

<http://www.osel.cz/7744-jak-se-vyznat-v-prehrsli-ruznych-castic.html>

## **Jak se vyznat v přehrsli různých částic**

V době, kdy největší laboratoř částicové fyziky slaví 60. výročí svého založení, je docela vhodné si zopakovat, jak se vyznat v té velmi pestré mozaice částic, které vytváří náš svět. To nám usnadní orientaci v článcích, kterých se v době výročí této instituce objeví celá řada.

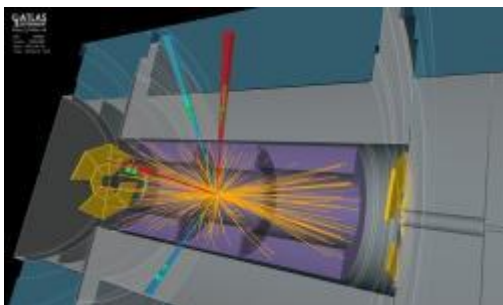
Prokázáním existence Higgsova bosonu se dovršilo potvrzování částic předpovědaných Standardním modelem částic a interakcí. Objev vedl k ocenění Petera Higgse a Françoise Englerta Nobelovou cenou v [minulém roce](#). Urychlovač LHC v laboratoři CERN sice zatím ještě stojí a pracuje se na vylepšování samotného urychlovače i jednotlivých experimentů, ale analýza dat získaných během tří let první etapy provozu probíhá a bude ještě řadu měsíců pokračovat. Dva experimenty, které jsou zaměřeny na zkoumání Higgsova bosonu (ATLAS a CMS), už identifikovaly řadu milionů jeho rozpadů. A s analýzou dalších dat nesoucích informace o různých možnostech jeho rozpadu neustávají. Zaměřují se na stále vzácnější způsoby, kterými se rozpadá. Ty mohou přinést nejvíce informací o podstatě a vlastnostech tohoto bosonu i o možné fyzice, která stojí za Standardním modelem.

Nejen rozpady Higgsova bosonu, ale několik další velmi vzácných rozpadů či společné produkce částic, které se pomocí experimentů využívajících urychlovač LHC podařilo poprvé pozorovat a zkoumat, ukazují perfektní shodu s předpověďmi Standardního modelu. To sice zmenšuje prostor pro pozorování známek nové fyziky za ním, ale stále je možnost, že se z větší statistikou a přesnější analýzou dat její projevy objeví.

Navíc se poměrně nedávno podařilo na urychlovačích v Japonsku a Číně pozorovat příznaky nových exotických částic, i když patří do zoologie postavené na složeninách z komponent Standardního modelu - kvarků. V daném případě objekt skládající se ze čtyř a pěti kvarků. Částice, které by mohly odpovídat těmto exotickým multikvarkovým systémům se pozorují i pomocí experimentů pracujících na

urychlovači LHC. Možné pozorování takových exotů už bylo ohlášeno v minulosti několikrát a psalo se o tom docela často, viz například podrobný článek pro časopis [Kozmos](#), který popisoval situaci v této oblasti před osmi lety. Ovšem tato pozorování byla zatím vždy později vyvrácena. Ke konečnému potvrzení objevů a hlavně jejich příslušné interpretace zatím nedošlo ani u těch z nedávné doby. Ani tentokrát ještě nejde o konečný důkaz a situace je stále otevřená, přesto nové pozorování naznačuje, že i bez nové fyziky v rámci Standardního modelu je stále prostor pro velmi zajímavé objevy.

[Zvětšit obrázek](#)



*Rozpad Higgsova bosonu na čtyři elektrony (přes dva Z bosony), tzv. zlatý rozpad pozorovaný v experimentu ATLAS (zdroj CERN).*

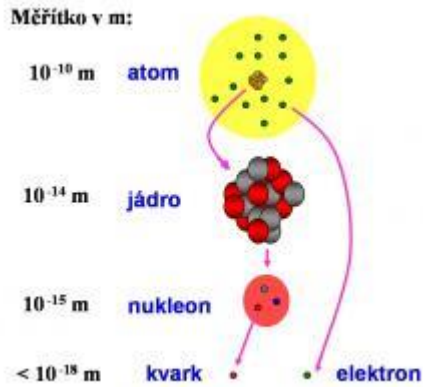
Jestliže chceme začít povídání o výzkumu v laboratoři CERN, musíme začít u světa částic v něm u Standardního modelu hmoty a interakcí. Ten je tou fyzikální teorií, která reprezentuje naše současné poznání struktury hmoty a je excelentní při popisu právě i fyziky, která se pozoruje na urychlovači LHC. Náš průvodce světem částic je současnou reflexí podobnou té, která vyšla na [Oslovi](#) před šesti lety a mapovala situaci v době očekávání dobudování urychlovače LHC. I ze srovnání těchto dvou článků lze vidět, že rozvoj vědy i fyziky není zase tak plný zvrátů, jak by to mohlo vypadat z populárně vědních článků na internetu.

**Struktura hmoty z pohledu současné fyziky**

V současné době téměř každý ví, že se náš svět skládá z **atomů**. Ty se pomocí chemických vazeb založených na elektrických silách (elektromagnetické interakci) váží do jednoduchých i velmi složitých **molekul**. Ví se také, že atomy nejsou nedělitelné, jak by mohl naznačovat jejich název, ale skládají se ze dvou částí. Jde o **jádro**, kolem kterého se nachází **oblak elektronů**. Jádro je velmi malé, jeho rozměry jsou o čtyři až pět řádů menší, než je rozměr samotného atomu. Skládá se z kladně nabitých **protonů** a neutrálních **neutronů** (dohromady se jim říká **nukleony**) a obsahuje téměř všechnu hmotnost atomu. Protony a neutrony jsou totiž zhruba 2000krát těžší než elektrony. Zatímco rozměr atomu je v řádu  $10^{-10}$  m, rozměr jádra je v řádu  $10^{-15}$  m u lehkých jader a  $10^{-14}$  m u těžkých jader. Hustota atomového jádra tak je zhruba  $10^{18}$  kg/m<sup>3</sup>. Hmota, kterou okolo sebe vidíme a ze které jsme i složeni, se tak skládá z obrovských prázdných prostor. Trochu přiblížit si to lze, když si představíme, že by se jádro lehkého prvku zvětšilo na velikost jednoho centimetru. Téměř veškerá hmotnost by byla umístěna v něm a až do vzdálenosti jednoho kilometru, což by byl rozměr atomu, by byl jen sem tam nějaký elektron s o tři řády nižší hmotností, než mají protony a neutrony v jádře. I naše těla jsou tak dominantně složena z prázdnoty.

Elektrony mají rozměr menší než  $10^{-18}$  m, což je nejmenší rozměr, který dokážeme pomocí současných urychlovačů určit. Z našeho současného pohledu jsou tak bodovými objekty. Jiná situace je u protonů a neutronů. Ty mají rozměr zhruba  $10^{-15}$  m, vždyť jádro nejlehčího atomu, kterým je vodík, je právě proton. Elektrony mají stejnou velikost náboje jako protony, jen elektrony mají náboj záporný a proton kladný. Celkový náboj jádra je tak dán počtem protonů a je kladný. Kladný náboj jádra vytvářený protony v něm drží **elektrickou silou** záporně nabitě elektrony v atomu. Pokud je počet elektronů stejný jako počet protonů v jádře, bude atom neutrální. Počet elektronů v neutrálním atomu pak určuje chemické vlastnosti příslušného atomu (prvku).

[Zvětšit obrázek](#)



### Struktura hmoty

## Zoologie částic a interakcí

Jaká síla (interakce) drží elektrony v atomech, už bylo zmíněno, teď se podívejme na to, jaká síla drží protony a neutrony v jádře. Elektrická síla to být nemůže, protože v jádře jsou pouze nabitě protony a stejně nabitě částice se odpuzují. Síla působící v jádře musí být silnější než elektrická síla a zároveň musí mít jenom krátký dosah, který nepřekračuje rozměr jádra, jinak by její působení bylo na větších vzdálenostech patrné.

Právě krátký dosah těchto sil byl jedním z důvodů, proč japonský fyzik Hideki Yukawa přišel s představou, že je tato **silná jaderná síla** způsobena výměnnou interakcí. Z jejího dosahu bylo možné ocenit hmotnost částice, kterou si protony a neutrony vyměňují, na zhruba desetinu hmotnosti nukleonu. Intenzivní hledání těchto částic vedlo k objevu dvou nových, které hmotností vyhovovaly. Prvním byla **mion**, který však neinteragoval silnou jadernou interakcí, pouze elektrickou. V tom se velice podobal už známému elektronu. Později se ukázalo, že i v řadě dalších ohledů je tato částice elektronu podobná a lze ji považovat za jeho těžšího „bratříčka“. Tím, že neinteragoval silnou jadernou silou, bylo jasné, že nemůže být tou správnou částicí, jejíž existenci předpověděl Hideki Yukawa. Tou se nakonec ukázala být ta druhá zmíněná částice. Ta dostala název **mezon pí**. Podobně, jako u neutronů a protonů, jde o částici s vnitřní strukturou, která interaguje silně. Byly nalezeny její tři nábojové varianty, s nábojem velikosti náboje elektronu jak kladným tak záporným, a také neutrální mezon pí. Později se našla celá řada mezonů s různou hmotností a

vlastnostmi. Jejich výměna mezi nukleony způsobuje silnou jadernou sílu mezi nimi a formuje její vlastnosti. Ukázalo se například, že tato interakce nemusí být jen přitažlivá, ale na velmi malé vzdálenosti, menší než polovinu rozměru nukleonu, se stává odpudivou.

Fyzikové tak měli najednou dva druhy částic. Prvním typem byly elektron a mion, které neinteragovaly silnou jadernou silou. Tyto částice, bez silné interakce, se začaly označovat jako **leptony**. Druhou skupinou pak byly proton, neutron a nově objevené mezony pí. Ty silnou interakcí interagují a začaly se společně označovat jako **hadrony**.

[Zvětšit obrázek](#)



*Experiment ATLAS studuje srážky na urychlovači LHC. Je jeden ze dvou experimentů, který potvrdil existenci Higgsova bosonu (zdroj CERN).*

Nukleony a mezony se liší v jedné podstatné vlastnosti, a tou je spin. **Spin** je fyzikální veličinou popisující vnitřní moment hybnosti daného mikroskopického objektu (částice či jádra). Ovlivňuje statistické chování částic, tedy to, jakým způsobem se částice chovají v případě jejich většího počtu. Jde o veličinu, která je specificky spojena s mikrosvětlem a kvantovou fyzikou. Podobně jako řada jiných kvantových veličin může mít pouze přesně dané diskrétní hodnoty. Vyjadřuje se v jednotkách násobků tzv. redukované Planckovy konstanty ( $1,05 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ ). Tyto násobky mohou být celočíselné (tedy 0, 1, 2, 3, ...) a v takovém případě mluvíme o **bosonech**. Nebo mohou být poločíselné (tedy  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ , ...) a v takovém případě mluvíme o **fermionech**. V případě bosonu může být v jednom kvantovém stavu nekonečně mnoho stejných bosonů, v případě fermionu může být v jednom kvantovém stavu pouze jeden stejný fermion.

