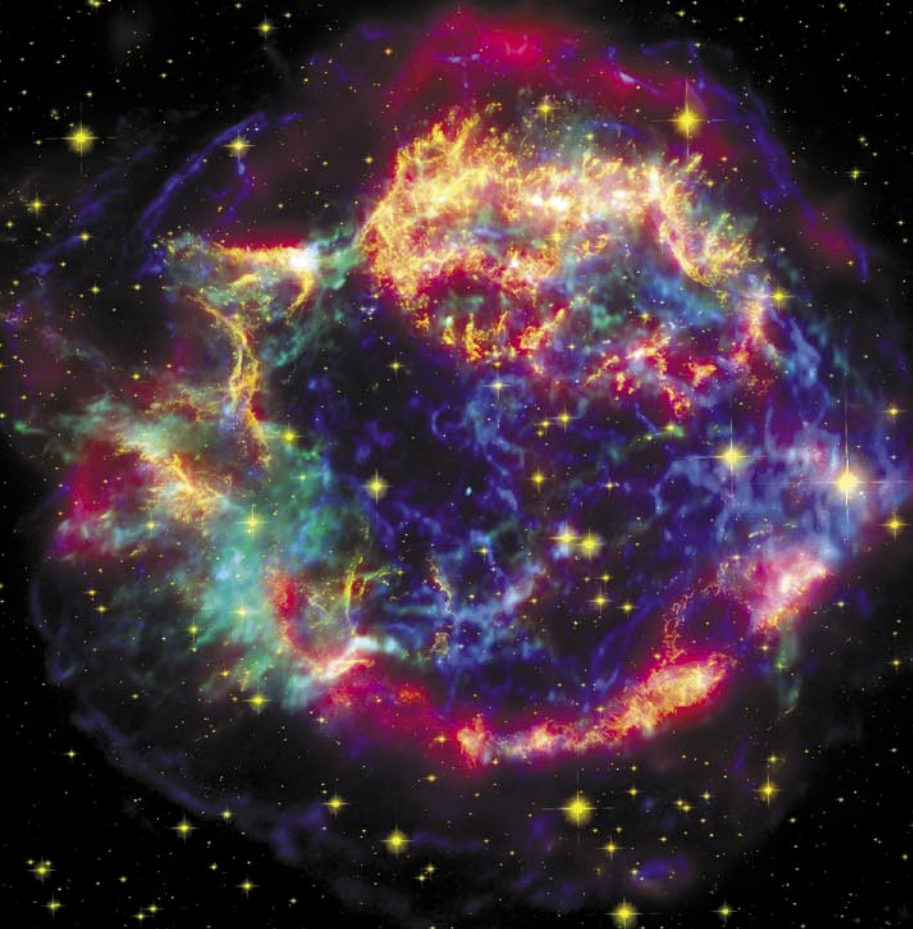


1. Velmi hustá a horká hmota může vznikat jak v přírodě, tak v laboratoři (pomocí urychlovače). Na obrázku je pozůstatek po supernově, kterou pozoroval J. Kepler před 400 lety, kombinace snímků z několika sond NASA pracujících v různém oboru spektra (snímky NASA).



VLADIMÍR WAGNER

Neutronové hvězdy

v pozemské laboratoři

Horká a hustá jaderná hmota

Na počátku vývoje vesmíru se jeho hmota vyskytovala ve velmi hustém a horkém stavu. Taková hmota v současné době vzniká při výbuchu supernovy a můžeme ji najít uvnitř neutronových hvězd. Jestliže chceme poznat, jak výbuch supernovy probíhá, musíme vědět, jaké má taková velmi horká a hustá hmota vlastnosti. Abychom mohli takovou hmotu zkoumat, musíme si ji připravit. Ovšem kdybychom odstartovali výbuch supernovy na Zemi, mělo by to katastrofální důsledky, nehledě na to, že bychom to asi neměli. Přece však existuje způsob jak připravit velmi horkou a hustou hmotu v laboratoři. Takovou možností je srážka atomových jader, která jsou urychlena na rychlosti blízké rychlosti světla. Při srážce jader se jejich hmota stlačí, zahřeje se, a tím vznikne oblast velmi horké a husté jaderné hmoty. Tato oblast má jen velmi malý objem, srovnatelný s objemem atomového jádra (řádově 10^{-42} m^3) a trvá velmi krátce (řádově 10^{-22} s). Přesto lze získat řadu informací o hmotě, jejíž hustota převyšuje hustotu atomového jádra ($2,6 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$) a jejíž teplota je nejvyšší dosud dosažitelná v laboratoři (10^{12} stupňů).

Současný pohled na stavbu hmoty

Veškerá rozmanitost a krása světa okolo nás je složena z atomů, které se spojují do jednoduchých i velmi složitých molekul. Dnes víme, že atomy nejsou těmi nejmenšími částicemi, ale skládají se z atomového jádra, které ve velmi malém objemu obsahuje téměř všechnu hmotu atomu a oblaku elektronů okolo něho. Jádro má kladný elektrický náboj, elektrony záporný a pohromadě je v atomu drží elektrická síla. I atomové jádro je složený objekt. Tvoří ho dva druhy nukleonů: *protony* a *neutrony*. Ani nukleony nejsou bez struktury; jsou složeny z *kvarků*. Kvarky v nukleonech i nukleony v jádře drží pohromadě silná interakce. Nukleony a další jim podobné částice, které mají společný název *baryony*, se skládají ze tří kvarků. *Antibaryony* (antihmotní partneři baryonů) se skládají ze tří antikvarků. Z kvarků a antikvarků jsou složeny i další částice, *mezony*, které se skládají vždy z jednoho kvarku a jednoho antikvarku. Baryony a mezony jsou částice, které se vyznačují tím, že na ně působí silná interakce. Souborně je označujeme jako *hadrony*.

