

Proton-protonová reakce (též p-p řetězec) má tyto základní dílčí reakce, které vedou k přeměně vodíku v hélium:

1. reakce ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{D} + \text{e}^+ + \nu$ (+ 1,44 MeV),

v níž dva protony (jádra vodíku) po srážce dávají vzniknout deuteronu, pozitronu a neutrinu. Neutrino je částice s velmi malým účinným průřezem (řádově do 10^{-45} cm^2) a snadno projde celou hvězdou nerušeně do kosmického prostoru.

2. reakce ${}^2\text{D} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (+ 5,49 MeV).

Deuteron se po srážce s protonem mění v hélium ${}^3\text{He}$ a záření γ . Tato reakce, jejíž pravděpodobnost je velká, proběhne prakticky ihned po vzniku deuteronu, po první reakci.

3. reakce ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$ (+ 12,85 MeV).

Dvě jádra ${}^3\text{He}$, která vznikla v předchozích reakcích, dávají vznik jednomu jádru hélia ${}^4\text{He}$ a dvěma protonům. Z celkové energetické bilance je asi 0,52 MeV ztraceno ve formě vyzáření neutrina, avšak i tak je při vzniku jednoho atomu hélia uvolněna celková energie 26,2 MeV = $4,2 \cdot 10^{-12} \text{ J}$.

Uhlíkový cyklus (též CNO-cyklus) je jiná cesta přeměny vodíku v hélium v průběhu šesti reakcí, ve kterých se uplatňuje hlavně uhlík a další prvky vyšších atomových vah. Podle autorů se tento proces nazývá též Betheův-Weizsäckerův cyklus.

1. V první reakci atom uhlíku ${}^{12}\text{C}$ v interakci s vodíkem produkuje izotop dusíku ${}^{13}\text{N}$ a kvantum záření γ

${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$ (+ 1,95 MeV).

2. Druhá reakce je přeměna nestabilního izotopu dusíku ${}^{13}\text{N}$ na izotop uhlíku ${}^{13}\text{C}$ při současném vyzáření pozitronu a neutrina.

${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \nu$ (+ 2,22 MeV).

Pozitron se opět spojí s elektronem - vznikají dvě kvanta záření γ a neutrino se z hvězdy definitivně ztrácí.

3. Třetí reakcí je interakce ${}^{13}\text{C}$ s protonem

${}^{13}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$ (+ 7,54 MeV), kdy vzniká normální dusík a záření γ .

• **4.** Čtvrtá reakce z celého cyklu je opět protonová, kdy dusík a proton dávají vznik nestabilnímu izotopu ${}^{15}\text{O}$ a záření γ

${}^{14}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$ (+ 7,35 MeV).

5. Izotop ${}^{15}\text{O}$ se v páté reakci ihned mění v izotop dusíku

${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + \text{e}^+ + \nu$ (+ 2,71 MeV)

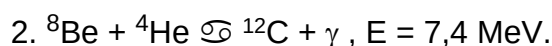
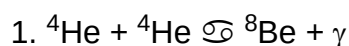
s vyzářením pozitronu a neutrina, jejichž osud je týž jako v reakci druhé.

6. Šestá a poslední reakce CNO-cyklu probíhající mezi izotopem dusíku a protonem je ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$ (+ 4,96 MeV).

Celková energetická bilance CNO-cyklu je nepatrně menší než proton-protonového cyklu: $E = 25,0 \text{ MeV} = 4,0 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ na jeden atom hélia, neboť více energie je vyzářeno ve formě neutrin. Do reakce vstupuje jedno jádro uhlíku a čtyři protony a vystupuje jedno jádro uhlíku a jedno jádro hélia.

CNO-cyklus může probíhat i tak, že místo ^{12}C se reakce zúčastní kyslík ^{16}O , který se postupně mění v izotopy ^{17}F , ^{17}O , ^{14}N , ^{15}N a opět ^{16}O při spotřebě 4 ^1H a produkci ^4He . Tento vedlejší cyklus je velmi málo pravděpodobný - na dva až tři tisíce reakcí hlavního cyklu CNO připadá jedna reakce vedlejšího cyklu. Proton-protonová reakce se uplatňuje při teplotách $10^{6,8} \text{ K}$ až $10^{7,2} \text{ K}$, kdežto CNO-cyklus v rozmezí teplot $10^{7,2} \text{ K}$ až $10^{7,7} \text{ K}$.

C) Při teplotách 10^8 K a výše může docházet ke spalování hélia na těžší prvky. Základní reakcí je tzv. 3α proces (Salpeterův), který probíhá takto:



α -proces: Syntéza prvků pomocí α částic při teplotách 10^9 K . Při těchto reakcích se uvolňuje záření γ a mohou vznikat prvky až do ^{40}Ca . Uplatňují se tehdy, jestliže hélium v jádru hvězdy plně nevyhořelo.

e-proces: Tento proces probíhá při teplotách $4 \cdot 10^9 \text{ K}$ a vede ke vzniku prvků skupiny železa: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni. Relativní zastoupení prvků v nitru hvězdy závisí nejen na teplotě, ale především na vazebné energii W , kterou jsou jednotlivé nukleony vázány k jádru. Jádra s vyšší vazebnou energií jsou samozřejmě stabilnější než jádra s energií nižší. Další důležitou skutečností je, že jaderné reakce jsou exotermické jen tehdy, jestliže konečný produkt má vyšší vazebnou energii přepočtenou na jeden nukleon než prvek, který do reakce vstoupil. Např. hélium má tento podíl roven $7,05 \text{ MeV}$ ($W / A = 28,2 / 4 = 7,05$). Maximum hodnoty W / A je u prvků s hmotnostním číslem $A = 50$ až 60 a největší je u železa ^{56}Fe ($8,8 \text{ MeV}$). U těžších prvků s $A \wedge 220$ opět klesá až pod $7,8 \text{ MeV}$. To znamená, že prvky skupiny železa jsou nejstabilnější a současně pro vznik těžšího jádra $A > 56$ z prvku lehčího je energie spotřebována. Dostoupí-li centrální teplota hvězdy $4 \cdot 10^{10} \text{ K}$ a hustoty 10^8 g.cm^{-3} , kdy vznikají prvky skupiny železa, konečný stav vyústí v rovnovážné zastoupení ^{56}Fe vzhledem k ostatním stabilním prvkům. Rovnováha = ekvilibrium, a proto se tento děj označuje jako e-proces.

s-proces: Tento proces produkuje např. Sr, Zr, Ba, Po. Princip je jednoduchý. Jádra lehčích prvků jsou bombardována neutrony, pro které i při nízkých energiích není náboj jádra překážkou. Těžké prvky mohou tímto způsobem vznikat i za poměrně nízkých teplot. Problémem číslo jedna zůstává nedostatek neutronů v počátečním stádiu života hvězdy, protože ty nevznikají ani při p-p reakci ani v CNO-cyklu. Jejich koncentrace se podstatněji zvýší až v pokročilejším stádiu spalování uhlíku či dusíku při α reakcích, kdy vznikají volné neutrony. Příkladem je rovnice: $^{13}\text{C} + ^4\text{He} \rightleftharpoons ^{16}\text{O} + n$ apod. Dokud je koncentrace volných neutronů nízká, je malá pravděpodobnost jejich srážek s jádry a vznik těžkých prvků probíhá pomalu. Kromě toho jen izotopy s dlouhým poločasem přeměny přispívají k tomuto ději podstatněji měrou. Méně stabilní se totiž rozpadnou dříve, než dojde k zachycení dalších neutronů nezbytných k tomu, aby jádro dosáhlo stability, jako jsou např. prvky s $A = 90, 138, 208$, které mají uzavřené neutronové slupky s celkovým sudým počtem neutronů 50, 82, 126. Jelikož proces probíhá pomalu (slow), označuje se názvem s-proces.

r-proces: Je to rychle probíhající s-proces. Vyžaduje vysokou koncentraci neutronů, při které je pravděpodobnost jejich srážek s jádry podstatně vyšší. Umožňuje vznik těžkých prvků reakcemi, kdy meziprodukt může být i velmi nestabilní izotop (např. ^{235}U , ^{238}U), na úkor prvků skupiny železa. Probíhá rychle (rapid-proces), proto se označuje jako r-proces.

To by asi stačilo alespoň pro hrubou představu, jak chemické prvky ve vesmíru vznikají. Existují jistě desítky jiných procesů, při kterých vznikají různé chemické prvky, ale ty, které jsem zde vyjmenoval jsou ty nejdůležitější. Myslím, že stejně zajímavý jako vznik chemických prvků je i vznik složitějších molekul v mezihvězdném prostoru, zvláště pak organických. Všeobecně se asi neví, že základní stavební složky buněk, to znamená lipidy a aminokyseliny, neexistují pouze na Zemi, ale na meteoritech a planetkách bloudí vesmírem. Zvláště zajímavé jsou tzv. uhlíkaté chondrity, které obsahují velké množství velice složitých aminokyselin, a to i takových, které se na Zemi vůbec nevyskytují (např. sarkosin $\text{CH}_3\text{NHCH}_2\text{COOH}$, beta-alanin $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ aj.). Ale to už je téma na jinou práci.

Výše uvedené je prací neznámého studenta

.....

