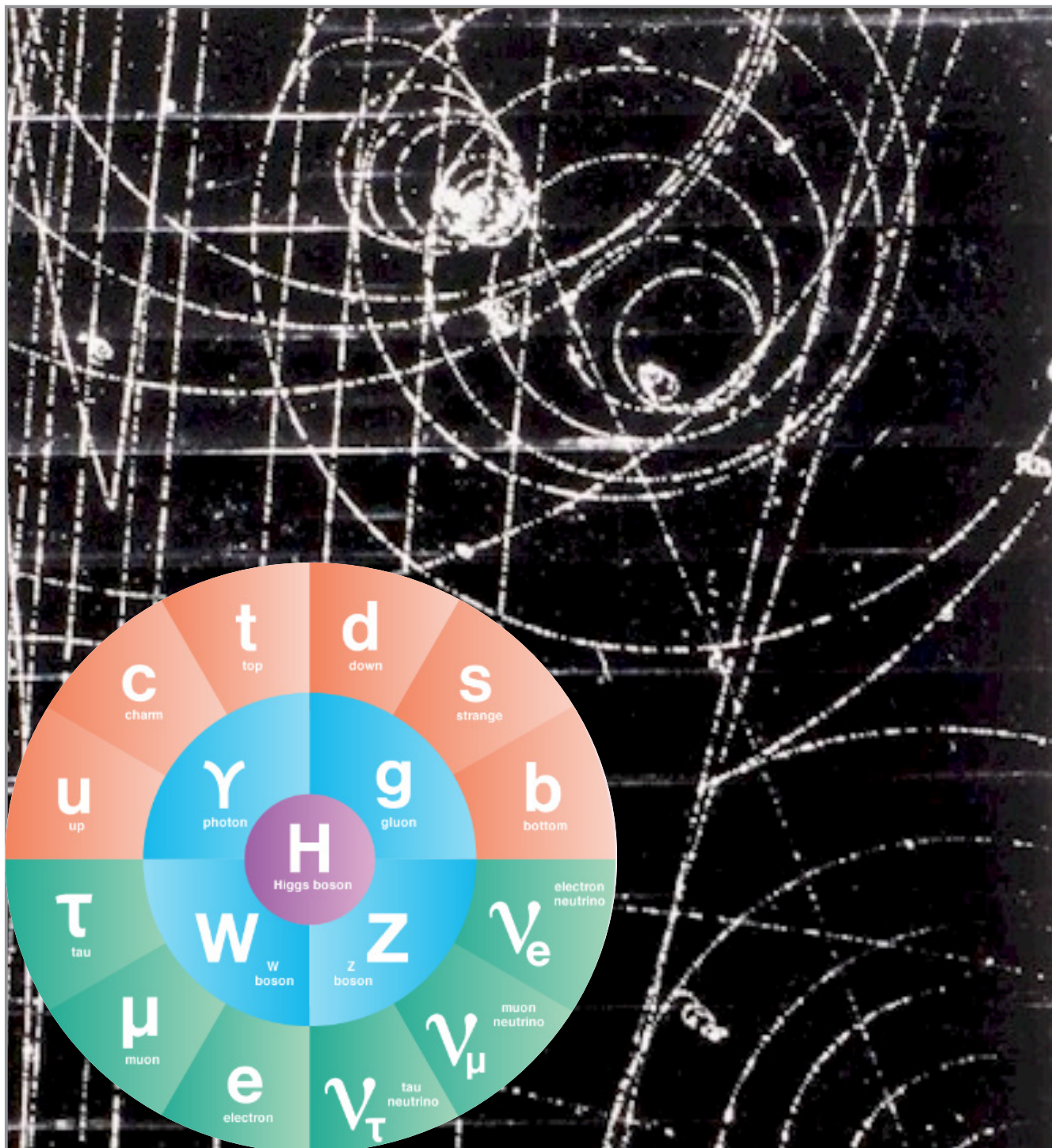


ELEMENTÁRNÍ ČÁSTICE A STANDARDNÍ MODEL



Gymnasium F. X. Šaldy
Liberec
Honsoft 2020

FYSIKA
pro 4. ročník

SEMINÁŘ
z fyziky

Obsah

ÚVOD

- Tabulky elementárních částic 6
- O vůních a barvách 6

SPIN

- Sternův-Gerlachův pokus 7
- Definice spinu 7
- Spin a symetrie 8

SYSTEM ČÁSTIC

- Dělení částic podle spinu 9
- Dělení částic podle interakce 10
- Dělení na částice a antičástice 10
 - Shrnutí 11
- Základní skupiny částic 11

ČÁSTICE LÁTKY

- Leptony 12
- Kvarkový model & Eightfold Way 13
 - Kvarky 15
 - Shrnutí 16

VELIČINY A ZÁKONY

- Veličiny popisující částice 17
- Zákony zachování v mikrosvětě 17

INTERAKCE

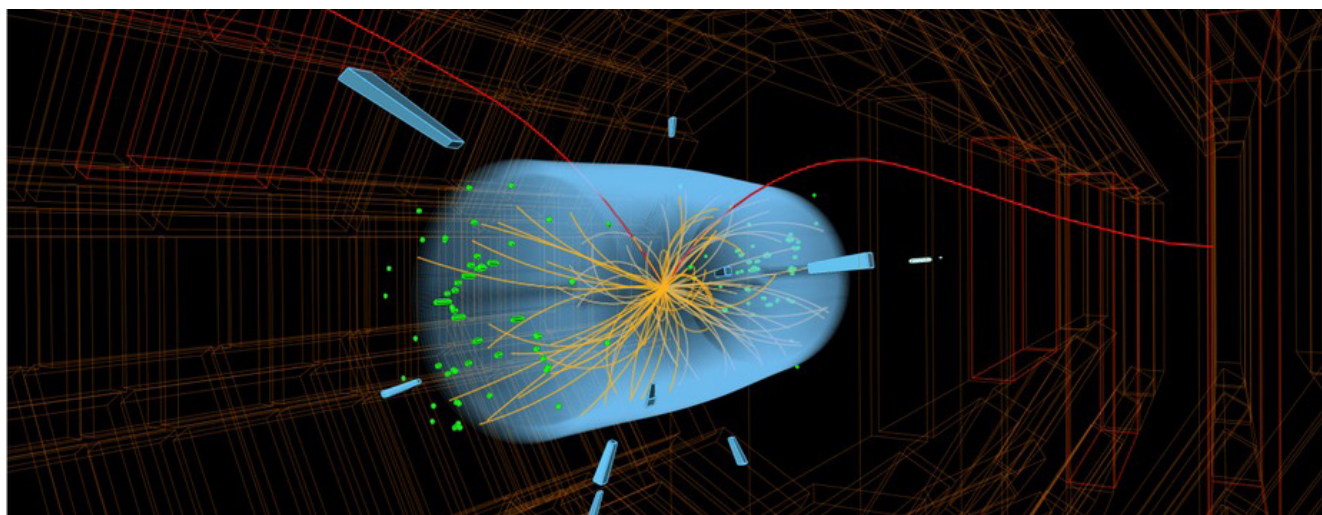
- Elektromagnetická interakce 20
- Slabá interakce 20
- Silná interakce 21
- Gravitační interakce 21

VELKÉ SJEDNOCENÍ

- Elektromagnetická interakce 22
- Elektroslabá interakce a Higgsův boson 22
- Teorie velkého sjednocení 22
 - Teorie všeho 23
- Počáteční supersymetrie 24
- Standardní model 24

LITERATURA

- „Vykradená“ & použitá literatura 25
- Zdroje číslovaných obrázků 25
- Zdroje ostatních obrázků 25





Úvod



Fysika mikrosvěta
Studijní materiály
Gymnasia F. X. Šaldy

Kvantová fyzika

Od Demokrita ke kvarkům
 Experimentální východiska
 kvantové fyziky
 Nový fyzikální obraz světa
 Atomová fyzika

Jaderná fyzika

Stavba a energie jádra
 Radioaktivita
 Jaderné reakce

Elementární částice

Elementární částice
 a standardní model
 Urychlovače a detektory částic

Tento učební text (na rozdíl od jiných spisů téže školní edice) nepřináší nově uspořádaný výklad. Není ani *kompilací* odborných textů, spíše jde o *koláž* osvědčených výkladů zejména z [Hal5], [Ald] a z [TČ]. Z těchto zdrojů jsou někdy (s drobnou úpravou) převzaty celé odstavce. Text tak slouží pro pohodlí studentů; prostudují jej snadněji, než rozsáhlejší texty původní. Ty mohou – v případě zájmu – sloužit k dalšímu vzdělávání.

Studijní text je nutno číst aspoň dvakrát; pojmy na začátku textu jsou ilustrovány příklady z konce textu, což při prvním čtení nemá (pro nepoučeného čtenáře) smysl. Úlohy, otázky a problémy nejsou v tomto textu zařazeny; čtenář je najde v samostatné sbírce úloh.

Pro studijní materiál nebyly vytvořeny nové ilustrace, ale přiznané jsou převzaty ilustrace z původních zdrojů. Anglické psané popisky nejsou překládány; vzhledem k tématu studijního materiálu není na konci připojen (v naší edici obvyklý) česko-anglický slovníček, ale anglické ekvivalenty jsou uváděny přímo v textu. Mnohé pojmy ostatně smysluplný a užívaný český název vůbec nemají. Elektronická verze materiálu obsahuje aktivní odkazy na videozáznamy, animace a webové stránky.

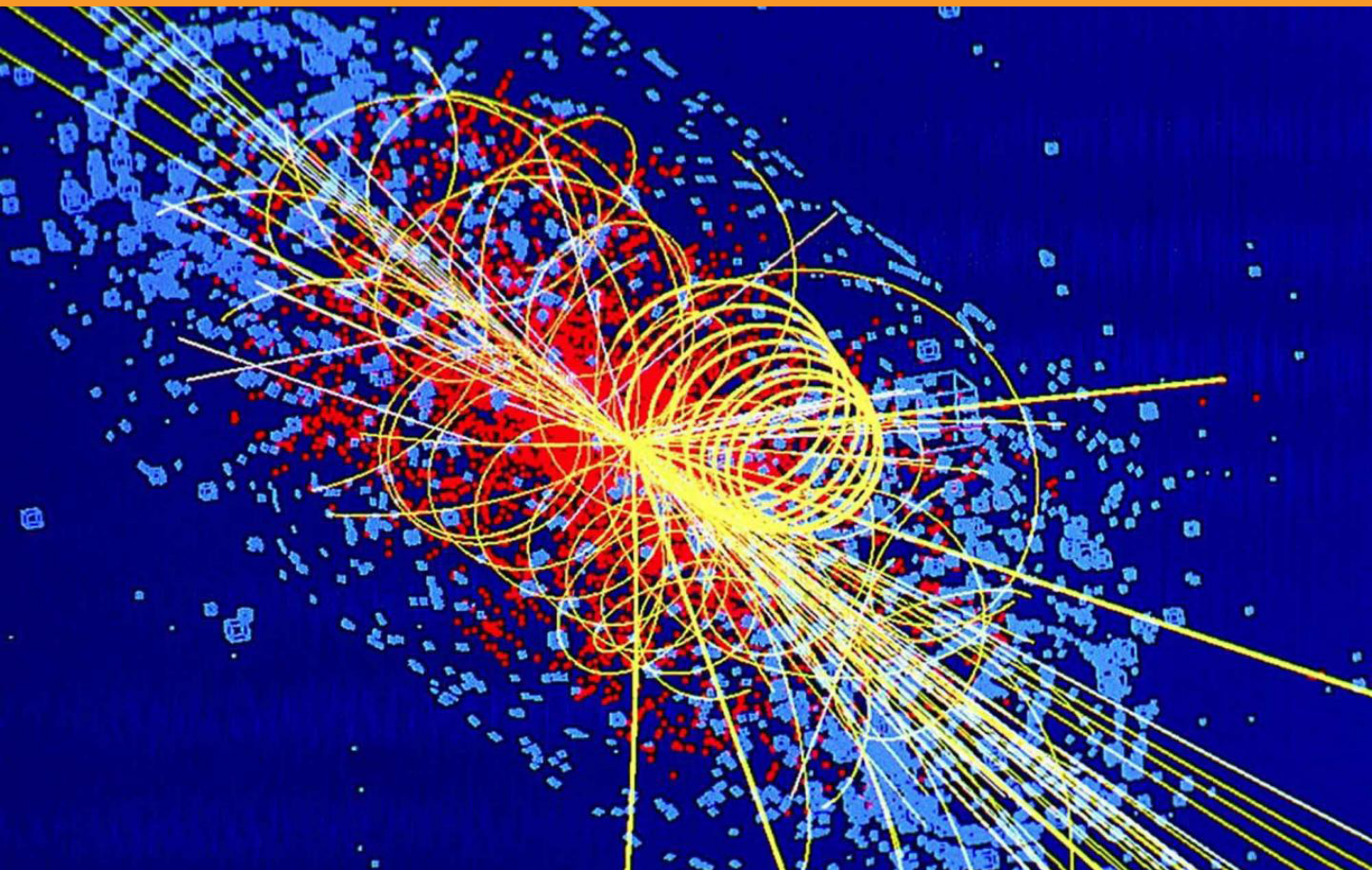
Tento text je spolu se studijním materiálem *Urychlovače a detektory částic* základní (a doporučenou) literaturou k přípravě na 10. maturitní otázku Gymnasia F. X. Šaldy *Elementární částice*. I při maturitní zkoušce je dovoleno užití tabulek uvedených na s. 6.

První verze tohoto textu vznikla v roce 2007; v roce 2020, během II. dějství „výuky za časů koronaviru“ byl text aktualizován, doplněn a v některých pasážích naopak zestručněn.

Editor textu není *částicovým fyzikem*, ba vůbec není *fyzikem* – je „jen“ *fyzikářem*. Proto rád přijme všechny opravy, nápady a náměty, jak některé téma či pojem vyložit lépe – ovšem nikoliv složitěji...

–jvk–

V Liberci 25. 12. 2020



Setkáme se s množstvím nových pojmů a skutečnou záplavou částic. Jestliže budete na chvíli zmateni, budete jen sdílet zmatení těch fyziků, kteří tento vývoj prožívali a kteří často neviděli nic jiného než narůstající složitost s malou nadějí na pochopení. Jestliže ale vytrváte, budete také sdílet nadšení, které fyzikové pociťovali, když báječné nové urychlovače chrlily nové výsledky a když teoretici předkládali nové myšlenky, stále odvážnější a odvážnější, až konečně ze zmatku vyvstal jasný obraz.

