

Atomární látka

Kvarkové-gluonové plazma – zárodečná polévka z kvarků a gluonů, ze které ve vesmíru vznikaly složené částice. Nacházejí-li se kvarky ve vzdálenosti menší než 10^{-15} m, chovají se jako volné (nevázané) částice a právě tuto fázi nazýváme kvarkové-gluonové plazma. Na větších vzdálenostech vytvářejí vázané celky, zpravidla mezony a baryony. Poprvé byla tato fáze látky připravena na urychlovači SPS ve středisku CERN v roce 2000. Ve vesmíru existovalo kvarkové-gluonové plazma v období do 10 mikrosekund po jeho vzniku.

Detektor Phoenix v Brookhavenské národní laboratoři. V tomto detektoru se při srážkách urychlených jader zlata vytváří kvarkové-gluonové plazma, zárodečná polévka, ze které vznikal vesmír. Zdroj: AGA.

Když se v noci podíváme na oblohu, uvidíme především hvězdy a planety. Při pohledu dalekohledem nám neuniknou hvězdokupy, galaxie a mlhoviny roztočivých tvarů. To vše je ale pouhým zlomkem celkového obsahu našeho vesmíru. Dnes odhadujeme, že svítící látka tvoří jediné procento hmoty a energie ve vesmíru. Je jistě poněkud frustrující si uvědomit, že náš svět složený z atomů není ve vesmíru tím nejdůležitějším a má pramalý vliv na jeho vývoj a budoucí osud.

Atomární látka vznikala v několika fázích. Nejprve se ze zárodečné polévky rodily v desítkách mikrosekund po počátku světa neutrony a protony. V několika minutách z nich vznikala lehká atomová jádra a 400 000 let po počátku se vytvořily i atomární obaly. Těžké prvky vznikaly až mnohem později v nitru prvních hvězd. Většina z nich explodovala jako supernovy a vyvržená látka obohatila okolní prostředí o těžké prvky. Naše tělo je tak složeno z materiálu bývalých supernov.

Atomární látka

Odhaduje se, že ve vesmíru je přibližně 5 % atomární látky, z toho čtyři díly nesvítící a jeden díl svítící. Jádra atomů jsou tvořena protony a neutrony. Obě dvě částice jsou dále složené ze tří kvarků a patří k tzv. baryonům. Můžeme tedy říci, že jádro atomu je tvořené výhradně baryony. V atomárních obalech se nacházejí elektrony, jejichž hmotnost je o tři řády menší než hmotnost neutronu nebo protonu – celková hmotnost atomu je tak dána především hmotností baryonového jádra, a proto o atomární látce hovoříme často jako o baryonové látce. K té patří ještě osamocené baryony (například protony slunečního větru nebo kosmického záření). Volné neutro-



ny se ve vesmíru nevyskytují, jsou nestabilní a jejich poločas rozpadu je 886 sekund (14,8 minuty).

Jak vypadá atomární látka? Když stojíme na podlaze, máme pocit, že je podlaha velmi pevná a neproniknutelná. Kdybychom si ale zvětšili atomy v podlaze tak, aby atomové jádro bylo veliké jako pomeranč, byl by první elektron atomárního obalu přibližně v pětikilometrové vzdálenosti. A mezi jádrem a obalem je zdánlivě pusto a prázdno. Ve skutečnosti se v tomto prostoru nacházejí fotony, polní částice elektromagnetické interakce, které udržují elektrony ve správné vzdálenosti od jádra. Naše tělo je také složené z elektronů a naše elektrony prostřednictvím dalších fotonů interagují s atomárními obaly a tím vzniká dojem „pevné půdy pod nohama“. Existují ale částice, které neinteragují elektromagneticky a atomární obaly jsou pro ně zcela průhledné. Některé částice dokonce neinteragují ani silnou interakcí a jsou pro ně z valné většiny průhledná i atomová jádra. Patří k nim například neutrino, které může prolétnout celou Zemí, aniž by jí bylo zachyceno. Jen zcela výjimečně interaguje s jádrem, které se mu postavilo do cesty, slabou interakcí. Pro některé částice je tak atomární látka zcela neproniknutelná, pro jiné se naopak chová jako síto s obrovskými děrami, kterým částice bez problémů procházejí.