Zkoumání narušení CP symetrie v rozpadech neutrálních B mezonů

Metody měření spinu Higgsova bosonu , Rupert Leitner

Složení kosmického záření , Hosek

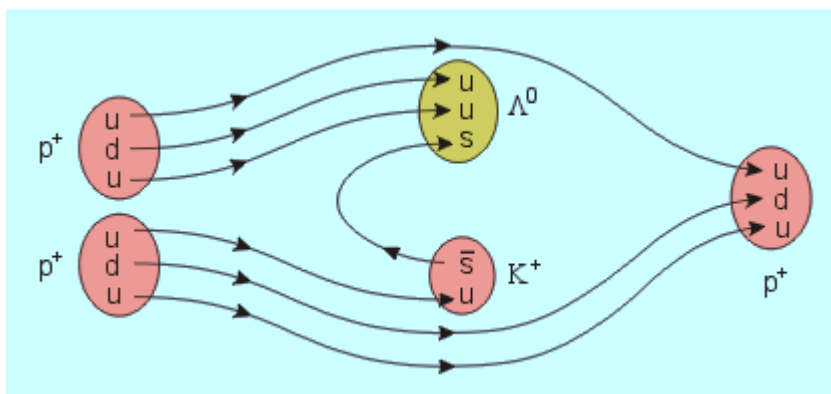
Chirální poruchová teorie a rozpad $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-$

Silná interakce : mezi kvarky a zprostředkovatelem jsou gluony (Kvarky jsou fermiony) (gluony jsou intermediální tj. polní částice)

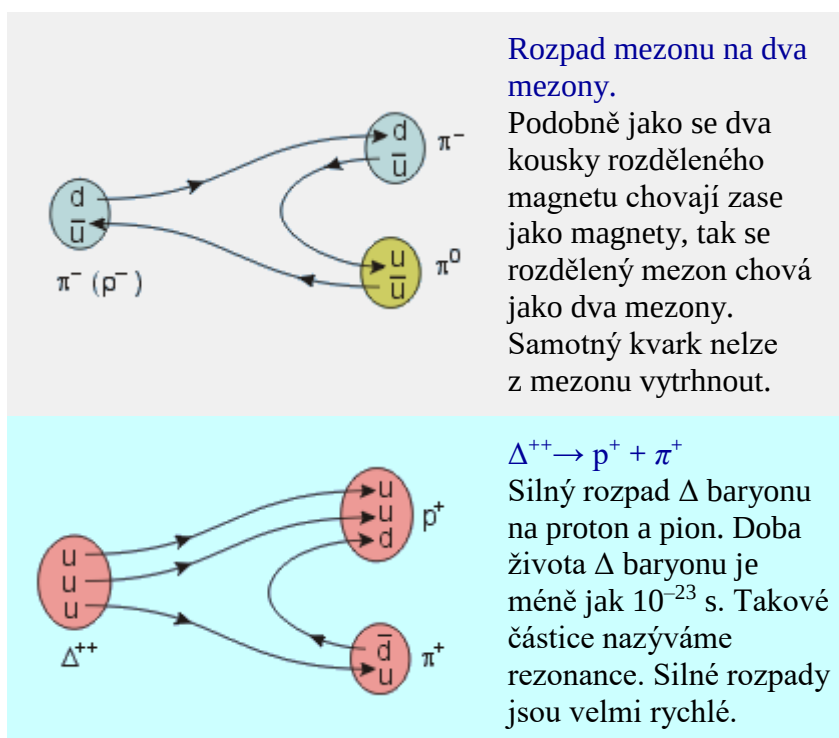
Slabá interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým nábojem slabé interakce Q_f , tzv. vůní (flavour). Vůni mají leptony a kvarky, existuje tedy 12 vůní (e, ν_e , μ , ν_μ , τ , ν_τ , d, u, s, c, b, t). Polní-intermediální částice slabé interakce mají nenulovou hmotnost ($W^\pm$ mají hmotnost 80 GeV a Z^0)

Elektromagnetická interakce je *výběrová interakce*. Působí jen na částice s nenulovým elektrickým nábojem. Symetrie je popsána jedním volným parametrem (úhlem otočení α), kterému odpovídá jediná intermediální částice – foton. Má-li mít interakce nekonečný dosah, musí mít polní částice nulovou hmotnost.

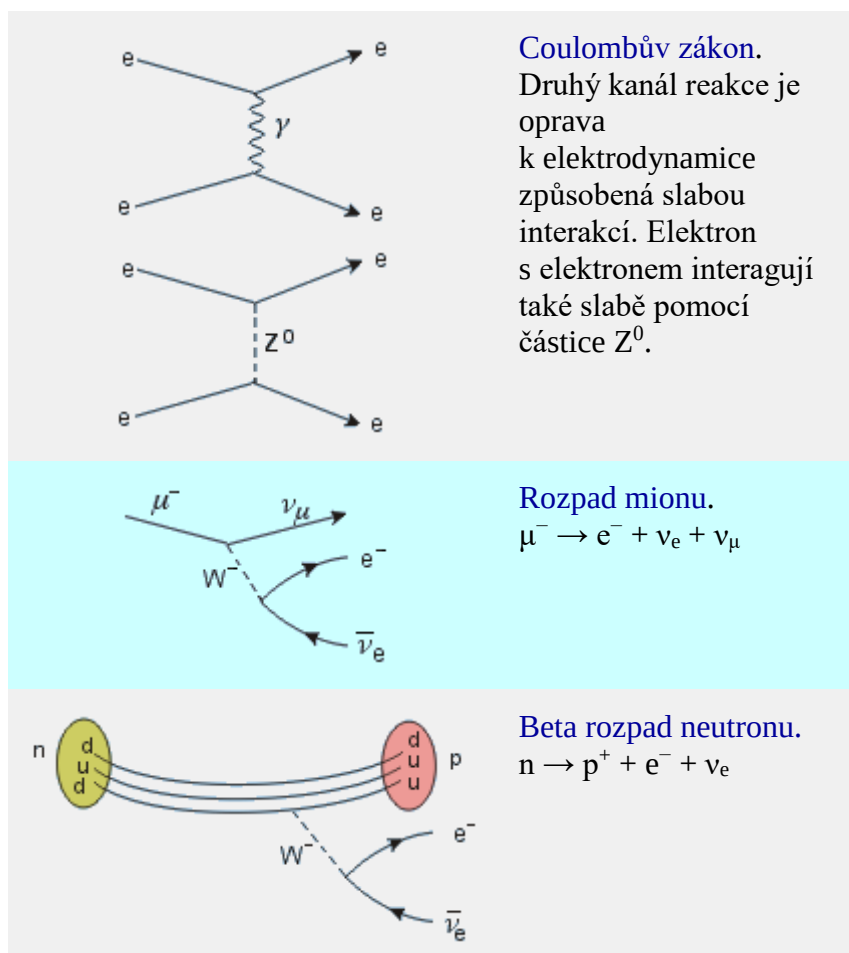
Silná interakce : silnou srážku dvou urychlených protonů $p^+ + p^+ \rightarrow \Lambda^0 + K^+ + p^+$:

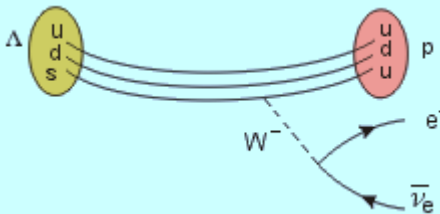
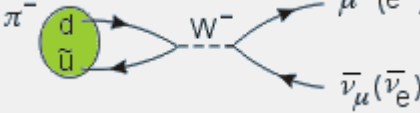
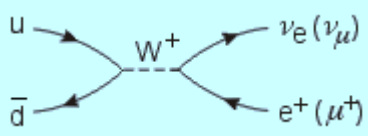
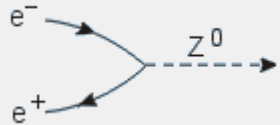


U diagramů silné interakce nebývá zvykem zakreslovat všechny vyslané a chycené gluony. Jako příklad uveďme diagram rozpadu mezonu na dva mezony a silný rozpad částice Δ^{++} :

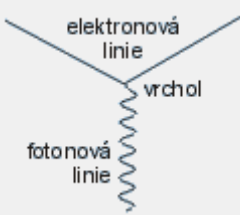
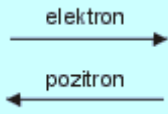


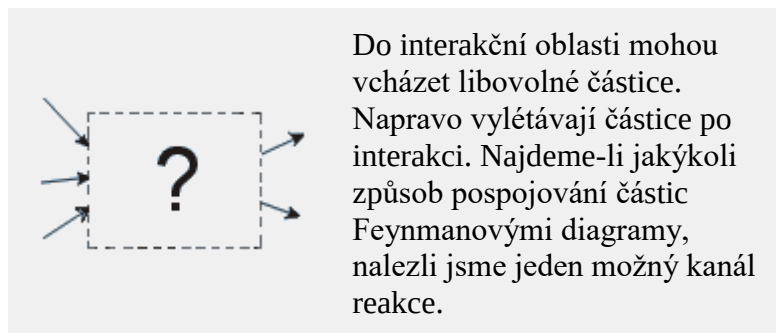
Slabá interakce : Typické slabé procesy



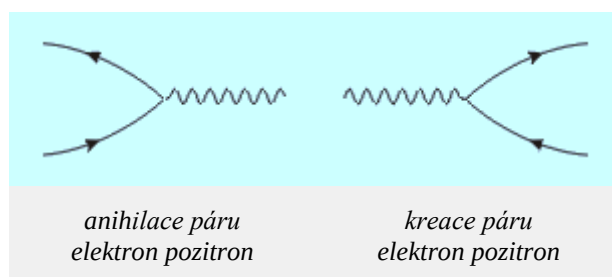
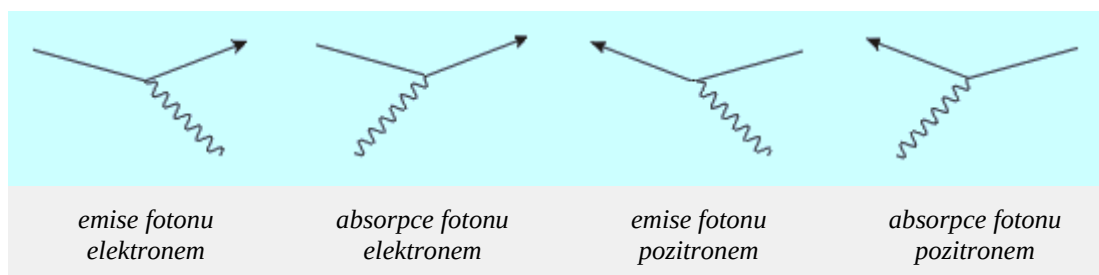
	Slabý rozpad Λ hyperonu. $\Lambda \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
	Rozpad π^+ a π^- mezonů: Pozorován v produktech interakce kosmického záření s horními vrstvami atmosféry. Vede na e^+, e^-, μ^+, μ^- a elektronová a mionová neutrina.
	Objev částic $W^{+/-}$. CERN (1983). Proton antiprotonový svazek. Každý svazek měl energii 270 GeV. Nabité proudy.
	Objev částice Z^0. CERN (1984). Zařízení SPS, později LEP, neutrální toky. Oba objevy: Carlo Rubbia, Simon van der Meer.

