

Kvark-gluonové plazma

O. Faltys

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

o.faltys@seznam.cz

Abstrakt

Na předních výzkumných pracovištích (CERN, RHIC,...) se podařilo vytvořit nový stav hmoty - tzv. kvark-gluonové plazma. Podle naměřených údajů ale kvark-gluonové plazma vykazuje známky chování dokonalé kapaliny a nikoliv teorii předpokládaného plazmatu. Nyní probíhají experimenty v CERNU na urychlovači LHC (Large Hadron Collider), kde je hlavní snaha detekovat Higgsův boson.

1 Úvod

V roce 2000 byla poprvé vytvořena nová forma hmoty, kvark-gluonové plazma (dále QGP). Stalo se tak v CERNu na urychlovači SPS (Super Proton Synchrotron). QGP je stav hmoty, který může vzniknout pouze při vysoce energetických procesech, kdy se podaří roztavit samotné částice atomového jádra (protony a neutrony) za vzniku volných kvarků a gluonů. Znalost vlastností QGP a jeho způsobu přechodu v hadronový plyn (kvarky a gluony spolu kombinují v protony a neutrony) jsou klíčové pro pochopení ranného stádia vývoje Vesmíru a zároveň mohou objasnit podstatu těch nejelementárnějších sil.

2 Kvarky

Základní stavební kameny našeho světa jsou (vedle leptonů) kvarky. Známe celkem šestici kvarků: down, up, strange, charm, beauty, truth. Kvarky down a up označujeme jako kvarky tzv. první generace. Jsou z nich složeny běžné částice našeho prostředí, například proton a neutron. Kvarky strange a charm označujeme jako kvarky tzv. druhé generace. Vyskytují se pouze při vysoce energetických procesech, jakými jsou například srážky kosmického záření s částicemi horních vrstev atmosféry. Existuje ještě jedna generace kvarků, tzv. třetí generace, kam patří kvarky beauty a truth. K jejich vzniku musíme dodat ještě podstatně více energie než na vznik kvarků druhé generace. Lze je detekovat pouze na velkých urychlovačích.

Z kvarků se skládají částice zvané hadrony. Ty dělíme na baryony a mezony. Baryony jsou částice, které se skládají ze tří kvarků. Mezony se skládají z dvojice kvark a antikvark (ke každé částici existuje její antičástice). Mezi kvarky působí silná interakce, která je zprostředkována osmicí gluonů. Gluony mají stejný náboj jako kvarky, tzv. barevný náboj a jsou tak schopny částečně odstínit silové působení mezi kvarky. Dalšími vlastnostmi charakterizujícími kvarky je například spin. Představme si kouli, jenž rotuje kolem osy, která prochází jejím středem. To je poněkud neohrabaně řečeno spin. Spin může nabývat hodnot $\pm 1/2$. Mezony mají tedy spin buď 1 nebo 0 (kvark a antikvark mají stejný nebo rozdílný spin). Baryony mají spin buď $1/2$ nebo $3/2$. Jelikož kvarky mají spin, tak podléhají Paulimu vylučovacímu principu, který říká, že žádné dvě částice se nemohou nacházet ve stejném kvantovém stavu. Existují ovšem i tak exotické částice, jakou je například částice delta baryon, která je tvořena třemi kvarky up. Tyto kvarky se od sebe musí nějak lišit, a tak jim

přísluší vlastnost nazývaná barva. Kvarky vytváří bezbarvé částice (hadrony tedy nemají barevný náboj). U mezonů se barva a antibarva vyruší. U baryonů existují tři kvarky různé barvy, které se složí na bílou.

Kvarky down, up a strange byly objeveny roku 1969, kvark charm roku 1974. U kvarků zatím nebyla zjištěna žádná struktura, a jsou tedy pokládány za nejelementárnější částice.

3 Experimenty

První experimenty, které měly za cíl detekovat QGP, se začaly provádět v 80. letech v Berkeley v laboratoři LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) v USA. V letech 1994 až 2000 se těžiště experimentů přesunulo do evropské laboratoře CERN. Zde se na urychlovači SPS podařilo poprvé detekovat QGP. Svazek jader olova Pb 208 byl urychlen až na energii 160 GeV na každý svůj nukleon a nastřelen na statický terčik, kde se srazil s dalšími jádry olova Pb 208. V roce 2000 převzaly štafetu opět Spojené státy americké a experimentovalo se na urychlovači RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider). Při tomto experimentu byly proti sobě urychleny dva svazky zlatých jader (izotop Au 197), které se čelně srazily. Uvolněná energie byla až desetkrát větší než na urychlovači SPS v CERNu. V současné době je již opět upřená pozornost do CERNu, kde se experimentuje zatím na urychlovači LHC (Large Hadron Collider).

4 Detekce QGP

V laboratorních podmínkách vznikne QGP jen na velice krátkou dobu (v RHIC přibližně na $50 \cdot 10^{-23}$ s). Přímé pozorování je tedy zcela vyloučeno. Nejsilnějším argumentem hovořícím ve prospěch existence QGP byla teoreticky předpovězená snížená produkce kvarku charm. V praxi to znamená vznik menšího počtu částic J/ψ . Částice J/ψ je mezon, který se skládá z kvarku charm a jemu příslušnému antikvarku. Produkce částic J/ψ je závislá na síle krátkého dosahu mezi kvarky (kvark charm se svým antikvarkem interagují přibližně na vzdálenost jedné třetiny protonu). V QGP by se měl nacházet takový počet volných kvarků a gluonů, že by měl být schopen odstínit vzájemné silové působení mezi kvarky a tím by tak byla výrazně snížena produkce mezonu J/ψ . A to bylo také skutečně zjištěno. Rozhodující je zde fakt (jak jsem již dříve zmínil), že gluony mají stejný náboj jako kvarky. Dalším důkazem potvrzujícím existenci QGP může například být sledování rozložení hybnosti produktů vylétávajících z místa srážky. Z těchto údajů je možno spočítat teplotu oblasti z níž částice vylétly (QGP by mělo existovat ještě při teplotě 2000000 K).