D. Halliday – R. Resnick – J. Walker: Fysika

La mode c'est ce qui se démode.

Coco Chanel



Areál CERN



Satelitní pohled na Fermilab



Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Ve třicátých letech 20. století bylo nemálo fyziků, kteří se domnívali, že bádání o základech struktury hmoty je na nejlepší cestě k vyřešení. K pochopení atomu stačily tři částice: elektron, proton a neutron. Kvantová teorie uměla počítat strukturu atomu a radioaktivní rozpad β . K tomu přibýlo předpokládání, ale tehdy ještě nepozorované neutrino. Nadšení však nevydrželo dlouho. Začala doba objevů nových a nových částic, která trvá dodnes. Nové částice dostaly jména a označení jako mion, π -mezón (pion), K-mezón (kaon) a Σ -baryon. Všechny tyto nové částice jsou nestabilní, jejich střední doba života leží v intervalu od 10^{-6} s do 10^{-23} s. Tato poslední hodnota je tak malá, že existenci takové částice můžeme ověřit jen nepřímými metodami. Zmíněné částice se vytvářejí při srážkách mezi protony nebo elektrony urychlenými na vysoké energie v urychlovačích v laboratořích jako CERN (poblíž Ženevy), Fermilab (blízko Chicaga), SLAC (ve Stanfordu) a DESY (nedaleko Hamburku).

TABULKY ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC

Během studia bude vhodné, ba spíše nutné mít při sobě vhodnou tabulku elementárních částic, a všechny částice, o nichž se v textu píše, v tabulce vyhledávat a řadit do systému. Doporučit lze zejména dvě tabulky: téměř ikonickou tabulku projektu *The Contemporary Physics Education Project* (existuje česká verze; nová anglická verze je dostupná na webu projektu [CPEP]) a českou (původně slovenskou) tabulku z publikace [TČ], tabulku v mnohém názornější a přehlednější.

Systém elementárních částic

SYSTÉM ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC											
FUNDAMENTÁLNÍ ČÁSTICE – nemají vnitřní strukturu (ř. nepoužíte z příloh částic)											
LEPTONY				KVAŘKY				ZPŮSOBUJÍCÍ ČÁSTICE			
Leptony jsou lehké, mají spin 1/2.				Kvařky a antikvařky jsou lehké, mají spin 1/2.				Způsobující částice jsou bosony, mají spin 1.			
Částice a její symbol	hmotnost [eV]	elektrický náboj [e]	barvový náboj [1/3]	Částice a její symbol	hmotnost [eV]	elektrický náboj [e]	barvový náboj [1/3]	Částice a její symbol	hmotnost [eV]	elektrický náboj [e]	spin
elektron e^-	$0.511 \cdot 10^6$	-1	0	elektron e^-	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0
elektron e^+	$0.511 \cdot 10^6$	+1	0	elektron e^+	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0
neutrino ν_e	$< 1.10^{-6}$	0	0	elektron e^-	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0
neutrino $\bar{\nu}_e$	$< 1.10^{-6}$	0	0	elektron e^+	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0
neutrino ν_μ	$< 1.10^{-6}$	0	0	elektron e^-	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0
neutrino $\bar{\nu}_\mu$	$< 1.10^{-6}$	0	0	elektron e^+	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0
neutrino ν_τ	$< 1.10^{-6}$	0	0	elektron e^-	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0
neutrino $\bar{\nu}_\tau$	$< 1.10^{-6}$	0	0	elektron e^+	$< 10^4$	0	0	gluon g	0	0	0

Doporučené tabulky elementárních částic

Vpravo tabulka projektu CPEP, vlevo tabulka z publikace [TČ].



Nová verze tabulky CPEP v seriálu *The Big Bang Theory*

Standardní model: ZÁKLADNÍ ČÁSTICE A INTERAKCE

Standardní model fyziky obsahuje částice (částicová fyzika) a to kvarky, lepty, která patříme ke třem silným interakcím (silná, elektromagnetická, slabá) a čtyřem základním interakcím, když není součástí „standardního modelu“ (gravitační, silná, slabá, elektromagnetická).

FERMIONY			stavební kameny hmoty			BOSONY		
Lepton	hmotnost GeV/c ²	elektrický náboj	Kvařky	Přibližná hmotnost GeV/c ²	spin = 1/2	Sjednocená elektroslabá síla	Elektrický náboj	Silná
ν_e elektronové neutrinum	$< 10^{-6}$	0	U up	0.0023	2/3	W^+	80.4	-1
e^- elektron	0.000511	-1	d down	0.0048	-1/3	W^0	80.4	+1
ν_μ muonové neutrinum	< 0.00002	0	C charm	1.3	2/3	Z^0	91.188	0
ν_τ tauonové neutrinum	0.106	-1	S strange	0.1	-1/3	g gluon	0	0
τ^- tauon	1.777	-1	t top	175	2/3			
			b bottom	4.3	-1/3			

VLASTNOSTI INTERAKCÍ

Sílka	Barvony a silná interakce		Gravitační		Elektromagnetická		Slabá	
	částice	hmotnost	částice	hmotnost	částice	hmotnost	částice	hmotnost
Silná	gluon	0	graviton	0	photon	0	W, Z	80, 91
Elektromagnetická	photon	0	graviton	0	photon	0	W, Z	80, 91
Slabá	W, Z	80, 91	graviton	0	photon	0	W, Z	80, 91

Hledá se antihmotu
Každému typu částice existuje odpovídající typ antičástice. Hledá se antihmotu pro všechny částice standardního modelu. Částice (pokud není součástí symbolu označení náboje + nebo -) částice a antičástice mají stejnou hmotnost a spin, ale opačný náboj. Některé elektricky neutrální bosony (např. Z^0 a γ), nedi, avšak, mají K^0 a \bar{K}^0 dva typy samy sobě antičástic.

Částice
Třetí dimenze jsou pouze vyjádřením zobrazování fyzikálních procesů. Některé částice se přeměňují na jiné částice prostřednictvím silných, slabých, elektromagnetických a gravitačních interakcí. Často se vyskytují v párech (částice a antičástice) nebo v párech (částice a částice).

Interakce
Interakce jsou způsobeny výměnou částic. Často se vyskytují v párech (částice a antičástice) nebo v párech (částice a částice).

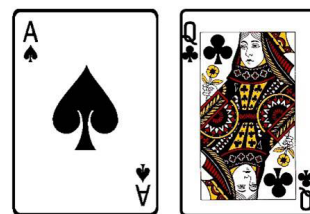
Struktura atomu
Atom je tvořen jádrem, které obsahuje protony a neutrony, a elektrony, které obíhají kolem jádra. Jádro má velikost $\sim 10^{-14}$ m, zatímco atom má velikost $\sim 10^{-10}$ m.

Standardní model fyziky
Standardní model fyziky obsahuje částice (částicová fyzika) a to kvarky, lepty, která patříme ke třem silným interakcím (silná, elektromagnetická, slabá) a čtyřem základním interakcím, když není součástí „standardního modelu“ (gravitační, silná, slabá, elektromagnetická).

PROLOG O VŮNÍCH A BARVÁCH

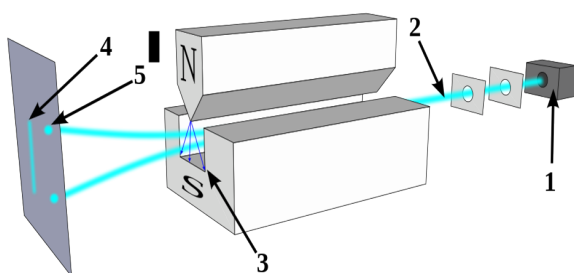
Úvodní citace výroky módní návrhářky Coco Chanel je možná poněkud nezapná, nikoliv však samoučelná. Ve fyzice elementárních částic především se stává, že co „nyní psáno, už neplatí“. – Zmíněná dáma přinesla světu módy černé koktejly či sukně pod kolena, především však snoubení vůni a barev. A vůně a barva jsou – jak dále uvidíme – základními pojmy fyziky elementárních částic...

Spin



STERNŮV-GERLACHŮV POKUS

Pojem **spin**, čtenářům známý z chemie, je spojen s experimentem, který v roce 1922 provedli OTTO STERN a WALTER GERLACH. Aparatura (OBR. 1) je umístěna ve vakuu. V elektrické pídce (1) se vypařuje stříbro; jednotlivé atomy vycházejí úzkou štěrbinou ve stěně pece, procházejí soustavou štěrbin (2) a vytvářejí úzký svazek. Svazek dále prochází nehomogenním magnetickým polem, které vytvářejí pólové nástavce elektromagnetu upravené do specifického („špičatého“) tvaru (3), a dopadá na skleněnou detekční desku.



OBR. 1

Před zapnutím magnetického pole je na stínítku jediná stopa. Je-li elektromagnet vypnut, prochází svazek ke skleněné desce bez vychýlení. Podle klasické fyziky se očekávalo, že po zapnutí magnetického pole se svazek spojitě rozptýlí (stopa (4) na stínítku), protože orientace spinů různých atomů stříbra vůči magnetickému poli je zcela nahodilá. Svazek se však rozdělil na dva a na stínítku vytvořil dvě ostré stopy (5) odpovídající opačným znaménkům spinu valenčního elektronu atomu stříbra.

Částice se spinem se totiž chová jako malý magnet. Výsledná síla, působící na částici v nehomogenním magnetickém poli, závisí na orientaci spinu částice. Atom stříbra má 47 elektronů, ale pouze jeden z nich je elektron valenční. Tento valenční elektron určuje výsledný magnetický moment konkrétního atomu, protože momenty ostatních částic v atomu stříbra se vyruší.

DEFINICE SPINU

Všechny elementární částice mají **vlastní moment hybnosti** nazývaný **spin**. Pro složku spinu S_z v libovolném směru (např. ve směru osy z) platí:

$$S_z = m_s \hbar \text{ pro } m_s = s, s-1, \dots, -s, \quad (1)$$

kde \hbar je redukovaná Planckova konstanta $\hbar = h/2\pi$, m_s je spinové magnetické kvantové číslo a s je spinové kvantové číslo. Číslo s nabývá buď poločíselných ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$), nebo celočíselných ($0, 1, 2, 3, \dots$)



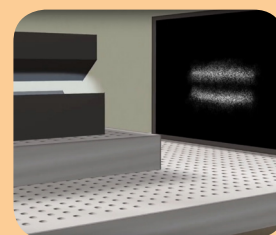
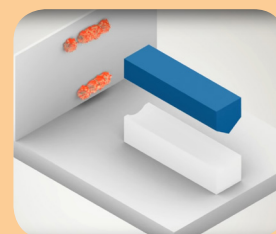
Sternův-Gerlachův pokus

Schéma pokusu na pamětní tabuli. Der Physikalische Verein, Gesellschaft für Bildung und Wissenschaft, Frankfurt am Main.



Joseph John Thomson

Objevitel elektronu v katodovém záření.



ANIMACE

${}^6\text{C}$: [He]	2s	$\uparrow\downarrow$	2p	\uparrow	\uparrow	
${}^{14}\text{Si}$: [Ne]	3s	$\uparrow\downarrow$	3p	\uparrow	\uparrow	
${}^{26}\text{Fe}$: [Ar]	4s	$\uparrow\downarrow$	3d	$\uparrow\downarrow$	\uparrow	\uparrow
${}^{47}\text{Ag}$: [Kr]	5s	$\uparrow\downarrow$	4d	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$

Zaplňování orbitalů elektronů

Zaplňování je popsáno třemi pravidly studovanými v chemii: princip minima energie dané elektronové konfigurace; Pauliho vylučovací princip; Hundovo pravidlo.



Emmy Noether

Symetrie je neměnnost (invariantnost) těles, rovinných geometrických útvarů nebo rovnic vůči transformaci souřadnic.

Symetrie tělesa je určena množinou všech transformací, které převádějí dané těleso v samo sebe. Tyto transformace lze popsat jako složení tří typů transformací (otočení, posunutí, zrcadlení).

Symetrie rovnic (fyzikálních zákonů) vyjadřuje, že tyto rovnice (zákony) se nemění při transformaci souřadnic, času či polí. Symetrie tak souvisí s homogenitou či isotropií prostoru, resp. homogenitou času. EMMY NOETHEROVÁ ukázala, že zákon zachování hybnosti je důsledkem homogenity prostoru, zákon zachování energie důsledkem homogenity času.

Symetrie se studují pomocí grup. Matematická teorie grup tak nachází uplatnění nejen ve fyzice mikrosvěta, ale např. v popisu symetrií krystalových soustav.

hodnot. Spin elektronu měřený v průmětu do libovolného směru nabývá tedy hodnot

$$S_z = 1/2\hbar, \text{ resp. } S_z = -1/2\hbar; \quad (2)$$

stručně říkáme „spin nahoru“, resp. „spin dolů“.

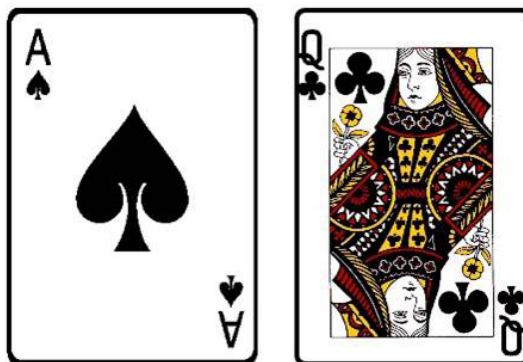
Výraz „spin“ se tedy užívá ve dvou různých významech: správně označuje vlastní moment hybnosti částice \mathbf{S} , ale často se také užívá k označení spinového kvantového čísla s částice. Proto běžně říkáme, že „elektron má spin $1/2$ “, i když striktně vzato je spin elektronu určen jednou z rovností (2).

A ještě varování: Nezaměňme spin \mathbf{S} s podivností S , o které pojednáme dále.

SPIN A SYMETRIE

Některá zjednodušení ve výuce chemie, mnohdy navíc podpořená prezentací planetárního modelu atomu, vytvářejí mylný dojem, že spin popisuje rotaci částice „podle osy“ (podobně jako podle osy rotují planety Sluneční soustavy)¹. Takováto představa rotace je však v rozporu se speciální teorií relativity.

