

Kvark-gluonové plazma aneb Malý třesk

Petr Kulhánek



Murray Gell-Mann, jeden z autorů kvarkové hypotézy.

Právě na konci druhého tisíciletí, v roce 2000, byla objevena nová forma hmoty: kvark-gluonové plazma. Za teplot stotisíckrát vyšších než v centru Slunce a hustot dvacetkrát vyšších než v atomovém jádře se v laboratoři CERN pravděpodobně podařilo na krátký okamžik roztavit samotné částice atomového jádra – protony a neutrony. Lidstvo se tak poprvé přiblížilo k unikátním podmínkám, které panovaly na samém počátku Vesmíru. Pojďme nyní společně sledovat tento prazvláštní příběh...

Kvarkový model

Asi každý již někde slyšel, že atomové jádro se skládá z neutronů a protonů. A určitě jste zaslechli slovo *mezon* (částice s hmotností „mezi“ elektronem a protonem). Již v šedesátých letech se začalo uvažovat o tom, že tyto částice nejsou opravdové elementární částice, ale že jsou složeny z menších, snad skutečně elementárních částic. První model tohoto typu navrhli nezávisle na sobě v roce 1964 Murray Gell-Mann a George Zweig. Ony částice, ze kterých má být tvořena hmota nazval Gell-Mann *kvarky*. Toto podivné slovo našel v románu „Finnegans Wake“ od Jamese Joyce. Hlavnímu hrdinovi se zdá sen, ve kterém racci letící za plující lodí křičí „Tři kvarky pro doktora Marka“. V celém románu se toto slovo již nikde jinde nevyskytuje.

Sám Gell-Mann navrhl existenci prvních čtyř kvarků, později byly do teorie doplněny další dva. Hovoříme o tzv. třech generacích kvarků. Z první generace (kvarky *d* a *u*) jsou tvořeny běžné částice kolem nás, například neutron a proton. Druhá generace (kvarky *s* a *c*) se vyskytuje zřídka, tyto kvarky najdeme jen ve vysoce energetických procesech, například při srážkách kosmického záření s částicemi horních vrstev atmosféry. Poslední generaci

(kvarky *b* a *t*) umíme vytvořit jen uměle na velkých urychlovačích. Všechny tři generace kvarků se ale ve Vesmíru vyskytovaly krátce po jeho vzniku a spoluutvářely jeho budoucí vlastnosti.

Názvy kvarků znamenají: *d* – *down* (dolů), *u* – *up* (nahoru), *s* – *strange* (podivný), *c* – *charm* (půvabný), *b* – *beauty* (krásný) a *t* – *truth* (pravdivý). Někdy se poslední dva kvarky nazývají *bottom* a *top* (dolní a horní). Všechny kvarky mají spin (vlastní točivost) rovný jedné polovině. Částice tvořené z kvarků se nazývají hadrony a dělí se do dvou velkých skupin: mezonů, ve kterých jsou kvarky složeny po dvojicích (kvark a antikvark) a baryonů složených ze tří kvarků různých barev. Asi deset mikrosekund po vzniku Vesmíru se volné kvarky pospojovaly do dvojic a trojic a vytvořily tak mezony a baryony. Tomuto procesu říkáme hadronizace hmoty.

V připojených tabulkách jsou nejznámější mezony a baryony složené z první generace kvarků (*d*, *u*). U mezonů se spin kvarků může složit souhlasně na hodnotu 1 nebo nesouhlasně na hodnotu 0. U baryonů složených ze tří kvarků může být výsledný spin buď 1/2 (jeden kvark má opačný spin) nebo 3/2 (všechny kvarky mají souhlasný spin).

Samozřejmě známe i částice obsahující jiné kvarky než kvarky první generace. Například mezony obsahující podivný kvark *s* nazýváme *K* částice (kaony) a ty sehrály důležitou roli při poznávání levoprávní symetrie. Baryony obsahující podivný *s* kvark nazýváme hyperony ($\Lambda = uds$, $\Omega^- = sss$, Ξ hyper-

ony, Σ hyperony) a nacházíme je často v produktech srážek kosmického záření s atmosférou. V počátečních fázích Vesmíru byly tyto částice velmi hojné. Uměle je možné vyrobit i různé exotické částice obsahující kvarky *c*, *b* a *t*, jmenujme alespoň *charmonium* neboli částici J/ψ (vázaný stav cc') a *psilonium* (vázaný stav bb'). Při hledání kvark-gluonového plazmatu sehrály významnou roli kaony, hyperon Ω^- a částice J/ψ .