Elektromagnetická interakce :

	Základním diagramem elektromagnetické interakce je diagram s jednou elektronovou linií (libovolné generace), jednou fotonovou linií a jedním vrcholem. Tento diagram můžeme libovolně spojitě deformovat a skládáme z něho elektromagnetické děje.
	Veškeré částice se ve Feynmanových diagramech pohybují <i>doprava</i>. Šipky na liniích neznamenaají pohyb, ale rozlišují mezi částicemi a antičásticemi. Šipka doprava znamená částici (zde elektron) a šipka doleva antičástici (zde pozitron).



Základní diagram elektromagnetické interakce lze interpretovat šesti způsoby:



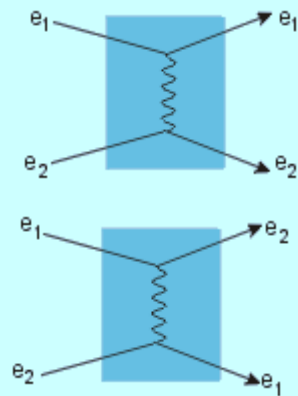
Typické **elektromagnetické** procesy

Počet vrcholů diagramu odpovídá pořadí v odpovídající řadě a amplituda pravděpodobnosti dějů s každým dalším vrcholem klesá v poměru, který nazýváme *konstanta jemné struktury*.

$$\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c \sim 1/137 .$$

Jedině linie s volnými konci jsou skutečné částice, které lze registrovat v našich přístrojích. Linie, které začínají a končí ve vrcholu odpovídají tzv. virtuálním částicím, které nesplňují Heisenbergovy relace neurčitosti. Tyto částice nikdy nemůžeme registrovat v přístrojích (nemají volné konce linií), jde například o intermediální (polní) částice.

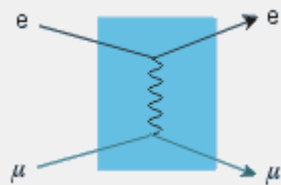
Uveďme některé jednoduché Feynmanovy diagramy:



$$e + e \rightarrow e + e$$

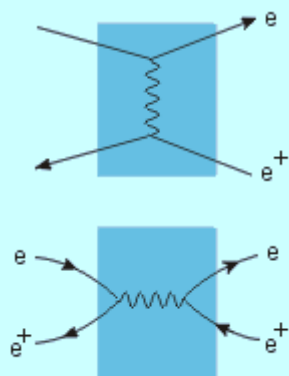
(Coulombův zákon)

Dva základní kanály reakce, jde o diagramy druhého řádu se dvěma vrcholy. Modrá oblast je „černá skříňka“ – oblast interakce. Běžně se v diagramech neoznačuje. Odpovídající příspěvek k účinnému průřezu reakce spočítal v roce 1932 [Christian Møller](#) (1904–1980) bez pomoci Feynmanových diagramů.



$$e + \mu \rightarrow e + \mu \text{ (elektron-mion)}$$

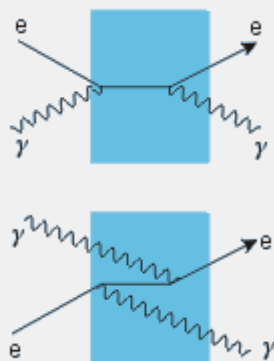
Na rozdíl od interakce dvou elektronů zde existuje jediný diagram 2. řádu. Mion jako těžká forma elektronu byl objeven v roce 1936.



$$e + e^+ \rightarrow e + e^+$$

(elektron pozitronový rozptyl)

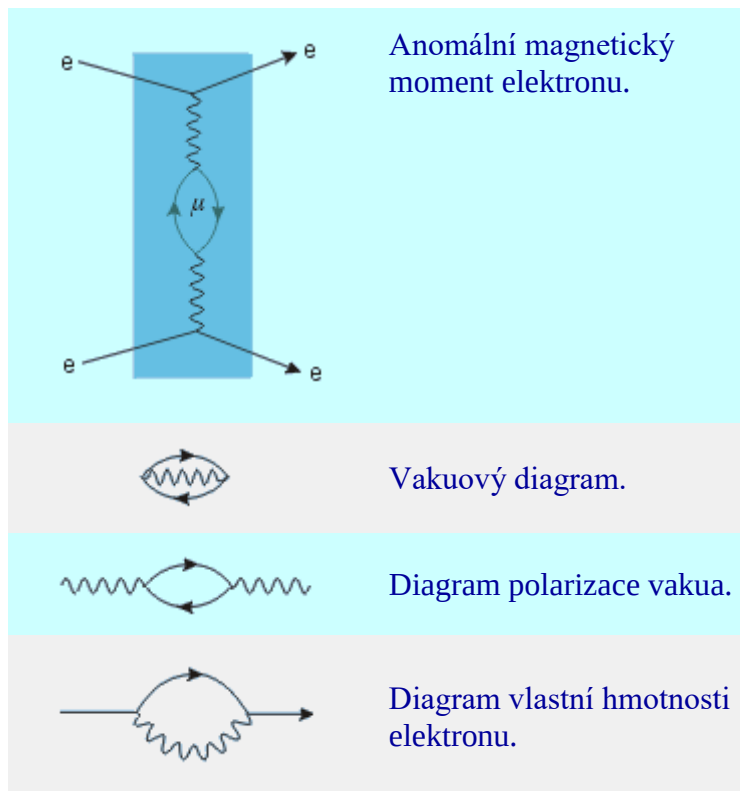
Dva základní kanály reakce v druhém řádu Feynmanových diagramů. Odpovídající příspěvek k účinnému průřezu reakce spočítal v roce 1935 [Homi Jehangir Bhabha](#) (1909–1966) bez pomoci Feynmanových diagramů.



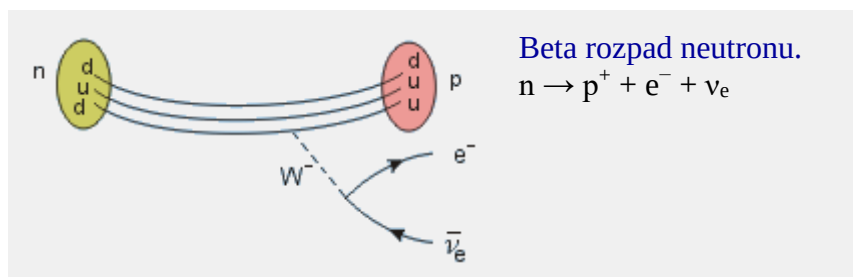
$$e + \gamma \rightarrow e + \gamma \text{ (elektron-foton)}$$

[Comptonův rozptyl](#)

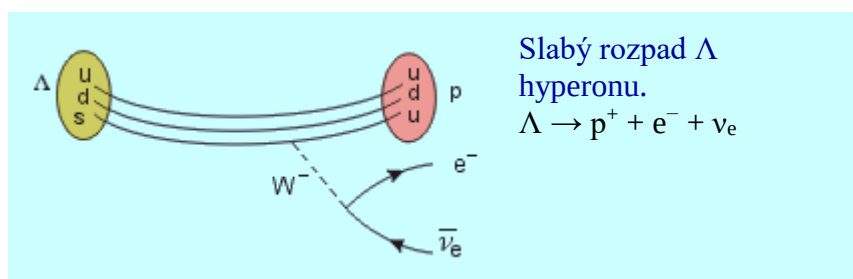
Dva základní kanály reakce v druhém řádu Feynmanových diagramů.



Zopakují znova co tvrdí Kulhánek :
slabá interakce →



slabá interakce →



Podle mě by to mělo být takto :

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\frac{x^3 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^3} = \frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2} \cdot \frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1} \cdot \frac{x^0 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^1}$$

5 5
5 5

$$\Lambda^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_{\tau}^0$$

$$\frac{x^4 \cdot t^1}{x^1 \cdot t^3} = \frac{x^3 \cdot t^0}{x^0 \cdot t^2} \cdot \frac{x^2 \cdot t^2}{x^2 \cdot t^1} \cdot \frac{x^0 \cdot t^1}{x^0 \cdot t^2}$$

6 6
6 6

Protože bývá v literatuře trošku binec ve značení „anti“ pro antičástice (většinou čárka nad písmenkem skoro stejná jako čárka značící záporný náboj), tak zde :

$$\bar{\nu}_{\tau}^0 \equiv \nu_{\tau}^0 \equiv (\nu_e^{\sim})^0 \rightarrow \text{antičástice, antineutrino}$$

=====

zdroj → <http://www.osel.cz/index.php?clanek=3619>

Jaká bude éra LHC a co po něm?

[Zvětšit obrázek](#)



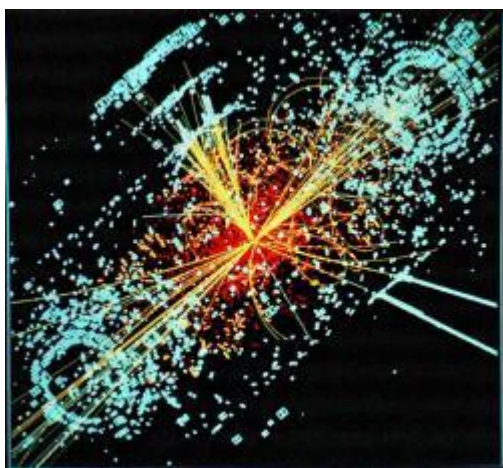
John Ellis (zdroj Wikipedia).

Už v současnosti se v Česku uskutečnilo několik zajímavých akcí, které souvisí s blížícím se spuštěním LHC. Jednou z nich byla návštěva významného teoretického fyzika Johna Ellise, který pracuje právě v laboratoři CERN. Ve Fyzikálním ústavu AVČR přednesl přednášku o budoucnosti laboratoře CERN v době urychlovače LHC a následující. Inspirujme se jeho povídáním a názory a pohledme na budoucnost částicové fyziky a využití velkých urychlovačů. Vysvětlení řady pojmů ze světa částic, které se budou v dalším výkladu používat, je možné najít v [tomto článku](#).

