

Standardní model

Fyzikové vytvořili teorii nazývanou *standardní model*, která popisuje veškerou hmotu a všechno silové působení ve vesmíru s výjimkou gravitace. Její půvab a síla spočívají v tom, že dokáže popsat stovky částic a jejich složité vzájemné působení pomocí několika málo fundamentálních částic a interakcí.

Základní prvky

- **Částice-nosiče interakce.** Každý ze základních typů silového působení je "zprostředkovan" částicí-nosičem (příkladem takové částice je foton).

- **Hmotové částice.** Podle standardního modelu je většina částic hmoty, které známe, ve skutečnosti složená z ještě fundamentálnějších částic nazývaných kvarky. Vedle nich existuje jiná třída fundamentálních částic nazývaných leptony (příkladem leptonu je elektron).


Rozeznáváme tedy dvě třídy částic: Částice, jež představují "kousky" hmoty (elektrony, protony, neutrony, kvarky) a částice, jež přenášejí silové působení (jako fotony).


Prvním typem částic, kterými se budeme zabývat, jsou **leptony**.


Existuje šest typů leptonů, z nichž tři nesou elektrický náboj a tři jsou elektricky neutrální. Nejznámějším nabitým leptonem je elektron (e). Další dva leptony s nábojem jsou mion (μ) a lepton tau (τ); jsou to prakticky kopie elektronu, pouze jejich hmotnost je mnohem vyšší. Všechny nabité leptony nesou záporný náboj.

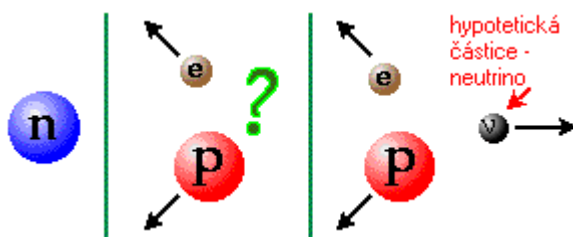
Zbývající tři typy leptonů jsou velmi obtížně pozorovatelná (protože jejich vzájemné silové působení s jinými částicemi je nesmírně slabé) [neutrino](#). Mají nulový elektrický náboj a velmi malou - pokud vůbec nějakou - hmotnost. Každý ze tří typů nabitých leptonů má "své" neutrino.


Ke každému z šestice leptonů existuje partner z [antihmoty](#) (**antilepton**), který má stejnou hmotnost a náboj opačného znaménka (antineutrino mají pochopitelně *nulový* náboj, ale nejsou totožná s neutriny - pozná se to třeba podle toho, že neutrino interagují s jinými částicemi než antineutrino).

 - - - Neutrino představují jeden ze dvou typů leptonů. Mají nulový elektrický náboj a nepatrnou (alespoň některé typy možná nulovou) hmotnost (otázka hmotnosti neutrin je v současnosti velmi aktuální, o její definitivní vyřešení usiluje několik experimentů). Téměř neinteragují s ostatními částicemi. Většina neutrin přicházejících z kosmu prolétne napříč Zemí a ani jednou při tom nezainteraguje.

 - - - Neutrino vznikají při nejrůznějších rozpadech a interakcích. Například neutron se rozpadá na proton, elektron a antineutrino. Právě detailní studium takových radioaktivních rozpadů vlastně přivedlo fyziky k hypotéze o existenci neutrina.

 - - - Pozorovalo se například, že při rozpadu neutronu na elektron a proton není součet hybností elektronu a protonu roven původní hybnosti neutronu. To vedlo k představě, že existuje další, téměř nepozorovatelná částice, která se podílí na rozpadu a vyrovnává bilanci hybnosti; dostala jméno neutrino.



 - - - Neutrino vznikají v hojném počtu a skoro neinteragují s ostatní hmotou, takže jich je ve vesmíru mnoho. Kdyby měla nenulovou (byť třeba velmi malou) hmotnost, významně by přispívala k celkové hmotnostní bilanci ve vesmíru a ovlivnila by způsob, jakým se vesmír rozpíná.

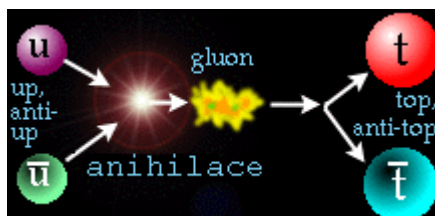
Další částice hmoty, kterými se budeme zabývat, dostaly jméno kvarky.

Existuje šest typů kvarků, které lze podle fyzikálních vlastností uspořádat do tří párů: u/d (z anglického up/down), c/s (charm/strange - pro tento pár se používá i české pojmenování půvabný/podivný) a t/b (top/bottom). Ke každému kvarku existuje odpovídající kvark z [antihmoty](#) - antikvark.

Kvarky mají nanejvýš neobvyklou vlastnost - nesou "neceločíselný" (vyjádřeno v jednotkách náboje protonu) elektrický náboj $2/3$ nebo $-1/3$ (náboj elektronu je v těchto jednotkách -1 a náboj protonu, pochopitelně, 1). Všechny běžné částice mají při tom náboj celočíselný. Kvarky nesou i další typ náboje nazývaný [barevný](#); o něm bude řeč později.

Ke každé částici (**hmota**) existuje odpovídající antičástice (**antihmota**). Antičástice jsou ve všech ohledech stejné jako partnerské částice, pouze jejich náboje jsou opačné. Například proton nese kladný elektrický náboj, antiproton má tedy záporný. Proton i antiproton mají ovšem přesně stejnou hmotnost, takže gravitace působí na oba stejně.

Když se částice a antičástice setkají, dojde k anihilaci. Vzniká energie, která se uvolňuje v podobě neutrálních částic-silových nosičů jako fotony, bosony Z nebo gluony.