Zatímco neutrony a protony jsou fermiony se spinem  $\frac{1}{2}$  násobku redukované Planckovy konstanty (zjednodušeně se mluví o spinu  $\frac{1}{2}$ ), mezony pí mají spin 0 a jsou bosony. Hadrony, které jsou stejně jako proton a neutron fermiony, dostaly označení **baryony**. Hadrony podobné mezonům pí se nazývají **mezony**.

V následujících letech se podařilo najít velké množství mezonů a baryonů, což spolu s jejich rozměry vedlo k otázce, jestli se neskládají z nějakých ještě elementárnějších částic. Dnes víme, že těmito částicemi jsou kvarky.

U leptonů byl počet nově objevených částic relativně velmi malý. První objev, který doplnil elektron a mion, byl spojen s vysvětlením záhady, která doprovázela rozpad beta. Při něm byly jako produkt rozpadu pozorovány dceřiné jádro a elektron.

V případě takového rozpadu jádra pouze na dva objekty by se energie rozdělila mezi dceřiné jádro a elektron pokaždé stejně a v závislosti na poměru mezi hmotností jádra a elektronu. Elektron by tak měl vždy přesně danou jednu hodnotu energie.

Ovšem, tak tomu nebylo, a při rozpadu beta se pozorovalo spojitě rozdělení energie elektronů vzniklých v rozpadu beta, přičemž maximální hodnota energie odpovídala energii, kterou by měly mít všechny elektrony. Stejně tak nesouhlasil spin dceřiného jádra s tím, co by vycházelo z rozpadu beta se vznikem pouze elektronu. Zákon beta by v takovém případě narušoval všechny tři fundamentální zákony zachování. Tedy zákon zachování energie, zákon zachování hybnosti i zákon zachování momentu hybnosti. Situaci vyřešil v roce 1931 Wolfgang Pauli předpovědí existence neutrální částice s velmi malou hmotností, která neinteraguje silnou interakcí. Dostala název **neutrino**.

[Zvětšit obrázek](#)



*Experiment LHCb také využívá urychlovač LHC. Je zaměřen na produkci částic s kvarkem b a studium jejich velmi vzácných typů rozpadů (zdroj CERN).*

Existence této částice čekala na potvrzení až do roku 1956, kdy byly k dispozici velmi intenzivní zdroje neutrin v podobě reaktorů (podrobněji [zde](#) ). Důvodem pro velmi náročnou detekci neutrina je, že interagují pouze **slabou interakcí**. To je třetí typ interakce, který je součástí Standardního modelu. Je tak slabá, že nedokáže vázat žádné systémy dohromady. Na druhé straně jí však příroda dovolila narušovat některé zákony zachování, které silná i elektromagnetická interakce musí striktně dodržovat. Proto také beta rozpad probíhá slabou interakcí, která jediná umožňuje při něm probíhající přeměny. Podrobněji o tom, jak se detekují je [zde](#).

K nabitým leptonům elektronu a mionu přibyl později ještě třetí, který dostal název tauon a jeho hmotnost je téměř dvakrát větší než hmotnost protonu, a tedy více než o tři řády větší než hmotnost elektronu. Zjistilo se, že existují také tři neutrální leptony, každý úzce svázan se svým nabitým leptonovým protějškem. Máme tak elektronové neutrino, předpovězené Paulim a dále neutrina mionové a tauonové. Dohromady tak máme šestici leptonů, která je rozdělena do tří dvojic, složených z nabitě a neutrální částice.

[Zvětšit obrázek](#)



*Protonový synchrotron v laboratoři CERN připravuje protony jak pro další urychlení v urychlovači SPS před vstříknutím do urychlovače LHC, tak i k produkci antiprotonů pro antiprotonový zpomalovač (zdroj CERN).*

## Svět a antisvět

Ukázalo se také, že každá prozatím jmenovaná částice má partnera – antičástici. Ta má stejnou hmotnost, dobu života, spin, velikost **náboje** či **magnetického momentu**, ale liší se ve znaménku náboje či magnetického momentu. Existence první antičástice byla předpovězena pro případ elektronu v roce 1928. Paul Dirac se snažil najít relativistickou pohybovou rovnici pro částice se spinem  $1/2$ . Jim nalezená rovnice však nabízela kromě řešení, která popisovala elektron, i řešení, která se dala interpretovat, jako částice s vlastnostmi elektronu, lišící se pouze znaménkem náboje. Tato antičástice dostala název pozitron a její existence byla potvrzena Paulem Andersonem v roce 1932. Později se zjistilo, že i všechny ostatní leptony nabitě a neutrální mají své antičástice, takže máme kromě záporně nabitých mionů a tauonů i kladně nabitě antimiony a antitauony. Kromě neutrin existují i odpovídající antineutrína.

Stejně tak mají své antičástice také hadrony, ať už baryony nebo mezony. Takže kromě protonu existuje i antiproton a kromě neutronu i antineutron. Neutron a antineutron mají sice nulový náboj, ale liší se znaménkem magnetického momentu a ještě jedné specifické kvantové fyzikální veličiny, která se označuje jako **baryonové číslo**. Baryony mají velikost baryonového čísla 1 a mezony 0. U dalších baryonů (i mezonů) se objevují další fyzikální kvantové veličiny (**podivnost**, **půvab**, ...) v jejichž znaménku se hadrony, které mají nenulovou jejich hodnotu, mohou lišit. U mezonů je



situace složitější. V předchozí části se zmiňovaly tři nábojové stavy mezonů pí. Kladný a záporný mezon pí jsou pár částice a antičástice. V případě neutrálního mezonu pí je antičástice totožná s částicí.

Když existují antiprotony a antineutrony, můžeme z nich v principu poskládat antijádra. Přidáním pozitronů (antičástice elektronu) pak získáme antiatomy. V principu je pak možné poskládat antimolekuly, antihmotu a antisvět. Realizace takového vytváření v našem vesmíru však naráží na řadu fundamentálních překážek. První a základní je, že při setkání částic a antičástic dochází k jejich anihilaci. Při anihilaci původní pár částice a antičástice zaniká. Například pár elektronu a pozitronu se přemění na dva fotony, pár protonu a antiprotonu se přemění na několik mezonů. Z toho důvodu je přítomnost antihmoty v našem vesmíru jen velmi omezená, po svém vzniku brzy anihiluje. Pozitrony mohou vznikat v řadě procesů, například jedním z typů rozpadu beta. Antiprotony pak dominantně ve srážkách vysokoenergetických částic kosmického záření s jádry atomů v zemské atmosféře. Při těchto srážkách, stejně jako při srážkách protonů či jader urychlených na velmi vysoké energie na urychlovači, vznikají i další antičástice. Z důvodů dodržení zákonů zachování náboje a zmíněných nových kvantových fyzikálních veličin vzniká vždy částice společně s antičásticí.

[Zvětšit obrázek](#)



*Instalace nové pasti na antivodíky experimentu ALPHA (zdroj CERN).*

Nejen antiprotony a antineutrony jsou tak produkovány ve srážkách protonů nebo jader urychlených na kinetické energie významně překračující hodnoty jejich klidové

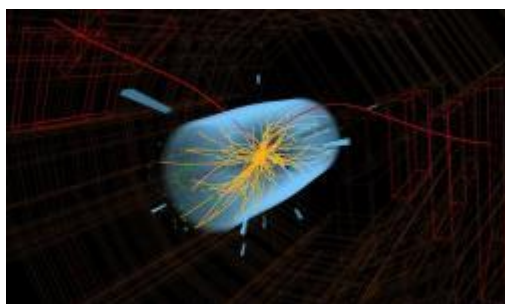
energie. Mají tak relativistické rychlosti, tedy takové, které se blíží rychlosti světla. Kvantová fyzika umožňuje, aby se část kinetické energie při srážce přeměnila na klidovou energii nově vzniklých částic. Například páru proton a antiproton nebo neutron a antineutron. Intenzivní produkce antiprotonů pomocí srážek relativistických protonů s těžkými jádry se využívá v laboratoři CERN. Tyto protony se pak zpomalovačem, který funguje jako inverzní urychlovač, zpomalují a po zachycení v magnetické pasti se využívají k produkci **antivodíku**. Pozitrony, které se k nim přidávají, se produkují v rozpadech beta plus radioaktivního jádra sodíku 22. Podrobněji o produkci antihmoty v laboratoři CERN [zde](#).

Pokud v magnetické pasti zachytí antiproton pozitron, vzniká neutrální antivodík. Zatímco nabité antiprotony a pozitrony se magnetickým polem snadno v pasti udrží, s neutrálním antivodíkem nastává problém. Ten však není neřešitelný. Antivodík má magnetický moment, je vlastně malou magnetkou. A magnetka se dá také zachytit magnetickým polem. Ovšem v tomto případě je konstrukce pasti pro zachycování magnetek antivodíků velice náročná. Proto trvala tak dlouho a teprve v posledních dvou letech začala pracovat v laboratoři CERN u experimentu ALPHA, který se produkci a studiu antivodíku intenzivně věnuje. Tam se v současné době daří zachycovat v speciální magnetické pasti a udržet stovky antivodíků až stovky sekund. To umožnilo první studium spektra vyzařování antivodíku, které vzniká při přechodech elektronů v jeho atomovém obalu, a jeho srovnání s vyzařováním vodíku. Tím, které je astronomům dobře známo při studiu spousty vesmírných procesů a objektů. Zatím je přesnost měření malá, ale jak bude postupně růst počet zachycených antivodíků a doba jejich udržení, bude možné pomocí jeho velmi přesné spektrometrie zjistit, do jaké míry jsou vlastnosti hmoty a antihmoty totožné. Zatím se podařilo připravit pouze nejlehčí antiatom – zmíněný antivodík.