Je třeba se smířit s tím, že spinové kvantové číslo nemá v makrosvětě obdobu, že podobně jako řada jiných veličin *prostě jen* charakterizuje určité chování objektu mikrosvěta.



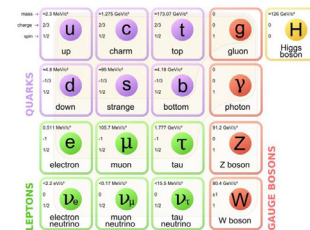
OBR. 2

V určitém smyslu však spin s rotací přece souvisí. Ukažme si to na jednoduchém příkladu s hracími kartami (OBR. 2). Uvažujme o minimálním úhlu (větším než 0°), o který můžeme kartu otočit (rotovat) tak, abychom dostali kartu „vypadající stejně“. Trochu lépe řečeno: Hledáme takový úhel, pro nějž je karta *invariantní* vůči rotaci. Snadno nahlédneme, že pro první kartu je to 360° , pro druhou 180° . Nazvěme nyní spinem s takové číslo, pro nějž platí, že potřebný minimální úhel rotace karty je roven $360^\circ/s$. Pro první kartu je pak $s=1$, pro druhou $s=2$.

- Jak si však představit kartu (částici, objekt mikrosvěta) o spinu $1/2$? Co platí o uvažovaném minimálním úhlu rotace?
- Higgsův boson (viz dále) má spin 0.

¹ V souladu s doporučením České astronomické společnosti píšeme *Sluneční soustava*, nikoliv *sluneční soustava*, jak uvádějí kodifikační příručky. Toto řešení je ve shodě s poznámkou v *Internetové jazykové příručce ÚJČ AV ČR*.

System částic



Dnes známe několik stovek částic. Jejich pojmenování vyčerpalo zásobu písmen řecké abecedy a jsou většinou známy jen pod číslem. Situace do jisté míry připomíná situaci v chemii před sestavením periodické tabulky: mnoho prvků a chaos.

Pokusíme se najít jednoduché fyzikální charakteristiky, z nichž každá umožní zařadit částici do právě jedné ze dvou skupin. Docházíme tak k trojímu možnému dělení částic do dvou (disjunktních) skupin.

Částice můžeme třídit:

- podle spinu na fermiony nebo bosony;
- podle interakce neboli podle toho, jaká síla na ně působí;
- podle toho, jsou-li to částice nebo antičástice (hmota, antihmota).

DĚLENÍ ČÁSTIC PODLE SPINU

Fermiony

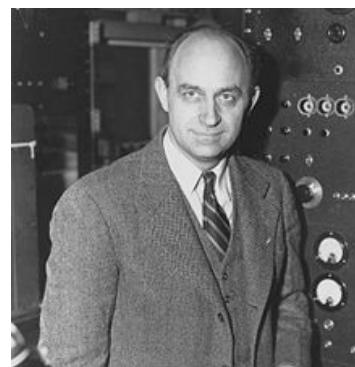
- Mají poločíselný spin (všechny leptony a kvarky, všechny baryony – např. elektron, neutrino, proton, neutron).
- Splňují **Pauliho vylučovací princip (the Pauli Exclusion Principle)**: „Dvě částice nemohou být nikdy ve stejném kvantovém stavu.“ Právě proto různé elektrony v atomovém obalu zaujímají různé kvantové stavy, a tím vytvářejí různorodé chování chemických prvků.
- Podléhají **Fermiho-Diracově statistice**.
- Pojmenovány podle Enrica Fermiho, amerického fyzika italského původu (viz studijní materiál *JF3: Jaderné reakce*).

Bosony

- Mají celočíselný spin (všechny mezony, foton, W^+ , W^- , Z^0 aj.).
- Nesplňují **Pauliho vylučovací princip**.
- Při nízkých teplotách má každý boson ze systému tendenci zaujmout nejnižší energetický stav. Vzniká **bosonový kondenzát**, který může mít supravodivé a supratekuté vlastnosti. (Soustava elektronů by jinak nikdy nemohla být supravodivá – jde o fermiony splňující Pauliho vylučovací princip. Při snižování teploty dojde nejprve k pospojování elektronů do dvojic – Cooperových párů, které jako bosony již mohou mít supravodivé vlastnosti.)
- Podléhají **Boseho-Einsteinově statistice**.
- Fyzik, podle něhož jsou částice nazvány, se jmenuje Satyendra Nath Bose.

LIGHT UNFLAVORED				STRANGE				BOTTOM			
J^P	J^P	J^P	J^P	J^P	J^P	J^P	J^P	J^P	J^P	J^P	J^P
0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}	0^{++}
0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}	0^{-+}
1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}	1^{--}
1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}	1^{+-}
2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}	2^{++}
2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}	2^{-+}
3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}	3^{--}
3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}	3^{+-}
4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}	4^{++}
4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}	4^{-+}

Část seznamu známých elementárních částic



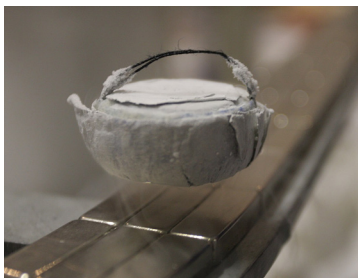
Enrico Fermi



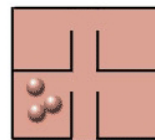
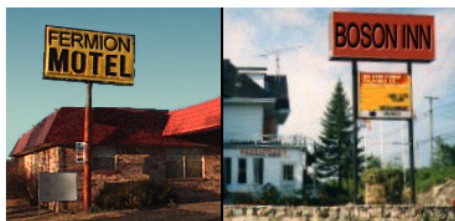
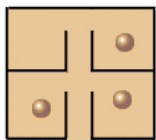
Satyendra Nath Bose

MODEL PAULIHO VYLUČOVACÍ PRINCIP

Fermiony se (viz OBR. 3) chovají jako celebrity, které odmítají sdílet s jinými fermiony jeden „pokoj“ – kvantový stav. „Hosté“ bosony ochotně zaplní celý pokoj (podobně jako žákyně a žáci Gymnasia F. X. Šaldy).

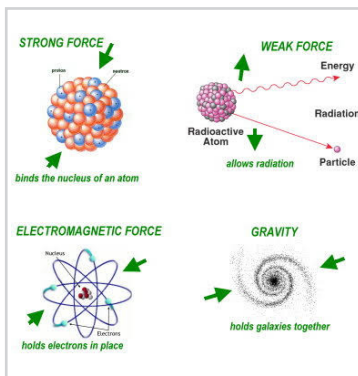


Supravodič levitující nad magnety



OBR. 3

DĚLENÍ ČÁSTIC PODLE INTERAKCE



Čtyři základní interakce



Paul A. M. Dirac předpověděl existenci antihmoty

Dávno před tímto objevem prý netradičně řešil úlohu ve školní soutěži. Zkuste ji vyřešit:

Tři rybáři společně ulovili určitý počet ryb a uložili se k spánku. Rybář, který se probudil jako první, si chtěl odnést svůj podíl. Počet ryb ale nebyl dělitelný třemi, proto jednu rybu pustil zpět do vody. Vzal si třetinu zbývajících počtu a odešel. Když se vzbudil druhý rybář, situace se opakovala. Jednu rybu pustil, vzal si třetinu a odešel. Totéž provedl třetí rybář. — Kolik ulovili ryb? Kolik ryb si každý z nich odnesl?

Některý čtenář možná objevil jedno řešení, jiný obecně popsal všechna řešení, vždy v oboru přirozených čísel.

Dirac ovšem trval na tom, že rybáři na začátku ulovili -2 ryby.

Částice také můžeme třídit podle sil, které na ně působí. **Gravitační síla** působí na *všechny* částice, ale její účinek je na úrovni subatomárních částic tak slabý, že ji (zatím?) nemusíme uvažovat. **Elektromagnetická síla** působí na všechny částice s nenulovým elektrickým nábojem, její vlastnosti jsou známy ze studia elektřiny a magnetismu.

Zůstává tedy **silná jaderná síla**, což je síla, která k sobě váže nukleony, a **slabá jaderná síla**, která se projevuje při β -rozpadu a podobných dějích. Slabá jaderná síla působí na všechny částice, silná jaderná síla pouze na některé.

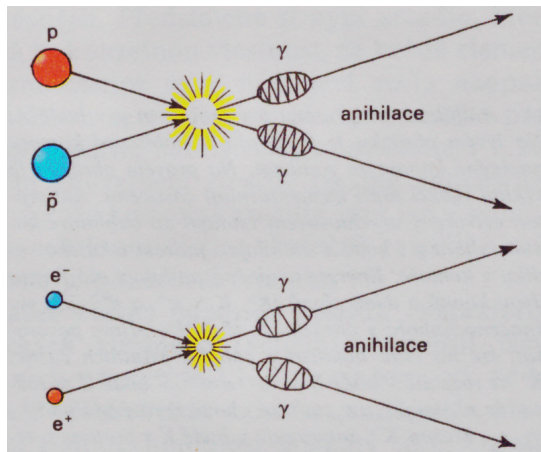
Částice tedy můžeme zhruba rozdělit podle toho, jestli na ně působí silná jaderná síla. Částice, na které tato síla působí, nazýváme **hadrony**. Částice, na které silná jaderná síla *nepůsobí* a kde je tedy dominantní slabá jaderná síla, nazýváme **leptony**.

DĚLENÍ NA ČÁSTICE A ANTIČÁSTICE

Když se Paul Dirac zabýval určitým zobecněním Schrödingerovy rovnice, získal vedle řešení popisujícího elektrony také řešení odpovídající elementárním částicím se spinem $1/2$, zápornou energií a opačným elektrickým nábojem než má elektron. Dirac taková řešení neodmítl jako řešení, která nemají fyzikální smysl, nýbrž je publikoval. Předpověděl tak existenci **antičástic** tvořících **antihmotu**.

K libovolné elementární částici tvořící látku existuje také odpovídající antičástice. Klidová hmotnost a spin antičástice jsou shodné s klidovou hmotností a spinem dané částice; elektrický náboj, baryonové číslo, leptonové číslo a podivnost antičástice jsou opačného znaménka.

Anihilace (OBR. 4) je proces přeměny páru částice–antičástice na jiné částice, např. přeměny elektronu a pozitronu na fotony.



OBR. 4

SHRNUTÍ

Shrneme předchozí kapitoly. Jestliže nalezneme novou částici, musíme položit tři otázky:

- Je to fermion, nebo boson?
- Je to lepton, nebo hadron?
- Je to částice, nebo antičástice?

Prohlédněte si tabulku částic; i když zatím nebudete rozumět všem pojmům (neznáte jejich význam a rozsah), bude to užitečné. Hledejte dále popsané částice:

- Stabilní **fermiony** (elektrony, protony, neutrony) jsou stavebními prvky hmoty: vytvářejí atomy a molekuly.
- **Bosony** jsou všechny zprostředkující částice, které jsou nositeli vzájemného silového působení, dále též všechny mezony.
- Baryony jsou např. protony a neutrony. Mezony jsou např. piony (starší název: π -mezony) umožňující vzájemné silové působení mezi nukleony v jádře atomu. Leptony jsou kupř. elektrony, pozitrony a neutrino.
- Antičásticí k elektronu je pozitron, který má stejnou klidovou hmotnost a spin. Elektrický náboj pozitronu je ovšem kladný a jeho leptonové číslo záporné. Antičásticí k protonu je antiproton, jeho elektrický náboj je záporný, baryonové číslo také. Antineutron se liší od neutronu záporným baryonovým číslem.

ZÁKLADNÍ SKUPINY ČÁSTIC

Všechny částice lze „roztřídit“ takto:

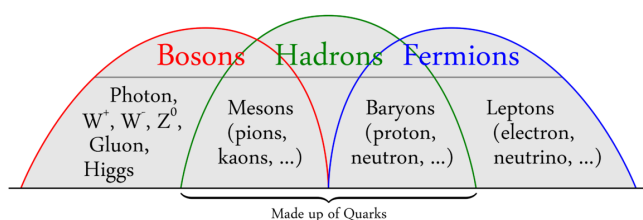
1. fundamentální (neboli: **bodové**) **částice** – nemají vnitřní strukturu; člení se dále na:

- a) stavební částice látky, tj. **leptony** a **kvarky** (mají poločíselný spin a jsou to fermiony),
- b) částice zprostředkující vzájemné silové působení leptonů a kvarků, tj. **intermediální (plní, výměnné)** částice (mají celočíselný spin a jsou to bosony).

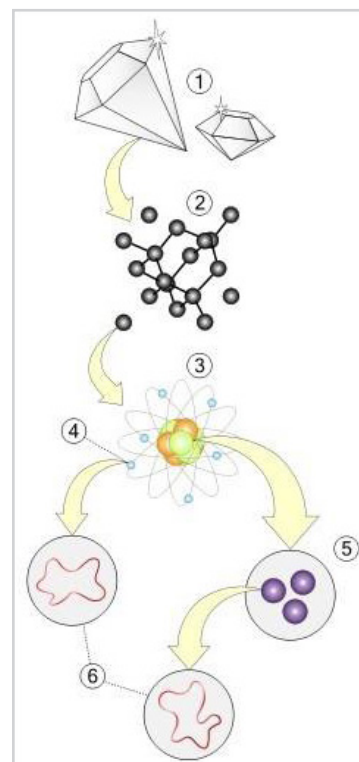
2. hadrony – částice složené z kvarků; dělí se dále na:

- a) **baryony** tvořené třemi kvarky (resp. antibaryony tvořené třemi antikvarky); baryony jsou fermiony (tzn., že mají poločíselný spin) a podle výsledného spinu se ještě člení na **nukleony** a **hyperony**,
- b) **mezony** tvořené páry kvark-antikvark; jsou to bosony (celočíselný spin).

Rezonance je elementární částice, jejíž střední doba života je kratší než 10^{-20} s. Rezonance se rozpadají vlivem silné interakce, proto jsou jejich doby života podstatně kratší než doby života částic rozpadajících se slabou interakcí. (Rezonance vznikají pouze při srážce elementárních částic zcela určitých frekvencí, což připomíná klasické rezonanční jevy v mechanickém či elektrickém kmitání – odtud tyto objekty mikrosvěta získaly svůj název.)



OBR. 5



Vrstvy hmotného jsoučna

① *makroskopická úroveň* (buňky, krystaly) – předmět biologie, geologie; ② *molekulární úroveň* – předmět chemie; ③ *atomární úroveň* – protony, neutrony a elektrony jako elementární částice v původním smyslu; ④ *leptony*, ⑤ *kvarky* – úroveň fundamentálních částic; ⑥ *úroveň strun* – pokus o supersymetrické sjednocení.