Trocha názvosloví:

Antičástice se označují vodorovným pruhem nad symbolem odpovídající částice nebo změnou znaménka, pokud se v označení částice vyskytuje. Například antičástice protonu (P) se označuje symbolem \bar{P} a nazývá se antiproton. Antičásticí elektronu (e^-) je pozitron (e^+).

Antihmoty se týká jedna vážná otázka, na kterou fyzikové hledají odpověď:

Hmota a antihmota jsou úplně stejné, až na opačné náboje. Jak je tedy možné, že ve vesmíru je (podle všeho, co víme) daleko víc hmoty, než antihmoty? A proč "přetlačila" hmota antihmotu a nikoli naopak?

Antihmota v experimentech

Fyzikové nechávají srážet svazky P a \bar{P} nebo e^- a e^+ a studují částice, které vznikají (často ve velkých počtech) po rozpadu bosonů (částic-nosičů interakce).

Příkladem takové anihilace je [anihilace elektronu a pozitronu](#), při níž vznikají částice D^\pm .

Prohlédněte si důkaz existence antihmoty viditelný prostým okem - anihilaci protonu a antiprotonu na staré [fotografii z bublinové komory](#) (55 kB).

Náš svět existuje díky tomu, že fundamentální částice interagují - váží se dohromady, rozpadají se, anihilují nebo reagují na silové působení jiné částice (jako třeba při srážce). Jsou známy čtyři typy interakce mezi částicemi:

Ujasněme si rozdíl mezi pojmy "síla" a "interakce":

Síla

je efekt, kterým působí na částici jiná částice.

Interakce

je souhrn silového působení a mechanismů rozpadu, jež ovlivňují danou částici.

Interakce není totéž, co síla - slovo "interakce" má širší význam. I když se oba pojmy se často užívají, jako by znamenaly jedno a totéž, fyzikové dávají přednost slovu "interakce".

Gravitace je asi pro každého neznámější ze všech interakcí, protože se s ní nepřetržitě setkáváme v každodenním životě. Do standardního modelu však není zahrnuta, protože její účinky v částicových procesech jsou zanedbatelné. Gravitace sice působí úplně na všechno, ale pokud nejsou ve hře opravdu velké hmotnosti, její silový účinek je velmi slabý.

Fyzikové dosud neobjevili částici-nosič gravitace, avšak existenci takové částice předpokládají a dokonce jí už dali jméno - **graviton**.

Ukázalo se, že některé částice (konkrétně kvarky a gluony) nesou náboj jiného typu než elektromagnetický. Dostal název **barevný náboj** nebo **barva**. Síla mezi částicemi nesoucími barevný náboj je nesmírně velká, díky čemuž dostalo toto silové působení jméno **silná interakce**. Tato síla drží pohromadě kvarky v hadronech, a proto její nosiče dostaly tak trochu žertovné jméno **gluony** (z angl. glue - lepidlo; gluony s velkým úspěchem "slepují" kvarky dohromady).

Je třeba si uvědomit důležitou věc: Barevný náboj nesou *pouze* kvarky a gluony. Hadrony (jako třeba protony a neutrony) jsou vůči barvě neutrální, stejně jako leptony. Silná interakce tedy přímo působí jen na velmi malých vzdálenostech na úrovni kvarků.

Barevný náboj

[Kvarky](#) a [gluony](#) jsou částice s barevným nábojem. Tak jako elektricky nabitě částice interagují prostřednictvím výměny fotonů, vyměňují si barevně nabitě částice gluony při interakci nazývané [silná](#).

Dva nebo více kvarků, které se ocitly blízko sebe, si s velkou intenzitou vyměňují gluony a vytvářejí velmi silné *barevné silové pole*, které váže kvarky k sobě. Barevný náboj může nabývat tří hodnot, kterým se (podle barev skutečného spektra, ale vztah se skutečnými barvami není samozřejmě žádný, výběr jmen těchto nábojů je zcela věcí dohody) obvykle říká červená, modrá a zelená; jiných (ve smyslu barevného náboje opačných či doplňkových) tří hodnot nabývá "antibarevný" náboj antikvarků. Kvarky při výměně gluonů s jinými kvarky neustále mění barevný náboj.

Každý kvark nese barevný náboj v jedné ze tří možných hodnot. každý antikvark má jednu ze tří hodnot náboje doplňkového. Gluony nesou náboj barevně-antibarevných párů (přičemž barva nemusí být stejná - jsou tedy například možné gluony s nábojem červená/anti-modrá). Je celkem 9 kombinací párů barva/antibarva, ale z důvodů symetrie se jedna z nich neuskutečňuje. Gluony tedy ve skutečnosti nesou 8 různých hodnot barevně/antibarevného náboje.

Uvěznění kvarků

Částice s barevným nábojem se v přírodě nevyskytují osamoceně. Kvarky s barevným nábojem jsou **uvězněny** spolu s dalšími kvarky uvnitř hadronů. Tyto složené objekty jsou barevně neutrální (jejich celkový barevný náboj je nulový).

Teprve se vznikem teorie silných interakcí v rámci standardního modelu dokázali fyzikové vysvětlit, proč se kvarky seskupují jen do podoby baryonů (tři kvarky) nebo mezonů (pár kvark-antikvark), avšak nikoli například do skupin po čtyřech. Nyní chápeme, že pouze prvně uvedené kombinace mohou být barevně neutrální. Částice složené třeba z kvarků ud nebo dd , jež nelze zkombinovat do barevně neutrálních stavů, nebyly v experimentech nikdy pozorovány.