Jak už bylo zmíněno, silná interakce drží kvarky uvnitř hadronů. Tato síla má velice specifické vlastnosti. Jestliže elektrická síla působí mezi částicemi s elektrickým nábojem, silná síla působí mezi částicemi s takzvaným „barevným“ nábojem. Máme dva druhy elektrického náboje – *kladný* a *záporný*, barevného náboje máme tři druhy – *červený*, *modrý* a *zelený*. Při výběru názvu pro náboj silné interakce se vycházelo z toho, že v baryonech má každý z kvarků náboj jiné barvy a dohromady vytvoří tyto tři barvy objekt (částici) bez barevného náboje. Podobně směs tří základních barev vytvoří barvu bílou. Také mezony jsou bezbarvé objekty, zde se vzájemně ruší barva a antibarva. Specifické vlastnosti silné interakce způsobují, že se kvarky za normál-

ních podmínek nemohou vyskytovat samostatně, ale vždy jsou uvězněny v hadronech. Představme si, že chceme vytrhnout kvark z hadronu. Budeme k tomu využívat stále větší energii, ale stále nebude stačit k tomu, aby se kvark z částice uvolnil. Až v určitém okamžiku bude hodnota energie tak vysoká, že bude stačit k vytvoření páru kvark a antikvark. Vzniklý kvark i antikvark se sloučí s již existujícími. Dostaneme dva hadrony místo jednoho, ale zase žádný volný kvark. Je to trochu podobné, jako když natahujeme pružinu proto, abychom její konce oddělili a získali pružinu s jedním koncem. Natahujeme ji až do okamžiku, kdy se pružina roztrhne. A dostaneme opět dvě pružiny, každou se dvěma konci, ale žádný osamělý konec.¹

V současnosti se předpokládá, že interakce jsou zprostředkovány výměnou částic. Jestliže u elektromagnetické interakce jde o výměnu fotonů, silná interakce je zprostředkována výměnou částic, které se nazývají gluony. A právě vlastnosti silné interakce, hadronů, kvarků a gluonů jsou klíčové pro chování velmi horké a husté jaderné hmoty, jímž se zabývají následující řádky.

Fáze jaderné hmoty a přechody mezi nimi

Stejně jako klasická hmota složená z atomů má i jaderná hmota různé fáze (skupenství). To, v jaké fázi hmota bude, závisí na její teplotě a hustotě určené tlakem, ve kterém se hmota nachází. V jakých podmínkách různé fáze normální atomové i jaderné hmoty existují a jakým způsobem přechází jedna fáze v druhou, si můžeme zobrazit pomocí fázového diagramu (viz obr. 4). Jestliže bude mít jaderná hmota hustotu blízkou hustotě atomového jádra za normálních podmínek, bude ve stavu, který je do jisté míry analogický kapalině. Řadu vlastností atomového jádra si můžeme přiblížit, když si ho představíme jako kapku jaderné kapaliny. Jestliže budeme této hmotě dodávat energii – ohřívat ji – v určitém okamžiku se jaderná kapalina začne přeměňovat (vypařovat) na hadronový plyn. V tomto sta-

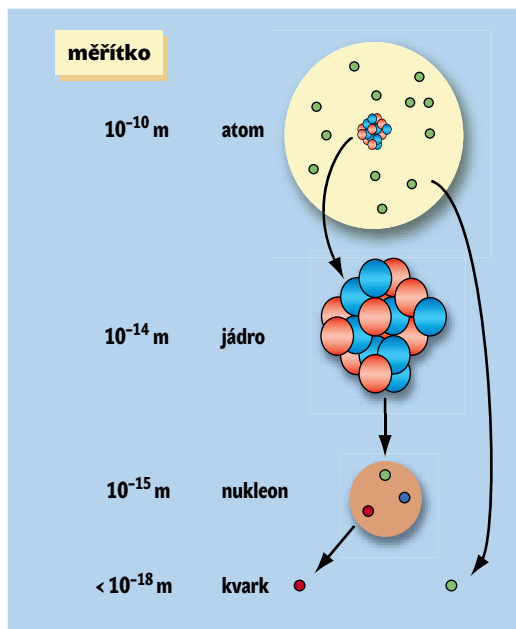
„No dobrá,“ řekla kočka a tentokrát se ztrácela pomaloučku od konečku ocasu až po škleb; ten chvíli ještě potrvál, když už ostatek zmizel. „Kočku bez šklebu, to už jsem viděla kolikrát,“ pomyslí si Alenka, „ale škleb bez kočky! Něco tak zvláštního jsem jakživ neviděla!“

Lewis Carroll:

Alenka v Kraji divů

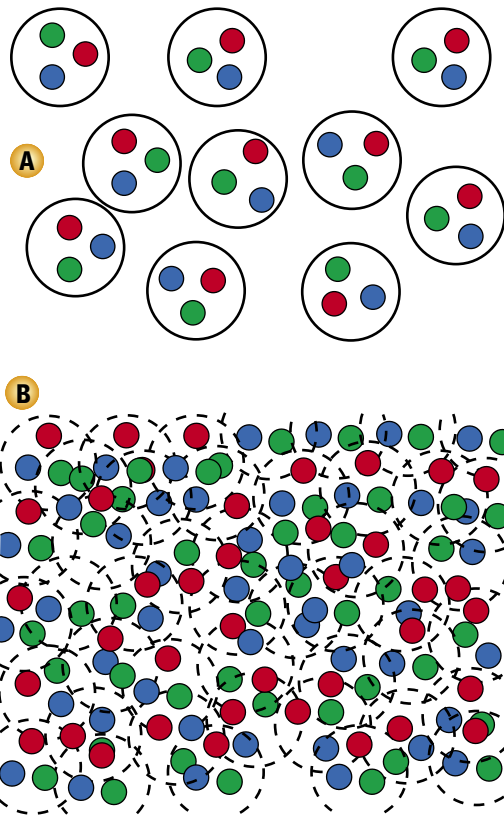
1) Dovolím si připomenout, že uvedený případ je pouhou analogií, jejíž platnost je velmi omezená. Uvěznění kvarků silnou interakcí v hadronech nemá nic společného s pružinou, ani barva jako náboj silné interakce není klasickou barvou. Vlastnosti mikrosvěta jsou velmi neobvyklé a fyzikové se snaží přiblížit si je pomocí podobnosti s jevy a vlastnostmi světa běžných rozměrů. K takovým analogiím však je třeba přistupovat velmi opatrně.

2. Současný pohled na hierarchii ve struktuře hmoty.



RNDr. Vladimír Wagner, CSc., (*1960) vystudoval MFF UK v Praze. V Ústavu jaderné fyziky AV ČR se zabývá hlavně experimentálním studiem horké a husté jaderné hmoty v relativistických srážkách těžkých iontů. Je jedním z mála fyziků, kteří publikují také pro nás pěšáky – laiky se zájmem o věc.

3. V hadronové hmotě jsou kvarky uvězněny v hadronech (v části A). Při velmi vysoké hustotě a teplotě jsou hadrony natlačeny tak, že se prolínají a nemohou si uchovat svoji identitu. Kvarky již nejsou uvězněny v hadronech (v části B). Obrázek připravil Marek Holub.