Pro těžší izotopy antivodíku nebo dokonce těžší prvky potřebujeme připravit těžší antijádra. Problémem je, že zatím dokážeme produkovat antijádra složená z více antinukleonů pouze s velmi malou efektivitou. Využívá se to, že při srážce dvou těžkých jader může vzniknout i více antinukleonů (antiprotonů a antineutronů). Ty pak náhodou a s velmi malou pravděpodobností mohou letět z místa srážky téměř

stejným směrem a s téměř totožnou velikostí rychlosti. Může se tak stát, že se sváží silnými jadernými silami do antijádra. Čím více antinukleonů antijádro obsahuje, tím menší je pravděpodobnost jeho vzniku touto metodou. Zatím nejtěžším vyprodukovaným antijádrem je antihelium-4 se dvěma antiprotony a dvěma antinukleony. To se podařilo před dvěma roky vyprodukovat a pozorovat při srážkách zlata na americkém urychlovači RHIC v Brookhavenu (podrobněji [zde](#)). K tomu, aby vzniklo 18 antihelií -4 byla potřeba miliarda vhodných srážek zlata a experiment musel běžet měsíce s velmi intenzivním svazkem. Neexistuje vhodné jádro (dostatečně stabilní), které by mělo pět nukleonů, a produkce antijádra s šesti antinukleony už má při použití popsané metody extrémně malou pravděpodobnost produkce. Kdy a jestli se podaří produkovat těžší antijádra, je tak velmi otevřená otázka. Stejně tak je nejisté, jestli se podaří získat těžší antiatomy než je antivodík. Závisí to na možnosti produkce těžších antijader, jejich uchovávání a získávání antiatomů z nich. Otázka produkce antimoty a jejího uchovávání je klíčová pro její případné využití například pro mezihvězdné lety, ale to už je pro [jiné vyprávění](#).

[Zvětšit obrázek](#)



*Záznam velice vzácného rozpadu mezonu Bs na dva miony pozorovaný experimentem CMS. Takových rozpadů je zhruba jeden na miliardu rozpadů tohoto mezonu. (Zdroj CERN).*

## Jak prokázat existenci nové částice?

Než pokročíme dále v přehledu částic, které patří do Standardního modelu, podívejme se, jak je možné tyto částice lovit. Většina nově hledaných částic má velmi krátké doby života. Jak produkci a existenci takových částic prokázat? O tom, jak je produkovat, jsme už psali. Pokud mají srážející se částice či jádra dostatečnou kinetickou energii přesahující klidovou energii spojenou s klidovou hmotností dané

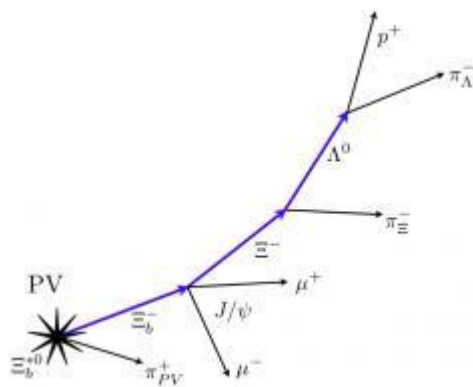
částice, kterou chceme produkovat, umožňuje kvantová fyzika její vznik.

Pochopitelně při dodržení všech zákonů zachování. Teď se podívejme, jak jejich vznik prokázat. Částice po vzniku existují jen velmi krátce a pak se rozpadají na sekundární částice. Ty už žijí déle a mohou doletět k detektorům, kterými obklopíme místo srážky. Podrobnější popis toho, jak detektory vypadají a fungují, je [zde](#).

Pokud tyto částice zachytíme a určíme jejich parametry: energii, hybnost, náboj ..., můžeme určit i vlastnosti původní částice, v rozpadu které sekundární částice vznikly. Zákon zachování náboje umožňuje z nábojů sekundárních částic určit náboj původní částice. Energie a hybnosti sekundárních částic nám umožňují pomocí kinematických vztahů speciální teorie relativity určit klidovou energii původní částice. Spiny a úhlová rozdělení sekundárních částic pak umožňují zjistit spin původní částice. Stejně tak lze ze součtu baryonových čísel, podivnosti, půvabu a dalších už zmiňovaných kvantových fyzikálních veličin určit hodnoty těchto fyzikálních veličin u původní částice.

Jeden velice zajímavý aspekt kvantových vlastností mikrosvěta je spojen s velice krátce žijícími částicemi. V kvantové fyzice existují vzájemně svázané fyzikální veličiny, jejichž hodnoty nelze určit současně s neomezeně velkou přesností. Součin nejistot jejich určení má svou nejmenší hodnotu. Pokud tedy jednu veličinu určíme extrémně přesně, druhá bude určena velmi nejistě. A toto se nedá změnit žádným vylepšením metod měření. Tento vztah se týká například současného určení polohy a hybnosti (tedy dané souřadnice a odpovídající složky hybnosti). Platí to však také pro určení energie a času. Jestliže má částice krátkou dobu života, je její časová souřadnice velmi málo neurčitá. Takže neurčitost v hodnotě její energie (tedy i klidové energie) je velká. Čím je kratší doba života, tím je větší nejistota v určení klidové energie (klidové hmotnosti) částice. Budeme-li tak počítat klidovou hmotnost původní částice z energií a hybností těch sekundárních, nedostaneme přesnou vždy stejnou hodnotu, ale pík s šířkou, která je dána dobou života částice. A z této šířky lze i tuto dobu života určit.

[Zvětšit obrázek](#)



*Schéma rozpadu jednoho z nově objevených baryonů obsahujících kvark  $b$  (složení  $u, s, b$ ) pozorovaných experimentem CMS na urychlovači LHC (zdroj CMS, CERN).*

## Kvarková struktura hadronů

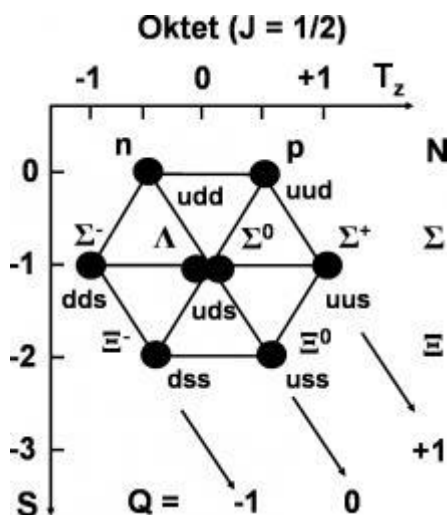
Zmínili jsme se, že byla postupně objevena řada částic interagujících silnou jadernou silou – hadronů. A to jak baryonů, tak i mezonů. Mezi první objevené částice patřily baryony, které při srážkách s dostatečnou energií vznikaly s velmi vysokou pravděpodobností, což svědčilo, že vznikají silnou interakcí. Měly větší hmotnost než nukleony a jen velmi krátkou dobu života, po které se právě na tyto nukleony rozpadaly. Vysoká rychlost jejich rozpadu svědčila o tom, že se silnou interakcí také rozpadají. Ta doba rozpadu byla v řádu  $10^{-24}$  s a částice tak mohly být pozorovány jen jako popsané rezonanční píky při měření klidové energie původní částice pomocí energií a hybností produktů rozpadu. Začaly se tak označovat jako **rezonance**. Nešlo je totiž pozorovat přímo, ale jen jako píky (rezonance) v závislostech pravděpodobností reakce na energii srážky nebo v hmotnosti vypočtené z energií a hybností sekundárních částic.

Později se podařilo pozorovat částice, baryony a mezony, které také vznikaly s velkou pravděpodobností, tedy silnou interakcí. Jejich doba života, než se rozpadly na známé částice, však byla v řádu  $10^{-10}$  s. Bylo tak jasné, že se nemohou rozpadat silnou interakcí. To byla velmi neobvyklá vlastnost a tak se začaly označovat jako **podivné částice**. Jejich rozpad, podobně jako rozpad beta, je způsobován slabou interakcí. To, že rozpad neprobíhá silnou, ale pouze slabou interakcí, naznačovalo, že existuje nějaká fyzikální veličina spojená s těmito podivnými částicemi, která se v silných interakcích zachovává a podivné částice se tak na normální baryony silnou

interakcí rozpadat nemohou. Slabá interakce naopak zákon zachování této veličiny narušuje a umožňuje příslušné rozpady, ty jsou však mnohem pomalejší. Postupně se začalo objevovat stále více podivných baryonů a mezonů. Podivné baryony se začaly označovat jako **hyperony**. Neutrální hyperon lambda je podobný neutronu a v jádře může neutron nahradit. Taková jádra s hyperonem se označují jako **hyperjádra**. Nejdříve byla objevena v kosmickém záření a později se začala produkovat pomocí urychlovačů. Dnes známe velký počet hyperjader, která obsahují jeden nebo dva hyperony. V roce 2010 bylo dokonce produkováno první [antihyperjádru](#), jde o antihypertriton. Kromě lambda hyperjader byly pozorovány i náznaky existence sigma hyperjader. Z pohledu astrofyziky je zajímavé, že hmota složená z hyperonů by se mohla nacházet v nitru neutronových hvězd.

Jaderní fyzikové tak najednou měli velký počet hadronů a řada faktů naznačovala, že se jedná o částice, které nejsou elementární, ale skládají se z jiných ještě elementárnějších částic. Zmíněno už bylo, že hadrony mají rozměr, který je v řádu rozměru nejmenších jader. Zároveň velikost jejich magnetického momentu naznačovala, že to nejsou částice bez struktury. Zvlášť markantní je to u neutrálního neutronu. Objekt, který je neutrální a neskládá se z částí s různým nábojem (celkově je součet těchto dílčích nábojů nulový), nemůže mít magnetický moment. A neutron nenulový magnetický moment má.

[Zvětšit obrázek](#)



*Obrázek základního oktetu baryonů tvořených z kvarků u, s a d v základním stavu (jejich vzájemný orbitální moment je 0) a s opačnou orientací projekce spinu, celkový spin baryonu J tak je 1/2. Veličina Tz je izospin, S podivnost a Q náboj.*

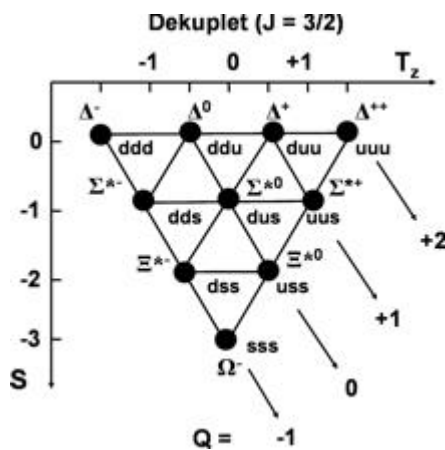
Zároveň se ukázalo, že pozorované částice se podle svých vlastností seskupují do různých skupin – multiplétů. Rozdíl hmotnosti částic v nich pak dodržoval pravidelné zákonitosti. Nezávisle na sobě navrhli Murray Gell-Man a George Zweig, že vlastnosti příslušných multiplétů normálních i podivných hadronů lze vysvětlit pomocí tří částic, kterým dal Gell-Man název **kvarky**. Tyto kvarky se dnes označují jako **u**, **d** a **s**. Kvark **s** je právě ten, který nese podivnost. Také kvarky mají své antičástice, tedy antikvarky. Baryony pak jsou složeny ze tří kvarků a antibaryony ze tří antikvarků. Mezony jsou složeny z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Dost dlouho trvalo, než bylo přijato, že kvarky jsou reálnými částicemi a ne pouze matematickými pomůckami pro klasifikaci hadronů. Důvodem bylo to, že kvarky měly náboj o velikosti  $1/3$  a  $2/3$  elementárního náboje. A částice s takovým nábojem nebyly nikde v přírodě pozorovány.