Jak barevný náboj působí

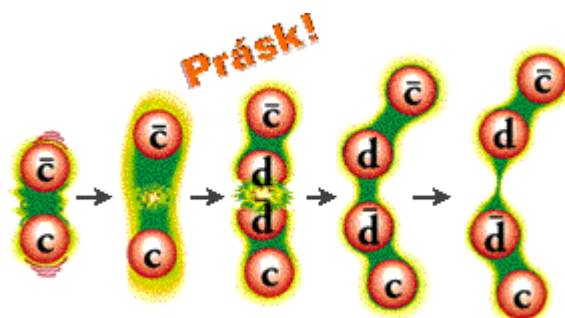
Barevný náboj se za všech okolností zachovává. Když tedy kvark absorbuje nebo emituje gluon, jeho barva se musí změnit, aby se zachoval celkový náboj. Představme si například, že "červený" kvark emituje "červený/anti-modrý" gluon. Výsledkem musí být "modrý" kvark - jedině tehdy zůstává celkový barevný náboj v procesu červený.

Kvarky neustále vyzařují a pohlcují gluony uvnitř hadronu, takže nijak nemůžeme pozorovat barevný náboj jednotlivého kvarku. Uvnitř hadronu se ovšem barva dvou kvarků, jež si vyměňují gluon, neustále mění takovým způsobem, že se celý vázaný systém udržuje v barevně neutrálním stavu, takže je pozorovatelný.

Barevné pole

Kvarky uvnitř hadronu si soustavně vyměňují gluony. Fyzikové v této souvislosti hovoří o **barevném poli** tvořeném gluony, jež udržuje skupinu kvarků pohromadě.

Jestliže něco přinutí jeden kvark v hadronu, aby se vzdálil se od svých sousedů, mezi ním a sousedními kvarky se "natáhne" barevné pole. Čím víc se kvarky od sebe vzdalují, tím víc energie se musí dodat barevnému poli mezi nimi. V určitém okamžiku je pro barevné pole energeticky výhodnější "přetrhnout se" na dva nové kvarky. Celková energie při tom zůstává zachovaná, protože energie barevného pole se přemění na hmotnost nově vzniklých kvarků a barevné pole se může "smrštit" zpátky do nenataženého stavu.



Kvarky nemohou existovat osamocně, protože je barevné pole neustále poutá k dalším kvarkům.

Zbývá ještě jedna interakce, kterou jsme se dosud podrobněji nezabývali - slabá.

Existuje 6 typů kvarků a 6 typů leptonů. Proč se tedy všechna stabilní hmota ve vesmíru skládá z kvarků dvou nejméně hmotných typů (u, d) a z nejméně hmotných nabitých leptonů - elektronů?

Působením slabé interakce se všechny kvarky a nabitě leptony s vyšší hmotností rozpadají na lehčí částice. Částice po rozpadu "zmizí" a místo ní se objeví dvě nebo více nových částic. Součet hmotností nových částic je vždy menší než hmotnost původní částice. Celý proces skončí, až pokud se vzniklé částice už "nemají na co" rozpadat. Proto se stabilní hmota okolo nás skládá pouze z elektronů a nejlehčích dvou typů kvarků, u a d.

● Když se nějaký kvark nebo lepton rozpadne na jiný (změní se jeho typ, například mion na elektron), říkáme, že se změnila jeho **vůně** (angl. flavor). Ke změnám vůně dochází jedine působením slabé interakce.

Nosiči slabé interakce jsou **bosony W^+ , W^- a Z** . Částice W jsou elektricky nabitě, Z neutrální.

Velmi zajímavou vlastností standardního modelu je to, že elektromagnetické a slabé interakce v něm vystupují jako jediná, sjednocená interakce, již se říká

V rámci standardního modelu jsou **slabá** a **elektromagnetická** interakce propojeny do podoby jednotné **elektroslabé teorie**.

Slabé náboje úzce souvisí s elektromagnetickými náboji a v jistém velmi důležitém smyslu nejsou vlastně ve srovnání s nimi malé. Z naší tabulky relativní síly interakcí můžete vyčíst, že na velmi malých vzdálenostech (10^{-18} metru) je síla slabé interakce srovnatelná s elektromagnetickou. Na vzdálenosti třicetkrát větší (což je stále ještě mnohem méně, než je průměrná vzdálenost kvarků v protonu nebo neutronu) je ovšem síla slabé interakce již podstatně menší než interakce elektromagnetické.

Na pohled to vypadá, že slabá a elektromagnetická interakce mají velmi rozdílnou intenzitu, ale jejich intenzita ("síla vazby") je ve skutečnosti téměř stejná. Odlišnost obou interakcí je dána obrovským rozdílem v hmotnostech nosičů - na jedné straně těžkých W a Z (jejich hmotnost je téměř stonásobkem hmotnosti protonu) a na druhé straně fotonu s nulovou hmotností.

Platí totiž, že interakční potenciál slabé interakce prudce klesá se vzdáleností podle vztahu

$$e^{-\frac{r \cdot m \cdot c}{\hbar}},$$

kde m je hmotnost, r vzdálenost, c rychlost světla a \hbar Planckova konstanta.

Ted', když je nám jasný rozdíl mezi hmotovými částicemi a částicemi-nosiči interakce, můžeme přejít k tomu, do jakých kategorií fyzikové tyto fundamentální částice rozdělují.

Začneme tím, že existuje pravidlo nazvané **Pauliho vylučovací princip**, podle něhož existuje třída částic, z nichž žádná se nemůže v daném systému vyskytovat v přesně stejném stavu jako jiná částice stejného typu (tj. se stejným spinem, [barevným nábojem](#), momentem hybnosti atd.).

Fyzikové dělí částice podle vztahu k tomuto pravidlu na dvě třídy - na ty, které se řídí Pauliho principem (tzv. **fermiony**), a na ty, které se jím neřídí (**bosony**).