2) Při hledání názvu se vycházelo z podobnosti mezi vydělením kvarků z částic a vydělením elektronů a iontů z atomů při vzniku normálního plazmatu.

3) Připomínám, že v mikrosvětě se energie často udává v elektronvoltech ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), předpona mega (M) znamená milion a předpona mili (m) tisícinu.

4) Viz J. Niederle, Vesmír 83, 502, 2004/9.

5) Světlo urazí za jednu nanosekundu necelých 30 cm, mějme na paměti rozměry detektorů na velkých urychlovačích, viz např. Vesmír 73, 274, 1994/5; 75, 9, 1996/1; 75, 608, 1996/11.

4. Fázový diagram jaderné hmoty. Podobně jako u normální hmoty existují i u jaderné hmoty různé fáze.

vu jsou některé vlastnosti jaderné hmoty analogické normálnímu plynu. Taková hmota se vyskytovala ve vesmíru v době desítek až stovek mikrosekund po jeho počátku. Jestliže naopak teplotu měnit nebudeme, ale hmotu stlačíme a zvětšíme její hustotu, dostane se hmota do stavu, který je jistou analogií pevné fáze. Ovšem má i velice podivné vlastnosti, je *supratekutá* a *supravodivá*. Taková hmota by se měla vyskytovat v nitru neutronových hvězd. Budeme-li jadernou hmotu ohřívat nebo stlačovat ještě více, mělo by při velmi vysokých teplotách nebo tlacích dojít k tomu, že se kvarky uvolní ze svého uvěznění v hadronech a dostaneme systém uvolněných kvarků a gluonů. Tomuto stavu hmoty dali vědci název *kvark-gluonové plazma*.² Horké kvark-gluonové plazma by se mělo vyskytovat v prvních deseti mikrosekundách vývoje vesmíru a chladné kvark-gluonové plazma v ještě hlubším nitru neutronových hvězd.

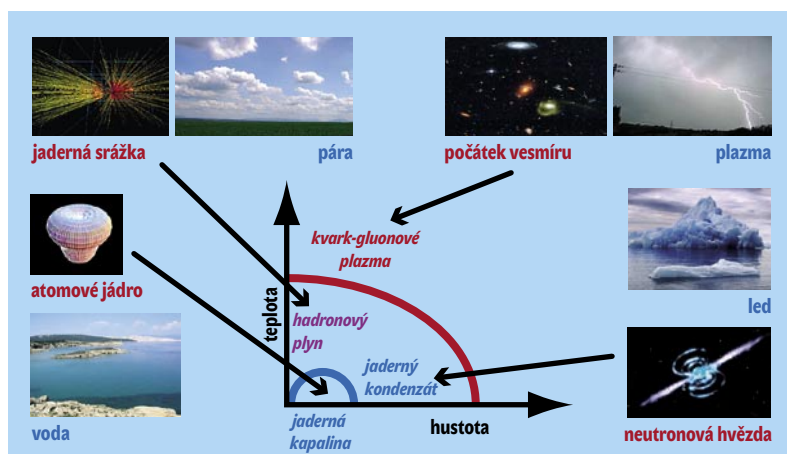
Důležité je vědět, při jaké teplotě a hustotě dochází k fázovému přechodu mezi různými

mi stavy hmoty a jakým způsobem probíhá. Existují dva typy fázových přechodů. První druh velice dobře známe u vody. Budeme-li ohřívat blok ledu v hrnci na vařiči, bude se s dodávaným teplem zvyšovat teplota ledu. Tak tomu bude až do okamžiku, kdy teplota ledu dosáhne hodnoty $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Pak se růst teploty zastaví a led se začne rozpouštět. Dostáváme směs vody a ledu. Růst teploty se přeruší až do doby, než se všechny led přemění ve vodu. Pak začne teplota opět růst, i když s odlišnou rychlostí. U druhého druhu fázových přechodů se růst teploty v průběhu ohřívání nezastaví, ale bude se měnit jinou rychlostí. V případě fázového přechodu druhého druhu také nemůže nastat situace, kdy by současně existovaly dvě různé fáze. V běžném světě takové fázové přechody můžeme pozorovat v průběhu změn magnetických vlastností látek.

Jak studovat horkou a hustou jadernou hmotu

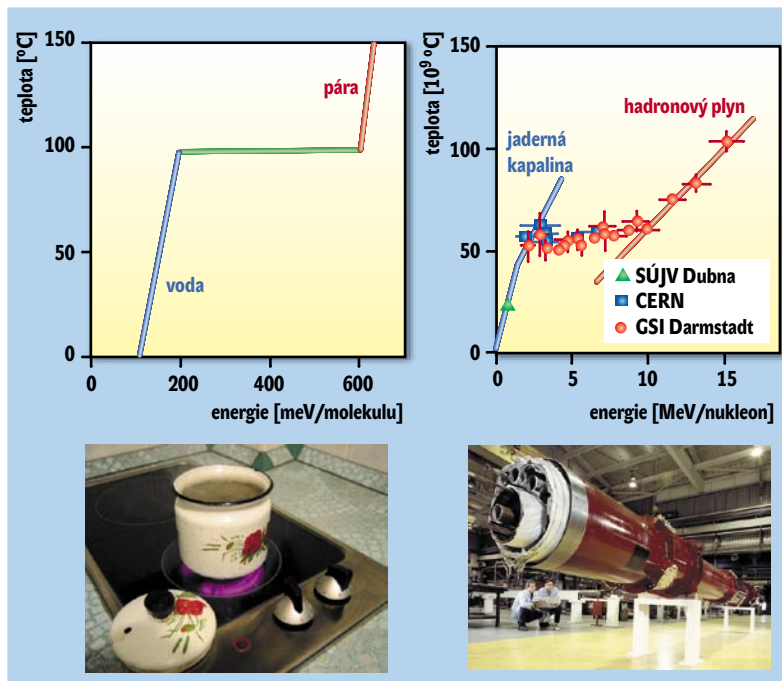
Pokud chceme studovat fázové přechody v jaderné hmotě, musíme si pořídit velice speciální vařič. Takovým vařičem je urychlovač a srážka urychlených jader. Velikost dodané energie závisí na energii, na kterou jsou jádra urychlena, a na geometrii srážky. Jestliže se jádra sráží čelně, přemění se na teplo nejvíce energie pohybu jader a hmota se nejvíce ohřeje. Čím méně je srážka čelní, tím méně tepla se dodá. Pro periferní srážku je dodávka tepla při srážce minimální. Pokud chceme určit, jakého druhu je fázový přechod v jaderné hmotě, musíme ji nejen umět ohřát, ale také určit stupeň ohřátí (velikost dodané energie) a najít takový teploměr, který by byl schopen změřit její teplotu. Ukažme si, jakým způsobem se zkoumal fázový přechod mezi jadernou kapalinou a hadronovým plynem. Geometrie srážky, a tím i dodaná energie, se určovala z počtu částic, které z místa srážky vylétaly. Teplotu lze určit z poměru mezi počtem různých izotopů některých lehkých jader vznikajících ve srážce. Vidíme, že průběh nárůstu teploty s velikostí dodaného tepla má velmi podobný tvar pro přechod mezi jadernou kapalinou a hadronovým plynem a přechod mezi vodou a vodní párou. Jen dodávané teplo je u prvního v MeV na jeden nukleon a u druhého v meV na jeden atom, tedy rozdíl devíti řádů.³ Podobně je rozdíl téměř osmi řádů v teplotě, kdy fázový přechod nastává. U vody nastává přechod u teploty $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (za normálního tlaku) a u jaderné kapaliny při teplotě $5,8 \cdot 10^{10} \text{ }^\circ\text{C}$.