Teprve později se pomocí rozptylu elektronů s velmi vysokými energiemi, které umožnily „zviditelnit“ kvarky uvnitř hadronu a určit jejich vlastnosti (tedy i náboj), podařilo prokázat jejich reálnou existenci. Po poznání teorie popisující silnou interakci, která drží kvarky v hadronech, se navíc zjistilo, že jednou z jejich vlastností je tzv. uvěznění, které zabraňuje existenci volného kvarku, který nebyl vázán do hadronu. Kvarky jsou, stejně jako elektrony, fermiony a mají tedy poločíselný spin. Pokud se složí tři kvarky s poločíselným spinem, získá se objekt s celočíselným spinem. A baryony jsou opravdu také fermiony. Naopak spojení dvou poločíselných kvarků (tedy i pár kvark a antikvark) vytvoří objekt s celočíselným spinem. A mezony jsou opravdu bosony. Stejně jako u elektronů, je jejich rozměr menší než  $10^{-18}$  m, a z našeho současného pohledu jsou bodové.

Ukázalo se také, že musí existovat úplně nová fyzikální veličina, kterou kvarky mají, a nemají ji jiné doposud pozorované částice. První náznak vyplýval z toho, že existovaly baryony, jako například  $\Delta^{++}$  rezonance, které obsahovaly tři stejné kvarky

(v tomto případě tři u kvarky) ve stejném stavu. Navíc je u všech tří orientace projekce spinu stejná. To je jasné z toho, že  $\Delta^{++}$  rezonance má spin  $3/2$ , tedy vnitřní spiny u kvarků, které jsou  $1/2$  se musí sečíst. Ovšem kvarky jsou fermiony a tři úplně stejné nesmí být v jednom stavu. Musí být tedy nějaká nová fyzikální veličina, v jejíž hodnotě se odlišují. Tato nová veličina byla označena jako barva. Může být trojího druhu červená, modrá a zelená. Každý kvark může tak nabývat tří různých hodnot barvy. Tři kvarky u v  $\Delta^{++}$  rezonanci tak mají každý jinou barvu a tyto fermiony se tak od sebe liší a mohou být ve stejném stavu.

[Zvětšit obrázek](#)



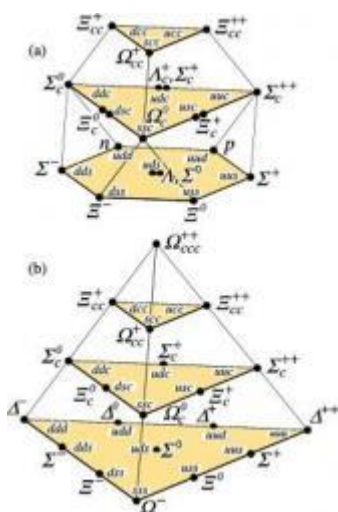
*Obrázek základního dekupletu baryonů tvořených z kvarků u, s a d v základním stavu (jejich vzájemný orbitální moment je 0) a s opačnou orientací projekce spinu, celkový spin baryonu J tak je 3/2. Veličina  $T_z$  je izospin,  $S$  podivnost a  $Q$  náboj.*

Ukázalo se, že barva je nábojem silné interakce, která drží kvarky v hadronech pohromadě. Podobně, jako stejně velký kladný a záporný náboj vytvoří elektricky neutrální objekt, vytvoří tři různé barvy dohromady neutrální objekt z pohledu barevného náboje. Tato vlastnost je důvodem označení této fyzikální veličiny názvem barva. Vždyť tři základní barvy vytvoří barvu bílou. Zároveň antikvarky mají antibarvu a systém složený z barvy a odpovídající antibarvy je tak neutrální z pohledu barevného náboje. Neutrální z pohledu silné interakce jsou tak jak baryony, tak i mezony.



Různé částice dostaneme jak kombinací různých kvarků, například proton má složení **uud** a neutron **udd**. Ale může se lišit orientací projekce spinů tří kvarků baryonu. V případě protonu a neutronu jsou opačné a celkový spin nukleonů, daný vektorovým součtem spinů jednotlivých kvarků, je  $1/2$ . Existují však i rezonance  $\Delta^+$  a  $\Delta^0$ , které mají stejné kvarkové složení, jako nukleony, ale všechny tři kvarky v nich mají stejnou orientaci projekce spinu a spin těchto  $\Delta$  rezonancí je  $3/2$ . Existuje tak baryonový oktetet se spinem  $1/2$ , ve kterém jsou i naše známé nukleony, a deкупlet se spinem  $3/2$ , kde jsou už zmíněné delta rezonance.

[Zvětšit obrázek](#)



*Baryony, u kterých jsou kvarky v základním stavu, které jsou tvořeny čtyřmi kvarky u, d, s a c. Spodní základny třírozměrných schémat baryonů se spinem  $3/2$  (a) a se spinem  $1/2$  (b) tvoří již ukázaný oktetet a deкупlet. (Zdroj PDG).*

Další možností jsou excitované stavy hadronů, kdy nejsou všechny kvarky v základním stavu, ale ve vyšších stavech. Spin hadronu je tak dán vektorovým součtem nejen spinů kvarků, ale i jejich orbitálních momentů. Je to do značné míry podobné excitovaným stavům atomů, kdy jsou některé elektrony ve vyšších stavech než základním. Nebo excitovaným stavům jader, kdy je ve vyšším stavu některý z nukleonů. Dostáváme tak velký počet hadronů s různými spiny a dalšími charakteristikami. Kvantová fyzika nabízí ještě další podivuhodnou možnost. Nemusí

existovat jen čisté stavy, ale také směs různých stavů. Tyto stavy musí mít některé vlastnosti stejné (například náboj či spin), ale jinak mohou být i značně odlišné. Některé mezony jsou tvořeny dvojicí kvark a jeho antikvark. V tom případě je náboj nula a i další řada veličin, u kterých se částice a antičástice liší ve znaménku, se vynulují. Existují tak mezony, které jsou stavy složené z několika různých čistých stavů v různém poměru. Například tedy s dvojic **u** a **anti-u**, **d** a **anti-d**, **s** a **anti-s**. Situace je mnohem složitější, než vyplývá ze zjednodušeného popisu, který jste právě přečetli. Ale i z něho je jasné, že kvarkový model popisuje a předvídá přehršel hadronů, jak baryonů, tak mezonů.

Možnosti se ještě dramaticky rozšířily, když se zjistilo, že existují ještě další tři těžší kvarky **c**, **b** a **t**. Kvark **t** je tak těžký, že se rozpadá (přesněji řečeno přeměňuje) rychleji než se stačí vázat do hadronů. I tak však je velký počet nových baryonů a mezonů, které tyto těžké kvarky obsahují. Pokud obsahují více těžkých kvarků, jsou těžké a možnost jejich objevu tak například poskytuje právě urychlovač LHC. Některé nálezy už má za sebou, ale řada dalších jeho experimenty teprve čeká.

[Zvětšit obrázek](#)

	<b>u</b>	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>c</b>	<b>b</b>	<b>t</b>
Náboj (e)	+2/3	-1/3	-1/3	+2/3	-1/3	+2/3
Spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Baryonové číslo	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Další kvantová čísla (vlně)	$T_3 = +1/2$	$T_3 = -1/2$	$S = -1$	$C = +1$	$B = -1$	$T = +1$

*Tabulka vlastností šestice kvarků ve Standardním modelu (Používá se taková konvence, že vlně kvarku ( $T_3, S, C, B, T$ ) má stejné znaménko jako jeho elektrický náboj. Tato konvence vede k tomu, že každý nabitý mezon má stejné znaménko náboje a vlně.*

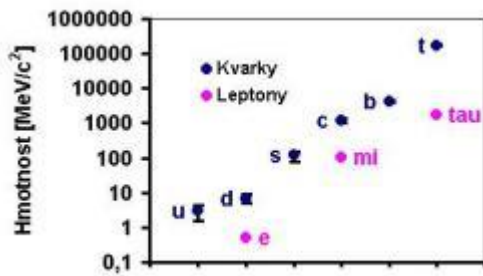
## Standardní model částic a interakcí

Hmota se tedy skládá podle současného poznání ze dvou typů částic. Jde o šestici leptonů, třech nabitých a třech neutrálních, a šestici kvarků (**u**, **d**, **s**, **c**, **b** a **t**). Ovšem, abychom z nich mohly postupně získat hadrony, jádra, atomy i molekuly, musíme mít

i interakce (síly), které budou mezi nimi působit. Podívejme se nyní blíže na ně. V předešlém textu jsme mluvili o třech silách: silné, elektromagnetické a slabé. Úplně jsme pominuli gravitaci. Ta je extrémně slabá a není součástí standardního modelu. Její kvantový popis čeká na teorii nové fyziky za Standardním modelem.

Standardní model tak obsahuje popis tří interakcí. Jejich podstata spočívá ve výměně částic. Ty mají celočíselný spin a jsou tedy bosony. Zároveň však mají částice různých interakcí velmi rozdílné vlastnosti, které definují vlastnosti příslušné interakce. Bosonem zprostředkujícím elektromagnetickou interakci je dobře známý **foton**. Klidová hmotnost fotonu je nulová a dosah elektromagnetické interakce je nekonečný. Elektromagnetickou interakci popisuje **kvantová elektrodynamika**. Slabá interakce je zprostředkována **bosony  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$** . Jejich klidové hmotnosti překračují osmdesát hmotností protonů. I to je důvod, proč je tato interakce tak velmi slabá a má tak malý dosah svého působení, který je v řádu tisícin rozměru protonu ( $10^{-18}m$ ). Ukázalo se, že slabá interakce velice souvisí s elektromagnetickou interakcí. Její popis je možný jen společně a dokáže to **teorie elektroslabé interakce**, která v sobě pochopitelně zahrnuje i kvantovou elektrodynamiku. Ukázalo se, že foton a bosony  **$W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$**  spolu velmi úzce souvisí. A bylo potřeba vysvětlit, proč má foton klidovou hmotnost nulovou a hmotnost bosonů slabé interakce je tak velká. Stejně, jako je třeba najít důvod, proč jeden ze čtyř bratrů v rodině je velice vyzáblý drobeček, a tři ostatní jsou statní pořezové. Tímto důvodem rozdílů u bosonů elektroslabé interakce se ukázal být **Higgsův mechanismus**. Ten zavádí novou interakci, která působí mezi bosony slabé síly, zahrnuje tak v sobě nutnost existence nové částice – **Higgsova bosonu**. Ten se od bosonů elektroslabé i silné interakce, které mají spin 1, diametrálně liší, jde o tzv. **skalární boson**, který má spin 0. To je jedna ze základních vlastností, která jej pomáhá identifikovat.