Mnoho různých fyziků přispělo k rozvoji teorií založených na **supersymetrii**, mimo jiné i jako důležitému příspěvku k budování [teorií velkého sjednocení](#), jež si kladou za cíl sjednotit silnou, slabou a elektromagnetickou interakci a také vysvětlit, proč mají částice právě takové hmotnosti, jaké mají. V supersymetrické teorii je každé pozorované částici přiřazena "stínová" partnerská částice, lišící se vnitřním momentem hybnosti - spinem. V konkrétních modelech supersymetrických sjednocených teorií mají tyto partnerské částice velkou hmotnost. Ke každému kvarku tak patří "skvark", k leptonu "slepton" atd.

Žádná supersymetrická částice nebyla zatím pozorována, avšak probíhají experimenty, ve kterých se po takových částicích pátrá - fyzikové v [CERN](#) například hledají supersymetrické "dvojče" bosonu W, ve [Fermilab](#) zase partnery kvarků a gluonů.

Určitý typ supersymetrických částic (tzv. *neutralina*) by mohl tvořit chybějící [temnou hmotu](#) ve vesmíru.

Jedním z určujících principů vývoje fyziky je snaha spojovat zdánlivě samostatné a nesouvisející teorie do obecnějších a systémově jednodušších teorií, které popisují původně nezávislé pojmy na jednotném základě. Taková sjednocená teorie zpravidla umožňuje oproti jednotlivým dílčím teoriím přesvědčivější vysvětlení i hlubší pochopení pozorovaných skutečností a často poskytuje i zásadní předpovědi, které ovlivňují další směřování výzkumu.

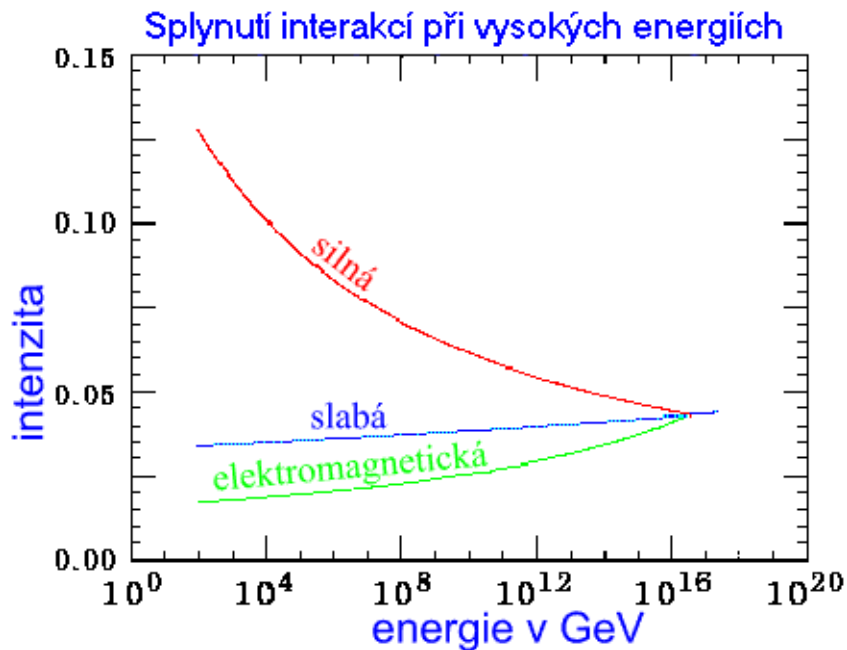
V letech 1861-65 vytvořil například James C. Maxwell jednotnou teorii elektromagnetismu, v níž objasnil vzájemný vztah a propojenost elektrických a magnetických polí. V letech 1881-84 pak H. Hertz prakticky dokázal, že jak radiové vlny, tak světlo jsou elektromagnetické vlny, přesně jak to Maxwellova teorie předpověděla.

Jedním z hlavních cílů současné fyziky částic je spojit silnou, slabou a elektromagnetickou interakci do takzvané [velké sjednocené teorie](#) (nebo také **teorie velkého sjednocení** - anglicky "Grand Unified Theory", zkráceně GUT). Taková teorie nám možná jednou dokáže říci, při jaké energii vymizí rozdíly mezi interakcemi a to, co se při dnešních energiích jeví jako různé interakce, projeví svou skutečnou podstatu jako interakce jediná.

Teorie, které by měly spojit do jednoho rámce silnou, slabou a elektromagnetickou interakci, dostaly jméno **velké sjednocené teorie** či **teorie velkého sjednocení**. Dnešní fyzikové umějí takové teorie sestavit, ale bude třeba více experimentálních dat, abychom mohli říci, která ze současných několika variant (pokud vůbec nějaká) odpovídá skutečnosti.

Pokud tento pohled na svět částic ukáže jako správný, bude to znamenat, že odlišné interakce, které dnes známe, jsou jen různými projevy nějaké obecnější, jednotné interakce. Jak je to možné? Silné, elektromagnetické a slabé interakce, jak je běžně pozorujeme, mají přece podstatně rozdílnou intenzitu i projevy!

Zní to možná podivně, ale experimentální data i teoretické představy nasvědčují tomu, že tyto na pohled zcela odlišné typy interakcí se přiblíží jedna druhé, pokud k vzájemnému působení částic dochází při dostatečně vysokých energiích.



Současné představy o velkém sjednocení vedou také k předpokladu, že existují dosud neznámé částice-nosiče s velmi velkou hmotností, které umožňují mimo jiné rozpad protonu. Takové rozpady musí být velmi vzácné - jinak by se většina protonů už rozpadla a svět, jak ho známe, by neexistoval. Přímá měření prokázala, že doba života protonu je větší než 10^{32} (jednička a 32 nul) let.