Vznik neutronů a protonů

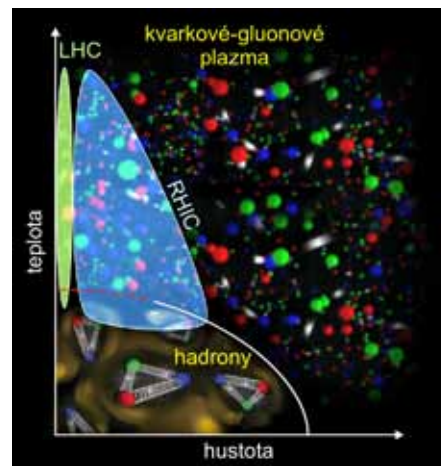
A jak atomární látka ve vesmíru vznikala? První neutrony a protony se pospojovaly ze zárodečné kvarkové-gluonové polévky přibližně 10 mikrosekund po vzniku vesmíru. Dnes tento proces umíme uměle napodobit v laboratoři.

Zárodečnou kvarkovou-gluonovou polévku umíme připravit na obřích urychlovačích. Poprvé se to podařilo ve středisku evropského jaderného výzkumu CERN v roce 2000 na urychlovači SPS (*Super Proton Synchrotron*). Bylo to po šesti letech dlouhých a vyčerpávajících experimentů. Urychlené jádro olova bylo nastřeleno na statické jádro. Po srážce se látka zahřála na teplotu 10^{12} K, což je stotisíckrát vyšší teplota než v nitru Slunce, a stlačila na dvacetinásobek hustoty atomového jádra. Ze vzniklé kvarkové-gluonové polévky posléze vznikaly protony, neutrony a další částice. Jde o jakýsi Malý třesk v laboratoři. V současnosti se kvarkové-gluonové plazma připravuje na urychlovači LHC (v detektoru ALICE) v evropském komplexu CERN a v americké Brookhavenské národní laboratoři na Long Island, na urychlovači

Plazma – kvazineutrální soubor nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování. To znamená, že se v dané látce nachází alespoň malé množství elektricky nabitých částic, které jsou v celém objemu elektricky neutrální a jsou schopny reagovat na elektrická a magnetická pole jako celek. Plazma vzniká odtržením elektronů z elektrického obalu atomárního plynu nebo ionizací molekul. S plazmatem se můžeme setkat v elektrických výbojích (blesky, jiskry, zářivky), v polárních zářích, ve hvězdách, ve slunečním větru a v mlhovinách. Přes 99 % atomární látky ve vesmíru je v plazmatickém skupenství.

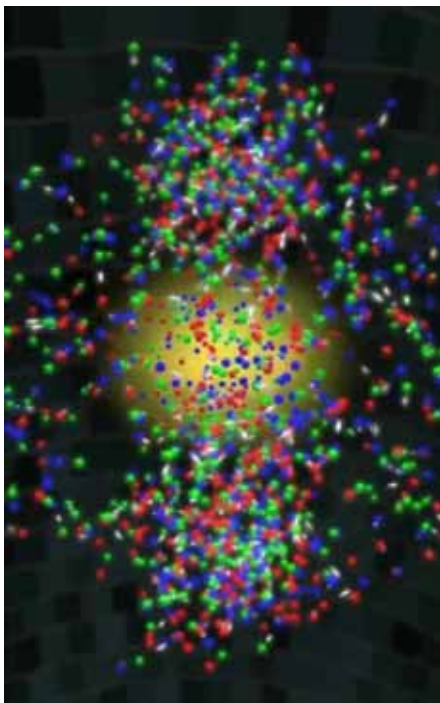
Atom – základní strukturní jednotka hmoty, jádro je složeno z neutronů a protonů, obaly z elektronů. Rozměry atomu jsou 10^{-10} m, rozměry jádra 10^{-14} m, hustota atomu je 10^{11} g/cm³, hustota jádra 10^{14} g/cm³.