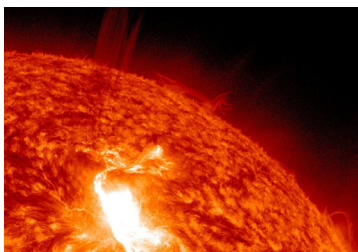
Každé nové ponoření do „hlubší vrstvy jsoučna“ si vyžádalo novou terminologii. Chemický atomismus přelomu 18. a 19. století předpokládal, že **atomy** jsou nedělitelné, ostatně proto dostaly tento „hrdý“ název (z řec. ατομος – nepožatý, nedělitelný; obrozenci navrhovali český tvar *nedrob*). Objev elektronu a struktury atomového jádra ukázaly částice, na něž lze atom „dělit“ – částice **elementární**. Z nich však jen některé – **fundamentální** – částice mají dle standardního modelu jednoduchou vnitřní strukturu (např. elektron či neutrino); ostatní elementární částice se skládají z fundamentálních částic jiného druhu, kvarků.

Původcem konceptu „vrstevnatého jsoučna“ je v oblasti filosofie přírodních věd NICOLAI HARTMANN, v psychologii např. ABRAHAM MASLOW (vzpomeňme na jeho pyramidu potřeb).



Částice látky

LEPTONY

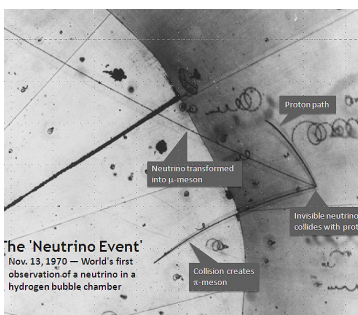


Sluneční neutrino

Tok slunečních neutrin se v okolí naší Země odhaduje na $70 \cdot 10^9$ v $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. V každém cm^3 je navíc 300 reliktních neutrin z období oddělení neutrin od ostatní hmoty v době cca 1 s po velkém třesku. Při interakci kosmického záření s atmosférou vznikají asi 20 km nad zemí tzv. atmosférická neutrino. Pro neutrino je celá Země zcela průhledná a neutrino s jejími atomy interagují jen zcela výjimečně.



Wolfgang Pauli



Detekce neutrino v bublinkové komoře

První rodinou elementárních částic jsou **leptony** (z řec. λεπτός – drobný, nepatrný). Jde o elektron a jeho „příbuzné“. V leptonech nepozorujeme žádnou vnitřní strukturu. Spin všech těchto částic je $1/2$ a jde tedy o fermiony. Všechny leptony interagují slabou interakcí a neinteragují silně. Nabité leptony (elektrony) interagují navíc elektromagneticky, což způsobuje intenzivní interakci s hmotou. Nenabitá leptony (neutrino) interagují s hmotou velmi slabě. Přesto jich je v našem okolí značné množství.

Elektron e^- je první objevená elementární částice. Je stabilní. Hmotnost elektronu je $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, elektrický náboj je $-e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Rozdílné chování různých atomů je způsobeno rozdílnou konfigurací elektronových obalů. Makroskopický pohyb elektronů vnímáme jako elektrický proud. Elektron objevil JOSEPH JOHN THOMSON v roce 1897. Antičástici elektronu – **pozitron** – teoreticky předpověděl PAUL A. M. DIRAC v roce 1928 ještě před jeho objevením.

Elektronové neutrino ν_e : Všude tam, kde při různých slabých rozpadech částic vznikne elektron, resp. pozitron, vzniká i jeho antineutrino, resp. neutrino. Jde o částici velmi malé hmotnosti, která interaguje s hmotou jen slabou interakcí, snadno proto hmotou proniká. Neutrino bylo objeveno při β rozpadu neutronu $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ (elektron a proton jako produkty rozpadu neodnášely veškerou původní energii a hybnost). Jeho existenci předpověděl WOLFGANG PAULI v roce 1930. Název neutrino mu dal ENRICO FERMI po objevu neutronu v roce 1932 (v italštině znamená **neutrino** malý neutron, **neutronek**). Jeho existence byla potvrzena v roce 1956 v jaderné elektrárně Savannah River v Jižní Karolině (FREDERICK REINES, CLYDE L. COWAN).

Mion μ^- , tzv. těžký elektron, se chová velmi podobně jako elektron. Má hmotnost $207 m_e$. Mion se vyskytuje v kosmickém záření a do zemské atmosféry vstupuje s relativistickými rychlostmi. Vzhledem ke své době života by neměl nikdy dopadnout na zemský povrch. Díky dilataci času však mion z hlediska pozorovatele na Zemi žije „déle“ a má dosti času, aby dopadl na povrch Země. Z hlediska mionu se Země „přibližuje“ relativistickou rychlostí a díky kontrakci vzdálenosti nemusí mion k povrchu Země uletět takovou vzdálenost. Z hlediska obou souřadnicových soustav (spojených se Zemí nebo s mionem) je tedy výsledek stejný, mion dopadne na povrch Země. Mion objevil CARL ANDERSON v kosmickém záření za pomoci mlžné komory (viz studijní materiál **Urychlovače a detektory částic**) v roce 1936.

Mionové neutrino ν_μ : Podobně jako elektronové neutrino doprovází při slabých rozpadech elektron, doprovází mionové neutrino mion. Má podobné vlastnosti jako neutrino elektronové.

Tauon τ^- , supertěžký elektron, má hmotnost $3484 m_e$. Jde o nestabilní částici; rozpadá se na své lehčí dvojníky (elektron nebo mion) a neutrino. **Tauonové neutrino** ν_τ doprovází tauon při slabých procesech. Bylo objeveno v laboratoři Fermilab v roce 1999 v experimentu DONUT

(Do Nu Tau, Direct Observation of the NU Tau; nu odpovídá tomu, jak se v angličtině čte řecké písmeno v).

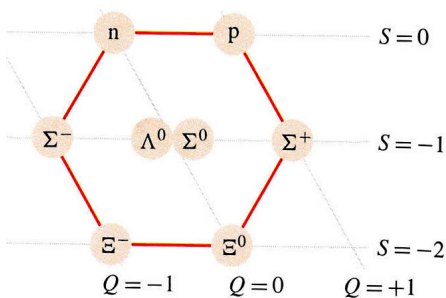
První generaci leptonů tvoří obyčejný elektron se svým neutrinem – částice běžné ve světě kolem nás. **Druhá generace** je mion se svým neutrinem. Na Zemi se vyskytují zřídka, zpravidla pocházejí z kosmického záření. **Třetí generace** leptonů – tauon se svým neutrinem – sehrála svoji roli za extrémních podmínek vzniku vesmíru. Dnes tyto částice dokážeme uměle připravit v urychlovačích. K těmto třem generacím leptonů přísluší i antičástice. Celková tabulka leptonů je:

Q/e	$L_e = -1$	$L_\mu = -1$	$L_\tau = -1$
0	$(\bar{\nu}_e)$	$(\bar{\nu}_\mu)$	$(\bar{\nu}_\tau)$
+1	(e^+)	(μ^+)	(τ^+)
Q/e	$L_e = 1$	$L_\mu = 1$	$L_\tau = 1$
0	(ν_e)	(ν_μ)	(ν_τ)
-1	(e^-)	(μ^-)	(τ^-)

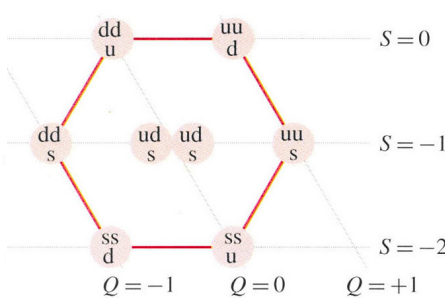
KVARKOVÝ MODEL & EIGHTFOLD WAY

Na konci 50. a v průběhu 60. let se fyzikové pokoušeli vysvětlit podstatu silné interakce i chování tzv. těžkých částic – **hadronů** (z řec. αδρός – vzrostlý, bujarý) – pomocí různých modelů. Tyto částice podléhají působení silné (jaderné) interakce. Mezi nejznámější hadrony patří částice tvořící atomové jádro – proton a neutron, které nazýváme souhrnně **nukleony**.

Tyto snahy vyústily v **kvarkový model** (nezávisle MURRAY GELL-MANN a GEORGE ZWEIG, 1964). Dnes podle tohoto modelu předpokládáme, že hadrony jsou tvořeny z šesti kvarků a šesti antikvarků.



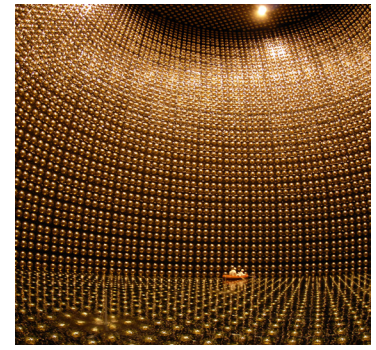
OBR. 6



OBR. 7

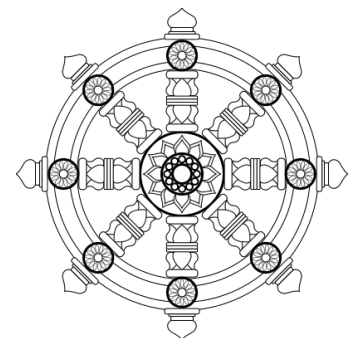
Skupina osmi baryonů – jsou mezi nimi neutron a proton – jejichž spinové kvantové číslo je 1/2, je znázorněna v obrazci (OBR. 6), který vzniká, když zobrazujeme podivnost S (veličina s *podivným* názvem podivnost bude vysvětlena dále) baryonů v závislosti na jejich náboji Q . Šest z osmi vytváří šestiúhelník, v jehož středu jsou dva baryony. Podobný obrázek lze nakreslit i pro mezony (OBR. 9). Existenci těchto a podobných diagramů (OBR. 6–9), nazvaných **diagramy osminásobné cesty** (*eightfold way*), předpověděli Murray Gell-Mann a Yuval Ne'eman.

Ve všech těchto diagramech je *příliš mnoho* částic na to, aby byly chápány jako částice fundamentální. Nabízí se uvažovat o jednodušších částicích vhodně zvoleného náboje a podivnosti, jejichž „spojením“ dostaneme



Super-Kamiokande

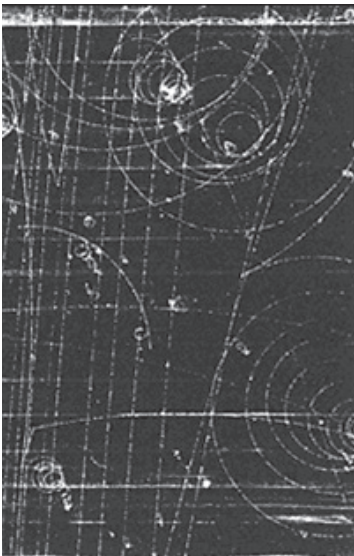
Japonský detektor neutrin umístěný 1000 m pod povrchem ve starém zinkovém dole. Nádoba detektoru obsahuje 50 000 tun vody, na stěnách je 13 000 fotonásobičů, průměr nádoby je 40 metrů. Detektor detekuje Čerenkovovo záření elektronu nebo mionu vzniklého srážkou elektronového nebo mionového neutrina s neutronem. V průměru je zachyceno jedno atmosférické neutrino za hodinu a půl. Na fotografii jsou zachyceni pracovníci na člunu. Při kontrole v roce 2001 zavazil jeden z dělníků pádlem o fotonásobič pod hladinou. Implozní vlna šířící se vodou způsobila řetězovou reakci, která poškodila 7 000 fotonásobičů. Oprava stála 25 000 000 \$. Jde zřejmě o největší materiální škodu způsobenou jedním pádlem v dějinách lidstva.



Eightfold Way

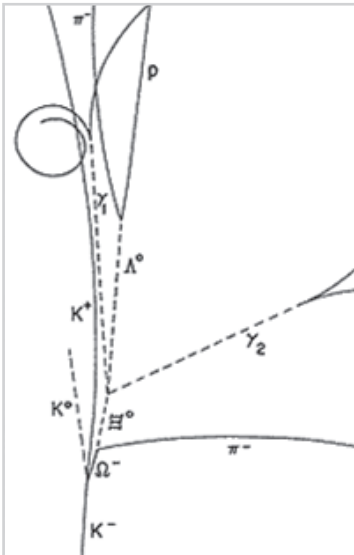
Název parafrázuje označení jednoho z principů buddhismu, [HRW] překládá jako *osminásobná cesta*, možno též *osmidílná cesta*. Někteří fyzikové užívají neutrální název **oktetový model**. Částice v diagramech jsou mj. popsány osmi kvantovými čísly, z nichž v tomto studijním textu popíšeme jen některá.

Stupně oné cesty jsou: náhled, rozhodnutí, řeč, jednání, žití, snaha, bdělost, soustředění.

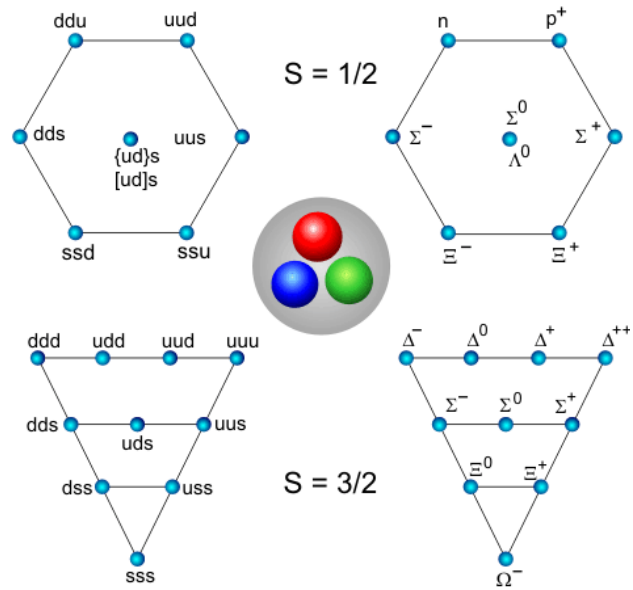


Částice Ω^-

Nahoře fotografie z bublinkové komory, dole identifikace trajektorií jednotlivých částic.