Když se některého z částicových fyziků zeptáte, co očekává od urychlovače LHC, téměř každý jako první slovo vypustí pojem higgs. **Tato jediná dosud nepozorovaná částice současně podoby teorie struktury hmoty a interakcí (standardního modelu)** je opravdu tím, co do jisté míry může charakterizovat období, ve kterém se tento obor fyziky před startem urychlovače LHC nachází. Je známkou obrovské šířky našich znalostí daných standardním modelem, který umožňuje pochopit, popsat a předpovídat velmi širokou škálu jevů, které pozorujeme v našem

světě v oblasti energií, které jsou dostupné urychlovači před LHC. Prázdným místem v naší mozaice je právě higgsův boson, který potřebuje teorie standardního modelu sjednocující popis elektromagnetické a slabé interakce. Tato částice by měla pomoci při vysvětlení vytváření hmotnosti částic a důvodu, proč má například částice elektromagnetické interakce foton nulovou klidovou hmotnost a částice slabé interakce Z a W bosony klidové hmotnosti tak obrovské. Objevení higgsova bosonu v oblasti energií, které nám LHC zpřístupní, by tak mělo být korunou dovršující standardní model. Urychlovač LHC umožní i další všestranné a velmi intenzivní testování tohoto modelu v nové oblasti velmi vysokých energií.

[Zvětšit obrázek](#)



Detekce higgsova bosonu experimentem CMS. Zatím pouze v simulaci. (Zdroj CERN).

Urychlovač LHC by však na druhé straně měl být nástrojem, který umožní překročení tohoto modelu a otevře cestu k výběru obecnější teorie, která umožní popsat realitu v oblastech energií, na které už standardní model nestačí. Otevřená otázka existence higgse, počtu těchto částic a jejich vlastností je průzorem do hloubky našich neznalostí. Pokud LHC higgse najde, mělo by nám podrobné zkoumání jeho vlastností otevřít průzor do oblasti nové fyziky. Ještě větší proniknutí do této oblasti by přinesl objev supersymetrických částic, jejichž objev by pomohl vysvětlit řadu symetrií pozorovaných mezi kvarky a leptony, najít správnou teorii sjednocující popis silné a elektroslabé interakce a třeba i vysvětlit, co tvoří temnou hmotu ve vesmíru. To jsou objevy, které lze od urychlovače LHC očekávat s velkou pravděpodobností. Ovšem nelze úplně vyloučit, že se na LHC objeví i projevy sjednocení popisu gravitační interakce a interakcí ostatních, tedy kvantové teorie gravitace. Například v podobě mikroskopických černých děr či projevů dalších rozměrů. Podrobnější soupis objevů, které by se s pomocí LHC mohly udělat a jejich dopadu na kosmologii [najdete zde](#).

Můžeme si položit otázku, co bude následovat po LHC. Už teď technici a fyzikové uvažují o jeho následovníku. Panuje vcelku dobrá shoda, že by to měl být urychlovač, který by srážel elektrony a pozitrony. V tomto případě musí jít o lineární urychlovač, abychom zabránili velkým ztrátám při urychlování vlivem synchrotronového záření. Na LHC srážíme protony, které jsou velmi složitými objekty. Mají komplikovanou strukturu složenou ze tří valenčních kvarků a složitého vakua, daného silnou interakcí. Při využití elektronu a pozitronu srážíme, z pohledu předpokládané energie srážky, jednoduché bodové objekty. Zbavíme se tak nežádoucího pozadí a je pak daleko jednodušší identifikovat a měřit vlastnosti nových částic. Mohla by vzniknout podobná situace, jako nastala v laboratoři CERN v poslední čtvrtině minulého století při přechodu od urychlovače protonů SPS k urychlovači elektronů a pozitronů LEP. Zatímco pomocí urychlovače SPS byly bosony slabé interakce W a Z objeveny, urychlovač LEP podrobně prostudoval jejich vlastnosti a umožnil extrémní zpřesnění parametrů i předpovědi teorie elektroslabých interakcí. Zda se bude stavět, kdy a jaké budou parametry nového velkého lineárního urychlovače elektronů a pozitronů bude určitě ovlivněno výsledky prvních let práce urychlovače LHC. Například objev relativně lehkých supersymetrických částic bude znamenat, že námi dostupná energetická oblast je zabydlena širokou plejádou těchto nových částic. ?? které příroda sama ještě nestvořila, čili bude to obdoba chemie, kde byly lidmi objeveny chemické látky – plastické hmoty, které ještě příroda sama svou genezí nedosáhla... Jak chtějí odborníci na LHC odlišit „umělé“ částice od těch, které už v přírodě někde existují ? 03.12.2009 Podrobný výzkum jejich vlastností by nám pak přinesl detailní pohled na supersymetrickou teorii. Byl by to silný impuls pro postavení tohoto nového stroje, který by pak ani nemusel dosahovat těch nejextrémnějších energií. V každém případě je velmi velká šance, že LHC bude nejen dovršením jedné velmi úspěšné éry částicové fyziky, ale otevře éru novou, stejně zajímavou a plodnou. A hlavně nám umožní daleko lepší pochopení struktury hmoty a nejrannějších počátků historie našeho vesmíru. Na závěr bych se ještě zmínil o jedné akci spojené s Českem a laboratoří CERN. Týká se totiž právě těch, kteří nyní sedí ve školních lavicích, ale právě oni budou pracovat na následovnicích urychlovače LHC.

Autor: Vladimír Wagner

Datum: 31.05.2008 v 09:46h

Co přinese LHC pro kosmologii?

aneb

co lze vyhlížet v roce spuštění současného největšího urychlovače na světě.

„Nejnepochopitelnější věcí na vesmíru je to, že je pochopitelný.“

Albert Einstein

„Díky posledním pokrokům se v ohnisku pozornosti ocitly nové záhady. ... Týkají se onoho prvního, pranepatrného zlomečku sekundy po velkém třesku, kdy vládly natolik extrémní podmínky, že fyziku, jež tehdy platila, prozatím neznáme ... Během tohoto počátečního okamžiku bylo všechno stlačeno na tak nezměrně vysokou hustotu, že se v ní kosmos a mikrosvět prolínaly v jednom.“

Martin Rees: „Pouhých šest čísel“

Na listopad roku 2007 se připravuje v mezinárodní evropské laboratoři CERN spuštění v současnosti největšího urychlovače na světě LHC (Large Hadron Collider – velký hadronový urychlovač vstřícných svazků). Nyní je tedy velmi dobrá doba podívat se na to, co můžou přinést experimenty na tomto urychlovači pro poznání struktury hmoty, světa částic a interakcí mezi nimi a hlavně pro pochopení velmi raného období vývoje našeho vesmíru.

Urychlovač LHC

Urychlovač LHC dokáže produkovat ve srážce zatím nejvyšší energii dostupnou pro tvorbu částic. Vzhledem k Einsteinově ekvivalenci mezi hmotností a energií tak má potenciál objevit úplně nové velmi těžké částice. Při srážkách urychlených těžkých jader pak umožňuje dosáhnout teplotu jaderné hmoty doposud uměle nedosažitelnou. Je to umožněno tím, že nový urychlovač dodá protonům nebo i těžkým jádrům více než o řád vyšší energie, než bylo dosud možné. Navíc se v něm sráží proti sobě letící svazky částic nebo jader. Kolize vstřícných svazků, kdy je těžiště srážejících se objektů v laboratoři v klidu, dovolují v principu přeměnit veškerou kinetickou energii pohybujících se objektů a využít ji na produkci nových částic nebo na ohřátí a stlačení jaderné hmoty. Pokud srážíme urychlené částice svazku s částicemi v terči, který je v laboratoři v klidu, pohybuje se těžiště soustavy vzhledem k laboratoři. Kinetická energie spojená s pohybem těžiště se musí při srážce zachovat. Nelze ji tak přeměnit na jiné

formy energie a na produkci nových částic. Dokumentujme si to právě na příkladu urychlovače LHC. Ten urychluje protony na kinetickou energii 7000 GeV¹. Při srážce vstřícných svazků tak máme k dispozici 14000 GeV. Tato energie by v principu stačila na vytvoření více než 14000 protonů.¹ Pokud bychom však svazek zamířili do pevného terče, lze využít na tvorbu částic pouze energii 118 GeV, zbývající energie zůstane spojena s pohybem těžiště. Kromě protonů umožní urychlovač LHC urychlit i velmi těžká jádra. V případě těch nejtěžších (například olova s 208 nukleony v jádře) ponese každý nukleon kinetickou energii 2700 GeV a tedy celková kinetická energie vnesená dvěma srážejícími se jádry olova bude 1 123 200 GeV. Ta by se například uvolnila při dopadu závaží o hmotnosti 0,02 gramu z metrové výšky na zem ve vakuu. To už je docela makroskopická energie blízká našim běžným zkušenostem. Alespoň těm z hmyzí říše. A tak se občas tato energie přirovnává k energii letící mouchy. Můžete namítnout, že to není nic moc. Je však třeba si uvědomit, že se srážejí objekty, které mají téměř o dvanáct řádů menší rozměr, než by mělo zmíněné závaží či moucha. Kdyby se s rychlostí, jakou mají urychlená jádra olova, srazila závaží o hmotnosti jednoho gramu, dostupná kinetická energie by byla zhruba $5 \cdot 10^{17}$ J. To už je energie uvolněná zhruba deseti tisíci hirošimských bomb.

Kosmické záření – příroda je pořád lepší

V dalším textu budu převážně pět ódy na nově budovaný urychlovač. Avšak pro začátek si neodpustím poznámku, že na přírodu a náš vesmír stále zdaleka nemáme. Ze všech stran kosmického prostoru přilétají do zemské atmosféry částice a jádra velmi vysokých energií. Zatím nejenergetičtější pozorované měly energii sto milionkrát vyšší než je hodnota plánovaná pro protony na LHC. Mohla by vás napadnout otázka, proč se vlastně velké urychlovače staví a proč nevyužijeme kosmické záření. Problémem je, že plošná hustota částic kosmického záření s velmi vysokou energií je velmi malá. Pokud bychom si vzali částice s energií vyšší než je ta, která je dosažitelná na LHC, dostaneme číslo zhruba 0,001 částic na m² a sekundu. Maximální počet srážek dosahovaných na LHC by měl být zhruba 10⁹ za sekundu a tedy o dvanáct řádů více. Ovšem, když vezmeme plochu Země, ostatních planet a Slunce, dostáváme zhruba 10¹⁶ srážek za sekundu. Toto číslo je deset milion krát větší než počet srážek na LHC a navíc kosmický stroj pracuje nepřetržitě miliony let. Ukazuje se, že naše technika je pořád daleko za přírodou. Zároveň je tak zaručeno, že fyzika při srážkách s těmito energiemi nám nepřináší žádná rizika. Ve sluneční soustavě totiž žádné katastrofické jevy způsobené srážkami vysokoenergetických částic kosmického záření nepozorujeme. I posuzování možných rizik vstupu do hájemství nové fyziky velmi vysokých energií bylo součástí projektování a schvalování nového urychlovače. Realita srážek kosmického záření o ještě daleko vyšších energiích je pak nejpádnejší odpovědí na možné obavy.