[Zvětšit obrázek](#)

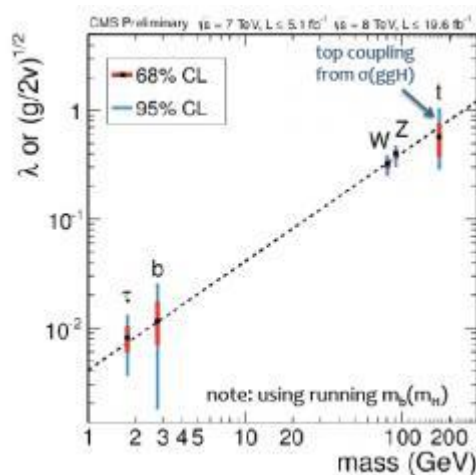


### *Hmotnosti částic hmoty ve Standardním modelu*

A právě potvrzení existence Higgsova bosonu a studium jeho vlastností byl hlavní úkol urychlovače LHC. A ten se ho [úspěšně zhostil](#), stejně jako řady dalších úkolů při zkoumání Standardního modelu. Standardní model a teorie elektroslabých interakcí dokáží předpovědět řadu vlastností Higgsova bosonu a různé formy jeho rozpadu a jejich pravděpodobnosti. Nedokáže však předpovědět jeho hmotnost. Oba experimenty LHC zaměřené na hledání Higgsova bosonu našly higgse s hmotností zhruba 125 GeV/c<sup>2</sup> (hmotnost protonu je necelý jeden GeV/c<sup>2</sup>). Jak už bylo zmíněno, podařilo se jim pozorovat rozpady milionů těchto částic v řadě různých reakcí. Bylo možné určit nejen jeho hmotnost, ale i náboj, spin, paritu, dobu života i pravděpodobnosti řady různých jeho rozpadů. A vše srovnat s předpověďmi Standardního modelu. Pozorované vlastnosti nově objevené částice plně odpovídají předpovědím Standardního modelu pro „standardního“ higgse.

Nejpřesvědčivější důkazy toho, že se jedná o higgse, a to higgse, který předpovídá nejjednodušší varianta higgsova mechanismu, je zkoumání vazby mezi higgsem a dalšími částicemi Standardního modelu. Ta by měla být tím větší, čím je částice těžší, protože Higgsův mechanismus stojí za její hmotností. Tato vazba se dá určit ze zkoumání společné produkce higgse a dané částice či rozpadů higgse. Ukazuje se, že závislost vazbové konstanty mezi higgsem a částicí na hmotnosti částice, zjištěná ze studia společné produkce, odpovídá přesně té, kterou předpovídá Standardní model.

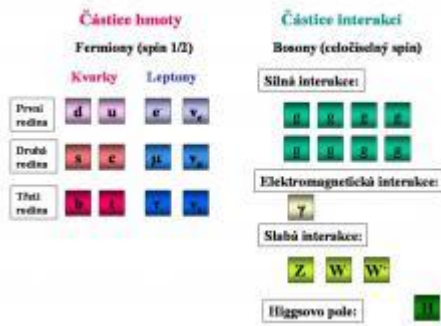
[Zvětšit obrázek](#)



*Závislost mezi vazbou částice a higgse na hmotnosti částice, jak byla zjištěna z dat experimentu CMS. Nejtěžší je t kvar, pak následují W a Z bosony a b kvark s tau leptonem. (Zdroj CMS).*

Z trojice sil v Standardním modelu zůstává silná interakce. Ta je způsobována výměnou osmice **gluonů**. Tyto částice mají sice nulovou klidovou hmotnost, ale charakter silné interakce i vlastnosti těchto částic se dramaticky liší například od interakce elektromagnetické. Silná interakce působí mezi částicemi, které mají náboj silné interakce a tím je zmíněná barva. Ve Standardním modelu jsou těmito částicemi kvarky a také gluony. Což je podstatný rozdíl od elektromagnetické interakce. Foton, který ji zprostředkuje, elektrický náboj nenese. Teorií, která popisuje silnou interakci, je **kvantová chromodynamika**. Silná interakce roste se vzdáleností kvarků. Při jejich vzdalování se tak v určitém okamžiku musí dodat energie, která stačí k produkci páru kvarku a antikvarku. Vzniklý kvark a antikvark se spojí s oddělovanými částmi původního hadronu a dostaneme místo jednoho dva hadrony. Nelze však získat volný kvark. Tomuto jevu se říká „uvěznění“ a jde o fundamentální vlastnost silné interakce. Dosah silné interakce je v řádu rozměrů hadronů. Mezi hadrony, například nukleony v jádře, působí silná jaderná síla, která je způsobována výměnou mezonů. Její podstata však leží v silné interakci způsobené gluony – jde o tzv. zbytkovou interakci. Mezi silnou jadernou interakcí a silnou interakcí je podobný vztah mezi molekulární vazbou a elektromagnetickou interakcí.

[Zvětšit obrázek](#)



*Přehled částic Standardního modelu.*

Standardní model tak obsahuje částice hmoty, kterými jsou leptony a kvarky, částice interakcí, kterými jsou foton, bosony  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$ , gluony a také Higgsov boson. Zároveň jsou jeho součástí také teorie elektroslabé interakce a kvantová chromodynamika. Může vzniknout otázka, zda je počet kvarků a leptonů konečný. Je třeba zmínit, že to, že je počet leptonů a kvarků stejný, vyplývá z podstaty Standardního modelu (jeho fundamentálních symetrií). Zároveň platí, že třeba doba života  $Z^0$  bosonu, který se rozpadá i na dvojice neutrino a antineutrino, závisí na tom, jaký je počet neutrin. Každý další typ lehkého neutrina zkrátí dobu života této částice. A přesně změřená doba života tohoto bosonu ukazuje, že existují pouze tři lehká neutrina a jím odpovídající nabitě leptony a kvarky. Jedinou otevřenou možností je existence neutrin s extrémní hmotností, což je však dosti exotické rozšíření Standardního modelu. Pochopitelně však není úplně vyloučené.

Kvantová fyzika dává řadu možností, jak se může nová fyzika za Standardním modelem projevit v procesech částic Standardního modelu. Umožňuje rozpady částic prostřednictvím hypotetických částic nové fyziky s velkou hmotností. To se projeví ve zkrácení doby života částic Standardního modelu. Nejvíce by se to mohlo projevit u částic Standardního modelu s největší hmotností, například kvarku  $t$ , bosonů  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$  a Higgsova bosonu. Zvláště pak u velice exotických a vzácných typů rozpadů, které narušují zákony zachování, například parity. Zároveň se projeví tím více, čím je hmotnost těch hypotetických částic menší a blíže energetického dosahu LHC. Dosavadní analýza dat získaných všemi experimenty LHC a stále podrobnější studium i velice vzácných rozpadů, však velice přesně odpovídá předpovědím Standardního modelu a není vidět rozdíly, které by mohly ukazovat na existenci

fyziky za ním. To je na jedné straně obrovský úspěch Standardního modelu. Na druhé straně to však naznačuje, že nová fyzika se začne projevovat až u energií, které jsou o mnoho řádů vyšší, než jsou energie dosažitelné na LHC. A může tak nastat situace, že je stále mimo dosah v současnosti představitelných a realizovatelných urychlovačů. Ovšem detailnější analýza už na LHC získaných dat a srážení při dvojnásobných energiích s velmi vysokou statistikou by v budoucnu mohla nějaké příznaky nové fyziky a existence nových exotických částic ukázat.

[Zvětšit obrázek](#)



*Detektorový systém Belle krátce po dokončení (zdroj KECK, Belle).*

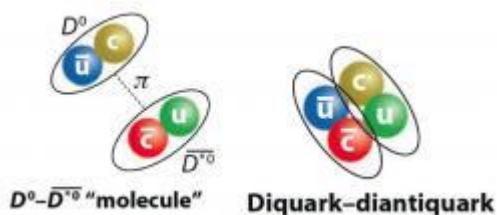
### Co nového by nás mohlo čekat v rámci Standardního modelu?

Zdá se tedy, že v rámci Standardního modelu už vše známe a v následujícím období lze z pohledu nových částic čekat pouze objevy stále těžších baryonů a mezonů. Tedy těch, které obsahují stále více těžších kvarků **c** a **b** nebo se kvarky v nich nacházejí ve stále excitovanějším stavu. Takhle jednoduché to ovšem není. Kvarkový model, který je součástí Standardního modelu, připouští existenci i daleko exotičtějších objektů složených z kvarků. Neutrálními objekty z pohledu náboje silné interakce jsou také ty, které obsahují dvě dvojice kvarku a antikvarku, tedy **tetrakvarky** – dohromady mají kvarky čtyři. Další možností je trojice kvarků, k níž se přidá dvojice kvark a antikvark, dohromady tak máme pět kvarků, daný objekt se nazývá **pentakvark**. Podobným způsobem lze vytvářet další multikvarkové systémy.

Vždy tak, aby se skládaly z trojic kvarků a dvojic kvarku a antikvarku, což zajišťuje, že jsou z pohledu náboje silné interakce neutrální.

Takové multikvarkové systémy se už hledají dlouho a již několikrát byl objev tetrakvarku či pentakvarku ohlášen. Podle způsobu, jak jsou kvarky uspořádány, můžeme dostat dimezonové či dibaryonové systémy nebo mezonové molekuly. Zatím se však žádný z těchto exotických systémů nedočkal nezvratného prokázání a v řadě případů byla pozdějšími měřeními s větší statistikou, přesněji nebo kritičtěji rozbor dat předkládaná interpretace pozorování jako projev tetrakvarku nebo pentakvarku zpochybněna. Problém je, že je třeba jednak nezvratně prokázat, že pozorování částice není zdánlivé, ale také ukázat, že se nedá interpretovat jako některý z bezpočtu klasických baryonů a mezonů. Je tak třeba co nejpřesněji určit hmotnost, spin, paritu a další vlastnosti částice, které mohou klasické interpretace vyloučit. Podrobněji se o těchto systémech psalo v článku zmiňovaném na začátku. Bohužel výpočty vlastností, například hmotnosti, klasických hadronů i exotických multikvarkových systémů pomocí kvantové chromodynamiky jsou velmi náročné a zatím mají velmi omezenou přesnost. I to je důvod problémů s přesnou interpretací některých nově objevených silně integrujících částic.