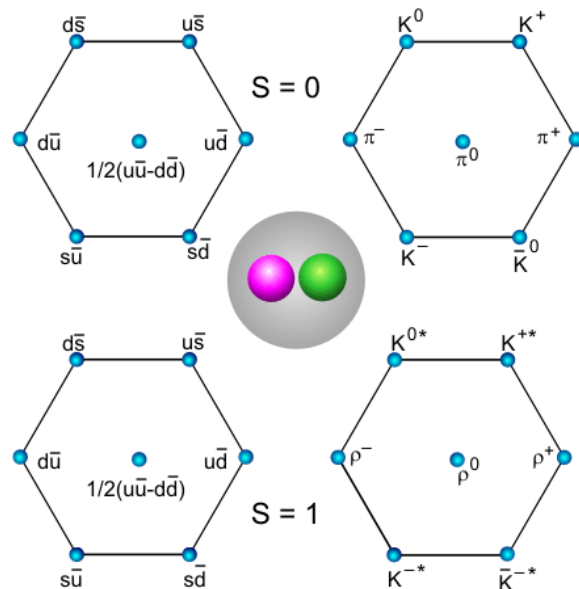


částice uvedené v diagramu. Nalezené řešení je v OBR. 7 a dále v levých sloupcích OBR. 8–9, popis užitých částic (kvarků) je v následující kapitole.



OBR. 8

V OBR. 8 dole je symetrie diagramu osminásobné cesty pro baryony se spinem 3/2. Když však byl diagram poprvé zveřejněn, bylo známo pouze devět takových částic; „čelní kuželka“ chyběla. V roce 1962, na mezinárodní konferenci v CERN, Gell-Mann při poznámce z publika předpověděl na základě diagramu: „Existuje baryon se spinem 3/2, nábojem -1, podivností -3 a klidovou hmotností přibližně 1680 MeV. Jestliže budeme tuto částici hledat (navrhuji pojmenovat ji Ω^-), myslím, že ji musíme najít.“ Skupina fyziků, kterou vedl NICHOLAS SAMIOS, se této výzvy chopila a skutečně našla „chybějící“ částici a potvrdila, že má všechny předpovězené vlastnosti.



OBR. 9

DOKUMENT



RICHARD FEYNMAN
MURRAY GELL-MANN
JUVAL NE'EMAN

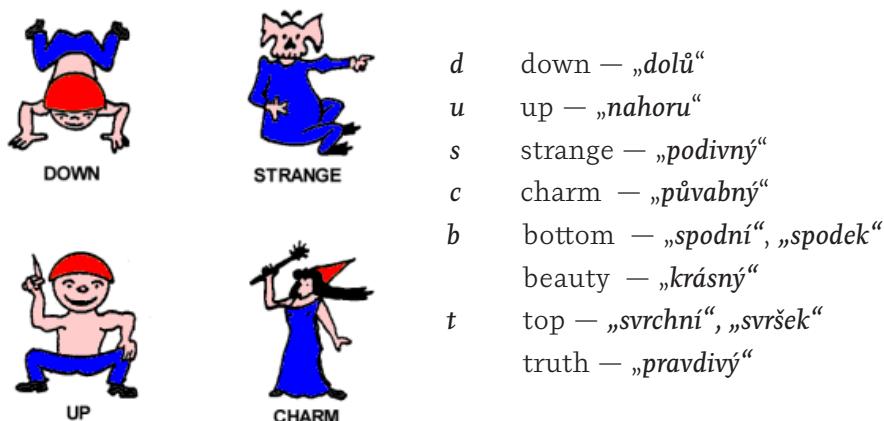
Strangeness Minus Three

BBC Horizon 1964

KVARKY

Existence obrazců osminásobné cesty ukázala, že mezony a baryony mají nějakou vnitřní strukturu, pomocí níž mohou být pochopeny jejich vlastnosti. Tato struktura je popsána kvarkovým modelem.

Kvarky Gell-Mann nazval podle románu Jamese Joyce *Finnegans Wake*, v němž se objevuje zvolání: „Three quarks for Muster Mark!“ Toto podivné, jinak neexistující slovo se v románu již nikde jinde nevyskytuje. Rozeznáváme šest kvarků (první čtyři znázornil ilustracemi Gell-Mann):



OBR. 10

Podobně jako leptony řadíme kvarky do generací. **První generaci** tvoří kvarky (d , u), běžně se vyskytující v přírodě, a jejich antikvarky. **Druhou generaci** (s , c) nacházíme v částicích kosmického záření a **třetí generaci** (b , t) dokážeme připravit uměle na urychlovačích. Tyto částice byly hojné při vysoce energetických procesech krátce po vzniku vesmíru.

Základní vlastnosti kvarků jsou v následující tabulce:

kvark	spin	náboj	hmotnost	rok objevu
d	1/2	- 1/3	5 MeV	1968
u	1/2	+ 2/3	3 MeV	1968
s	1/2	- 1/3	95 MeV	1968
c	1/2	+ 2/3	1,3 GeV	1974
b	1/2	- 1/3	4,2 GeV	1977
t	1/2	+ 2/3	173 GeV	1995

Z kvarků lze vytvořit dvě skupiny částic:

- **mezony** (z řec. μέσος – střední): jsou složeny z jednoho kvarku a jednoho antikvarku,
 - **skalární mezony**: spin kvarků je orientován opačně a výsledný spin mezonu $s = 0$,
 - **vektorové mezony**: spin kvarků orientován souhlasně a výsledný spin mezonu $s = 1$;
- **baryony** (z řec. βαρύς – těžký): jsou složeny ze tří kvarků. Tři kvarky lze kombinovat tak, že výsledný spin je roven 1/2 nebo 3/2; proto existují dvě skupiny baryonů (**nukleony** a **hyperony**).

Popisované částice si vyhledejte v tabulce částic.



James Joyce

Irský, anglicky píšící romanopisec a básník. V jeho posledním, experimentálním románu *Finnegans Wake* se objevuje slovo *quarks*.

O knize bylo mj. napsáno: „The first thing to say about *Finnegans Wake* is that it is, in an important sense, unreadable. It is an extraordinary performance, a transcription into a miniaturized form of the whole western literary tradition. ... solo performance that need, in a sense, only be looked at rather than read...“ (Seamus Deane)

„Z celkového počtu 217 937 slov *Finnegans Wake* se 49 200 vyskytuje v textu pouze jedinkrát; text představuje montáž z více než 70 jazyků. Joyce se nořil do slovníků a volně porušoval pravidla pravopisu, skládal slova do kufříkových složenin, sesekával je na fragmenty, psal je pozpátku i jinak mrzačil, aby vyhovovala jeho uměleckému plánu řekotoku víceznačností, eufonie („zvukopisu“), slovních hříček, hádanek a aluzí. Výsledná směsice indoevropských a jiných jazyků se stala plynoucím vodním tokem, na jehož povrchu pableskují přechytlivé záměrné i náhodné sémantické slovní hříčky, paradoxy a vnitřní významové konflikty.“ (Petr Škrabánek)



Murray Gell-Mann

— Three quarks for Muster Mark!
 Sure he hasn't got much of a bark
 And sure any he has it's all beside the mark.
 But O, Wrenegade Almighty,
 wouldn't un be a sky of a lark
 To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
 And he hunting round for uns speckled trousers around by Palmer-stown Park?
 Hohohoho, moulted Mark!
 You're the rummest old roster ever flopped out of a Noah's ark
 And you think you're cock of the wark.
 Fowls, up! Tristram's the spry young spark
 That'll tread her and wed her and bed her and red her
 Without ever winking the tail of a feather
 And that's how that chap's going to make his money and mark!
 Overhoved, shrillgleescreaming. That song sang seawans. The winging ones. Seahawk, seagull, curlew and plover, kestrel and capercallie. All the birds of the sea they trolled out rightbold when they smacked the big kuss of Tristram with Usolde.
 And there they were too, when it was dark, whilst the wild-caps was circling, as slow their ship, the winds aslight, upborne the fates, the wardorse moved, by courtesy of Mr Deaubaleau Downbellow Kaempersally, listening in, as hard as they could, in Dubbel-dorp, the donker, by the tourneyold of the wattarfalls, with their vuoxens and they kemin in so hattajocky (only a quarter-buck askull for the last acts) to the solans and the sycamores and the wild geese and the gannets and the migratories and the mistlethrushes and the auspices and all the birds of the rockby-suckerassousyocanal sea, all four of them, all sighing and sob — bing, and listening. Moykle ahoykling!

Finnegans Wake













Úryvek, v němž se vyskytuje slovo *quarks*.

Pravidla pro skládání kvarků do hadronů

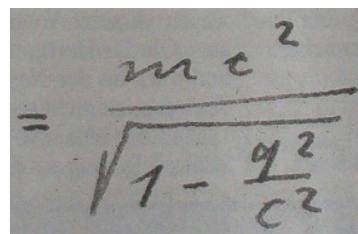
- Baryonové číslo složených částic musí být rovno $B=\pm 1$ (pro baryony, resp. antibaryony) nebo $B=0$ (pro mezony).
- Elektrický náboj složených částic musí nabývat hodnoty rovné celočíselnému násobku elementárního náboje.
- Spiny se mohou skládat paralelně nebo antiparalelně. Antiparalelním skládáním spinu může z těchto kvarků vzniknout jiná částice nežli paralelním, srov. OBR. 9.

SHRNUTÍ

hadron	částice obsahující kvarky
mezon	částice složená z kvarku a antikvarku (např. pion, kaon)
baryon	částice složená ze tří kvarků (například neutron, proton)
hyperon	baryon obsahující podivný kvark nebo antikvark

	Quarks		Leptons	
Generation 3	 t Top	 b Bottom	 τ Tau	 ν_τ Tau-neutrino
Generation 2	 c Charm	 s Strange	 μ Muon	 ν_μ Muon-neutrino
Generation 1	 u Up	 d Down	 e Electron	 ν_e Electron-neutrino

Veličiny a zákony



$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

VELIČINY POPISUJÍCÍ ČÁSTICE

Klidová hmotnost částice je její hmotnost měřená v inerciální vztažné soustavě, vůči níž je částice v klidu.

Klidová energie částice je její energie v inerciální vztažné soustavě, v níž je částice v klidu, a je dána Einsteinovým vztahem $E = mc^2$.

Elektrický náboj – nejčastěji se udává v násobcích elementárního náboje e .

Spin je vlastní moment hybnosti částice.

Leptonové číslo je kvantové číslo nabývající hodnoty +1 pro leptony, -1 pro antileptony a 0 pro ostatní částice (rozlišuje se elektronové leptonové číslo, mionové leptonové číslo a tauonové leptonové číslo).

Baryonové číslo je kvantové číslo nabývající hodnoty +1 pro baryony, -1 pro antibaryony a 0 pro ostatní částice.

Podivnost (strangeness) je kvantové číslo, které charakterizuje podivné částice. Pro tyto částice má hodnotu různou od nuly; pro všechny ostatní je nulové. Podivné částice obsahují ve své struktuře podivný kvark.

Princip nerozlišitelnosti částic. Jakékoliv dvě totožné částice jsou (na rozdíl od makroskopických objektů) zcela stejné a nelze je žádným způsobem označit ani rozlišit jednu od druhé. Např. dva elektrony jsou zcela stejné.

ZÁKONY ZACHOVÁNÍ V MIKROSVĚTĚ

Pro částicové reakce platí zákony platné v makrosvětě: zákon zachování energie, zákon zachování hybnosti a momentu hybnosti, zákon zachování elektrického náboje.

Kromě toho platí některé další zákony, které v makrosvětě nemají obdobu:

Zákon zachování baryonového čísla: Probíhají pouze takové částicové reakce, při kterých se celkové baryonové číslo nemění, tj. součet baryonových čísel částic do reakce vstupujících je roven součtu baryonových čísel částic z reakce vystupujících.

Zákon zachování leptonového čísla: Probíhají pouze takové částicové reakce, při kterých se celkové leptonové číslo nemění, tj. součet leptonových čísel částic do reakce vstupujících je roven součtu leptonových čísel částic z reakce vystupujících.

Zákon zachování spinu: Součet spinu částic vstupujících do reakce je roven součtu spinu částic z reakce vystupujících, přičemž spiny se mohou sčítat paralelně nebo antiparalelně.

Zákony zachování baryonového a leptonového čísla, zákon zachování spinu i zákon zachování elektrického náboje platí pro všechny částicové reakce, v nichž mezi částicemi působí silná, slabá i elektromagnetická interakce. Nejslabší gravitační interakci lze při částicových reakcích zanedbat.

objekty	síly	energie
atomy	chemické	1 eV
jádro, elektrony	elektrické	10 eV
nukleony	jaderné	1 MeV
kvarky	mezi- kvarkové	1 GeV

Typické vazební energie

v jednotlivých vrstvách struktury látek.

$$u + u + d = uud$$

Baryonové číslo:

$$1/3 + 1/3 + 1/3 = 1$$

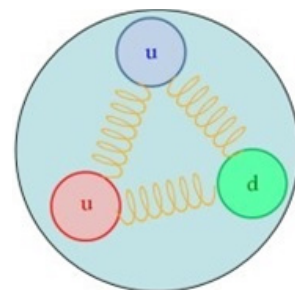
Elektrický náboj:

$$2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$$

Spin:

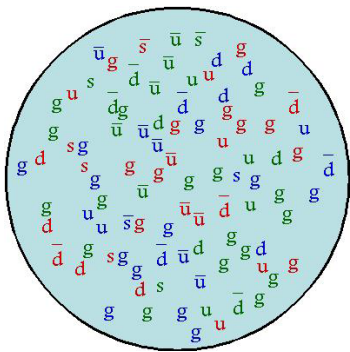
$$1/2 + 1/2 - 1/2 = 1/2$$

Stavba protonu podle kvarkového modelu



Model struktury protonu

Kvarky uud jsou vázány silnou interakcí (znázorněno pružinou) realizovanou výměnou gluonů. Tento model je velmi zjednodušený, pravděpodobnější model je na následující straně.



Model struktury protonu

Další model protonu, „realističtější“ než model na s. 17 dole: proton je nyní chápán jako soustava kvarků, antikvarků a gluonů.