Ještě nesmíme zapomenout na jednu důležitou vlastnost kvarků – barvu. Kvarky mají poločíselný spin a proto by podle Pauliho vylučovacího principu neměly existovat dva ve stejném kvantovém stavu. Přesto se v některých částicích nacházejí dokonce tři stejné kvarky naráz (například částice Δ^{++} je tvořena třemi kvarky *u*). Kvarky se v těchto částicích od sebe musí nějak lišit a proto existují ve třech různých variantách. Tuto vlastnost fyzikové nazvali barvou. Představujeme si, že každý kvark existuje ve třech různých barevných provedeních. Kvarky vytvářejí bezbarvé částice: buď mezony (kvark a antikvark téže barvy, barva a antibarva se vruší) nebo baryony (tři kvarky různých barev, které se složí na bílou). Tato „barva“ však nemá se skutečnou barvou nic společného. Fyzikové barvu zavedli jen pro názornost (jak by bylo nehezke, kdybychom říkali: kvark v provedení 1, kvark v provedení 2, atd.).

Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (*1959)
vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře FEL ČVUT.

Kvark	Název	Náboj	Hmotnost	Rok objevu
d	down	-1/3	7 MeV	1969
u	up	+2/3	5 MeV	1969
s	strange	-1/3	150 MeV	1969
c	charm	+2/3	1,4 GeV	1974
b	beauty	-1/3	4,3 GeV	1976
t	truth	+2/3	176 GeV	1995

Objevy kvarků

Gell-Mann na základě svého modelu předpověděl existenci částice Ω^- složené ze tří podivných kvarků. Tato částice byla nalezena ještě v roce 1964, kdy byl model předložen. V roce 1969 bylo v rozptylových experimentech na urychlovači SLAC ve Stanfordu potvrzeno, že neutron a proton se skládají ze tří kvarků. V tomto roce získal Murray Gell-Mann Nobelovu cenu za fyziku za příspěvek ke klasifikaci elementárních částic. V roce 1974 bylo objeveno charmonium, vázaný stav kvarku c a antikvarku c' . Částice byla po usilovném boji objevena na dvou pracovištích současně: na protonovém urychlovači v Brookhavenu, ve skupině vedené profesorem Tingem (částici nazvali J) a na kolideru SPEAR ve Stanfordu, ve skupině vedené prof. Richterem (částici nazvali ψ). Objevu předcházela „lýtý boj“ obou

Mezony 1. generace

Částice	Stavba	Název	Spin
π^-	du'	pion	0
π^0	$dd' + uu'$	pion	0
π^+	ud'	pion	0
ρ^-	du'	róon	1
ρ^0	$dd' + uu'$	róon	1
ρ^+	ud'	róon	1

skupin o prvenství. Dnes se toto slavné období dějin fyziky úsměvně nazývá „ J/ψ revoluce“ a charmonium se říká částice J/ψ . V roce 1976 bylo objeveno *psilonium*, vázaný stav kvarku b a antikvarku b' . Poslední t kvark byl nalezen v roce 1995 v laboratoři Fermilab.

Silná interakce a barva

Co drží kvarky pohromadě tak, aby tvořily částici jako je neutron či proton? Je to silná interakce způsobovaná gluony. Slovo „glue“ znamená v angličtině lepit nebo lepidlo. Gluony slepují kvarky k sobě dohromady a nedovolí jim uniknout. Je to ale velmi zvláštní lepidlo. Na velmi malých vzdálenostech lepí velmi slabě, kvarky se chovají skoro jako volné částice. Ale běda, vzdálí-li se na vzdálenost větší než 10^{-15} m. Tehdy začne gluonové lepidlo působit velmi intenzivně a nedovolí kvarkům vzdálit se z jejich vězení. Proto se po dlouhá léta nepodařilo získat volný kvark. Vždy jsou po dvojicích nebo po trojicích uvězněny v mezonu nebo v baryonu. Na volné kvarky je totiž třeba jít oklikou. Dodáme-li látce velkou

energii, stlačíme ji natolik, že průměrné vzdálenosti mezi kvarky budou menší než 10^{-15} m. Gluonové lepidlo přestane účinkovat a získáme tak kvark-gluonové plazma složené z volných kvarků a gluonů. Právě takové podmínky panovaly ve Vesmíru prvních 10 mikrosekund po Velkém třesku a v roce 2000 se je podařilo na malou chvíli napodobit v laboratoři CERN. Těmto experimentům se začalo symbolicky říkat *Malý třesk*.

Podivné vlastnosti gluonového lepidla jsou způsobeny tím, že samy gluony jsou barevné (přesně bychom měli říci, že mají stejný kvantový náboj jako kvarky, tzv. barevný náboj). Každý kvark má kolem sebe velký houf gluonů. *Gluonový kožich*, do kterého je kvark obléknut, je dokonce mnohem hmotnější než kvark sám. Čím blíže bychom pronikli ke kvarku, tím by jeho barva slábla. Říkáme, že gluony v okolí kvarku způsobují „*antistínění*“ jeho náboje. Velikost barevného náboje ale určuje kvalitu interakce dvou kvarků a proto dva velmi blízké kvarky téměř neinteragují. Za všechno mohou gluonové kožichy!