Čas od času se ve vědě objeví nový poznatek či idea, která zásadním způsobem změní předchozí způsob nazírání na svět. Příkladem takové revoluce ve vědě (a náboženství) byl třeba Koperníkův objev, že Země není středem vesmíru a dokonce ani sluneční soustavy.

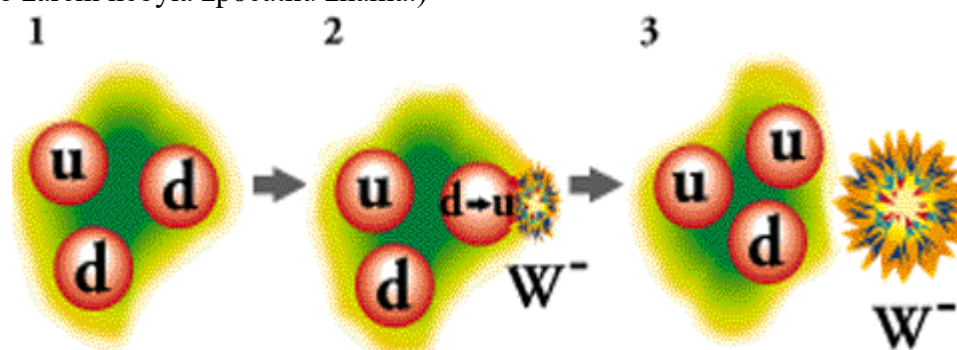
Stejně zásadní změně museli vědci podrobit své představy úplně nedávno - ukázalo se, že většina vesmíru je tvořena zcela jiným typem hmoty, než z jaké se skládá Země, planety a hvězdy. Z gravitačních efektů jasně vyplývá, že musí existovat "temná hmota", tedy hmota, kterou při přímém pozorování vesmíru nevidíme, protože nezáří. Říká se jí také "chybějící hmota", protože "chybí" v celkové bilanci. Je řada nepřímých důkazů pro to, že většina neviditelné hmoty se neskládá z protonů, neutronů a elektronů jako my sami a běžná hmota okolo nás.

Co tvoří temnou hmotu? Odpověď na tuto otázku zatím neznáme. Možná jsou to neutrina, možná ještě exotičtější formy hmoty, které se objevují v úvahách teoretických fyziků.

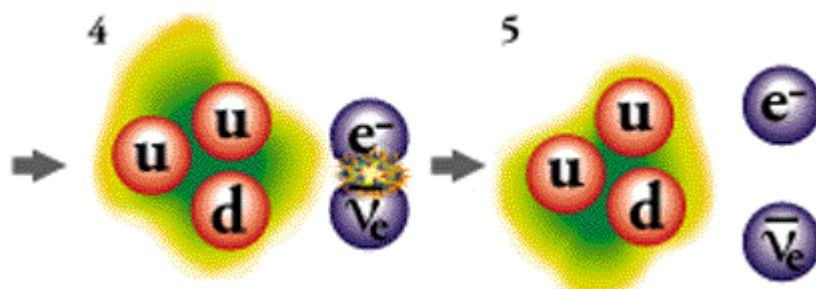
Nahlédli jsme za hranice standardního modelu a seznámili jsme se s některými problémy, které se fyzika částic snaží rozřešit. Tato kapitola končí. Chcete-li se vrátit na úvodní stránku Dobrodružství s částicemi, použijte tlačítko "Úvodní strana".

http://www-hep2.fzu.cz/adventure/map_proj.html

Neutron (udd) se rozpadá na proton (uud), elektron a antineutrino. Tomuto procesu se říká beta rozpad neutronu. (Elektronům se v prvních dobách studia jaderných rozpadů říkalo záření beta, protože pravá podstata tohoto záření nebyla zpočátku známa.)



- Záběr 1: Neutron (s nulovým elektrickým nábojem) se skládá z kvarků udd.
- Záběr 2: Jeden z kvarků d se přemění na u. Kvark d má ovšem náboj $-1/3$, zatímco kvark u $2/3$, takže je jasné, že tento proces musí zprostředkovat záporná částice - virtuální boson W^- , jež odnáší náboj -1 . Celkový náboj je tak zachován.



- Záběr 4: Z virtuálního bosonu W^- vzniká elektron a antineutrino.
- Záběr 5: Proton, elektron a antineutrino se rozlétají různými směry.

Jednotlivá stádia tohoto procesu, jež předcházejí konečnému stavu, trvají jen nepatrný zlomek vteřiny (dal by se zapsat jako jednička lomená jedničkou s 27 nulami) a nejsou přímo pozorovatelná.

Heisenbergův princip neurčitosti

V roce 1927 zformuloval Heisenberg základní princip kvantové mechaniky, podle kterého je nemožné přesně změřit polohu částice a její hybnost SOUČASNĚ. Čím přesněji určíme jednu z veličin, tím méně

toho víme o druhé. Tato vlastnost kvantových objektů se nazývá **Heisenbergův princip neurčitosti**. Formálně se dá vyjádřit vztahem

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

Součin neurčitosti v poloze (x) a neurčitosti v hybnosti (p) je tedy větší nebo roven určité konstantě (h s pruhem se nazývá Planckova konstanta a má v kvantové mechanice speciální význam).

Stejný princip lze vyjádřit i pomocí neurčitosti v energii a času:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

To znamená, že součin neurčitosti v energii a neurčitosti v čase opět nemůže být menší než daná konstanta. Po velmi krátkou dobu tak může nastat obrovská neurčitost ve velikosti energie. Na této představě se zakládá pojem *virtuálních částic*.