Stejně jako u normální hmoty je i u jaderné hmoty velmi důležitá znalost stavové rovnice jak kapaliny, tak plynu. Ta určuje, jaký je vztah mezi teplotou, hustotou a tlakem. Velmi známá je například stavová rovnice ideálního plynu, která určuje, jak se plyn chová v různých podmínkách a při jejich změnách. Je potřeba ji znát při konstrukci zařízení, ve kterých se plyn využívá. Stavová rovnice určuje, jestli je hmota lehce stlačitelná, pružná jako guma (stačí málo energie, aby se změnil její objem), nebo je stlačitelná málo, pevná jako ocelová kulička (k změně jejího objemu je



třeba hodně energie). Například pro průběh výbuchu supernovy a chování neutronových hvězd je velmi důležité, jakou stavovou rovnici jaderná hmota v daných podmínkách má.

Mnohem exotičtější stavy hmoty než jaderná kapalina a hadronový plyn by se měly objevit při ještě vyšších teplotách během fázového přechodu od hadronového plynu ke kvark-gluonovému plazmatu. Dosáhnout tohoto přechodu a vyprodukovat kvark-gluonové plazma je „svatým grálem“ v dané oblasti fyziky už více než čtvrt století. Abychom tuto metu dosáhli, potřebujeme ještě větší urychlovač, než postačí pro vytvoření hadronového plynu. Prvním takovým urychlovačem byl SPS v mezinárodní laboratoři CERN ve Švýcarsku.⁴ Energie, kterou jádra při urychlení získala, byla téměř dvěstěkrát vyšší než ta, která postačí k přípravě hadronového plynu. Jádra mají rychlost blízkou rychlosti světla, proto je jejich rozměr ve směru pohybu podle Einsteinovy speciální teorie relativity velmi silně zkrácen a z pohledu pozorovatele v laboratoři připomínají tenké „lívance“. Ve srážce urychleného jádra s jádrem v terči, který byl v klidu vůči laboratoři, pak vzniká velmi horká a hustá hmota. Nestačí ovšem exotickou hmotu připravit, musíme také změřit její teplotu, hustotu, tlak a další vlastnosti. Musíme mít „teploměry“, „hustoměry“, „tlakoměry“ a další nástroje, které dokážou jadernou hmotu zkoumat a potvrdit vznik hledaného exotického stavu. K tomu nám slouží detektory, které obklopují místo srážky, loví co největší počet částic vznikajících během srážky a měří jejich parametry. A právě tyto částice nám mohou přinést všechny potřebné informace, i když to není právě jednoduché. Částice letí z místa srážky nesrovnatelně dále, než je doba, po kterou horká a hustá hmota po srážce existuje. Z tohoto pohledu jde o případ srovnatelný s určováním vlastností vesmíru v jeho velmi raných stádiích pomocí těch signálů, které můžeme zachytit nyní. Podobnost si jasně uvědomíme, když si připomeneme, že samotná srážka trvá řádově 10^{-22} s, a částicím, i když letí často rychlostí blízkou rychlosti světla, trvá jednotky až desítky ns (1 ns =



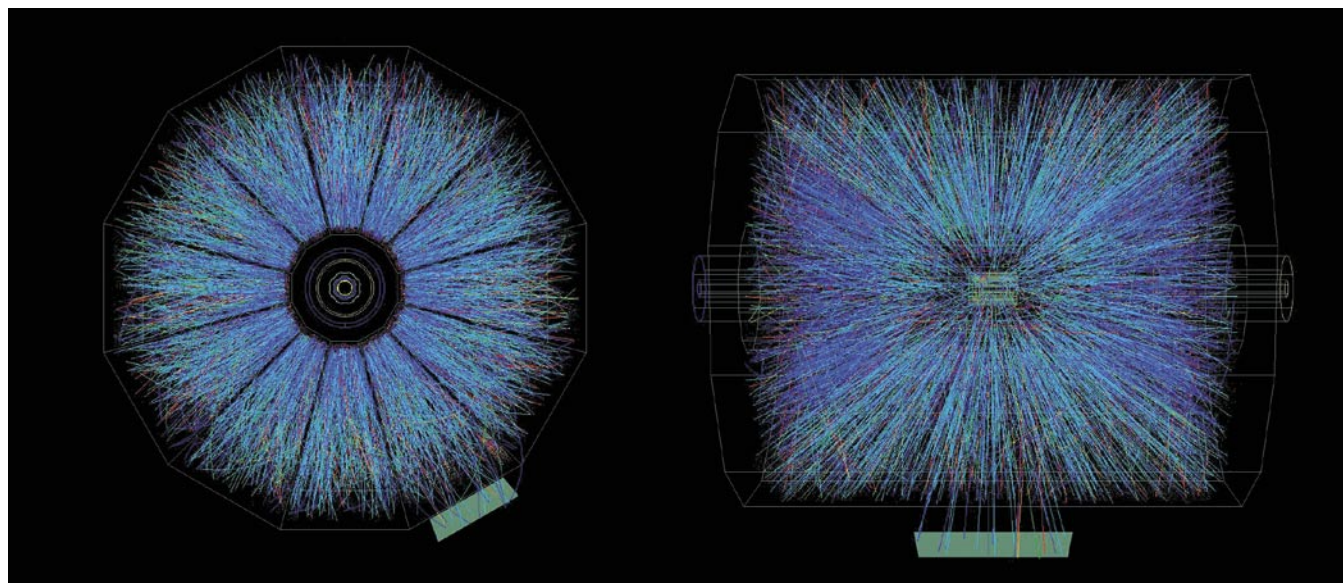
10^{-9} s), než doletí k detektorům.⁵ Stáří vesmíru v době, kdy se v něm vytvořila nejlehčí jádra (těžší pak vznikla ve hvězdách) bylo okolo 200 s. Současné stáří vesmíru je 14 miliard let, to znamená okolo $4 \cdot 10^{17}$ s. Poměr mezi dobou, po kterou existuje horká a hustá hmota při srážce jader, a dobou, kdy o tom dostaneme signál, je srovnatelný s poměrem mezi věkem vesmíru v době, kdy se tvořila první atomová jádra, a jeho současným stářím, kdy sledujeme dozvuky této éry. V obou případech se dostáváme do situace, která připomíná pohled Alenky na škleb kočky Šklíby z úvodního citátu. Alenka měla tu výhodu, že kočku Šklíbu viděla v době, než z větší části zmizela. My jsme závislí pouze na pohledu na zůstávající škleb a z něj musíme určit, jak naše kočka Šklíba vypadá.