Fázový diagram, patrný je přechod mezi kvarkovým-gluonovým plazmatem a hadrony (částicemi složenými z kvarků). Barevně jsou vyznačeny oblasti dosažitelné na urychlovačích LHC a RHIC. Zdroj: BNL.



Neutrino – částice patří spolu s elektrony do rodiny leptonů. Nemají elektrický náboj. Neinteragují ani silně ani elektromagneticky, proto látkou většinou procházejí. Neutrino známe ve třech provedeních – elektronová, mionová a tauonová. Alespoň jedno z neutrín má nenulovou klidovou hmotnost a proto dochází k tzv. oscilacím neutrín, samovolné přeměně mezi jednotlivými typy. Reliktní neutrino se ve vesmíru oddělilo od látky přibližně v jedné sekundě. Dnes vznikají neutrino ve hvězdách, ve Slunci, v supernovách, při interakci kosmického záření s atmosférou, v nitru Země při radioaktivním rozpadu, v urychlovačích i jinde.

Kvarková-gluonová polévka je směsicí kvarků a gluonů. Ve vesmíru byla v časech kratších než 10 mikrosekund. Zdroj: Brookhavenská národní laboratoř.



RHIC (v detektorech Phoenix a Star). V těchto experimentech se stýká kosmologie (nauka o vesmíru jako celku) s částicovou fyzikou zabývající se mikrosvětlem. V posledních letech se ukázalo, že se kvarkové-gluonové plazma příliš nepodobá plynu, jak jsme si představovali, ale spíše kapalině. Jednotlivé kvarky jsou i za těchto extrémně vysokých teplot k sobě poněkud vázány.

Vznik lehkých atomových jader

Do přibližně jedné sekundy od vzniku vesmíru neutrino intenzivně interagovalo s látkou. Na rozdíl od dnešní doby byla tenkrát látka pro neutrino neprůhledná. K dramatickému obratu došlo v jedné sekundě, kdy poklesla průměrná hodnota energie částic pod prahovou hodnotu potřebnou pro termodynamickou rovnováhu neutrín s okolním plazmatem. Látka začala být pro neutrino jako mávnutím proutku průhledná. Neutrino, která s v této době oddělila od látky, nazýváme reliktní neutrino. Jsou všudypřítomná, ale mají natolik nízkou energii, že je naše detektory nejsou schopné zatím zachytit.

Oddělení neutrín od látky mělo za následek faktický nástup slabé interakce, a tím nestabilitu volného neutronu. Neutrony se začaly rozpadat a jejich počet se snižoval. Protonů naopak přibývalo. Začal zápas neutronů o přežití. Jen ten neutron, který si chytil svůj proton, se stal stabilním. Toto období nazýváme primární nukleosyntézou. Vznikají lehká atomová jádra (deuterium, helium, lithium...). Z poměrného zastoupení lehkých jader v současnosti se dozvídáme důležité informace o raném vesmíru. Podmínky pro tvorbu jader byly vhodné přibližně od tří do pěti minut. Dříve se vázaná jádra díky nárazům energetických částic opět rozpadala, později již byly srážky částic v expandujícím vesmíru málo pravděpodobné a navíc neutronů valem ubývalo.