Virtuální částice

Při mnoha rozpadech nebo anihilacích vznikají částice-nosiče sil s velmi vysokou energií, které se bezprostředně poté rozpadají na další částice s nižší energií. Tyto vysokoenergetické a velmi krátce existující částice se nazývají **virtuální částice**.

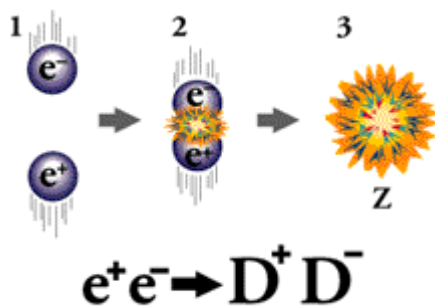
Virtuální částice po dobu své kratičké existence na první pohled narušují zákon zachování energie. Podle principu, se kterým jsme se právě seznámili, však může být neurčitost v energii velmi velká, pokud je proces dostatečně krátký. Díky Heisenbergovu principu neurčitosti tedy takovéto částice ve skutečnosti mohou existovat, ale jen po velmi omezenou dobu. V určitém smyslu tak žijí "na dluh" a mimo běžnou realitu.

Základní a obecně platné pravidlo ovšem je, že celková energie při libovolném procesu se zachovává. Energie částic před rozpadem se v každém případě rovná energii rozpadových produktů.

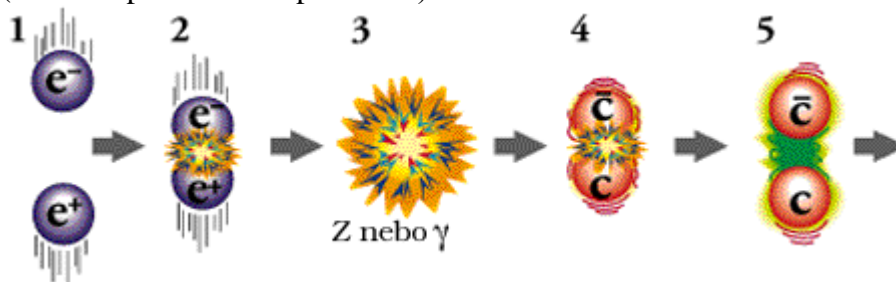
Virtuální částice zprostředkovávají většinu dějů mezi fundamentálními částicemi. Jako příklad můžeme uvést [beta rozpad neutronu](#), [produkci půvabných částic](#) nebo [rozpad částice eta-c](#).

K návratu k [rozpadům částic](#) použijte tlačítko "Zpět",
jinak použijte tlačítko "back" na vašem prohlížeči

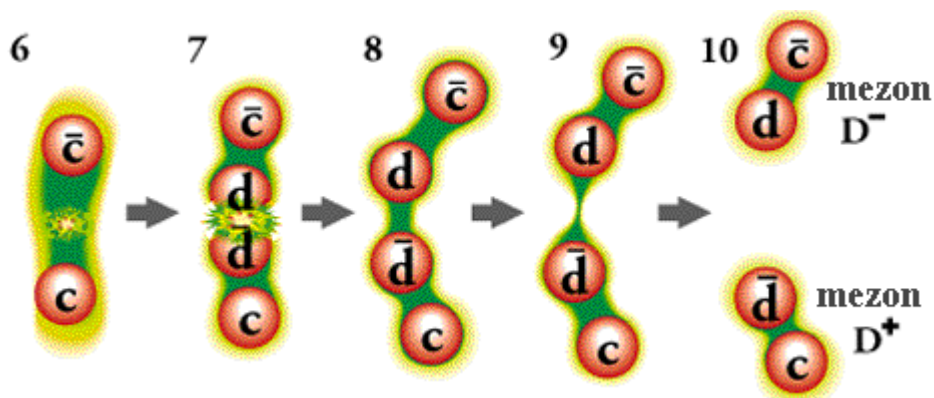
Otázka: Jestliže se při srážce elektronu s pozitronem vytvoří Z, je tato částice Z virtuální?



Když se elektron srazí při vysoké energii s pozitronem (antielektronem), mohou při anihilaci vzniknout mezony D^+ a D^- (částice s půvabem či "půvabné").



- Záběr 1: Elektron a pozitron se říjí vstříc jisté zkáze.
- Záběr 2: Srážejí se a anihilují, při tom se uvolňuje značná energie.
- Záběr 3: Elektron a pozitron vytvořily anihilací virtuální foton nebo virtuální částici Z, tedy [virtuální částice-nosič interakce](#).
- Záběr 4: Virtuální částice-nosič přechází na pár kvark c, kvark anti-c.
- Záběr 5: Kvark a antikvark se začínají vzdalovat a "natahují" mezi sebou [pole barevné síly](#) (gluonové pole).



- Záběr 6: Kvarky se dále vzdalují a ještě víc "napínají" pole mezi sebou.
- Záběr 7: Energie barevného pole se zvětšuje s rostoucí vzdáleností mezi kvarky. Když je energie obsažená v poli dostatečně vysoká, přemění se v další kvark-antikvarkový pár (nezapomínejme, že platí $E = mc^2$).
- Záběry 8-10: Kvarky se spojí tak, že vzniknou dvě samostatné barevně neutrální částice - mezon D^+ (z kvarků c, anti-u) a mezon D^- (z kvarků anti-c, u).