[Zvětšit obrázek](#)



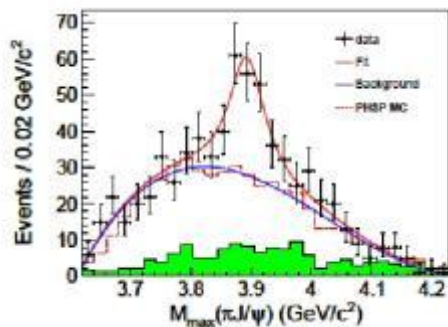
*Částice X(3872) může mít klasické vysvětlení, ale může jít i o exotický systém, buď o mezonovou molekulu nebo tetrakvark (zdroj CMS, CERN).*

Je však třeba říci, že existuje několik kandidátů, jejichž pozorování jsou velmi přesvědčivá a možné interpretace klasickými baryony nebo mezony jsou postupně vylučovány. Jako příklad může sloužit částice, která je označována jako **X(3872)**. V závorce je hmotnost částice v MeV/c<sup>2</sup>. Ta byla objevena před deseti lety



v rozpadech  $B^+$  mezonů experimentem BELLE v japonské laboratoři KEK. Později byla existence této částice potvrzena a určeny některé její parametry, které vylučovaly interpretaci některými klasickými hadronovými stavy. Nové informace přinesla analýza dat získaných experimentem LHCb, který pracuje na urychlovači LHC. Ten vyloučil alternativní hodnoty spinu, parity a nábojové parity a ponechal pouze jednu možnost. To vyloučilo další možnosti vysvětlení této částice pomocí klasického hadronu. Zůstala tak pouze jediná možnost klasické interpretace, a tím se silně posílila pravděpodobnost, že jde o něco exotického, jako tetrakvark nebo mezonová molekula. Je tedy vidět, že se i LHC experimenty zapojily do lovu na exotické multikvarkové systémy.

[Zvětšit obrázek](#)



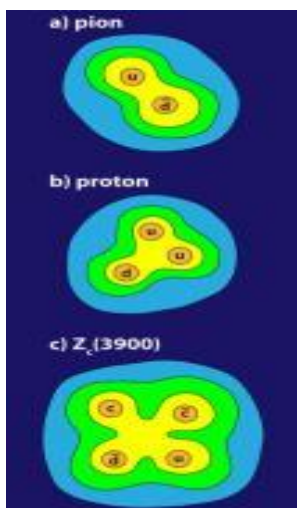
*Nově objevený kandidát na tetrakvark  $Z_c(3900)$  pozorovaný experimentem BELLE (zdroj arXiv:1304.0121v2)*

Nejnověji ohlásily kandidáta na tetrakvark experimenty BESS III a BELLE. V jejich případech by mohlo jít o částici složenou z  $c$  kvarku,  $c$  antikvarku,  $d$  antikvarku a  $u$  kvarku. Označily ji jako  $Z_c(3900)$ , kde v závorce je hmotnost v jednotkách  $MeV/c^2$ . Částice byla objevena při studiu jiného podivného objektu  $Y(4260)$ . Ten byl produkován ve srážkách elektronu a pozitronu a rozpadal se na dva nabitě mezony pí (jeden kladný a druhý záporný) a  $J/\psi$  mezon. Při studiu klidové hmotnosti spočtené z energií a hmotností dvou částic (jednoho mezonu pí a  $J/\psi$  mezonu) se objevil pík u hmotnosti zmíněných  $3900 MeV/c^2$ . Jeho parametry naznačují, že by mohlo jít o zmíněný exotický tetrakvark.

Nedávno svou trochou do mlýna na multikvarkové systémy přispěl i německý synchrotron COSY v Julichu, který naznačuje existenci částice označené jako  $d^*(2380)$ . Její existenci je však třeba potvrdit a zjistit, zda jde o multikvarkový systém nebo dibarionovou „molekulu“ (viz [zde](#)).

Tím, že gluony interagují silnou interakcí, mohly by se taky stát součástí složených silně interagujících systémů. Možná by mohly existovat systémy složené pouze z gluonů – označují se jako **glueball** nebo i hybridní systémy složené z kvarků a gluonů. Objevily se sice možní kandidáti, ale situace s jejich potvrzením je zatím horší než u multikvarkových systémů. I v této oblasti by mohly experimenty na LHC sehrát svou roli.

[Zvětšit](#)



*Nově objevená částice  $Z_c(3900)$  by mohla být tetrakvarkem (zdroj APS/Alan Stonebraker).*

## Závěr – příště hurá za Standardní model

Pokud se chceme vypravit do světa zatím hypotetických a často velice exotických částic a nezabloudit tam, musíme dobře znát svět těch již potvrzených, které jsou součástí Standardního modelu. Proto jsem si dovolil začít seriál o částicích a posledních výsledcích laboratoře CERN a zvláště urychlovače LHC velice

podrobným popisem těch, které jsou součástí Standardního modelu. Jak bylo popsáno, prokázaly první tři roky činnosti urychlovače LHC extrémní úspěšnost Standardního modelu. Podařilo se nejen objevit jeho poslední chybějící částici, Higgsův boson, ale ukázalo se, že jeho vlastnosti přesně odpovídají předpovědím Standardního modelu. Studium řady i velice vzácných reakcí a rozpadů s extrémní přesností potvrzují předpovědi této teorie a zmenšují prostor pro projevy hypotetické nové fyziky za Standardním modelem.

[Zvětšit obrázek](#)



*V současné době probíhá vylepšování urychlovače LHC a jeho příprava na urychlování protonů na téměř dvojnásobnou energii a mnohem vyšší intenzity. Vylepšují se i jednotlivé experimenty. (Zdroj CERN).*

Přesto však je řada teoretických evidencí a experimentálních faktů, které naznačují, že nová fyzikální teorie, která sice Standardní model obsahuje, ale je mnohem obecnější a širší, musí existovat. Jde například o vysvětlení toho, z čeho se skládá temná hmota ve vesmíru, nebo nalezení kvantové teorie gravitace. A nejpřesvědčivějším důkazem platnosti případných návrhů hypotetické nové fyziky by byl objev nových částic, které předpovídá. A tak se v dalších dílech cyklu podíváme na tyto hypotetické částice z předkládaných návrhů nové fyziky. Zároveň se také blíže podíváme, co nám získané znalosti o různých částicích řeknou o vývoji vesmíru a různých objektů v něm. A co nám k tomu říká nebo může říci laboratoř CERN a její urychlovač LHC. I když není vyloučeno, že pro konečný objev příznaků nové fyziky budou potřeba větší urychlovače, jejichž plány popisuje třeba [Marek Taševský](#).

**Autor:** [Vladimír Wagner](#)

**Datum:** 31.08.2014 15:03

## Diskuze:

Díky Pavle za upřesnění diskuze.

Vladimír Wagner,2014-09-03 00:10:29

Plně se ztotožňuji s Tvým názorem, že Standardní model nám stále poskytuje velký prostor pro zajímavé objevy. Jen bych upřesnil tuto věc. Nehledá se nástupce Standardního modelu. Standardní model tu bude pořád. **Ovšem je nutná nová teorie,** která bude obsahovat Standardní model, ale dokáže popsat svět obecněji i v těch oblastech, kde to Standardní model nedokáže. Bez této obecnější teorie se opravdu neobejdeme. Hlavní důvody jsou řečeny v odpovědi na otázku, co je nová fyzika. Jinak, zase moc díky za zajímavá doplnění a diskuzi. Vždy se na ně těším.

### [Odpovědět](#)

Stejně jako s newtonovskou fyzikou

Jenda Krynický,2014-09-03 11:57:18

když budu počítat za jak dlouho dopadne na zem šutr puštěný z věže, tak taky zanedbám relativistické efekty a budu to počítat podle starého dobrého Newtona. Je to jednodušší a při těchto rychlostech a vzdálenostech s velkou rezervou dostatečně přesné.

Jestli a jak zrovna foukne a jestli šutr cestou trefí mšici způsobí o několik řádů větší rozdíl než Newton versus Einstein.

### [Odpovědět](#)

Re: Stejně jako s newtonovskou fyzikou

Fanda Sin,2015-05-28 16:54:48

Nepočítá se dokonce ještě dráha letu družic pomocí Newtona?

[Odpověď](#)

Anihilace atomu a antiatomu

Jiri Novak,2014-09-02 15:26:02

Zajima mne jaky je mechanismus anihilace atomu. Dojde nejprve ke kontaktu elektronoveho a antielektronoveho oblaku, to zpusobi anihilaci elektronu a antielektronu? "Hola" jadra se pak se pritahuji a dojde take k jejich anihilaci?

Bylo by mozne zamezit anihilaci pomoci ionizace atomu a antiatomu?

[Odpověď](#)

**Pavel Brož,2014-09-02 20:12:28**

Zcela určitě jako první zanihulují elektrony s pozitrony, protože jejich vlnové funkce v atomu a antiatomu zabírají nesrovnatelně větší oblast než vlnové funkce jader a antijader (precizněji řečeno, zatímco vlnová funkce elektronu a pozitronu je nezanedbatelná v oblasti o velikosti celého atomu či antiatomu, tak vlnová funkce jádra a antijádra je nezanedbatelná pouze v oblasti o velikosti jádra). Anihilace jader a antijader bude probíhat až následně. Pokud není počáteční teplota hmoty a antihmoty příliš velká, dejme tomu necht' je řádově velká jako pokojová teplota, tak pak po anihilaci elektronů a pozitronů utvoří jádra s antijádry vázané stavy ve vysoce excitovaném stavu odpovídajícím velikosti srovnatelné s velikostmi původních atomů. Základní stav vázaného systému jádro/antijádro je ale mnohem menší, řádově srovnatelný s velikostí atomových jader, a do tohoto základního stavu bude původní stav postupnou deexcitací přecházet. V deexcitovaném stavu už se budou vlnové funkce jádra a antijádra překrývat dostatečně na to, aby mohla proběhnout jejich anihilace. Během deexcitace původního stavu jádro/antijádro do jeho stavu základního se postupně vyzáří fotony rentgenového spektra (tj. řádově tisíckrát energetičtější než fotony viditelného spektra, nicméně stejně tak řádově tisíckrát méně energetické, než jsou gama fotony vzniklé z anihilace elektronů s pozitrony).

Při finální anihilaci jader s antijádry naopak vzniknou gama fotony řádově tisíckrát více energetické, než jsou gama fotony vzniklé z anihilace elektronů s pozitrony; výsledná sprška fotonů vzniklých během celého procesu bude tedy sestávat z fotonů o energiích cca půl MeV (odpovídá klidové energii elektronu/pozitronu), dále z deexcitačních fotonů o energiích řádově až keV, a z fotonů o energiích řádově GeV.