Urychlovač LHC – nástroj pro testování teorií popisujících strukturu hmoty

Věda je nástrojem, který umožňuje hledat a nacházet popis přírody. Vytváří hypotézy, modely a teorie, které musí být konfrontovány s experimentálním pozorováním. Je tedy jasné, že za vědecký popis (ať už jde o hypotézu, model nebo teorii) lze označit jen takový, který umožňuje dávat alespoň principiálně ověřitelné předpovědi, které mohou být konfrontovány s pozorováním. Ovšem ověřování teorií, které popisují velmi extrémní stavy hmoty, může být velmi náročné. Pro teoretické fyziky může být velmi

složitě najít takové předpovědi, které by šly za možnosti současné teorie struktury hmoty. Tou je v současnosti **standardní model hmoty a interakcí** a musí ji pochopitelně každá nová obecnější teorie v sobě zahrnovat jako limitu pro „běžné“ hodnoty fyzikálních veličin. Zároveň však musí předpovědi být pro takové fyzikální podmínky, které jsou experimentálně dosažitelné, byť s využitím veškerých současných lidských možností a umu. Právě s takovými těžkostmi se potýkají i teorie, o kterých budeme dále hovořit. Jsou navíc matematicky velmi náročné a spočítat lze zatím většinou konkrétní předpovědi pouze pro extrémně vysoké energie nebo pro ty v současnosti dosažitelné. V prvním případě jde o oblast experimentálně zatím nedostupnou a v druhém případě jsou pochopitelně předpovědi většinou shodné s předpověďmi naší současné teorie – standardního modelu.

Hlavním posláním urychlovače LHC a experimentů na něm postavených je získání experimentálních dat o hmotě vznikající při srážkách částic nebo jader s energií mnohonásobně převyšující doposud dosažitelné hodnoty. Urychlovač LHC umožní produkovat částice, získávat teploty a hustoty, které vznikají jen v takové značně neobvyklé situaci. Tak se stane tím potřebným prostředkem pro ověření hypotéz popisujících fyziku hmoty za extrémních podmínek. Měl by přispět k výběru těch, které přírodu reálně popisují, a umožnit jejich přeměnu na teorii. Nalezená a potvrzená teorie by nám pak umožnila popsat chování a vývoj vesmíru v těch nejranějších stádiích. Velká část fyziků doufá, že by právě takto získaná teorie byla tou finální, která by dokázala úplně popsat strukturu a chování hmoty.

Experimenty - čtyři hlavní a jeden malý (ale důležitý)

Jak už jsme se zmínili, využívá urychlovač vstřícné svazky. Urychlování začíná v malém lineárním urychlovači a pak probíhá postupně v několika na sebe navazujících kruhových urychlovačích. Poslední stupeň je náš urychlovač LHC. Ten se skládá ze dvou nezávislých trubic. Před vstupem do urychlovače LHC se svazek protonů nebo jader rozdělí na dvě části. Každá je pak urychlována na konečnou energii v jiné trubici v opačném směru. Trubice LHC se v několika místech kříží a ve čtyřech místech křížení jsou umělé jeskyně, ve kterých jsou umístěny jednotlivé experimenty. Tři velké experimenty ATLAS, CMS a LHCb jsou primárně určeny pro studium srážek protonů. Stejný cíl má i malý experiment TOTEM, který je ve stejné jeskyni jako experiment CMS a bude studovat částice rozptýlené do velmi malých úhlů. Čtvrtý velký experiment ALICE je pak určen pro studium vlastností velmi horké a husté hmoty. Konkrétní popis experimentálních zařízení a použitých typů detektorů si necháme na někdy příště a nyní se budeme věnovat fyzice, kterou budou studovat.

Standardní model

Nejdříve si jen krátce zopakujeme naše současné představy o struktuře hmoty. Jsou obsaženy v tzv. standardním modelu hmoty a interakcí. Umožňuje nám popsat fyzikální vlastnosti hmoty v podmínkách, které jsme schopni připravit na současných urychlovačích (minimální rozměr 10^{-18} m a energie ~ 200 GeV). Podle něho je svět kolem nás složen z **částic hmoty**, mezi kterými působí čtyři typy interakcí (gravitační, slabá, elektromagnetická a silná). Ovšem i interakce jsou zprostředkovány částicemi. Ty jsou označovány jako **částice interakcí**.

Částice hmoty jsou dvojího typu. **Leptony** neinteragují silnou interakcí, naopak **kvarky** interagují i silnou interakcí. Máme tři dvojice (rodiny) kvarků a tři dvojice (rodiny) leptonů. U dvojice leptonů jde vždy o nabitý lepton (elektron, mion nebo tauon) a neutrální (elektronové, mionové nebo tauonové) neutrino. Součástí standardního modelu jsou i příslušné antičástice. Částice hmoty mají hodnotu spinu (vnitřního momentu hybnosti) polocíslný násobek Planckovy konstanty. Patří tedy mezi **fermiony**.

Nyní se podívejme na interakce, které mezi částicemi působí, vytvářejí z nich vázané systémy a celou rozmanitost našeho světa. Hodnota spinu částic interakcí je rovna celočíselnému násobku Planckovy konstanty a jsou tedy **bosony**. Nejsilnější interakcí je **silná interakce**, která je zprostředkována osmicí gluonů. Jejím nábojem je tzv. barva, která je trojího druhu. Tento typ náboje nesou z částic hmoty pouze kvarky. Vázaný systém musí být z pohledu barevného náboje neutrální (bezbarvý). V našich podmínkách se vyskytují dva typy vázaných systémů z kvarků. Jedním z nich jsou baryony složené ze tří kvarků, z nichž každý nese jinou barvu. Mezi **baryony** patří například protony a neutrony. Ty pak silná jaderná interakce váže do atomových jader. Druhým typem jsou **mezony** složené z kvarku a antikvarku (kombinace barvy a antibarvy je bezbarvá). Silně interagující baryony a mezony se společně označují jako **hadrony**. Dosah silné interakce je velmi malý, řádově odpovídá rozměru protonu. Má velmi specifické vlastnosti (například její intenzita roste se vzdáleností), které způsobují i to, že kvarky jsou v současných podmínkách našeho vesmíru uvězněny v hadronech. Silná interakce je popsána kvantovou chromodynamikou.

Dalším typem interakce, která působí mezi částicemi je **elektromagnetická interakce**. Ta je spojena s elektrickým nábojem. Ten je dvojího druhu – kladný a záporný. Elektromagnetická síla je mnohem slabší než silná. Na rozdíl od silné interakce, která má velmi krátký dosah, má dosah nekonečný. Její intenzita klesá známým způsobem s kvadrátem vzdálenosti. Je popsána kvantovou elektrodynamikou.

Třetím typem interakce je **slabá interakce**. Ta má velmi malou intenzitu a dosah, což obojí je dáno velkou hmotností tří částic, které ji zprostředkují (bosony W^+ , W^- a Z^0). Je popsána elektroslabou teorií, která je kvantovou teorií pole obsahující i kvantovou elektrodynamiku.

Posledním čtvrtým známým typem interakce je **gravitační interakce**. Ta je nejslabší. Je tak slabá, že její projevy v mikrosvětě lze pro v současnosti dostupné energie zanedbat. To, že její projevy v makrosvětě převládají, je dáno nekonečným dosahem této interakce a tím, že má jen jeden druh náboje (hmotnost). V případě elektromagnetické interakce, která má také nekonečný dosah, má příroda tendenci vytvářet kombinací nábojů neutrální objekty. V případě gravitace se vliv hmotností pouze sčítá a pro velké objekty dosahuje velkých hodnot. Gravitační popisujeme pomocí Einsteinovy obecné teorie relativity. Ta je klasickou teorií. Kvantovou teorii gravitace zatím nemáme a tak gravitace není součástí standardního modelu.

Právě nalezení kvantového popisu gravitace a společného popisu všech známých interakcí je důležitým úkolem fyziků a pomoc při hledání této „finální“ teorie je i důležitým úkolem urychlovače LHC. Napřed se však ještě podrobněji podívejme na zkoumání standardního modelu.

Dva typy výzkumů na urychlovači LHC.

Na LHC se budou provádět dva typy výzkumů. Prvním typem je studium srážek protonů. Zde jde o dovršení našeho poznání standardního modelu hmoty a interakcí a hledání projevů vyšší teorie (nové fyziky), která by standardní model obsahovala, ale dokázala by popsat chování hmoty při ještě vyšších energiích a při ještě menších rozměrech. U mikroobjektů, kterými elementární částice i jádra jsou, se dominantně projevují vlastnosti kvantové fyziky. Jednou z nich je i vlnový charakter objektů. Čím je energie částice větší, tím je menší její charakteristická vlnová délka. A nejmenší rozměr, který můžeme vidět u objektu zkoumanému pomocí záření, je dán vlnovou délkou tohoto záření. I v optice nám světlo s kratší vlnovou délkou umožňuje vidět zkoumaný objekt mnohem detailněji. Doposud největší urychlovač Tevatron (sráží protony s antiprotony) urychluje protony na energii 980 GeV, což znamená jejich vlnovou délku $2 \cdot 10^{-19}$ m. To je více než tisíckrát menší rozměr než rozměr protonu. Pro LHC jsou tato čísla ještě sedmkrát lepší. Druhá důležitost dosažení co nejvyšší hodnoty energie urychlovaných protonů už byla zmíněna. Díky Einsteinově vztahu mezi energií a hmotností určuje dosažená kinetická energie největší možnou klidovou energii a tím i hmotnost nově vytvořených částic. Často je však dosažitelná hmotnost snížena tím, že částice ve většině případů vznikají v páru částice a antičástice. Navíc se (souvisí to se zmiňovanou charakteristickou vlnovou délkou) protony nesrážejí jako celek, ale sráží se jednotlivé komponenty, které je tvoří. Na tvorbu nové částice se může přeměnit pouze kinetická energie, kterou nesou příslušné srážející se části protonu. S velkým zjednodušením můžeme říci, že se proton skládá ze tří částí. První jsou tři kvarky, označované jako valenční. Existence dalších komponent je dána kvantovou fyzikou. Jsou spojeny s vlastnostmi interakce, která drží valenční kvarky pohromadě, a vlastnostmi vakua. Jednou z těchto částí jsou virtuální gluony zprostředkující silnou interakci a druhou pak virtuální páry kvarku a antikvarku. O vlastnostech vakua a představě virtuálních částic jsem už v tomto časopise psal [5]. Každá z těchto tří komponent nese zhruba třetinu hybnosti a tedy i energie, kterou urychlený proton má. Jestliže se tedy srazí dva valenční kvarky, bude dostupná energie zhruba devětkrát menší než je kinetická energie, kterou mají dva srážející se protony. Při úvahách, jaké maximální hmotnosti mohou mít produkované částice, je třeba vzít tuto skutečnost v úvahu.