Hledání nového exotického stavu – kvark-gluonového plazmatu

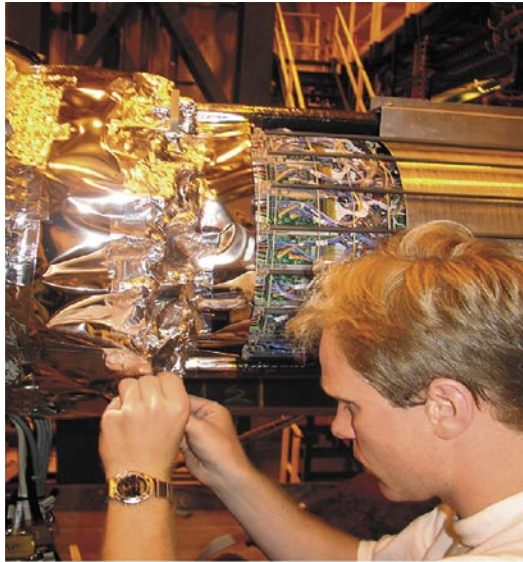
V laboratoři CERN bylo u urychlovače SPS postaveno několik velmi složitých systémů

5. Srovnání fázového přechodu mezi vodou a vodní párou a fázového přechodu mezi jadernou kapalinou a hadronovým plynem. V ukázce fázového přechodu jaderné hmoty jsou využita měření ze tří různých laboratoří.

6. Při srážce dvojice jader zlata na urychlovači RHIC vznikají tisíce částic, které je třeba systémem detektorů zachytit. Vpravo je pohled z boku. Srážka zaznamenaná experimentem STAR – zdroje tohoto experimentu.



7. Na experimentech se podílejí i fyzikové z našeho ústavu. Jeden z našich studentů připravuje křemíkové driftové detektory experimentu STAR.



detektorů, které měly prokázat vznik nového stavu hmoty: kvark-gluonového plazmatu. Spektra různých částic nám přinášela informace o teplotě v rozdílných etapách průběhu srážky a jejich úhlové rozdělení o rozložení tlaku. Mnoho se také můžeme dovědět srovnáním počtu vznikajících částic odlišného druhu. Experimenty, které se prováděly, hledaly a pozorovaly několik signálů vzniku systému složeného z volných kvarků a gluonů. Ukázaly, že při srážkách se nám daří dosáhnout hustoty a teploty, která je potřebná ke vzniku kříženého stavu hmoty. Potvrdily, že se rodí více takzvaných podivných částic, a naopak vzniká méně částic, kterým se říká J/ψ , než by se očekávalo bez vzniku volného systému kvarků a gluonů. Problémem bylo, že tyto jevy dokázali teoretici vysvětlit i tak, že obyčejný hadronový plyn získává při vysokých teplotách a tlacích některé neobvyklé vlastnosti. Přesto však představitelé sedmi experimentů na urychlovači SPS v laboratoři CERN vyhlásili v roce 2001, že dohromady se jejich pozorování nedají vysvětlit jinak než vznikem kvark-gluonového plazmatu.

Velká část fyzikální komunity však stále měla pochybnosti. K tomu, aby se podařilo beze vší pochybnosti prokázat existenci kvark-gluonového plazmatu a zkoumat jeho vlastnosti, bylo třeba srážet jádra s ještě větší energií. Takovou energii poskytl nový urychlovač RHIC, který byl postaven v laboratoři v Brookhavenu (USA). Tamější urychlovač sice neurychluje jádra na vyšší energie než urychlovač SPS, ale dokáže svazek jader rozdělit na dvě části a urychlit je proti sobě. Takové využití vstřícných svazků umožnilo ve srážce zís-

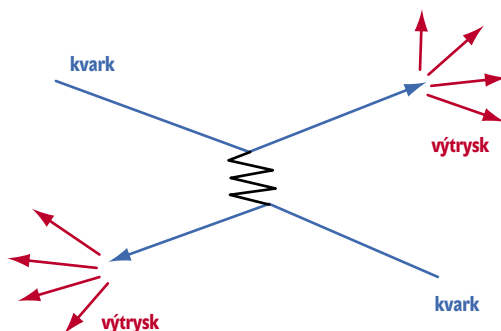
kat desetkrát více energie, než tomu bylo na urychlovači SPS. To vedlo kromě jiného k pozorování jevu, který by mohl být přímým důkazem vzniku exotického kvark-gluonového plazmatu.

Potlačení hadronových výtrysků – konečný důkaz?