Pokud by byla počáteční teplota hmoty a antihmoty aspoň několik tisíc Kelvinů, pak by po anihilaci elektronových obalů s pozitronovými měla jádra a antijádra takovou kinetickou energii, že by spolu vázané stavy nevytvořila, pouze by kolem sebe prolétla bez anihilace - bez vytvoření vázaného stavu by totiž nemohla proběhnout postupná deexcitace do stavu základního. Při těchto teplotách by ale byla ionizovaná už původní hmota a antihmota, takže by se nedalo moc hovořit o anihilaci atomů s antiatomy, šlo by o anihilaci částic plazmy. Opět i pro tuto anihilaci platí, že vlnové funkce elektronů a pozitronů jsou mnohem rozplizlejší než vlnové funkce jader a antijader, proto i zde zanihilují elektrony a pozitrony rychleji než jádra a antijádra. Bude-li ale částic plazmy dostatečně hodně, pak se jádra a antijádra i bez vytvoření vázaného stavu do sebe dříve či později trefí a zanihilují.

Pokud bychom uvažovali teplotu hmoty a antihmoty nižší, než jsou řádově ty tisíce Kelvinů, tak by částečná ionizace atomů a antiatomů nepomohla, protože by opět došlo k vytvoření vázaných stavů mezi kladně nabitými částečně ionizovanými atomy a záporně nabitými částečně nabitými antiatomy. Tudíž by opět došlo v prvním sledu k anihilaci elektronových/pozitronových obalů, následně pak k deexcitaci vzniklého vázaného stavu jádro/antijádro a dále k jejich anihilaci. Anihilaci hmoty s antihmotou je možné docílit jenom jejich separací s využitím elektrických či magnetických pastí.

V úvahách výše jsem předpokládal hmotu i antihmotu dostatečně řídkou, aby bylo možno zanedbat záchyt gama fotonů vzniklých z anihilace elektronových obalů, v opačném případě se hmota během rozbíhající se exploze okamžitě zionizuje, nemá pak tedy smysl bavit se o atomech a antiatomech.

[Odpověďt](#)

to Pavel Brozi

Jiri Novak,2014-09-02 22:00:06

Pane Brozi dekuji za, pro mne fascinující, informace. ( mě fascinuje že pan Brož ani ten Vesmír nepotřebuje, jemu anihilují funkce, a deexcitují funkce, funkce elektron-protonů, že sou rozplizlejší, tj. ty funkce . Opravdu fascinující )

[Odpověďt](#)

Anihilace atomu a antiatomu

Vladimír Wagner,2014-09-02 23:24:01

Byl jsem dnes celý den na státnicích, takže se k otázce dostávám až teď. Děkuji Pavlovi, že už odpověděl, ale dovolil bych si některé věci opravit a doplnit.

Především nukleony mezi sebou anihilují za vzniku několika mezonů pí. Takže třeba identifikace vzniku a anihilace antivodíku se provádí detekcí dvojice gama s energií 0,511 MeV a několika (tři až čtyři) pí mezonů. Nebudou tam žádné gama s geovými energiemi, o kterých píše Pavel. Pí mezon se následně rozpadá na mion a mionové neutrino a mion na elektron a neutrino mionové a elektronové (případně na pozitron a neutrino). V daném případě označuji neutrino a antineutrino souhrně jako neutrino. Jinak, vázané systémy jádra a anti jádra se už v CERNu studují, jde o systém složený z helia a antiprotonu, viz třeba zde:

<http://www.osel.cz/index.php?clanek=2932> . Studium tohoto systému lze získat informace o excitovaných stavech takového systému a energie fotonů, které je vybijejí. Ostatně takto se studují i energetické stavy pozitronia (tedy vázané stavy elektronu a pozitronu).

[Odpověďt](#)

Článek o identifikaci antivodíku

Vladimír Wagner,2014-09-02 23:26:31

pomocí jeho anihilace je zde:

<http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/antivodik/antivodikchlad.html>

## Odpověď

děkuji za opravu :-)

Pavel Brož, 2014-09-03 21:14:40

a mrzí mě, že jsem kvůli ukvapené úvaze mystifikoval pana Nováka i ostatní čtenáře.

**Klídek, mistře, vo co de..., že** Je to samozřejmě tak, fotony vzniklé z anihilace nukleonů s antinukleony nemohou mít energii řádově GeV. Nicméně o řád nižší fotony o energiích až do cca jednoho sta MeV už by ve výsledném procesu k nalezení být mohly, protože elektrony a pozitrony vzniklé v kaskádě těch rozpadů – po odpočtení energie odnesené neutrinu a antineutrinu – by dostatečné energie mít měly. Vyžadovalo by to ale, aby té hmoty a antihmoty bylo dost na to, aby ty finálně vzniklé elektrony a pozitrony měly šanci zanihilovat, zatímco prve jsem naopak předpokládal situaci, kdy hmota a antihmota jsou dost řídké na to, aby produkty anihilace unikly pryč.

Prve jsem si totiž zkratkovitě představil, že např. u anihilace protonu s antiprotonem může jeden z kanálů interakce vést k produkci několika fotonů, podobně, jako u rozpadu neutrálního pionu. Čistě akademicky vzato by to totiž opravdu možné bylo, nebránil by tomu žádný zákon zachování, souhrnně bychom měli dva kvarky u, jeden kvark d, dva antikvarky u a jeden antikvark d, takže proces analogický rozpadu neutrálního pionu by v principu proběhnout opravdu mohl. Ve skutečnosti ale neproběhne, protože by trval o mnoho řádů déle, než kolik potřebuje silná interakce k popárování tří kvarků a tří antikvarků do barevně neutrálních dvojic ať už nabitých nebo neutrálních pionů. Neutrální piony se pak rozpadnou za dobu, kdy už budou nejméně desítky nanometrů daleko od polohy původního jádra a antijádra (tedy ve vzdálenostech nejméně desetmilionkrát větší, než je rozměr původního jádra či antijádra), zatímco nabité piony se rozpadnou ve vzdálenosti dokonce ještě miliardkrát větší, tedy ve vzdálenostech řádově desítek metrů daleko.

No jo, to je tak, když dostatečně nepromýšlím svá tvrzení - plus navíc když se montuji Vladimírovi do jeho oboru :-) Ještě jednou se proto omlouvám za nechtěnou



mystifikaci v mém předchozím příspěvku :-) Kolikrát za život si mystifikoval, nadutý fracku ,

### Odpověď

Pro pana Wagnera

Josef Řeřicha,2014-09-02 11:11:06 Tento příspěvek jsem já. Musel jsem se ukrýt pod jiné jméno, jinak by mě vědci uráželi a vše co bych řekl by byl nesmysl a blábol. Když totéž řeknu pod jiným jménem, je to smysluplné a dokonce se to i pochválí.

Pane Wagnere, dvě otázky ( díky za to, že jste minule k nim vyzval ) : Zopakujte, prosím, pro mě ( a nejen pro mě ) co to je „nová fyzika“, čemu se tak začíná říkat ?  
Druhá otázka : Hubble zjistil posuv čar ve spektru (!) u většího souboru galaxií. Vyhodnotil se tento jev později jako že čím je galaxie dál od nás, tím rychleji (!) se vzdaluje ( ač to není "zrychlený" pohyb ). Toto vzdalování ( zrychlené , či rovnoměrné ?) je „axiální“ ? Ano ? Znamená to, že kdyby nedocházelo ( v Hubbleho dalekohledu ) k posunu spektrálních čar, že by se rychlost nezvyšovala ? A jak by vypadalo spektrum, kdyby se rychlost „rozpínání“ opravdu nezvyšovala, ale přitom kdyby putování světla se nekonalo „axiálně“, ale byl by globální vesmír zakřiven a světlo by tuto trajektorii kopírovalo, světlo by putovalo z galaxií k nám nikoliv přímo, ale po geodetě, ( gravitace je všudypřítomná ) po nějaké křivce. Jak by v takovém případě vypadalo spektrum?

### Odpověď

Co je nová fyzika?

Vladimír Wagner,2014-09-02 23:48:34

Standardní model je extrémně úspěšný pro popis mikrosvěta až po energie dostupné na LHC, přesto je jasné, že nemůže být konečným stupněm našeho poznání. Má značný počet parametrů (překračující dvacítku), které je třeba určit z experimentu a Standardní model je nepředpovídá. Nezahrnuje popis gravitace. Kvantový popis gravitace zatím neexistuje. Nevysvětlí temnou hmotu a temnou energii ve vesmíru. Velice pravděpodobně nedokáže vysvětlit narušení symetrie mezi hmotou a

antihmotou v našem vesmíru (i když určitý náznak toho, že by to za speciálních podmínek mohlo jít, je zde: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6618> ). Víme, že částice (kvarky, leptony, intermediální bosony) nemohou být bodové, jak předpokládá Standardní model.

Tyto zmíněné věci a hlavně vlastnosti hmoty na úplném počátku vesmíru či v podmínkách černé díry a dalších extrémních stavů by měla vysvětlit nová teorie, která však musí obsahovat Standardní model jako svou součást, která je limitou pro nižší energie (okolo energií LHC a nižší).

**Nová teorie je extrémně důležitá pro kosmologii, bez ní se nelze dostat do doby před začátkem Standardního modelu Velkého třesku.** Často se považují za možného kandidáta na tuto teorii některé strunové teorie, ale to je pod, možná stále větším, otazníkem: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=2858> . A je to opravdu na rozsáhlejší diskuzi, či spíše rozsáhlý článek.

#### [Odpověďt](#)

**Jak je to s rozpínáním vesmíru a červeným posuvem?**

Vladimír Wagner, 2014-09-03 00:03:32 **Wagner odpovídá mě ( tedy Řeřichovi, a asi proto slušně a hezky )**

Nevím, jestli jsem otázku správně pochopil. Ale velikost rudého posuvu (změna spektra) u galaxie nám řekne, jakou rychlostí se od nás vzdaluje. Pokud se zároveň podaří určit vzdálenost této galaxie. A měření rychlosti vzdalování (ze spektra) a vzdálenosti (třeba pomocí cefeid, supernov Ia či jiných objektů) pro velký počet galaxií, lze studovat, jak se vzdalování galaxií od nás zrychluje se vzdáleností a tedy i jak probíhá rozpínání vesmíru a také, jestli se rychlost rozpínání v čase mění.