Druhým typem výzkumů budou srážky těžkých jader. Při nich je hlavním cílem zkoumání jaderné hmoty při velmi vysoké teplotě a velmi vysoké hustotě energie. Jde o přesně takovou hmotu, která zde byla velmi krátce po vzniku našeho vesmíru. Jak bylo popsáno v dřívějším článku [6], podařilo se v nedávné době pomocí urychlovačů SPS a RHIC prokázat existenci nové formy jaderné hmoty – kvark-gluonového plazmatu. Jedná se o směs uvolněných kvarků a gluonů, která vzniká za velmi vysokých hustot a teplot. Ukázalo se však, že kvark-gluonové plazma má při zatím experimentálně dosažitelných teplotách velmi odlišné vlastnosti od těch, které jsou předpovídaný teoretiky. Proto je nesmírně důležité získat daleko větší objemy této látky při co nejvyšších teplotách. Pro kosmologii to má velký význam, neboť ve velmi raném stádiu vývoje byl náš vesmír tvořen právě takovou hmotou a její vlastnosti nechaly svůj otisk i na jeho pozdějším vývoji.

Co může ke standardnímu modelu říci LHC?

Standardní model je na jedné straně velice dobře poznán. Na druhé straně nám stále ještě některé jeho komponenty chybí. Jednou z nejviditelnějších jsou jedna nebo více chybějících částic, které se označují jako **Higgsovy bosony** a podrobněji jsem o nich už v časopise Kozmos psal [4]. Jsou zodpovědné za velmi vysoké hmotnosti částic W^+ , W^- a Z^0 , které jsou osmdesátkrát až devadesátkrát těžší než proton a zprostředkují slabou interakci. Jsou ve své podstatě „sourozenci“ našeho dobře známého fotonu, který zprostředkuje elektromagnetickou interakci. Slabá interakce a elektromagnetická interakce se dají popsat společnou teorií. Higgsovy bosony jsou její součástí a způsobují, že bosony slabé interakce jsou

tak „obézní“ na rozdíl od fotonu, který má klidovou hmotnost nulovou. V nejjednodušším případě může být jeden neutrální Higgsův boson. Ve složitějším případě pak čtyři (dva neutrální označované jako H_1 , H_2 a dva nabitě H^+ a H^-) i více. V takovém případě už je však většinou třeba zavádět novou fyziku přesahující standardní model. Higgsovy bosony a mechanismus, který je generuje, mají i další významné vlastnosti, které z nich dělají velmi důležitou součást standardního modelu. Pomocí nich se třeba můžeme zbavit některých nekonečných hodnot, které vznikají při výpočtech (například tzv. radiálních korekcí) v rámci elektroslabé interakce. Proto je velmi důležité, aby byla správnost použití Higgsova mechanismu ve standardním modelu potvrzena. A právě pozorování Higgsova bosonu by bylo tím potřebným přímým důkazem. Navíc určení počtu různých Higgsů a studium jejich vlastností by upřesnilo, jaká konkrétní forma Higgsova mechanismu se v našem světě uplatňuje. Pokud platí ta nejjednodušší varianta, musí být hmotnost Higgsova bosonu v poměrně úzkém rozmezí ¹⁾, aby teorie elektroslabé interakce byla správně vyladěna až po velmi vysoké energie ohraničené Planckovou energií 10^{19} GeV, u které se interakce sjednocují ¹⁾. V tomto případě bude Higgsův boson určitě pomocí urychlovače LHC objeven. Pokud ne, je to jasná známka existence nové fyziky za standardním modelem.

Nejtěžší kvark t byl objeven teprve nedávno na urychlovači Tevatron v laboratoři Fermilab (USA). Velmi zajímavé u něho je, že je velice těžký ¹⁾ a díky tomu se při jeho vzniku ve formě dvojice kvarku t a antikvarku $\bar{t}$ nestihnou vytvářet elementární částice, které kvark nebo antikvark t obsahují. Kvark t se totiž velice rychle přeměňuje (rozpadá) na některý z lehčích kvarků a intermediální boson elektroslabé interakce i s uvolněním velkého množství energie. V konečném důsledku dostáváme výtrysky částic obsahujících lehčí kvarky a několik leptonů. Studium jeho vlastností, například určení jeho přesné hmotnosti, by mělo přinést zvětšení našich znalostí standardního modelu a pohled i za něj. Díky své energii bude urychlovač LHC úplnou továrnou na produkci t kvarků.

Může vzniknout otázka, zda existují ještě těžší kvarky, které by bylo možné na LHC objevit. Standardní model a naše současné znalosti ukazují, že už jsme objevili všechny druhy „klasických“ kvarků. Vychází se ze symetrií, které panují mezi kvarky a leptony. Víme, že ve standardním modelu existuje stejný počet rodin leptonů a kvarků – tedy tři. Existují tak tři druhy neutrin. Pokud by existovala ještě další rodina kvarků a leptonů, musel by existovat ještě čtvrtý typ neutrina. Již několikrát jsme se zmínili o neutrální částici, která zprostředkovává slabou interakci – Z^0 bosonu. Tato částice se může rozpadat také dvojici lepton a antilepton a tedy i na dvojici neutrino a antineutrino. Každá nová možnost rozpadu zkracuje dobu života Z^0 bosonu. Tu dokážeme v současnosti velice přesně změřit. Zároveň dokážeme díky teorii elektroslabé interakce spočítat pravděpodobnost rozpadu na neutrino a antineutrino. Víme tak, že se nám žádný další rozpad na nový typ neutrina a antineutrina do doby rozpadu Z^0 bosonu nevleze a existují tak jen tři typy neutrin. Situace by byla rozdílná, kdyby existovala nějaká velmi těžká neutrino, která by díky své vysoké hmotnosti dobu života Z^0 bosonu neovlivnila. Existence takových neutrin se příliš nepředpokládá, ale protože ji nelze ani vyloučit, budou experimenty na urychlovači LHC hledat i tyto exotické částice a s nimi spojené nové exotické kvarky.

Značné doplnění znalostí a ověření našich představ potřebuje i kvantová chromodynamika, což je teorie, která v rámci standardního modelu popisuje silnou interakci mezi kvarky. Je zprostředkována osmicí gluonů. Foton, který přenáší elektromagnetickou interakci, sám nenes náboj této interakce. Naopak gluony nesou barvu – náboj silné interakce, a proto mohou interagovat samy mezi sebou. Mohly by tak hypoteticky vytvářet vázané systémy složené pouze z gluonů. Ty by, stejně jako vázané systémy složené z kvarků, musely být bezbarvé, tedy z pohledu barevného náboje neutrální. Takový vázaný systém z gluonů se označuje jako gluonium nebo „glueball“. Pokud takové systémy opravdu existují, mohly by mít i značný vliv na vývoj vesmíru v období kolem epochy, kdy se kvarky vázaly do hadronů – docházelo k hadronizaci.

Stejně tak by mohly být významné další složené objekty vázané silnou interakcí. Jak už bylo zmíněno, známe dnes pouze dva typy vázaných systémů kvarků. Baryony, které jsou vázaným systémem tří kvarků (antibaryony jsou ze tří antikvarků), a mezony, které jsou složeny z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Zatím hypoteticky by však mohly existovat i vázané systémy s jiným počtem

kvarků – tetrakvarky, pentakvarky a další. Podrobnější rozbor dosavadního průběhu hledání těchto exotických částic jsem napsal pro Kozmos před rokem [7]. Je jasné, že hledání glueballů a exotických multikvarkových systémů bude důležitým úkolem experimentů na LHC.

Dalšími zatím hypotetickými objekty, které souvisí s vlastnostmi silné interakce, jsou **podivnůstky** (anglicky strangellets). Měly by to být kousky kvark-gluonového plazmatu, které by obsahovaly kromě dvou nejlehčích i příměs třetího o něco těžšího kvarku. Takové kvark-gluonové plazma by mohlo být stabilní i za normálních podmínek. Na studium kvark-gluonového plazmatu je zaměřen experiment ALICE, ale hledání podivnůstek se budou věnovat i některé z dalších experimentů. Bližší popis vlastností těchto objektů a jejich významu pro astrofyziku lze najít v článku [1].

Stěžejním úkolem, který je třeba v poznání standardního modelu udělat, je studium narušení některých symetrií nebo zákonů zachování, ke kterým v něm může docházet. Jedná se zvláště o rozdíl mezi průběhem reakcí a dalších fyzikálních zákonitostí v situaci, kdy zaměníme znaménka u prostorových souřadnic (náš svět převedeme na zrcadlový) a zároveň zaměníme všechny částice v reakci za antičástice a naopak (přejdeme do antisvěta). Takto vzniklý rozdíl se označuje jako **narušení CP symetrie**. Poprvé byl tento jev pozorován v rozpadu K^0 mezonů a v nedávné době u jejich ještě těžších kolegů B^0 mezonů. Z hlediska kosmologie je tato oblast velmi důležitá, protože narušení CP symetrie je nezbytnou podmínkou pro vznik přebytku hmoty nad antihmotou na počátku vývoje našeho vesmíru. Zdá se, že ve standardním modelu není narušení dostatečné a neobejdeme se bez nějaké komplexnější teorie. V každém případě je třeba určit jeho velikost a nejintenzivnější projevy se objevují právě v rozpadech těžkých mezonů, které se budou na LHC intenzivně produkovat. Proto je potřeba získat velmi přesná měření produkce a rozpadu řady těžkých hadronů. Blíže jsem podmínky vzniku přebytku hmoty nad antihmotou v časopise Kozmos již popisoval [2].