U elektromagnetické interakce podobný jev neznáme. Pravda, každý elektron je obklopen houfem fotonů (elektrickým polem, chcete-li). Ale fotony nemají elektrický náboj a proto nezpůsobují žádné „*antistínění*“. Elektrony jsou naopak „*stíněny*“ virtuálními elektron-pozitronovými páry a to dokonce i ve vakuu. Ale elektromagnetická interakce, to je jiná kapitola a tak se raději vrátíme ke kvarkům.

Kvark gluonové plazma

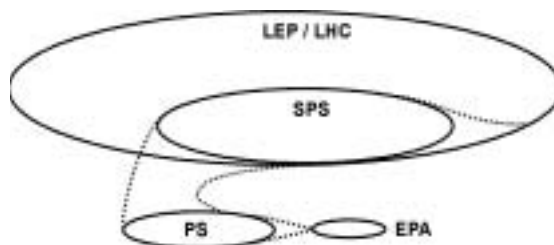
Skupenství kapalné, pevné a plynné má snad každý. Při zvyšování teploty může látka postupně projít těmito skupenstvími. Dalším zvyšováním můžeme narušit elektronové obaly a látka se stává plazmatem. Jsou v ní volné nosiče náboje, látka reaguje jako celek na vnější elektrická a magnetická pole a sama je schopna taková pole vytvářet. Jako celek je ale elektricky neutrální. Přes 99 % látky je ve Vesmíru ve stavu plazmatu. Ať jde o hvězdy samotné, mlhoviny či výtrysky kvasarů. Na naší Zemi je plazma v menšině, nalezneme ho v ionosféře, v kanálech blesků a v polárních zářích.

Baryony 1. generace			
Částice	Stavba	Název	Spin
n	ddu	neutron	1/2
p	uud	proton	1/2
Δ^-	ddd	delta baryon	3/2
Δ^0	ddu	delta baryon	3/2
Δ^+	duu	delta baryon	3/2
Δ^{++}	uuu	delta baryon	3/2

Další zahřívání látky si můžeme představit jako ostřelování stále energetičtějšími částicemi. Při velmi vysokých energiích může dojít k tomu, že průměrné vzdálenosti mezi kvarky budou menší než 10^{-15} m a kvarky s gluony se začnou chovat jako volné. Vytvoří se zcela výjimečný stav hmoty – kvark gluonové plazma.

Historie experimentů

Nalezení kvark gluonového plazmatu se stalo snem experimentátorů někdy na konci 70. let. První experimenty tohoto typu se začaly provádět v 80. letech v Berkeley v laboratoři LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) v USA. V letech 1994 až 2000 se hledání kvark-gluonového plazmatu přesunulo do laboratoře CERN (European Center for Nuclear Research, Evropské středisko pro jaderný výzkum) do Evropy. Svazek vysoce urychlených částic (3,5 TeV) olova Pb 208 v urychlovači SPS (Super Proton Synchrotron) byl nastřelen na statický terčik, taktéž z olova. Uvolněná energie byla natolik obrovská, že stačila k „roztavení“ protonů a neutronů na kvarky a gluony. V průběhu šestiletého výzkumu bylo uskutečněno 7 experimentů (NA44, NA45/CERES, NA49, NA50, NA52, NA57/WA97 a WA98), na kterých se podílelo přes 500 vědců z více jak dvaceti zemí světa. Experimenty byly také prováděny



CERN. Základní urychlovače ve středisku CERN. Na urychlovači SPS se prováděly experimenty s kvark-gluonovým plazmatem do roku 2000. Po přestavbě urychlovače LEP na LHC budou v roce 2005 experimenty pokračovat opět v Evropě.



CERN. LHC (Large Hadron Collider) a Alpy.

s atomy zlata nastřelenými na olověný terčík.

Objev nové formy hmoty, kvark-gluonového plazmatu, byl oznámen 10. února 2000 na slavnostním zasedání komplexu laboratoří CERN.

V roce 2000 se experimenty stěhují opět do USA, do Brookhavenu (Long Island, USA) na výkonnější zařízení RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider). Dosažitelné energie budou desetkrát vyšší než v laboratoři CERN a lze tak očekávat systematický průzkum tohoto exotického stavu hmoty. Experimenty jsou prováděny s izotopem zlata AU 197. Do roku 2005 by měl být dostavěn urychlovač LHC (Large Hadron Collider) v laboratoři CERN a experimenty se poté opět vrátí k nám, do Evropy.