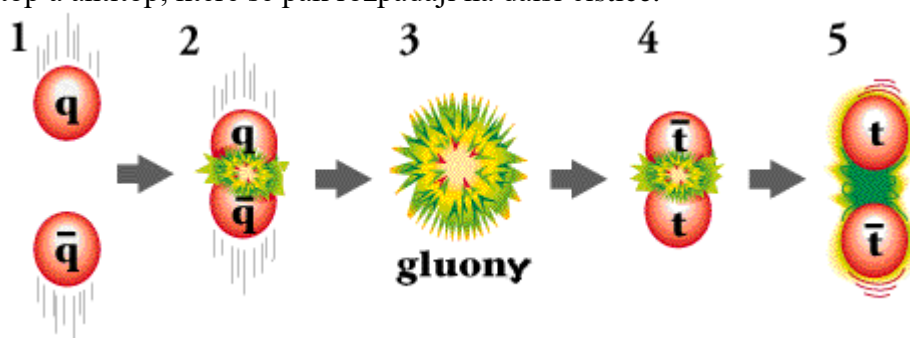
Jednotlivá stádia tohoto procesu, jež předcházejí konečnému stavu, trvají jen nepatrný zlomek vteřiny (dal by se zapsat jako jednička lomená jedničkou s 27 nulami) a nejsou přímo pozorovatelná.

Pokud to váš prohlížeč dovoluje, můžete si prohlédnout popsany proces v [animaci](#). Natažení obrázku může nějakou chvíli trvat, ale výsledek stojí za to!

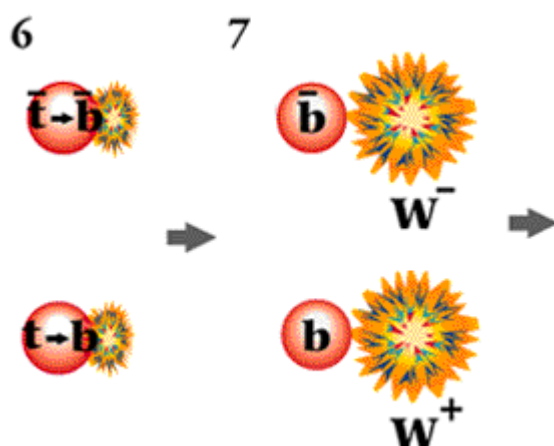
Pro pochopení popsaného procesu je důležité si uvědomit skutečnost, že kvarky musí být vždy vázány do skupin - dochází k tzv. [uvěznění kvarků](#).

Zde se dovíte něco víc o [antihmotě](#).

Kvark (jenž je součástí protonu) a antikvark (z antiprotonu) mohou při vysokoenergetické srážce vytvořit kvarky top a antitop, které se pak rozpadají na další částice.



- Záběr 1: Kvark z protonu a antikvark z antiprotonu se řítí do srážky.
- Záběr 2: Kvarky se srazí a anihilují ...
- Záběr 3: ... na [virtuální](#) gluony.
- Záběr 4: Z gluonů vznikají kvarky top a antitop.
- Záběr 5: Kvarky se pohybují směrem od sebe, mezi nimi se vytváří [barevné](#) (gluonové) pole.

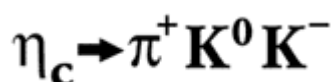


- Záběr 6: Kvarky top a antitop se nedostanou příliš daleko, protože se dříve rozpadnou na kvark b (resp. anti- b) a vyzáří při tom částici-nosič slabé interakce W .
- Záběr 7: Nově vzniklé kvarky b , anti- b se vzdalují od vyzářených částic W .

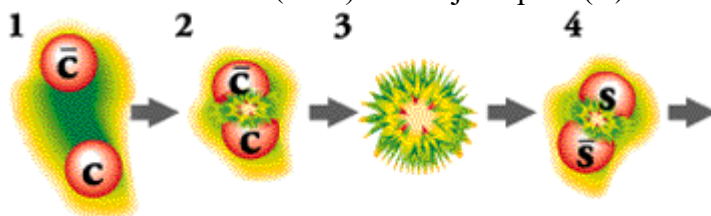


- Záběr 8: Virtuální boson W^- se přeměňuje na elektron a neutrino, zatímco virtuální W^+ na kvarky u a anti-d.
- Záběr 9: Elektron, neutrino, b, anti-b, u i anti-d se rozlétají do různých směrů.

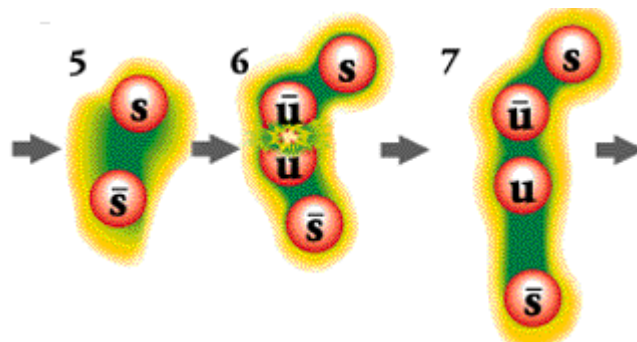
Anihilace c / anti-c



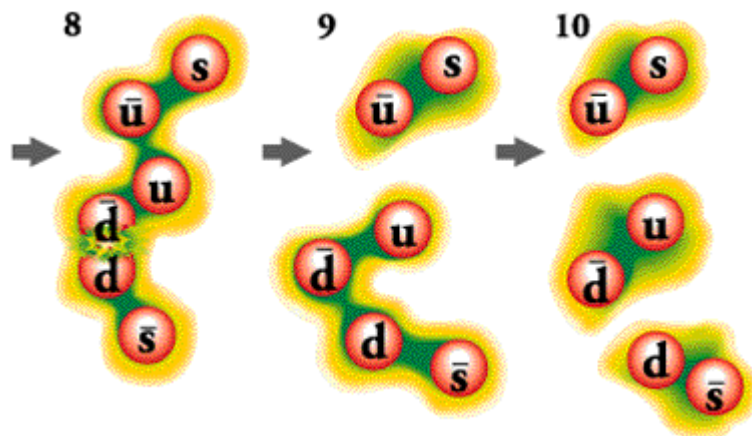
Kvark c a antikvark anti-c uvnitř mezonu η_c (eta-c) anihilují na pion (π) a dva kaony.