Cesta za standardní model

Dnes je však jasné, že standardní model nestačí na popis hmoty v extrémnějších situacích. Už jsem se zmínil o nutnosti vysvětlení přebytku hmoty nad antihmotou. Neznáme původ temné hmoty a temné energie. A je řada dalších faktů, se kterými se standardní model nedokáže vypořádat. Standardní model nesjednocuje popis silné a elektroslabé interakce a nezahrnuje gravitaci. Obsahuje 19 volných parametrů plus další spojené s vlastnostmi neutrín (hmotnosti a parametry míchání), které musíme zjistit z experimentu. Obsahuje řadu symetrií a hierarchií, které nemohou být náhodné a je třeba je vysvětlit. Ovšem tyto symetrie se na druhé straně stávají vodítkem při hledání teorie, která by byla obecnější a dokázala by sjednotit teorie popisující elektroslabou a silnou interakci (teorie velkého sjednocení) nebo dokonce dosáhnout jednotného popisu všech čtyř známých interakcí.

Teorie velkého sjednocení vycházejí ze symetrií pozorovaných mezi rodinami kvarků a leptonů. Umožňují přeměnu kvarku na lepton a opačně prostřednictvím nově zavedených částic (označují se jako **leptokvarky** nebo jako částice X a Y). Ovšem jejich předpovídaná hmotnost je v řádu 10^{15} GeV a tedy daleko z dosahu urychlovače LHC.

Z hlediska výzkumů plánovaných na LHC jsou mnohem zajímavější **supersymetrické teorie**, které zavádějí symetrii (neměnnost fyzikálních zákonů) pro záměnu bosonů na fermiony a opačně. Předpovídají, že každá známá částice standardního modelu má svého supersymetrického partnera, který se liší spinem. Fermion má supersymetrického partnera boson (jeho název se utvoří pomocí s -, například

s-kvark, s-elektron ...) a boson pak fermion (název se vytvoří příponou ino: fotino, gluino, ...). V našem současném světě je tato symetrie narušená a díky tomu mají supersymetrickí partneři známých částic velmi vysoké hmotnosti. Ty by měly být pro nejjednodušší varianty supersymetrických teorií v oblasti 100 GeV – 1000 GeV, tedy v dosahu urychlovače LHC. Situace je komplikovaná tím, že kvantová fyzika kromě „čistých“ stavů částic umožňuje i jejich „směs“. Takže například nejlehčím pozorovaným neutrálním supersymetrickým fermionem nemusí být ani fotino, ani gluino či jiný čistý stav, ale směs, která se pak označuje jako neutralino. S tímto objektem se pak můžete setkat jako s nejžhavějším kandidátem na částici tvořící temnou hmotu. Nemůže se totiž rozpadat na jiné supersymetrické částice, které jsou všechny těžší, a jeho rozpad na částice „normální“ je velmi silně zbržděn. Hledání supersymetrických částic je jedním z nejdůležitějších úkolů, které LHC má.

Pokud nebude nalezen Higgsův boson, bude třeba najít jinou příčinu narušení elektroslabé symetrie (vysokých hmotností W^+ , W^- a Z^0 bosonů). Jednou z možností, která by nahradila i supersymetrické teorie, jsou **teorie technicoloru**. Pro naše povídání je podstatné, že i v tomto případě je předpovídána řada nových částic, které jsou v energetickém dosahu urychlovače LHC.

Daleko menší šance má LHC přispět k hledání **axionů**. Axiony zavádějí některé teorie, které se snaží popsat zmiňované narušení CP symetrie. Axiony jsou také uváděny jako možní kandidáti na původce temné hmoty. Většinou se předpokládá, že jejich hmotnost bude velmi malá a urychlovač LHC tak nepředstavuje výhodu při jejich hledání. Zato hmotnost magnetických monopolů, které předpovídají některé teorie velkého sjednocení by mohla být v nově zpřístupněné oblasti energií.

Není pochopitelně vyloučeno, že stejně jako jsou hadrony složené z kvarků, mohou být kvarky také složeny ještě z elementárnějších částic. To by vedlo k existenci excitovaných stavů kvarků, které by se mohly pomocí urychlovače LHC produkovat.

V současnosti jsou nejžhavějším kandidátem na „finální“ teorii tzv. **strunové teorie**. Tyto teorie zahrnují standardní model i supersymetrii. Jejich hlavním znakem je, že popis částic jako bodového objektu nahrazují strunou s extrémně malým rozměrem (v řádu 10^{-35} m). Různé vibrační módy takových strun by byly pozorovatelné jako známé částice. Základní výhodou této představy je, že se zbavujeme nefyzikálních nekonečných hodnot (například hustoty), které dostaneme v případě bodových objektů. Strunové teorie vedou k nutnosti zavedení dalších až sedmi rozměrů kromě známých tří prostorových a jednoho časového. Ty by měly být ve většině případů svinuty do velmi malých rozměrů (srovnatelných s rozměrem struny) a tedy by se v našich normálních podmínkách neprojevovaly. Je vidět, že rozměr strun je velmi hluboko pod rozlišovací schopnost urychlovače LHC. Ovšem některé varianty strunových teorií předpokládají, že některé extra rozměry by mohly být částečně nebo úplně rozvinuté. V tom případě by se mohli projevit i při experimentech na LHC a jejich příznaky zde budou intenzivně hledány. Pro kosmologii je toto hledání velice atraktivní, neboť strunové teorie zavádějící nové rozměry jsou základem bránových, ekpyrotických kosmologických hypotéz [3]. Podobného charakteru je i hledání různých projevů kvantové gravitace. Takové výzkumy se také prováděly na menších urychlovačích a budou pokračovat i na urychlovači LHC.

V oblasti kvantové gravitace má pro kosmologii význam i hledání **mikroskopických černých děr**. Jedná se o hypotetické černé díry s hmotností v řádu Planckovy hmotnosti 10^{19} GeV/ c^2 (10^{-8} kg) a méně. Jejich Schwarzschildův poloměr by byl natolik malý, že by nebylo možné brát kvantové vlastnosti gravitace jak opravy ke klasické teorii, ale byly by pro vlastnosti takového objektu určující. Chování mikroskopické černé díry by bylo dáno pouze hodnotou hmotnosti, náboje, a spinu, podobně jako je tomu u částic. Význam pro kosmologii tkví hlavně v tom, že pokud vznikaly v ranných stádiích našeho vesmíru primordiální mini černé díry, pak by mohly díky svému vypařování Hawkingovým zářením končit jako mikroskopické černé díry.

Jak zjistit vznik nové částice?

Jak je vidět, jedná se ve velké řadě případů o hledání nových částic. Shrňme si experimentální možnosti, které pro jejich zachycení máme. Jsou dány tím, že většina detektorů pracuje na základě přeměny energie, které ztrácí nabitá částice při průchodu v materiálu tím, že ionizuje nebo excituje atomy tohoto materiálu.

Pokud má částice elektrický náboj a existuje dostatečně dlouhou dobu, je její detekce poměrně jednoduchá. Částice interaguje a ztrácí energii pomocí elektromagnetické interakce. V takovém případě můžeme určit náboj, energii i hybnost částice a určit i její klidovou hmotnost. Menším problémem je, když existuje velmi krátce a rozpadá se na nabitě částice. V takovém případě zachytíme všechny částice vzniklé v rozpadu. Sečteme jejich náboje, energie a hybnosti, určíme tak náboj, energii a hybnost původní částice a tedy stejně jako v minulém případě její klidovou hmotnost. Stejným způsobem můžeme určit vlastnosti neutrální částice, která se rozpadá na nabitě částice. Větší problém je s detekcí neutrálních částic, které nejdříve musíme převést na nabitě částice. To není problém v případě, že je částice hadronem a interaguje silnou interakcí. Neutrální hadrony tak můžeme zachytit a určit jejich energii a hybnost.

A chvála chybějící energie a hybnosti

Řada částic, které chceme hledat, se však rozpadá na částice, které s normální hmotou interagují velmi slabě. Pokud jsou navíc neutrální nelze je normálně detekovat. V takovém případě lze využít chybějící energie, která je s nimi spojená a nemůže být našimi detektory zachycena. Zachytíme ostatní vzniklé částice a určíme jejich energii a hybnosti. Využitím zákona zachování energie a hybnosti určíme hodnoty energie a hybnosti, které neznámá částice odnáší a pomocí nich můžeme stejně jako v předchozích případech spočítat hodnotu klidové hmotnosti této částice.

Nejrannější vesmír

Podívejme se blíže, do jakého období vývoje našeho vesmíru nám umožní urychlovač LHC nahlédnout. Celé naše vyprávění bude zaměřeno na období, které je vzdáleno od počátku rozpínání daleko méně než jednu sekundu. Ještě přesněji do okamžiku vzdálenému od počátku rozpínání 10 mikrosekund a méně. V tomto okamžiku klesla teplota vesmíru na hodnotu 10^{12} stupňů a došlo k uvěznění kvarků a gluonů z kvark-gluonového plazmatu do hadronů. Je zřejmé, že pro pochopení velmi horkého hadronové plynu s teplotou blízkou fázovému přechodu může urychlovač značně přispět. Jedná se o zkoumání horké a husté jaderné hmoty pomocí experimentu ALICE a další experimenty budou zkoumat vlastnosti velmi těžkých hadronů, které se v takto horké jaderné hmotě vyskytují.

Urychlovač LHC nám umožní pohled hluboko pod těch deset mikrosekund a měl by nám nechat nahlédnout, jak se postupně po rozdělení silné a elektroslabé interakce a vzniku kvarků a antikvarků v době zhruba 10^{-33} s po začátku rozpínání měnilo kvark gluonově-plazma. Měnilo se od slabě interagujícího podobné plynu, které vyhlížejí teoretici, na silně interagující blízké ideální kapalině, které

pozorujeme v blízkosti fázového přechodu v hadronový plyn. Během této doby také mělo dojít k vydělení elektromagnetické a slabé interakce v čase přibližně 1 ps (teplota zhruba 10^{15} stupňů). Dnes se spíše nepředpokládá, že by s tímto vydělením byla spojena inflační fáze vývoje vesmíru. Ta se klade do dřívějšího období mezi časem 10^{-35} až 10^{-37} sekundy. Je však vidět, že plné pochopení elektroslabé a silné interakce nám může umožnit si alespoň „zespodu na tuto inflaci trochu sáhnout“.