Proton se skládá ze dvou kvarků *up* a jednoho kvarku *down*, dále z množství gluonů a z obrovského množství dvojic kvark+antikvark (*up*, *down*, *strange*; příslušné antikvarky jsou značeny pruhem); vyznačen je i barevný náboj (*red*, *green*, *blue*) všech částic. (Na rozdíl od modelu na s. 21 nejsou barevné náboje antikvarků znázorněny doplňkovými barvami CMY.)

Zákon zachování podivnosti: Součet podivností částic vstupujících do reakce je roven součtu podivností částic vystupujících z reakce. Zákon zachování podivnosti platí pouze pro reakce, v nichž mezi částicemi působí silná interakce. Podivnost se nezachovává, působí-li mezi částicemi slabá interakce.

Zákony zachování jsou empirická pravidla popisující částicové reakce. Každá reakce splňující zákony musí probíhat. Neprobíhá-li, zakazuje ji nějaký dosud neznámý zákon.

EXKURS OBJEV ZÁKONA ZACHOVÁNÍ PODIVNOSTI

Podivnost částice, jedna z „nových“ charakteristik, se vynořila, když si experimentátoři povšimli, že některé nové částice jako je kaon a sigma vznikají jen spolu. Zdálo se nemožné získat v reakci jen jednu z nich. Při interakci svazku pionů s vysokou energií s protony kapaliny v bublinkové komoře dojde často k reakci



Naopak reakce



která neporušuje žádný ze zákonů zachování známých v počátcích částicové fyziky, nenastane nikdy.

Proto se začalo předpokládat (navrhli to nezávisle na sobě MURRAY GELL-MANN ve Spojených státech a KAZUHIKO NISHIJIMA v Japonsku), že některé částice mají novou vlastnost, nazvanou **podivnost** (*strangeness*), které přísluší nové kvantové číslo *S* a pro toto číslo existuje vlastní zákon zachování. (Je třeba odlišovat zde zavedený symbol podivnosti od symbolu spinu.) Název podivnost pochází z doby před tím, než se odhalily vlastnosti těchto částic; tehdy byly známy jako „podivné částice“ – a název už zůstal.

Proton, neutron a pion mají $S = 0$; nejsou to „podivné částice“. Částici K^+ byla přiřazena podivnost $S = +1$ a částici Σ^+ podivnost $S = -1$. Je tedy v první rovnici podivnost zachována:

$$0 + 0 = (+1) + (-1), \quad (5)$$

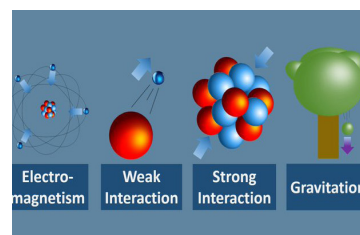
ale není zachována ve druhé rovnici

$$0 + 0 \neq 0 + (-1). \quad (6)$$

Reakce popsána druhou rovnicí tedy nenastává, protože narušuje zákon zachování podivnosti.

Může se zdát těžkopádné vymýšlet novou vlastnost částic jen proto, abychom vyřešili problém, jaký představují uvedené rovnice. Podivnost a její kvantové číslo se však brzy projeví v mnoha dalších oblastech fyziky elementárních částic; podivnost je dnes plnohodnotnou charakteristikou částice, podobně jako třeba náboj nebo spin.

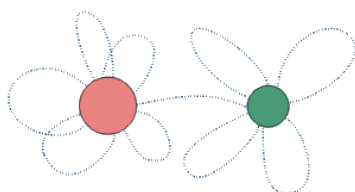
Interakce



V „současném“ vesmíru (současnost nesoumírných událostí je relativní!) fyzika rozpoznala čtyři interakce:

- **Elektromagnetická interakce:** Působí jen na částice s elektromagnetickým nábojem (elektrony, protony, nabité piony,...). Interakce má nekonečný dosah, působí i na velké vzdálenosti.
- **Slabá interakce:** Působí na leptony i hadrony. Zodpovídá za relativně pomalé rozpady částic (například β rozpad neutronu, rozpad mionu). Jde o interakci krátkého dosahu do vzdáleností srovnatelných s rozměry atomového jádra.
- **Silná interakce:** Působí jen na hadrony. Jde o sílu, která spojuje kvarky v mezony a baryony; sílu, která udržuje pohromadě neutrony a protony v atomovém jádře a sílu, způsobující některé rychlé rozpady elementárních částic. Jde opět o interakci krátkého dosahu do vzdáleností srovnatelných s rozměry atomového jádra.
- **Gravitační interakce:** Působí na všechny částice bez rozdílu, má nekonečný dosah. Odpovídá za strukturu vesmíru (pohyby planet, soudržnost galaxií, celkový vývoj vesmíru).

Podle představ kvantové teorie pole (PAUL A. M. DIRAC, RICHARD FEYNMAN a další) probíhá interakce dvou částic tak, že si vymění tzv. **intermediální (mezipůsobící, plní, výměnnou) částici** (OBR. 5).

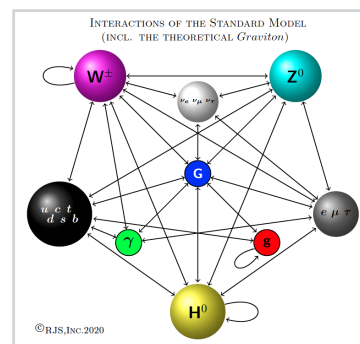


OBR. 11

Každá částice podléhající interakci je obklopena oblakem těchto intermediálních částic. Pojem **pole** (elektromagnetické, slabé, silné, gravitační) tak neznamená nic jiného než oblak intermediálních částic. Jde o tyto částice:

interakce	částice	spin	el. náboj
elektromagnetická interakce	foton	1	0
slabá interakce	W^+ , W^- , Z^0	1	0
silná interakce	8 gluonů	1	0
gravitační interakce	graviton ?	2 ?	0 ?

Každá elektricky nabitá částice je tedy obklopena fotony (elektromagnetickým polem), každý kvark je obklopen gluony (gluonovým – silným polem) atd.



Interakce ve standardním modelu

Bosony jsou znázorněny jasnými barvami, fermiony ve stupních šedi. Částice s nenulovou klidovou hmotností jsou znázorněny 3D stínováním, částice s nulovou klidovou hmotností jsou znázorněny bez tohoto efektu.

Orientované úsečky znázorňují fundamentální interakce mezi dvěma částicemi (tedy jaké interakce částice prostředkují a jaké „cítí“); smyčky znázorňují působení daného druhu částic na sebe sama.



Broom Bridge, Dublin

„Here as he walked by on the 16th of October 1843 Sir William Rowan Hamilton in a flash of genius discovered the fundamental formula for quaternion multiplication

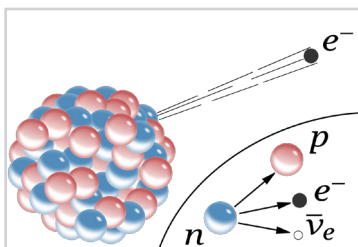
$$i^2=j^2=k^2=ijk=-1$$

& cut it on a stone of this bridge.“

Kvaterniony (čtyřsložková zobecnění komplexních čísel) byly prvním matematickým nástrojem pro formulaci Maxwellových rovnic. Dnes jsou tyto rovnice vyjádřeny pomocí (tehdy ještě neznámých) vektorů a vektorových operátorů.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

Maxwellovy rovnice



Rozpad β^-



Bublinková komora detektoru Gargamelle (CERN)

Název detektoru s bublinkovou komorou neodkazuje na obskurní seriál *Šmoulové*, ale na významné renesanční romány Françoise Rabelaise *Gargantua a Pantagruel*.

ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE

- **Působení interakce:** Elektromagnetická interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým elektrickým nábojem.
- **Dosah interakce:** Nekonečný.
- **Intermediální částice:** Jediná intermediální částice – **foton**. Foton má nulovou klidovou hmotnost. Má-li mít interakce nekonečný dosah, musí mít intermediální částice nulovou klidovou hmotnost.

To, že jevy elektrické a magnetické mají společnou podstatu (proměnná elektrická pole vytvářejí pole magnetická a proměnná magnetická pole vytvářejí pole elektrická), objevili ve svých experimentech a teoretických pracích MICHAEL FARADAY, ANDRE MARIE AMPÈRE, HANS CHRISTIAN OERSTED, HEINRICH HERTZ. Završením těchto prací byla **teorie elektromagnetického pole** formulovaná JAMESEM C. MAXWELLEM a HEINRICHEM HERTZEM (1873). Mezi různými souřadnicovými systémy se Maxwellovy rovnice transformují pomocí Lorentzovy transformace. Právě odlišnost transformačních vlastností Maxwellových rovnic od rovnic klasické mechaniky vedla ve svých důsledcích ke vzniku speciální teorie relativity.

SLABÁ INTERAKCE

- **Působení interakce:** Slabá interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým nábojem slabé interakce – **vůni (flavour)** Q_f . Vůni mají leptony a kvarky. Vždy jedna generace částic (například elektron se svým neutrinem) má stejnou vůni. Rozeznáváme tedy vůni elektronovou, mionovou, tauonovou, vůni kvarků d a u , vůni kvarků s a c a vůni kvarků t a b (celkem 6 vůní).
- **Dosah interakce:** Konečný, slabá interakce má krátký dosah, cca 10^{-17} m. S tím je spojená nenulová klidová hmotnost intermediálních částic interakce (W^\pm mají klidovou hmotnost 80 GeV a Z^0 má hmotnost 91 GeV).
- **Symetrie interakce:** Slabá interakce „nerozpozná“ od sebe částice stejné vůně. Například elektron a elektronové neutrino se při slabé interakci jeví jako jediná částice. Stejně tak kvark d a kvark u a další dvojice částic. Samozřejmě při jiných interakcích (například elektromagnetické) lze tyto dvojice odlišit.
- **Intermediální částice:** 3 intermediální částice W^+ , W^- a Z^0 . Vzhledem k tomu, že jde o interakci krátkého dosahu, je hmotnost těchto částic nenulová.

Slabá interakce byla poprvé poznána při β rozpadu neutronu. Od té doby bylo pozorováno mnoho rozpadů částic ovládaných slabou interakcí. Jde o rozpady s relativně velmi dlouhými poločasy (odtud název slabá interakce) od 10^{-15} s do dlouhých hodin a týdnů. Interakce působí na značné množství částic (na všechny leptony a kvarky a samozřejmě částice z kvarků složené). Nepůsobí na intermediální částice.

Při slabé interakci dochází k výměně intermediálních vektorových bosonů W^+ , W^- , Z^0 . Tyto částice teoreticky předpověděli STEVEN WEINBERG, ABDUS SALAM a SHELDON LEE GLASHOW, kteří jsou autory jednotné teorie elektromagnetické a slabé interakce (**elektroslabé interakce**). Za tuto práci obdrželi Nobelovu cenu v roce 1979.

Částice objevil v CERN CARLO RUBBIA na přelomu let 1983 a 1984. Za jejich objev obdržel Nobelovu cenu; druhým oceněným byl konstruktér zařízení SIMON VAN DER MEER. Jejich aparatura využila Gargamelle, detektor částic s bublinkovou komorou.

SILNÁ INTERAKCE

- **Působení interakce:** Silná interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým nábojem silné interakce – **barevným nábojem** (*chromos*) Q_c . Barvu mají kvarky a gluony. Rozeznáváme tři barvy (viz dále). Výsledný svět je bezbarvý.
- **Dosah interakce:** Konečný, silná interakce má krátký dosah, cca 10^{-15} m.
- **Symetrie interakce:** Kvarky jsou fermiony, proto by se neměly nacházet podle Pauliho vylučovacího principu ve stejném kvantovém stavu. Tomu zdánlivě odporuje již existence neutronu (*ddu*), kde jsou dva kvarky *d* v témž stavu. Tento problém vyřešilo právě zavedení další kvantové vlastnosti, která odlišuje jednotlivé kvarky v částici – barevného náboje, barvy. Název této vlastnosti nijak nesouvisí s barvou v „normálním významu“ tohoto pojmu; nová vlastnost kvarků mohla být nazvána i jinak.
- **Intermediální částice:** 8 intermediálních částic, které nazýváme gluony (z angl. *to glue*). Vzhledem k tomu, že jde o interakci krátkého dosahu, je hmotnost těchto částic nenulová.

Jde o výběrovou interakci, která působí jen na částice složené z kvarků, tj. na hadrony (mezony a baryony).

Na rozdíl od ostatních interakcí jsou v silné interakci samy intermediální částice nositeli barevného náboje. To neznáme u elektromagnetické interakce: foton jako intermediální částice elektromagnetické interakce sám o sobě nenese elektrický náboj. Důsledkem tohoto faktu je tzv. antistínění barevného náboje. Čím blíže kvarku se nacházíme, tím je jeho barevný náboj menší. Proto kvarky na velmi malých vzdálenostech neinteragují a síla interakce roste se zvětšující se vzdáleností. Proto se kvarky nevyskytují nikdy o samotě.

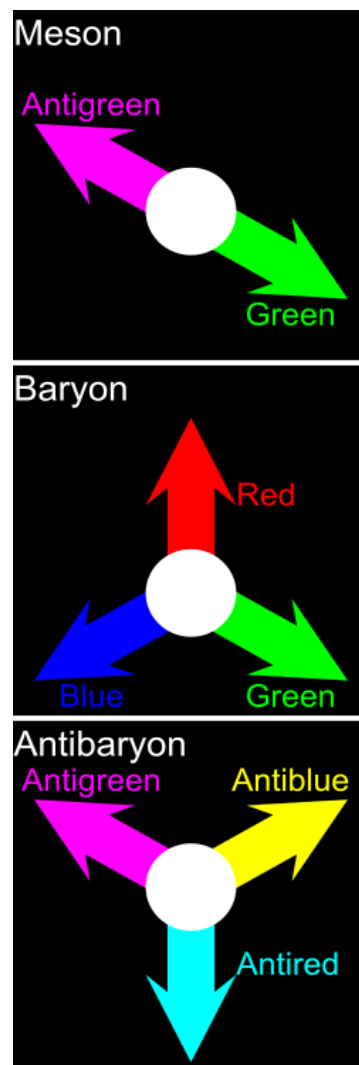
Barevný náboj nabývá šesti hodnot: červené, zelené a modré pro kvarky a antičervené, antizelené a antimodré pro antikvarky. Ačkoliv tyto barvy nemají nic společného s barvami v běžném smyslu, nejsou zvoleny náhodně. Kvarky se totiž skládají do částic tak, že složené částice mají neutrální barevný náboj, tj. „bílou barvu“: První možností je kombinace kvark–antikvark (např. červená + antičervená = bílá). To jsou pro nás již známé **mezony**. Druhou možností je složení tří kvarků různých základních barev, které dohromady dají bílou (např. červená + zelená + modrá = bílá), pak jde o **baryony**.