A co nového bylo na urychlovači RHIC pozorováno? Při energiích srážejících se jader, které jsou na urychlovači RHIC dosaženy, se již nesrážejí nukleony, ale součásti těchto nukleonů – některé z kvarků, které nukleon tvoří. Po jejich srážce a rozptylu dostáváme dva kvarky, které se pohybují v opačném směru vůči sobě a mohou mít velmi velkou složku rychlosti (hybnosti) ve směru kolmém na směr pohybu srážejících se jader. Jak jsme si již zmínili, v normálních podmínkách nemohou existovat kvarky samostatně. Zároveň má každý z této dvojice kvarků velmi vysokou energii a produkuje značné množství různých kvarků a antikvarků, které se následně spojují do elementárních částic (hadronů). Velká část kinetické energie se tak přemění v klidovou energii (hmotnost) takto vzniklých elementárních částic. V konečném důsledku dostaneme dva výtrysky (z angličtiny „jety“) velkého množství elementárních částic, které se pohybují ve směru původních rozptýlených kvarků. Celková energie částic ve výtrysku je rovna kinetické energii původního kvarku. Rozdílné chování takto rozptýlených kvarků a tvorby výtrysku při pohybu v kvark-gluonovém plazmatu ve srovnání s pohybem v normální hadronové hmotě by mělo být tím otiskem palce pachatele na místě činu. V kvark-gluonovém plazmatu by mělo docházet k velmi silným ztrátám energie a potlačení produkce výtrysků. Pokud srážka dvojic kvarků nastává v určité vzdálenosti od středu vzniklé horké a husté oblasti, tak alespoň jeden z kvarků (výtrysků) musí v tomto prostředí překonávat značnou vzdálenost. V případě kvark-gluonového plazmatu je velká pravděpodobnost, že při prodírání okolní hmotou ztratí většinu energie a nepodaří se mu dostat se ven. Pak bychom ale měli pozorovat daleko méně dvojic protilehlých výtrysků, než je tomu v normálním hadronovém plynu, kde k takovým ztrátám energie nedochází. A právě takové potlačení tvorby výtrysků pozorovaly experimenty STAR, BRAHMS, PHOENIX a PHOBOS, pracující na urychlovači RHIC při srážkách jader zlata již v roce 2002. S vyhlášením svých pozorování ale fyzikové čekali další rok.

Proč váhali fyzikové z Brookhavenu s vyhlášením svých závěrů o dalším důkazu vzniku kvark-gluonového plazmatu tak dlouho? Chyběl jim ještě jeden krok, aby se jejich důkaz stal nezpochybnitelným. Naše znalosti chování i normální hadronové hmoty a interakce kvarku (výtrysku) v ní jsou značně útržkovité. Proto bylo třeba připravit situaci, kdy vzniká dvojice výtrysků uvnitř prostředí, o kterém zaručeně víme, že jde o normální hadronovou (nukleonovou) hmotu. A takové prostředí si fyzikové připravili při srážkách

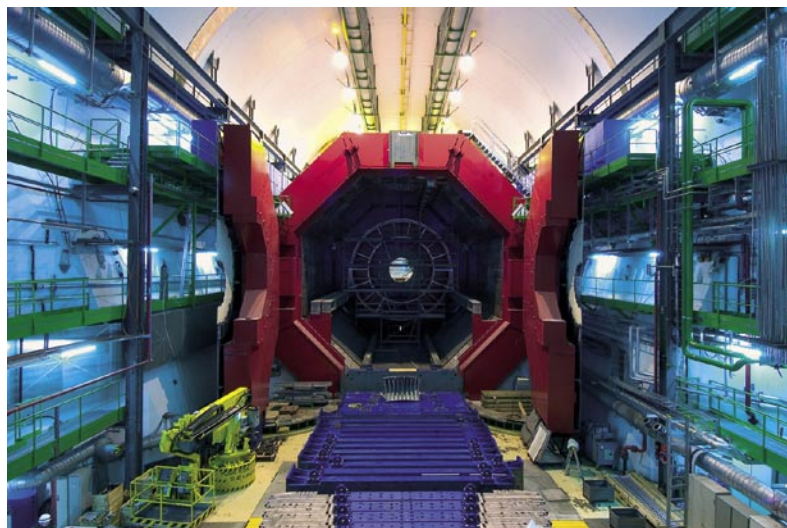
8. Při hluboce nepružném rozptylu kvarků probíhajících při srážkách hadronů a jader za velmi vysokých energií vznikají dvojice výtrysků hadronů. Obrázek zhotovil M. Holub.



deuteronu (ten má pouze dva nukleony) s jádrem zlata. V takovém případě kvark-gluonové plazma nevzniká (deuteron je na to příliš malý), ale zároveň máme dostatečný objem normální hadronové hmoty, kterou nám poskytuje jádro zlata. Na experiment se srážkami deuteronu se zlatem se čekalo. Díky srovnání produkce dvojic výtrysků ve srážkách protonu s protonem, deuteronu se zlatem a zlata se zlatem můžeme teprve získat kýžený důkaz. Ve srážkách zlata se zlatem se pozoruje potlačení produkce dvojic výtrysků oproti předpokladům odvozeným ze srážek protonů. Toto potlačení se však nepozoruje ve srážkách deuteronu se zlatem a zdá se, že pozorování vedou k jedinému závěru: Při srážkách zlata se zlatem za tak vysokých energií, jichž se dosahuje na urychlovači RHIC, vzniká úplně nová forma hmoty, jejíž některé vlastnosti jsou velmi blízké vlastnostem předpokládaného kvark-gluonového plazmatu.

Je nově objevený stav hmoty opravdu kvark-gluonové plazma?

V brookhavenských experimentech se dále zkoumaly vlastnosti nového exotického stavu hmoty. Nedávno publikovaná souhrnná zpráva o výsledcích získaných za první roky práce urychlovače RHIC potvrdila, že teplota a hustota energie převyšují hodnoty nutné pro vznik kvark-gluonového plazmatu. Jak už bylo zmíněno, potlačení produkce výtrysků hadronů ukazuje na to, že opravdu vzniká systém volných kvarků a gluonů. Ovšem vlastnosti tohoto systému se zdají být velice odlišné od toho, co si fyzikové představovali na počátku. Dřívější představa byla taková, že uvolněné kvarky a gluony spolu interagují jen velmi slabě a nový stav hmoty se chová jako ideální plyn. Experimenty na urychlovači RHIC ukázaly, že v oblasti dosažených teplot není interakce uvolněných kvarků a gluonů slabá a hmota spíše připomíná ideální kapalinu, která má velmi podivné vlastnosti – je například supratekutá. Zároveň bylo pozorováno, že přechod mezi hadronovým plynem a kvark-gluonovým plazmatem je málo výrazný a nejspíše pouze druhého druhu.