V předchozích částech jsme si ukázali, že v dosahu urychlovače LHC by mohla být řada nových dosud neznámých částic. Pokud opravdu existují, budou se v námi popsané počáteční fázi vývoje vesmíru intenzivně vyskytovat a jejich počet a vlastnosti silně ovlivní chování hmoty v daném čase. A to i chování vakua při velmi vysokých hustotách energie. Kromě reálných se totiž budou vyskytovat virtuální formy těchto částic. Urychlovač LHC by tak mohl přispět k hlubšímu pochopení vakua, kvantových fluktuací a dalších jevů, které jsou kruciólní pro popis vývoje vesmíru před dobou 10^{-33} s.

Dosažená energie sice neumožní nastolit podmínky panující příliš hluboko před zlomky mikrosekund, ale umožní nám pochopit fyziku daleko dřívějšího období. Můžeme směle říci, že urychlovač LHC je stroj na zkoumání vývoje vesmíru v období od 10^{-33} s do okamžiku 10^{-5} s. Není vyloučeno, že nám pomůže nahlédnout i hlouběji. Pokud se na zkoumaný úsek podíváme v lineární škále, může nás napadnout, proč se zabývat nicotnými několika mikrosekundami oproti 14 miliardám let dalšího vývoje našeho vesmíru. Pokud se však na ně podíváme ve škále logaritmické, zjistíme, že je toto období dokonce delší a je vidět že zde probíhal velice zajímavý a bouřlivý vývoj. Je důležitým úkolem jaderných a částicových fyziků a astrofyziků zjistit, které z jeho kapitol byly pro současný stav vesmíru podstatné a které následné procesy smazaly a překryly. K tomu by jim měl pomoci právě i LHC.



Obr. č. 8) První testy instalovaných detektorů v době, kdy ještě nepracuje urychlovač, se provádějí pomocí kosmického záření. Průlet kosmického záření některými detektory experimentu ATLAS. (Snímek CERN)

Závěry

Na závěr bych se pokusil o shrnutí toho, co můžeme od urychlovače LHC očekávat. Především by měla být potvrzena existence jednoho nebo více Higgsových bosonů. Studium jejich vlastností je velice důležité pro poznání chování teorie elektroslabých interakcí při velmi vysokých energiích. Stejný význam by mělo i jejich nenalezení. To by znamenalo, že se musí najít náhrada Higgsova mechanismu. Pochopení elektroslabých interakcí, tedy i oddělení elektromagnetické a slabé síly, by mohlo mít pro kosmologii klíčový význam, neboť je tento proces jedním z možných kandidátů na původce inflační fáze vývoje vesmíru.

V dosahu urychlovače by měly být i lehčí ze supersymetrických částic. To je také kosmologicky velmi významné, protože nejlehčí ze supersymetrických částic by mohla být zodpovědná za temnou hmotu ve vesmíru. Právě v této době, kdy byl nedávno nalezen konečný přímý důkaz existence temné hmoty při pozorování srážky kup galaxií [8], je důležité zjistit jejího původce.

Experiment ALICE by měl podrobně prostudovat nový stav jaderné hmoty za velmi vysoké teploty a hustoty, který byl objeven v předchozích experimentech na urychlovačích SPS a RHIC. Jedná se o systém složený z volných kvarků a gluonů – kvark-gluonové plazma a ve vesmíru se vyskytoval v době před uplynutím 10 μ s. Pozorované vlastnosti této hmoty jsou velmi odlišné od teoretických předpovědí. Ukázalo se, že kvark-gluonové plazma interaguje velmi silně a podobá se více ideální kapalině než jen slabě interagujícímu plynu. Je důležité dokonale poznat vlastnosti kvark-gluonového plazmatu při teplotě blízké teplotě jeho přechodu v jadernou hmotu složenou z hadronů a charakter tohoto přechodu. Tyto znalosti jsou podstatné, protože průběh fázového přechodu mohl ovlivnit průběh fluktuací hustoty baryonové hmoty v tomto období a tvorbu lehkých chemických prvků v prvotním vesmíru.

Důležitým úkolem bude přesné určení hmotností a dalších vlastností těžkých kvarků a částic, které vytvářejí. Stejně tak přesné určení vlastností silné interakce a jejich změn s růstem energie, narušení a znovunastolení různých typů symetrií. Jedná se o velmi důležitou součást pochopení vzniku asymetrie mezi hmotou a antihmotou v prvotním vesmíru.

Dosud zmíněné jevy patří k těm, které jsou očekávány s velmi vysokou pravděpodobností a urychlovač LHC u nich určitě rozhodujícím způsobem doplní nebo dokonce změní naše znalosti. Je tak velká naděje, že, ať už najdeme Higgsovy bosony, supersymetrické částice nebo projevy technicoloru, nám urychlovač LHC umožní plné pochopení vzniku narušení symetrie mezi elektromagnetickou a slabou interakcí. Ač pracuje s energiemi v řádu pouze 10⁴ GeV, mohl by nám umožnit popsat vesmír až po Planckovu energii 10¹⁹ GeV a možná si tak třeba i sáhnout na jeho inflační období, které by mohlo probíhat u energií zhruba o tři řády menších.

O dalších hypotetických částicích a jevech, které se budou hledat, už toto říci nelze. Nalezení projevů dalších rozměrů plynoucích ze strunových teorií, mikroskopických černých děr, podivnůstek, magnetických monopolů je daleko méně pravděpodobné. Zvláště v případě jevů vyplývajících ze strunových teorií jsme s energií ještě pořád strašlivě nízko. Jestli díky urychlovači LHC udělají experimentátoři radost strunovým teoretikům, je tak spíše jen ve hvězdách. Ovšem nejvíce se fyzikové těší na objevy, které se vůbec nečekají a v tomto článku tedy zmíněny nejsou. Spuštění urychlovače LHC koncem tohoto roku se netrpělivě očekává a v roce 2008 bychom mohli očekávat první řadu objevů. Může nás těšit, že se na nich budou podílet i čeští a slovenští fyzikové zapojení do několika LHC experimentů.

Na závěr ještě jednu poznámku s výhledem do ještě vzdálenější budoucnosti. Postupem času, jak se dokončuje urychlovač LHC a jednotlivé detektorové systémy, předávají je jejich projektanti a stavitelé fyzikům a sami se už zaměřují na přípravu nového, ještě výkonnějšího stroje. Mělo by jít o

zařízení srážející elektrony a pozitrony (CLIC – Compact Linear Collider). Využilo by se toho, že elektron ani pozitron nemají na rozdíl od protonu na dostupné rozměrové škále strukturu. Celá jejich energie při srážce by tak mohla jít do produkce jedné částice (nebo jednoho páru částice a antičástice). Navíc neinteragují silnou interakcí. Urychlovač musí být lineární, protože lehké elektrony ztrácejí při změnách směru energii vyzařováním brzděného záření. Při velmi vysokých energiích urychlovaných elektronů se energetická ztráta na kruhovém urychlovači vyrovná s hodnotou energie, kterou jsme schopni pro urychlování dodat. Diskuze a vývojové práce na novém urychlovači i detektorech jsou v plném proudu, takže následovník LHC už se také připravuje.

Poznámky:

- 1) V jaderné fyzice se používají jako energetické jednotky $\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. $1 \text{ GeV} = 1000000000 \text{ eV}$. V energetických jednotkách se díky Einsteinově vztahu mezi energií a hmotností $E=mc^2$ může vyjadřovat i hmotnost. Hmotnost protonu je tak $0,938 \text{ GeV}/c^2$. Často se při psaní o LHC využívá jednotka $\text{TeV} = 1000 \text{ GeV}$. Já zůstávám u GeV právě pro její blízkost ke klidové energii protonu.
- 2) V reálném případě však mohou většinou částice vznikat v páru s příslušnou antičásticí. Proton tedy vzniká v páru s antiprotonem a mohlo by se vytvořit 7000 protonů spolu s 7000 antiprotony.
- 3) V článku se budu odkazovat na několik předchozích článků vyšlých v časopise Kozmos. Pokud příslušná čísla nemáte, lze je nalézt na adrese <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/>
- 4) Nejčastěji se uvádí interval $150 - 180 \text{ GeV}/c^2$.
- 5) U této energie už nelze zanedbat vliv gravitace a je třeba znát kvantovou teorii této interakce.
- 6) Jeho klidová hmotnost ($175 \text{ GeV}/c^2$) je více než 186 krát větší než hmotnost protonu a vyrovná se téměř hmotnosti celého jádra zlata.

Odkazy:

[1] Vladimír Wagner: [Podivné hvězdy](#), Kozmos, roč. XXX, 1999, č. 3, str. 11

[2] Vladimír Wagner: [Proč je ve vesmíru více hmoty než antihmoty?](#), Kozmos, roč. XXXI, 2000, č. 6, str. 14

- [3] Vladimír Wagner: [*Je kosmologie mytologií aneb úvaha experimentálního fyzika o kosmologických hypotézách a modelech*](#), Kozmos, roč.XXXIV,2003,č.1
- [4] Vladimír Wagner: [*Kdo polapí Higgse? aneb hon na poslední chybějící částici standardního modelu*](#), Kozmos, roč.XXXV, 2004, č.2
- [5] Vladimír Wagner: [*Vakuum ve skutečnosti prázdnota není aneb kouzla kvantové fyziky*](#), Kozmos, roč.XXXVI,2005, č.1
- [6] Vladimír Wagner: [*Co to je a jaké jsou vlastnosti kvark-gluonového plazmatu? aneb co jsme zjistili díky urychlovači RHIC o nové fázi jaderné hmoty*](#), Kozmos, roč.XXXVI, 2005 ,č.4 a 5
- [7] Vladimír Wagner: [*Nový typ složených částic – pentakvarky – konečně prokázán?*](#), Kozmos, roč.XXXVI,2005,č.6 a roč.XXXVII, 2006, 1
- [8] Vladimír Wagner: [*Temná hmota in flagranti*](#), Vesmír, 2006, č.12

Vladimír Wagner

ÚJF AVČR Řež

E_mail: WAGNER@UJF.CAS.CZ

WWW: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/>