GRAVITAČNÍ INTERAKCE

Gravitační interakce byla/bude probrána ve výkladu **obecné teorie relativity**.

Gravitační vlny byly zachyceny na interferometrickém detektoru LIGO ve Spojených státech na konci roku 2015, tedy 100 let poté, co je předpověděl Albert Einstein. LIGO má čtyřkilometrová ramena, jeden přístroj je v Hanfordu, druhý v Livingstonu (tři tisíce kilometrů od sebe). Významnou osobností tohoto projektu je americký fyzik KIP THORNE.

Předpokládá se, že i gravitace má zprostředkující částice – **gravitony**. Ty ovšem nebyly (zatím?) pozorovány.



Barevný náboj

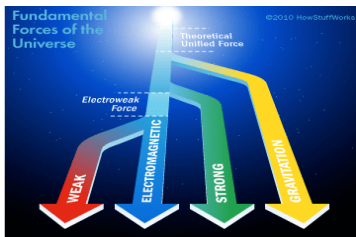
Náboj kvarků je znázorněn barvami barevného modelu RGB. Náboj antikvarků je symbolicky naznačen doplňkovými barvami v modelu CMY.



KIP THORNE

Hyde Park Civilizace

Česká televize, 2019
Zhlédnout lze anglickou i česky dabovanou verzi rozhovoru.



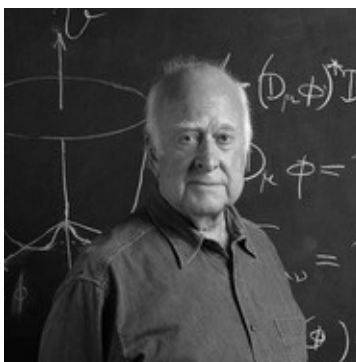
Velké sjednocení



Richard Phillips Feynman

Spoluautor kvantové teorie pole, nositel Nobelovy ceny (1965), oblíbený učitel a popularizátor fyziky.

Fotografie je jednou z „ikonických“ fotografií z dějin USA; Feynman jako člen vyšetřovací komise ukazuje veřejnosti jednoduchý pokus se sklenicí ledového nápoje, jímž prokazuje, že příčinou tragické havárie raketoplánu Challenger v roce 1986, při níž zahynulo sedm astronautů, byla ztráta pružnosti těsnícího gumového kroužku. V témž roce došlo i k havárii sovětské jaderné elektrárny v Černobylu. Jakkoliv jsou obě tragické, fyzikálně-technické události zásadně odlišné svým přímým dopadem na civilní obyvatelstvo, byly svými politicko-společensko-mediálními důsledky významnými mezníky v dějinách studené války.



Peter Higgs

V roce 1993 prohlásil britský ministr pro vědu, že kdo mu nejsrozumitelněji objasní Higgsovy mechanismus, vyhraje láhev kvalitního sektu. Na-

V průběhu let dochází ve fyzice ke vzniku mnoha nových odvětví, fyzika se diferencuje. Současně však probíhá integrační proces – snaha o jednotný popis fyzikálních jevů. Tak byla v 19. století pochopena společná podstata jevů elektrických a magnetických a vznikla teorie elektromagnetického pole. Po vzniku kvantové teorie se objevila příslušná kvantová analogie – kvantová elektrodynamika a kvantová teorie elektromagnetického pole. V době relativně nedávné se podařilo „spojit“ elektromagnetickou a slabou interakci v teorii **elektroslabé interakce**. Nyní probíhají intenzivní pokusy připojit k teorii elektroslabé interakce ještě interakci silnou (tzv. **velké sjednocení**) a gravitační (tzv. **teorie všeho**).

ELEKTROMAGNETICKÁ INTERAKCE

Společná podstata jevů elektrických a magnetických byla pochopena v druhé polovině 19. století a vyústila v sadu rovnic klasické elektrodynamiky, u jejichž zrodu stáli JAMES CLERK MAXWELL, OLIVER HEAVISIDE a HEINRICH HERTZ (první formulace v roce 1873). Dnes tyto rovnice nazýváme Maxwellovy rovnice.

Ve dvacátém století se objevila kvantová podoba elektrodynamiky a kvantová teorie elektromagnetického pole (PAUL A. M. DIRAC, RICHARD FEYNMAN, JULIAN. SCHWINGER, ŠIN'ICHIRO TOMONAGA).

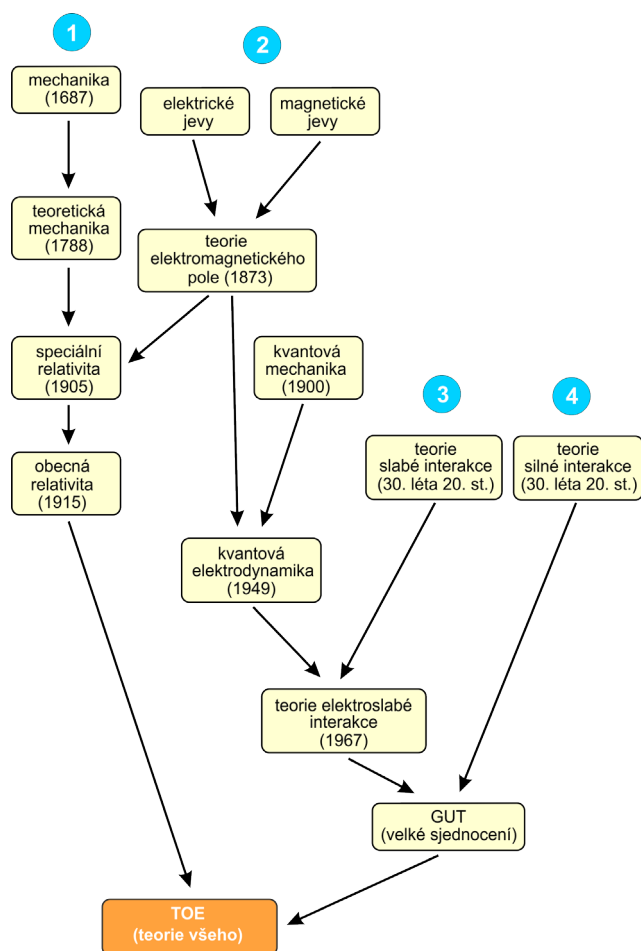
ELEKTROSLABÁ INTERAKCE A HIGGSŮV BOSON

V šedesátých letech 20. století se ukázalo, že je možné vytvořit teorii, která by jednotně popisovala elektromagnetickou i slabou interakci. Teorie elektroslabé interakce předpověděla, že kromě fotonu existují ještě další tři výměnné částice: intermediální bosony W^+ , W^- , Z^0 , které odpovídají za slabou interakci.

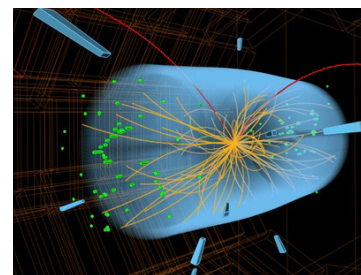
V teorii elektroslabé interakce byl jeden zásadní problém. Aby nebyla ve sporu s experimenty, musí být jistým způsobem narušena její symetrie. Za narušení symetrie by měly být odpovědné další částice, které nazýváme **Higgsovy bosony**. Jejich existenci – a vůbec celý mechanismus, jak polní i další částice získávají hmotnost –, navrhl v roce 1964 skotský fyzik a matematik PETER HIGGS. Higgsova částice se stala nejdéle hledanou částicí standardního modelu elementárních částic. Detekována byla až v roce 2012 na urychlovači LHC v CERN.

TEORIE VELKÉHO SJEDNOCENÍ

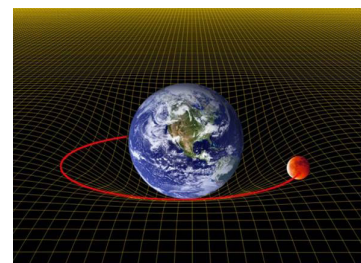
Pokusy popsat jednotně interakce elektroslabou a silnou se nazývají **teorie velkého sjednocení** neboli GUT (*Grand Unified Theory*). Řada z těchto pokusů byla již provedenými experimenty vyvrácena. Nejpravděpodobnější varianty teorií GUT předpovídají existenci dalších



OBR. 12



konec zvítězil tento příběh: „Představte si rozsáhlý sál, kde je na večírku velké množství vědců. Tito vědci představují Higgsovo pole. Nyní vejde výběrčí daní a chce projít sálem k barovému pultu. Celkem bez odporu projde, nikdo se s ním bavit nebude. Výběrčí daní představuje částici, která s Higgsovým polem neinteraguje a ponechá si nulovou hmotnost. Takovou částici je například foton. Poté do sálu vejde někdo významný, například sám Peter Higgs. Každý z vědců mu chce sdělit novinky ze své laboratoře, každý touží si s ním potrást pravici a prohodit alespoň pár slov. Než se Higgs prodere k baru, aby si objednal pivo, uplyne celá věčnost. Taková významná persóna představuje částici, která intenzivně interaguje s Higgsovým polem a získá nenulovou klidovou hmotnost, a proto se pohybuje pomaleji. Nakonec vejde posel zajímavých zpráv. Novinku sdělí nejbližším stojícím hned u vchodu a poté odejde. Novinka se šíří davem, tu a tam se vytvoří hlouček, který o zprávě diskutuje a poté ji sdělí dalším účastníkům večírku. Takové vynořující se hloučky představují Higgsovu částici, která se občas vynoří z Higgsova pole.“



Obecná teorie relativity

Newtonovský koncept působící síly nahrazuje obecná teorie relativity popisem pohybu v zakřiveném prostoročase. „Hmota vládne prostoru tím, že mu říká, jak se zakřivovat, a prostor vládne hmotě tím, že jí říká, jak se pohybovat.“ (John Wheeler)

intermediálních částic, které by měly způsobovat přechody mezi kvarky a leptony. Důsledek by byl zásadní: nestabilita protonu.

TEORIE VŠEHO

Ačkoliv žádná z teorií GUT není potvrzena, stále se objevují pokusy o jednotný popis všech interakcí, tj. o připojení gravitační interakce do jednotné teorie. Se zřejmou nadsázkou se nazývají **teorie všeho** (TOE, *theory of everything*)

Gravitační interakce se významně liší od předchozích tří interakcí. Gravitace působí nejen na všechny materiální objekty, ale i na intermediální částice. Základní teorií gravitace je obecná relativita, která převádí problémy síly na pohyb v zakřiveném prostoročase. Teorie má tedy zcela odlišnou konstrukci než teorie ostatních tří interakcí, které využívají výměnné částice. Jednotný popis gravitační a ostatních interakcí tedy znamená teoretické spojení obecné relativity s kvantovou teorií.

Spojení kvantové teorie s obecnou relativitou naráží ve čtyřech dimenzích na principiální problémy. Tyto problémy lze překonat ve vesmíru s vyšším počtem dimenzí (10, 11, 26, 506, ...). Je možné, že náš vesmír je skutečně například desetidimenzionální, ale v makrosvětě vnímáme jen naše čtyři dimenze. Může to být podobné pohledu na chomáč vaty, který se z dálky jeví jako třídimenzionální útvar s definovaným objemem. Při podrobnějším prozkoumání zjistíme, že je vata tvořena vláčkénky a že definovat objem nemusí být vůbec jednoduché. Ostatních 6 dimenzí našeho vesmíru by také mohlo tvořit jakási „vláčkénka“. Elementární částice pak nejsou bodové útvary, ale jednodimenzionální útvary, které nazýváme **struny**.

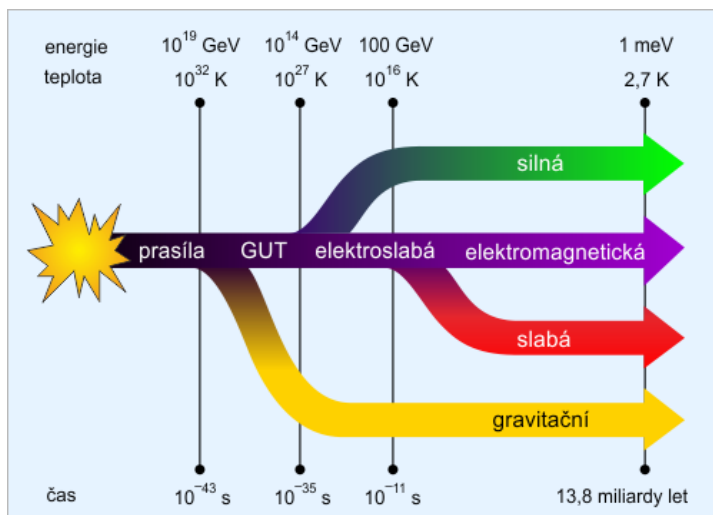
POČÁTEČNÍ SUPERSYMETRIE



The Big Bang Theory
The Final Episode

Sheldon Cooper přijímá Nobelovu cenu za své objevy v oblasti finální teorie.