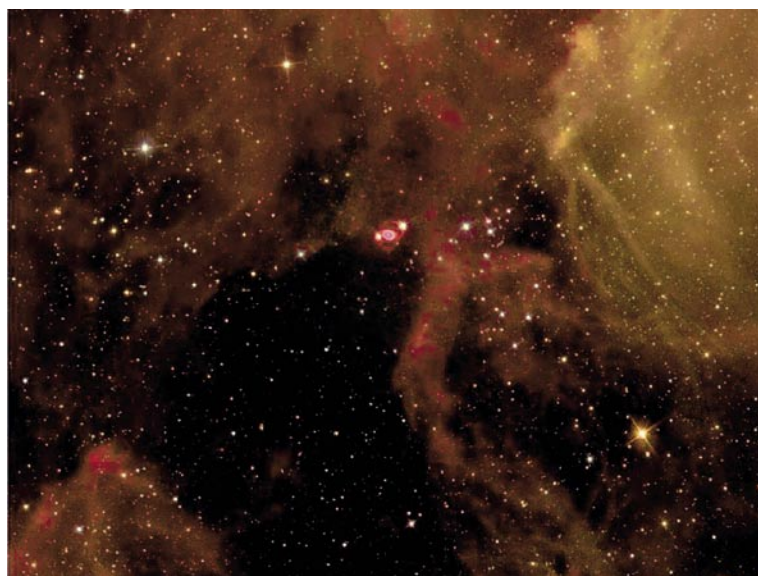
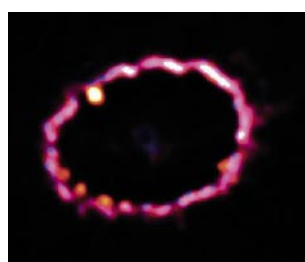
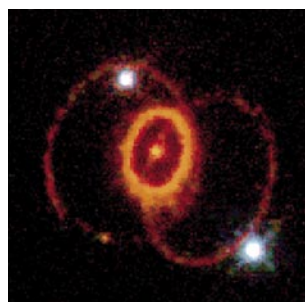


Nemohou tedy asi existovat obě fáze společně. Situace je daleko složitější, než se původně předpokládalo. Při dosažených teplotách dostáváme novou exotickou formu hmoty, která je složena z uvolněných kvarků a gluonů. Opakuji: její chování je však na rozdíl od původních předpokladů blízké chování kapaliny. Teorie však nadále předpokládají, že při ještě vyšších teplotách by se měl systém volných kvarků a gluonů přece jen začít chovat jako ideální plyn. Proto mezi odborníky probíhá diskuse, zda by se pozorovaný stav neměl nazvat jinak a název kvark-gluonové plazma „ušetřit“ pro systém z volných kvarků a gluonů při ještě vyšší teplotě, kdy se bude chovat jako plyn, tedy bude blíže našim původním představám.

A co dále?

Zpracována je jen menší část doposud získaných dat z experimentů na urychlovači RHIC. Další analýza i nové experimenty by měly přinést odpovědi na dosud nezodpovězené otázky a podrobně zkoumat vlastnosti nového stavu jaderné hmoty. Musí se prozkoumat stavová rovnice nového stavu hmoty, aby se mu podle toho již s konečnou platností mohl přisoudit název. Je třeba určit i přesný charakter fázového přechodu. To, co

9. Experiment ALICE budovaný společně s urychlovačem LHC v laboratoři CERN by měl být ještě výkonnějším nástrojem pro studium velmi horké a husté jaderné hmoty (snímek CERN).



10. Pozůstatek po supernově 1987A fotografovaný v roce 2004 pomocí Hubblova teleskopu (snímek NASA). Hmota vyvržená při výbuchu naráží na oblaka plynu vzniklých v posledních etapách života hvězdy.



11. Světlo z této krásné spirální galaxie NGC1350 se vydalo na cestu před 85 miliony let. Snímek ESO.

12. Krabí mlhovina skrývající ve svém nitru pulzar (neutronovou hvězdu) je pozůstatkem po supernově (snímek NASA).

se nepodaří v těchto experimentech, by mohl prostudovat experiment ALICE (česky Alenka), který se staví v laboratoři CERN na budovaném urychlovači LHC. Urychlovač bude (stejně jako urychlovač RHIC) využívat vstřícné svazky. Dostupná energie bude ještě 25krát větší než u urychlovače RHIC. Dá se očekávat, že se otevře prostor pro řadu nových, zajímavých, možná i velmi nečekaných předpovědí a teorií.

Supernovy

V přírodě se velmi horká a hustá hmota vyskytuje při výbuchu supernov, v neutrono-

vých hvězdách, a byla tady na počátku vesmíru. Znalost chování zmíněné hmoty je nutná pro pochopení těchto objektů. K výbuchu supernovy dochází v konečných stádiích života velmi hmotných hvězd v době, kdy hvězda spálí své dostupné jaderné palivo v termojaderných reakcích. Při svém vzniku se hvězda skládá hlavně z vodíku. Skoro čtvrtina její hmoty je helium a jen nepatrný zbytek jsou těžší prvky, které pocházejí od předchozích generací hvězd. Postupně se v nitru hvězdy slučují jádra lehkých prvků na prvky stále těžší. Při tom se uvolňuje energie. Čím těžší prvky se mají slučovat, tím vyšší teplota prostředí je potřeba. U velmi hmotných hvězd pak dostaneme ke konci jejich života strukturu složenou ze slupek. Uvnitř je jádro složené ze železa, což je poslední prvek, který takto může vzniknout. Nad ním jsou postupně umístěny slupky ze stále lehčích prvků. Slučováním jader železa nebo železa s jinými prvky už nelze získat energii. Hvězda přestává produkovat energii, která jí pomáhala vzdorovat gravitační síle, a její nitro se začíná vlivem gravitace hroutit. Struktura umírající hvězdy je složitá a složitý je i průběh kolapsu, i když probíhá ve velmi krátkém čase (v řádu milisekund). Poloměr vnitřní části, která je už tak velmi stlačená, se v této době zmenší přibližně z 5000 km na 20 km. Z našeho pohledu je důležité, že v určitém okamžiku přesáhne hustota hmoty v nitru hvězdy hustotu jadernou. Hustota hroutícího se objektu se dále zvyšuje. Při určité hustotě, která závisí právě na vlastnostech horké a husté jaderné hmoty, dojde k „odrazu“ a hroutení u vnější vrstvy hroutícího se vnitřku hvězdy se přemění v expanzi. Vytvoří se takzvaná rázová vlna a její interakci s obálkami vnějších částí hvězdy pozorujeme jako výbuch supernovy. Vnitřní část se v závislosti na její hmotnosti přemění na neutro-



novou hvězdu nebo se zhroutí v černou díru. Hroučící se nitro hvězdy si můžeme představit jako obrovskou pružnou gumovou kouli. S určitou silou ji můžeme stlačovat jen do určitého okamžiku, pak odskočí a velikost odskoku je dána pružností materiálu koule. Čím je pružnější, tím je větší i odskok. Stejně tak u supernovy, čím „pružnější“ je hustá a horká jaderná hmota, tím větší je i výbuch. Abychom mohli popsat a simulovat průběh výbuchu supernovy v počítači, musíme znát pružnost (stavovou rovnici) jaderné hmoty při různých teplotách a hustotách, kterých hroučící se hmota postupně dosahuje. Musíme znát příslušné fázové přechody a jejich vlastnosti. Naše znalosti jsou v této oblasti zatím velice kusé. Stavová rovnice nám z nich vychází málo pružná a v počítačových simulacích nám supernovy vybuchují velice špatně.