Nezanedbatelnou součástí každého velkého experimentu je dnes teoretické a numerické zázemí. Simulace kvark gluonového plazmatu je prováděna pomocí rozsáhlých paralelních výpočtů skupiny MILC (MIMD Lattice Computation), do které patří: University of California at Santa Barbara, University of Arizona, University of Colorado, Florida State University, Indiana University, University of Pacific, University of Utah, Washington University a společnost NORDITA.

Detekce kvark gluonového plazmatu

V laboratorních experimentech vydrží kvark gluonové plazma po velmi krátkou dobu. Nalétávající urychlená jádra olova způsobí srážky protonů a neutronů s velkou energií. Na krátkou chvíli 10^{-22} sekundy se neutrony s protony „roztaví“, vznikne kvark-gluonová koule, která se rychle rozpíná a ochlazuje. Kvarky se začnou seskupovat po dvojicích a trojicích do hadronů, vzniká opět normální hmota. V laboratoři na vznik kvark-gluonového

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



Brookhaven. Základní urychlovače v Brookhavenu (Long Island, USA). Na urychlovači RHIC se bude pokračovat v experimentech s QGP do roku 2005.

energie kvark-gluonové koule z hybností vede na hodnoty převyšující kritickou mez pro vznik kvark gluonového plazmatu, sledování skladby produktů rozpadu odpovídá vytvoření kvark-gluonové fáze i další. Pro existenci kvark-gluonového plazmatu (QGP) hovoří celkem 7 argumentů:

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

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



Schéma průběhu experimentu.

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

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

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

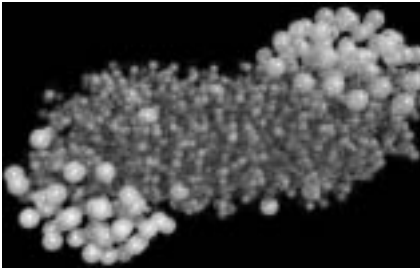
6. Sledování skladby různých typů produktů: Podle množství různých produktů experimentu lze odhadnout teplotu při hadronizaci. Vychází 180 MeV, což je v souladu s kritickou teplotou nutnou pro dosažení kvark-gluonové fáze.

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

Můžeme jen doufat, že experimenty připravované v Brookhavenu i pozdější experimenty na urychlovači LHC v laboratoři CERN po roce 2005 nám umožní dobře poznat tento nový stav hmoty a lépe tak pochopit procesy, které probíhaly při samých počátcích Vesmíru.



Brookhaven. Tunel urychlovače RHIC uložený necelé 4 metry pod Zemí.



Setkají-li se dva atomy olova s dostatečnou energií, dojde k destrukci protonů a neutronů v jejich jádrech. Na malou chvíli se z nich uvolní kvarky a gluony.

Kvarky, a co dál?

Kvarky mají podle současných znalostí bodovou strukturu až do rozměrů 10^{-18} m (tisícina velikosti protonu). V roce 1996 byly v laboratoři Fermilab provedeny rozptylové experimenty, které naznačují, že by na menších rozměrech mohly být kvarky složeny z dalších částic, tzv. *preonů*. První preonový model byl vytvořen Salamem a Patim již v roce 1974. Každý kvark by měl být tvořen ze tří částic: *somonů* (3 druhy, určují generaci, náboj mají nulový), *flavonů* (2 druhy, určují vůni, neboli druh kvarku v dané generaci, například „dolní“ či „horní“, náboj mají $\pm 1/2$) a *chromonů* (4 druhy, určují barvu, náboj mají $\pm 1/6$). Dohromady získáme $3 \times 2 \times 4 = 24$ částic, 12 kvarků a 12 leptonů (elektronů s neutriny). Model má však své problémy. Preony by musely zaujímat prostor menší než 10^{-18} m a podle Heisenbergových relací by musely mít značnou hybnost. Leptony a kvarky by proto získaly větší hmotnost než ve skutečnosti mají. Problém by vyřešila nadsvětelná rychlost preonů. Nadsvětelné preony by měly zápornou hmotnost a výsledná hmotnost kvarků a leptonů by byla v souladu s pozorováním. Cena by však byla značná – ztráta kauzality (příčinné souvislosti). Existence preonů by také otevřela dávnou otázku. Je vůbec hierarchie struktury hmoty konečná? Není každá elementární částice tvořena dalšími, ještě elementárnějšími částicemi? Na odpovědi na tyto otázky si budeme muset ještě nějakou dobu počkat. A dost možná, že se odpověď nikdy nedozvíme...

Tento článek vznikl na základě přednášky konané na FEL ČVUT a je doplněním a rozšířením krátkého sdělení, které vyšlo ve zpravodaji Pražské pobočky ČAS, Coroně Pragensis 2/2001.