Všechny čtyři interakce by se měly chovat jednotně při energiích vyšších než 10^{19} GeV. Tyto podmínky nastaly ve vesmíru 10^{-43} s po velkém třesku (tzv. Planckův čas). V Planckově čase tedy došlo k narušení

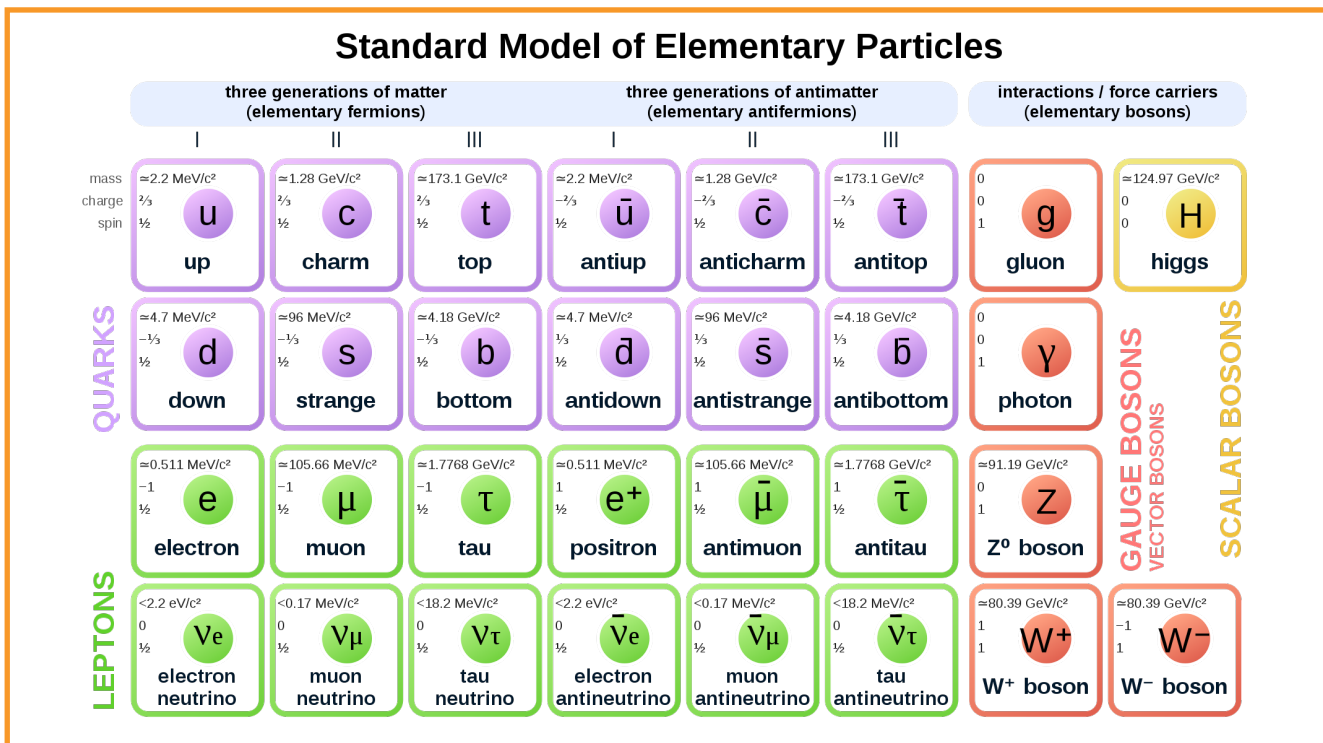


OBR. 13

supersymetrie a „oddělení“ gravitační interakce od elektroslabé a silné interakce. Vesmír před tímto časem asi měl zcela jiné vlastnosti a platily v něm přírodní zákony, které neznáme. Planckův čas je tedy současně časem, od kterého jsme schopni

vesmír vůbec popsat. Teplota v Planckově čase se odhaduje na 10^{32} K a hustota vesmíru na 10^{97} $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Vývoj jednotlivých interakcí („sil“) z původní supersymetrické interakce („prasilá“) znázorněný v OBR. 13 však dosud není experimentálně potvrzen.

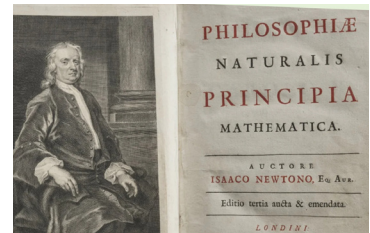
STANDARDNÍ MODEL



OBR. 14

Literatura

„VYKRAZENÁ“ & POUŽITÁ LITERATURA



- [Hal5] Halliday, D. – Resnick, R. – Walker, J.: Fyzika V: *Moderní fyzika*. 1. vyd. Brno: Vutium, Prometheus, 2000.
- [TČ] Tarábek, P. – Červinková, P.: *Odmaturuj z fyziky*. 2. vyd. Brno: Didaktis, 2006.
- [VSF] *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.
- [Hoř19] Hořejší, J.: *Tajemný mikrosvět. Stručná historie standardního modelu*. 1. vyd. Praha: MatfyzPress, 2019.
- [WK2] Wagner, J. – Kopal A.: *Fyzika II*. 2. vyd. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 1995.
- [Ald] Kulhánek, P. – Havlíček, I. – Rozehnal, J. – Břeň, D: *Astrofyzika – Částice a interakce* [online; cit. 2020-12-19]. <<https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/interakce/>>
- [PA] *The Particle Adventure* [online; cit. 2020-12-19]. <<https://particleadventure.org>>
- [CPEP] *The Contemporary Physics Education Project* [online; cit. 2020-12-19]. <<https://www.cpepphysics.org/>>
- [1] Dolejší, J. – Kotrbová, O.: *Částicová fyzika pro začátečníky* [online; cit. 2020-12-19]. <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~dolejsi/textbook/particle_textbook_CZ.htm>
- [2] Desai, R.: *The atom*. [online; cit. 2020-12-19]. <<https://drrajivdesaimd.com/2014/07/26/the-atom/>>

ZDROJE ČÍSLOVANÝCH OBRÁZKŮ

- [Hal5] 6, 7; [Ald] 10, 11, 12, 13; [PA] 3; [2] 2; Wikipedia.org: 1, 8, 9, 14; Josip Kleczek: *Vesmír kolem nás* (Albatros, Praha 1986): 4

ZDROJE OSTATNÍCH OBRÁZKŮ

- 1 <https://www.energy.gov/science/doe-explains-the-standard-model-particle-physics>; Particle Physics Spring (12) 2016 | 3 <https://www.universetoday.com/tag/fundamental-particles/> | 4 Vitězslav Pěnička | 5 CERN | 6 [CPEP]; <https://www.eucall.eu/network/desy/>; [TČ]; Autor: Brücke-Osteuropa – Vlastní dílo, CCo, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22544329>; [1]; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fermilab_satellite.gif | 7 [2]; <https://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch#/media/Datei:SternGerlach2.jpg>; https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:JJ_Thomson.jpg | 8 <https://medium.com/@phalperm/emmy-noether-the-struggles-of-a-mathematical-genius-205b20de4b23>; <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/1621-zaplnovani-orbitalu-elektrony> | 9 https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model; [1]; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Enrico_Fermi_1943-49.jpg;



Aldebaran



The Particle Adventure



The Contemporary Physics Education Project



Částicová fyzika pro začátečníky



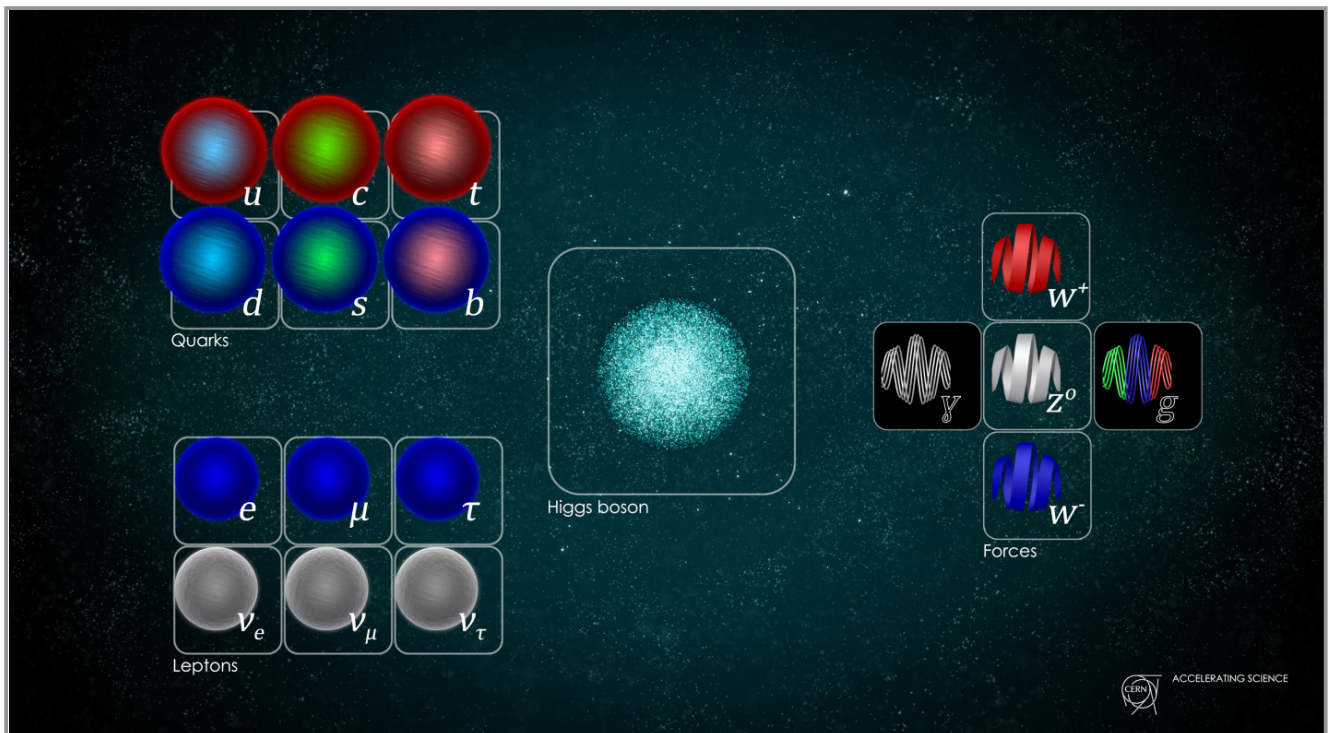
Studijní text je vysazen písmem Pepone českého typografa Františka Štorma

Autor o písmu říká: „Je určeno především k sazbě krásné literatury. Název *Pepone* je poctou Josefu Kroutvorovi. Základní řezy jsou opticky a proporčně vyváženy pro malé velikosti a dlouhé čtení. Jeho vývoj byl veden myšlenkou na současné a nenápadné knižní patkové písmo s aktuálním výrazem a mnoha funkcemi. Písmena mají jen mírný kontrast tahů, světlé řezy mohou působit jako drátěná kresba, zatímco v těch tmavších poznáváme typické rysy egyptienky. Mírný sklon italik je vzdálen každému extrému a jemné stínování nevytváří grafické napětí. Úsporný až minimalistický ráz kresby se dobře hodí na dlouhé texty, kde se osvědčuje emotivní nezabavenost, jež napomáhá sledování obsahu. Výrazné vodorovné patky pevně ukotvují řádku v ploše papíru, ostře řezané detaily ilustrují vytříbenost slohu. Na úvahu se ponechává užití extrémně tučných řezů: jejich vzhled, zejména v italikách, může evokovat 60. léta a poslouží spíše v jednotlivých nápisech, stejně jako nadměrné zdobení či četnost ligatur, jež by neprospěly plynulosti četby; všechny tyto funkce jsou jednotlivě vypínatelné a ponechané na úvahu inteligentním grafikům. Použití pochopitelně není nikterak omezeno jen na dílo zmíněného autora, ba právě naopak. Ostatně nebyl by to první ani poslední případ, kdy se jednoúčelová abeceda stala universální.

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SatyenBose1925.jpg> | **10** https://twitter.com/i_sooryas/status/1058673111892078592; <https://quantumfrontiers.com/2015/04/12/paul-dirac-and-poetry/>, <https://fyzmatik.pise.cz/192-diracovo-netradicni-reseni-ulohy-o-rybarich.html>; archiv PKF | **11** <https://www.slideshare.net/mahboob804/levels-of-magnification-at-quantum-level-behavior-of-atoms-till-they-form-matterbydrmahboob-ali-khan-phd> | **12** <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/scientists-say-crystal>; <https://innowacje.newseria.pl/news/potwierdzono-wplyw,p1228137664>; <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/FirstNeutrinoEventAnnotated.jpg>; <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=333866> | **13** <https://www.nuclear-power.net>; <https://www.nytimes.com/2020/04/15/science/physics-neutrino-antimatter-ichikawa-t2k.html>; https://cs.wikipedia.org/wiki/U%C5%A1lechtil%C3%A1_osmid%C3%ADln%C3%A1_stezka | **14** <http://www.hep.fsu.edu/~wahl/satmorn/history/Omega-minus.asp.htm> | **15** [Ald]; Autor: World Economic Forum – Flickr: Murray Gell-Mann – World Economic Forum Annual Meeting 2012, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18227534>; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:James_joyce.jpg | **16** http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/keyhole/en/projects/number_of_families.html | **17** <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18017561>; [2] | **18** Matt Strassler, <https://profmattstrassler.com/articles-and-posts/largehadroncolliderfaq/whats-a-proton-anyway/> | **19** By ParticlesAndMath – Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=87583307>; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Particles_by_fundamental_interactions.svg; <https://twitter.com/awarenergy/status/963337418731671553> | **20** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta-minus_Decay.svg; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:William_Rowan_Hamilton_Plaque_-_geograph.org.uk_-_347941.jpg; <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maxwell%27sEquations.svg>; <https://en.wikipedia.org/wiki/Gargamelle#/media/File:Gargamelle.jpg> | **21** https://en.wikipedia.org/wiki/Quark#/media/File:Hadron_colors.svg | **22** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peter_higgs_chalkboard.jpg; <https://sciscomedia.co.uk/richard-feynman-genius-of-simplicity/icedunk/>; <http://thesoulwanderers.blogspot.com/2017/12/quotes-of-wisdom-grand-unified-theories.html> | **23** archiv PKF; CERN | **24** [youtube.com](https://www.youtube.com) | **25** <https://www.nationaltrust.org.uk/> | **26** <https://www.stormtype.com/>; Vladimír Renčín, dikobraz.cz

Obrázky, které tu nejsou explicitně uvedeny, jsme našli v rozsáhlém digitálním archivu předmětové komise fyziky naší školy. Původní zdroj se bohužel nepodařilo dohledat. Citace rádi doplníme.





O vlních a barvách
Sternův-Gerlachův pokus
Spin a symetrie
Systém částic
Leptony
Kvarkový model & Eightfold Way
Veličiny popisující částice
Zákony zachování v mikrosvětě
Elektromagnetická interakce
Slabá interakce
Silná interakce
Gravitační interakce
Elektromagnetická interakce
Elektroslabá interakce a Higgsův boson
Teorie velkého sjednocení
Teorie všeho
Počáteční supersymetrie
Standardní model

Studijní text Gymnasia F. X. Šaldy shrnuje základní poznatky o elementárních částicích a standardním modelu.

Tento text je spolu se studijním materiálem *Urychlovače a detektory částic* základní (a doporučenou) literaturou k přípravě na 10. maturitní otázku Gymnasia F. X. Šaldy *Elementární částice*.

www.gfxs.cz