Neutronové hvězdy

Neutronová hvězda, která může vzniknout při výbuchu supernovy, skrývá ve svém nitru také jadernou hmotu ve velmi hustém stavu. Těsně po svém vzniku je i horká, ale postupně chladne. Neutronové hvězdy, které dnes pozorujeme jako pulzary, jež k nám vysílají své radiové signály, jsou uvnitř tvořeny chladnou jadernou hmotou, složenou převážně z neutronů. V hlubším nitru by se mohly vyskytovat i jiné hadrony a v nitru nejhlubším také chladné kvark-gluonové plazma. Studovat velmi hustou, ale studenou jadernou hmotu na urychlovačích nelze a její vlastnosti musíme zatím získávat extrapolacemi z oblastí našemu bádání dostupnějších. Proto je také popis takové hmoty ještě složitější. Znalosti stavové rovnice všech fází jaderné hmoty, které se v neutronové hvězdě mohou vyskytovat, jsou velmi důležité pro určení její stavby, poměru mezi hmotností a poloměrem, průběhu ochlazování a dalších vlastností. Zmínil jsem se, že neutronové hvězdy pozorujeme v podobě pulzaru. Neutronová hvězda vytváří totiž magnetické pole, jehož osa se nekryje s její osou rotace. Ve směru osy magnetického pole vyzařuje radiové vlny, které tak zametají vesmírný prostor. Pokud tyto vlny zasáhnou Zemi, můžeme je pozorovat jako pulz v radiové oblasti. Z periody, s jakou se tyto pulzy u pulzaru opakují, můžeme určit periodu rotace neutronové hvězdy. Pokud je neutronová hvězda jednou složkou dvojhvězdy, existují v takové soustavě procesy, které rotaci neutronové hvězdy velmi urychlí. Ve vesmíru tak pozorujeme pulzary, které pulzují s periodou v řádu milisekund. To, jakou rychlost rotace neutronová hvězda ještě přežije, aniž by ji odstředivé síly roztrhaly, určuje právě stavová rovnice jaderné hmoty. Studium vlastností neutronových hvězd nejen při rotaci nám spolu se studiem srážek jader může přinést nezbytné informace pro pochopení těchto komplikovaných objektů.

Podivné (kvarkové) hvězdy

Supernovy a neutronové hvězdy jsou objekty, které ve vesmíru pozorujeme. Teď se zmíníme o vesmírném objektu, který je zatím

pouze hypotetický. Normální kvark-gluonové plazma, o kterém jsme až dosud mluvili, existuje jen za velmi vysokých teplot a hustot. Některé teorie předpovídají, že za určitých okolností by mohlo být kvark-gluonové plazma stabilní i za normálních podmínek. Mohlo by to být v případě, kdyby kvark-gluonové plazma obsahovalo kromě dvou typů kvarků, které se vyskytují v nukleonech, ještě jeden typ, jemuž se říká podivný. Takový kvark se vyskytuje v některých částicích (nazývaných rovněž podivné), které vznikají při srážkách na urychlovačích za vysokých energií. Kvark-gluonové plazma s příměsí podivných kvarků by mohlo být nejstabilnější fází jaderné hmoty a mluví se o něm jako o podivném kvark-gluonovém plazmatu. Pokud by taková hmota existovala, proč by nemohly ve vesmíru existovat objekty z ní složené? Takový objekt by na rozdíl od klasických vesmírných těles nedržela pohromadě gravitační síla, ale silná interakce. Připomínal by obrovský hadron. Jeho hustota by byla stejná v téměř celém objemu a na povrchu v rozmezí pouhých 10^{-14} m by byl velmi ostrý skok z hustoty atomového jádra do vakua. Vzniknout by mohl přeměnou neutronové hvězdy v případě, že by se do ní dostal malý kousek podivného kvark-gluonového plazmatu. Takový kousek velikosti srovnatelné s atomovým jádrem se anglicky nazývá „strangelet“ a česky bychom jej mohli nazvat podivnůstka. Mohl by vznikat v průběhu výbuchu supernovy. Jestliže se podivnůstka dostane do kontaktu s hmotou neutronové hvězdy složené z neutronů, začne ji přeměňovat v podivné kvark-gluonové plazma. Během minuty se celá hmota neutronové hvězdy přemění na podivné kvark-gluonové plazma a vzniká podivná (někdy se jí také říká kvarková) hvězda. Při tom se uvolní obrovské množství energie srovnatelné i větší než energie uvolněná při výbuchu supernovy. Vzniklá podivná hvězda může být v mnoha ohledech podobná neutronové hvězdě. Přesto však existuje řada odlišných vlastností, které by nám mohly pomoci mezi pozorovanými „neutronovými“ hvězdami identifikovat ty podivné. Podivná hvězda by měla být mnohem stabilnější. Pokud by se například našly pulzary s rotací rychlejší, než by tomu mohlo být u neutronové hvězdy, mohla by to být hvězda podivná. Podivná hvězda by také chladla rychleji než neutronová. Na závěr je třeba připomenout, že jak podivné kvark-gluonové plazma, tak podivnůstky a podivné hvězdy jsou hypotetické a jejich existence zatím nebyla prokázána. Je také možné, že ani existovat nemohou. Rozhodnout otázku jejich existence mohou jen další studie stavové rovnice horké a husté hmoty ve srážkách těžkých jader a pozorování vlastností co největšího počtu neutronových hvězd.

Doufáme, že další studium horké a husté jaderné hmoty na urychlovačích přinese podrobnější a přesnější poznatky. Chtěl bych zdůraznit, že na zmiňovaných experimentech pracují i čeští fyzikové a je tam plně otevřen prostor pro studenty, kteří by se chtěli do těchto velmi zajímavých bádání zapojit. ☞

6) Podrobnější popis nejnovějších objevů při studiu kvark-gluonového plazmatu viz <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/poplcan/qgp/qgp.pdf>.