5 Nejdokonalejší kapalina

Teoretičtí fyzikové předpokládali, že směs volných kvarků a gluonů bude vykazovat známky chování plazmatu, tedy ultra horkého plynu nabitých částic. K obrovskému překvapení ale experimenty provedené na urychlovači RHIC ukazují, že kvark-gluonové medium vykazuje známky chování kapaliny a nikoliv plynu! Tento poznatek vyplývá především z následujících jevů.

Utlumení jetu

- Jakmile se dva proti sobě letící protony, urychlené téměř až na rychlost světla, srazí, tak pozorujeme výstřiky párů kvarků (tzv. jety), které jsou vzájemně opačně

orientované. Detektory v urychlovači RHIC zaznamenávají pouze jednu polovinu takového páru. Nabízí se otázka, kam zmizel druhý kvark (jet). Odpověď je taková, že se jeden kvark vrátil do právě zformovaného kvark-gluonového média. Svoji energii předal méně energetičtějším částicím (kvarkům, gluonům ...) při průletu médiem a nemůže tudíž proletět skrz naskrz.

Eliptický tok

- Srazí-li se dvě jádra nepřímo svými středy (což se stane téměř vždy), tak oblast, v níž se nachází kvark-gluonové médium, má eliptický tvar (ragbyový míč). Uvnitř tohoto média působí značné tlaky, které ho rozpínají. Podstatné je zde to, že hadrony s největší energií mají tendenci vylétávat v rovině srážky. V této rovině se médium rozpíná nejrychleji. Tato vlastnost dokazuje kolektivní chování částic v médiu (kapalina). V plynu by všechny částice vylétávaly rovnoměrně do všech stran.

Je to dokonce vůbec nejdokonalejší kapalina, která kdy byla pozorována. Její viskozita se odhaduje na pouhou jednu desetinu hodnoty viskozity supratekutého helia.

6 LHC

LHC je nejvýkonnější urychlovač na světě. Primární okruh je dlouhý 27 km a svazky těžkých jader jsou usměrňovány (a urychlovány) 1800 supravodivými magnety. Energie připadající na jeden nukleon může v LHC dosáhnout až na hodnotu 7 TeV. Při srážce těžkých jader je tak pochopitelně uvolněno mnohonásobně více energie, než tomu bylo na urychlovači RHIC. První svazek částic byl do LHC vypuštěn 10. září 2008.

Největší úsilí fyziků bude zřejmě zaměřeno na detekci Higgsova bosonu. Higgsův boson je hypotetická částice, která má ostatním částicím propůjčovat hmotnost. Existenci této částice si vyžádalo porušení elektroslabé symetrie. Elektromagnetickou interakci mezi nabitými částicemi zprostředkovává foton a dosah této interakce je v podstatě neomezený. Slabá interakce se uplatňuje při beta rozpadu protonu a neutronu. Proton se rozpadá na neutron, pozitron (antičástice k elektronu) a neutrino. Neutron se rozpadá na proton, elektron a antineutrino. Problém je v tom, že slabá interakce působí na krátkou vzdálenost a dalo by se očekávat, že částice, které zprostředkovávají tuto interakci, nebudou nehmotné. Teoreticky byly předpovězeny tři takové částice a ty se později v CERNu skutečně podařilo objevit. Byly to bosony W^+ , W^- a boson Z . Higgsův boson si můžeme představit jako částici, která je schopna pohltit nosiče silových interakcí (vyjma fotonu), a tak jim propůjčit hmotnost. Tedy Higgsův boson je zodpovědný za narušení elektroslabé symetrie. Podle teoretických předpokladů se hmotnost Higgsova bosonu pohybuje v rozmezí 115-150 GeV. Nemá elektrický náboj ani spin.

7 Závěr

Podle experimentů v RHIC vykazuje QGP, v rozporu s teorií, známky chování dokonalé kapaliny a nikoliv plynu. Experimenty na urychlovači LHC nám tak snad dají uspokojivou odpověď na tento problém. Hlavním cílem experimentů na LHC je však detekce Higgsova bosonu. Potvrzení jeho existence by možná úspěšně dovršilo teorii Standardního modelu (teorie popisující částice a jejich vzájemné interakce).

Reference

- [1] P. Kulhánek, www.aldebaran.cz/texty/QGP.pdf
- [2] V. Wagner, <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/plazma/plazmanova.html>
- [3] M. Riordan, W. A. Zajc, *Prvních pár mikrosekund*, Scientific American, květen-červen 2007, str. 18-25
- [4] kol. autorů, http://cs.wikipedia.org/wiki/Velký_hadronový_urychlovač
- [5] J. Kapoun, <http://scienceworld.cz/fyzika/pribeh-higgsova-bosonu-2285>
- [6] kol. autorů, http://cs.wikipedia.org/wiki/Higgsův_boson
- [7] kol. autorů, http://cs.wikipedia.org/wiki/Záření_beta