- Záběr 1: Kvarky c a anti-c přiblíží k sobě ...
- Záběr 2: ... a anihilují ...
- Záběr 3: ... na [virtuální](#) gluony.
- Záběr 4: Z gluonů vznikají kvarky s, anti-s.



- Záběr 5: Kvarky se pohybují směrem od sebe, mezi nimi se vytváří [barevné pole](#).
- Záběr 6: Energie pole se zvětšuje s rostoucí vzdáleností kvarků, až dosáhne takové hodnoty, že stačí na přeměnu v pár u / anti-u.
- Záběr 7: Kvarky u, anti-s se začínají vzdalovat.



- Záběr 8: Barevné pole mezi u a anti-s dosáhlo dostatečné energie, aby mohl vzniknout další kvark-antikvarkový pár (d / anti-d).
- Záběr 9: Kvarky anti-u, s společně utvářejí barevně neutrální mezon (kaon).
- Záběr 10: Všechny kvarky se poskládaly do barevně neutrálních párů. Částice u - anti-d je pion, d - anti-s je další (opačně nabitý) kaon.

Po každém takovém rozpadu se objevuje soubor barevně neutrálních částic, které vznikly přeměnou energie barevného pole. Pozoruje se mnoho různých koncových stavů.

Jednotlivá stádia tohoto procesu, jež předcházejí konečnému stavu, trvají jen nepatrný zlomek vteřiny (dal by se zapsat jako jednička lomená jedničkou s 27 nulami) a nejsou přímo pozorovatelná.

Chcete-li popsanému procesu lépe porozumět, přečtěte si něco víc o [kvarcích](#) a o [uvěznění kvarků](#).

http://www-hep2.fzu.cz/adventure/adventure_home.html

Gluony

(z angl. "glue" - lepidlo) Nehmotná kvanta zprostředkující @ silnou interakci mezi @ kvarky. Tato interakce je způsobena "barevným nábojem" ("barvou") kvarků a gluonů a dává vzniknout @ hadronům, které jsou barevně neutrální. Termín "barva" je přitom pouze označením pro kvantové číslo charakterizující možné stavy v prostoru vnitřní symetrie kvark-gluonových interakcí (viz @ standardní model). Zatímco kvarky existují ve třech barvách, gluonových barev je osm. Díky svému barevnému náboji mohou gluony interagovat také samy se sebou a z teorie silných interakcí (@ kvantová chromodynamika) proto plyne existence celé řady jejich vázaných stavů (gluonium, resp. angl. "glueball"). Elektrický náboj gluonů je nulový a jejich spin je roven jedné. Podobně jako kvarky nebyly volné gluony pozorovány a teorie předpovídá, že jsou trvale uvězněny uvnitř hadronů.

počítány. Přímé sledování je prakticky vyloučeno. Pozorují se ale velmi precizně produkty rozpadu kvark-gluonové koule. Z teoretických předpovědí je známo, že oproti normálním srážkám hadronů dojde v kvark-gluonové fázi k potlačení produkce kvarku c a naopak posílení produkce kvarku s . V praxi to znamená snížení počtu pozorovaných částic J/ψ (vázaný stav cc') a zvýšení počtu pozorovaných kaonů (mezony obsahující kvark s). Oba dva jevy byly v experimentech v laboratoři CERN pozorovány a jde o hlavní argumenty ve prospěch existence kvark-gluonové fáze. Samozřejmě je mnoho dalších nepřímých indicií: pozorované zvýšení elektromagnetického vyzařování, zpětný dopočet teplot a hustot

vytvoření kvark-gluonové fáze i další. Pro existenci kvark-gluonového plazmatu (QGP) hovoří celkem 7 argumentů:

1. Sledování částic J/ψ : Při vysokých energiích se objevují při srážce hadronů částice J/ψ . Po vytvoření kvark gluonové fáze by měl teoreticky jejich počet razantně klesat, právě tento jev byl velmi dobře pozorovatelný.

2. Sledování podivných kvarků: Při srážkách hadronů vzniká 20% podivných (s) kvarků. V kvark-gluonovém plazmatu by mělo vznikat 40 % s kvarků. V experimentu se pozorovaly kaony (mezony s podivným kvarkem) a baryon Ω^- (sss). Bylo zjištěno patnáctinásobné zvýšení počtu částic Ω^- .

3. Sledování fotonů z QGP: Při vyšších energiích bylo pozorováno zvětšení počtu fotonů. V experimentu je však značný šum z jiných zářivých procesů, sledování fotonů není příliš průkazné.

4. Sledování vektorových mezonů (ρ , ϕ): Prošla-li látka kvark-gluonovou fází, probíhá rozpad na leptonové páry jiným způsobem než obvykle.

5. Sledování rozložení hybnosti produktů: Zpětným propočtem lze zjistit, jak horká byla oblast ze které částice vylétly. Vychází 100 MeV. Hybnosti částic „zamrzly“ v okamžiku po hadronizaci a nesou informaci o této fázi.

6. Sledování skladby různých typů produktů: Podle množství různých produktů experimentu lze odhadnout teplotu při hadronizaci. Vychází 180 MeV, což je v souladu s kritickou teplotou nutnou pro dosažení kvark-gluonové fáze.

7. Bose-Einsteinova interferometrie (Brown, Twiss): Z vyhledávání párů částic je touto metodou možné odhadnout rozměry oblasti, ve které částice vznikly. Ze známé teploty lze dopočíst hustotu energie, která vychází dvakrát až čtyřikrát vyšší než kritická hustota nutná pro vznik kvark-gluonové fáze.