Jinak vzdálenost se měří po křivce dané zakřivením vesmíru (ovšem náš vesmír je velmi plochý). **( námitka : velmi plochý dnes, ale v době před 10-12 miliardami let, kdy „testované záření“ bylo emitováno-odstartováno, tak dnes tomuto záření „hodnotíme rudý posuv“, tak vesmír po celých 12 miliard let nevyklonil konstantně plochý )**

#### [Odpověďt](#)

článek pěkný, komplexní, **jsou otázky dovoleny ?**

Josef Řeřicha,2014-09-01 11:10:32 To jsem já

Na urychlovači LHC v CERNu proběhly, jak se tu píše, dva experimenty ( ATLAS a CMS ) pro potvrzení Higgsova bozonu, což znamená, že volený experiment se zaměřuje na způsoby, kterými se HB rozpadá. Otázka : znamená to, že vlastně vlastní HB nehledáme, to nejde, ten najít neumíme, a proto hledáme „pouze“ způsoby kterými se rozpadá ? Analyzují se data, tj. informace o různých (!) možnostech jeho rozpadu. A informace to jsou informace o „vlastnostech“ rozpadu jiných částic po rozpadu vlastního HB. Ano ? Znamená to že si předem „naplánujeme“ jaké vlastnosti hledáme ? u částic, které lze identifikovat jako druhotné po rozpadu HB ? Ano ? Otázka druhá : Když chemik objeví novou chemickou reakci, oponent mu řekne, že platí tehdy když jí chemik dokáže mnohokrát zopakovat se stejným postupem a výsledkem. Je to tak i u Higgsova bozonu ? kolikrát se tento pokus stejného postupu (!) se stejnými shodnými výsledky podařilo zopakovat ? Dekuji za dobrou a správnou odpověď

#### Odpověď

Otázky jsou nejen povoleny, Wagner dokonce řekl, že otázky libovolného občana jsou nejen povoleny. Kdybych se představil svým jménem pravým, bylo by cokoli bych slušného řekl, nedovoleno a okamžitě grázly a darebáky a zuřivci, ponižováno a uráženo. ( to je výsledek pana O Rottera , který mě navěky degradoval )

Vladimír Wagner,2014-09-01 18:20:29

ale i vítány. Řekl pan Wagner Řeřichovi Takže se je pokusím zodpovědět. Higgs žije velice krátce a do detektorů ve vzdálenostech řádově centimetry a metry od místa jeho vzniku a rozpadu doletí jen stabilnější produkty jeho rozpadu (tedy sekundární částice). Někdy je to jednoduché pro analýzu. To v případě, že jde třeba o dva fotony nebo čtyři nabitě leptony (dvojice elektronu a pozitronu a dvojice záporného a kladného mionu). Jindy složitější. To, když je některou sekundární částicí v rozpadu neutrino, které se nedetekuje. Detekované částice většinou dokáže analýza signálu detektoru bezrozporně identifikovat.

Jak je v článku popisováno, v případě, že jsou sekundární částice z rozpadu higgse (třeba ty dva fotony), můžeme pomocí jejich hybnosti a energie určit hmotnost

higgse. Tedy, pokud jsou sekundární fotony z rozpadu higgse, dostaneme vždy výpočtem z jejich změřených energií a hybností stejnou hmotnost - hmotnost higgse. Jak experiment CMS, tak experiment ATLAS pozorovaly značný počet párů fotonů či čtveřic leptonů, které ukazovaly na to, že pocházejí z rozpadu jedné částice s danou hmotností.

Součet nábojů těchto sekundárních částic je nula. Což odpovídá předpokladu, že higgs je neutrální. Zároveň zjištěná pravděpodobnost vzniku této částice a pravděpodobnosti jeho rozpadu různými pozorovanými způsoby odpovídaly předpovědím Standardního modelu.

Během celé doby experimentu se detekují všechny částice, které vznikají a které je detektorový systém schopen zaznamenat. A v analýze se zjišťovalo, zda v dané srážce není nějaká kombinace částic odpovídající rozpadu higgse. A takové se zaznamenávaly u obou experimentů v průběhu celé doby práce urychlovače.

Postupně se tak nabrala dostatečná statistika higgsů, aby bezrozporně potvrdila jeho existenci. Nabral se dostatečně signifikantní pík ve spektru hmotností spočtených z hybností a energií vhodné kombinace částic.

### [Odpověď](#)

Velice pěkný a komplexní článek

Pavel Brož, 2014-08-31 23:45:40

děkuji. Možná by se pouze dalo ještě dodat, nejedná se ale o nic zásadního - objevem Higgsova bozonu není Standardní model po experimentální stránce již zcela uzavřen. Standardní model obsahuje spoustu volných parametrů, které on sám nefituje, dají se fitovat jenom experimentem. Hmotnost Higgsova bozonu je jen jedním z mnoha těchto parametrů, dále se jedná o hmotnosti všech fermionů, hodnoty vazebních konstant či elementy dvou klíčových komplexních matic figurujících v tomto modelu. Některé z těchto parametrů jsou už dostatečně přesně nalezeny z experimentů, jiné jsou zatím známy stále ještě s velikou nepřesností, přitom ale jejich konkrétní číselná velikost má podstatné konsekvence např. v neutrinové fyzice, asymetrii mezi hmotou a antihmotou a možných mechanismů jejího vzniku, či pravděpodobnosti některých exotických procesů, jejichž existence

má podstatný dopad na případnou fyziku za Standardním modelem. Tyto parametry navíc nemohou nabývat libovolných hodnot, ale platí mezi nimi množství křížových vztahů a nerovností, které opět mohou při experimentálním testování vést buď k jejich zpřesnění, anebo k případnému prokázání nedostatečnosti Standardního modelu. Z tohoto důvodu skýtá experiment pro upřesňování fyzikálního obrazu světa i bez projevů nové fyziky dostatečně úrodné pole ještě na několik dalších desetiletí.

## Odpověďt

Díky Pavle

Vladimír Wagner, 2014-09-01 07:16:46

za diskuzi, ale dovolil bych si trochu nesouhlasit. A to už podruhé v rozmezí pár hodin. To se jen tak u jiných docentů nestává. Doplnění poslední chybějící částice ve Standardním modelu a potvrzení, že je taková, jak ji předpovídá, je zásadní událost. Standardní model má řadu volných parametrů, které je třeba určovat z experimentu. Ovšem teoretická předpověď jejich hodnot je už otázka fyziky za Standardním modelem.

Je jasné, že určení přesných experimentálních hodnot právě třeba v neutrinovém sektoru může přinést velmi zajímavé výsledky. Nevíme, jestli jsou neutrina majoranovské či dirackovské částice a jaké jsou jejich absolutní hodnoty hmotností. Chybí nám znalost fázového úhlu narušení CP symetrie u neutrin. To vše je třeba ještě zjistit. A o řadě takto zacílených výzkumů, které nám zajímavé informace přinesou již v brzké době se i na Oslovi psalo (třeba <http://www.osel.cz/index.php?clanek=6216>). Přesné určení experimentálních hodnot parametrů Standardního modelu a tím i možnosti extrémně přesných předpovědí pomocí něj i u exotických řídkých jevů je totiž klíčové pro hledání projevů nové fyziky. A pořád ještě také nedokážeme spočítat s dostatečnou přesností hmotnosti hadronů a nevíme zda opravdu existují popisované multikvarkové systémy a o přesných teoretických předpovědích si u nich můžeme nechat zatím jen zdát.

To je ale kvalitativně něco jiného, než potvrzení existence higgse. Víím, že může být velká diskuze o tom, co je rozšíření Standardního modelu a co už nová fyzika. A pochopitelně nemohu vyloučit existenci těžkých neutrin a odpovídající nové generace

částic. Ale já bych už je řadil spíše do té fyziky nové. A myslím také, že je docela široká akceptace je, že higgs je opravdu poslední potvrzená částice toho, co lze označit bez diskuze za Standardní model.

V experimentální i teoretické oblasti se určitě bude ještě hodně dlouho dít hodně zajímavého, ale potvrzení higgse a jeho základních vlastností si přece jen dovolím považovat za zlom.

### [Odpovědět](#)

omlouvám se za nedorozumění

Pavel Brož, 2014-09-01 20:47:37

vzniklo tím, že špatně rozdělují dlouhé věty - měl jsem na mysli, že můj dodatek není nic zásadního, nikoliv že bla-bla ..... bléééé objev Higgse nebyl zásadním objevem :-). Objev Higgse si myslím je pro Standardní model aspoň tak významný, jako byl objev rozpínání vesmíru pro Einsteinovu obecnou teorii relativity - ta by si sice dokázala udržet své postavení i bez onoho legendárního Hubbleova objevu, nicméně díky němu si získala respekt i jako první exaktní kosmologická teorie. Hubbleův objev expanze vesmíru také ukázal, že myšlenkové schéma dynamického prostoru, se kterým obecná teorie relativity pracuje, nemusí být jen pouhým matematickým trikem umožňujícím např. odvození Newtonovy gravitace v limitě slabého gravitačního pole, ale že může být důležitým principem pro pochopení evoluce celého vesmíru. Stejně tak objev Higgsova bozonu ukazuje, že Higgsův mechanismus není jen matematickým trikem umožňujícím vyhnout se nekonečným, která v teorii bez tohoto mechanismu existovala, ale že ve skutečnosti může ukazovat na existenci reálných složek hmoty.

Moje poznámka mířila spíše k něčemu jinému, a to k tomu, že i v rámci Standardního modelu může v budoucnu dojít k překvapivým objevům, tedy i tehdy, pokud bychom se např. po zbytek tohoto století neměli projevů nové fyziky dočkat. Vezmu si jako příklad opět paralelu s kosmologií - rovnice Einsteinovy teorie relativity obsahovaly jakožto volný parametr kosmologickou konstantu. Řešení pro všechny možné hodnoty této konstanty byly nalezeny už v během prvních dvaceti let existence

obecné teorie relativity. Po objevu expanze vesmíru se intenzivně studovala řešení odpovídající zpomaleně se rozpínajícímu vesmíru, a řešila se hlavně otázka, jestli se jedná o vesmír eliptický (uzavřený), hyperbolický (otevřený) či parabolický (hraniční případ mezi nimi). Nikoho nenapadlo uvažovat, že vesmír by nemusel být ani jedním z těchto podpřípadů, jednoduše proto, že by se rozpínal zrychleně místo zpomaleně. Přitom Einsteinovy rovnice opačné znaménko kosmologické konstanty, a tedy zrychlené místo zpomaleného rozpínání, vůbec nevyplývaly - pouze fyzikům až do roku 1998 přišlo takové znaménko kosmologické konstanty jako nefyzikální. Objev zrychlené expanze vesmíru v letech 1998-9 v principu neznamenal objev nové fyziky ve smyslu, že by automaticky bylo potřeba přinést novou teorii k jeho vysvětlení - a přesto znamenal převrat v chápání vesmíru. HDV se také jednou dočká

Stejně tak i v rámci Standardního modelu už i v minulosti docházelo k senzačním objevům. Za všechny je možno jmenovat např. experimentální průkaz existence kvark-gluonového plazmatu nebo objev nenulové hmotnosti neutrin - přitom ani jeden z nich nevybočuje z teoretických mezí Standardního modelu. Proto jsem osobně optimista i pro případ, že by v příštích dvou desetiletích žádná nová fyzika - ve smyslu nevyhnutelnosti nějakého nástupce Standardního modelu - nebyla zapotřebí. K našemu obrazu světa má toho Standardní model stále dost co říct.

### [Odpověďt](#)

JN, 06.11.2017 ; se mi zdá že už jednou jsem tuto diskusi komentoval, 2.4.2014 a jen rychlým vyhledáváním, jsem tento komentovaný dokument dnes nenašel.