Vznik atomů

Přibližně 400 000 let po začátku se z volných elektronů formují kolem lehkých jader atomární obaly. Končí Velký třesk, počáteční horké plazmatické prostředí se postupně mění v neutrální svět atomů. V této fázi se vesmír stává průhledným pro záření, jež se odděluje od atomární látky. Dnes toto záření pozorujeme jako tzv. *reliktní záření* a je pro nás němým svědkem éry končícího Velkého třesku. V jeho obrazu jsou patrné fluktuace (nejčastěji mají úhlový rozměr přibližně 1°), které jsou

zárodky budoucích galaxií a kup galaxií. Není bez zajímavosti, že když reliktní záření opouštělo horkou plazmatickou látku, šlo o obyčejné světlo. Dnes, po 14 miliardách let, se díky expanzi vesmíru jeho vlnová délka prodloužila přibližně na jeden milimetr. Proto pozorujeme reliktní záření v mikrovlnné oblasti.

Z frekvenční analýzy reliktního záření lze získat řadu parametrů našeho vesmíru (křivost, stáří, zastoupení jednotlivých složek atd.). Poprvé byla tato analýza provedena z měření americké sondy WMAP v roce 2003. Dnes máme k dispozici přesnější měření z evropské sondy Planck, která uskutečnila 4 kompletní přehlídky oblohy v mikrovlnném oboru. Ze dvou byla frekvenční analýza dokončena v roce 2013, kompletní analýza bude hotová v druhé polovině roku 2014. K výsledkům ze sondy Planck se budeme v této kapitole ještě několikrát vracet.

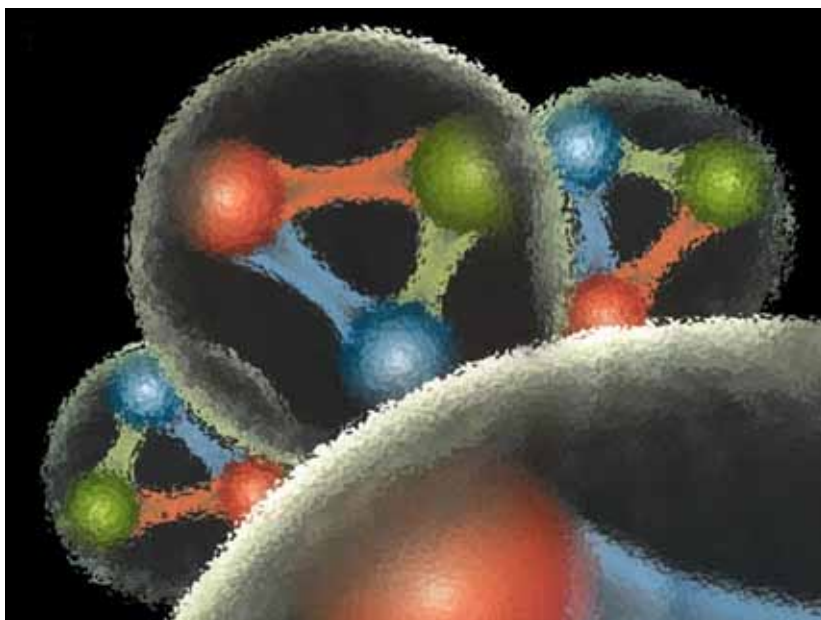
Vznik těžkých prvků

Zhruba 400 milionů let po začátku vznikají první obří hvězdy a v jejich nitru se termojadernou syntézou vytvářejí i těžká atomová jádra až po jádro železa, které je nejstabilnější. První hvězdy nežily dlouho, jejich materiál byl rozmetán do okolního vesmíru v podobě gigantických explozí, tzv. hypernov. Při těchto explozích vznikaly i prvky s většími jádry, než má železo. Přetváření lehkých jader na těžká v nitrech hvězd probíhá dodnes. Hmotnější hvězdy končí svůj život jako supernovy a těžkými jádry zásobují okolní prostor. Většina materiálu, z něhož jsme stvořeni, se do vesmíru dostala při gigantických explozích hypernov a supernov.

I v naší sluneční soustavě jsou těžké prvky a bez nich by nemohly vzniknout ani planety, ani život. Odhaduje se, že původcem této látky byla exploze supernovy, která nastala přibližně před 7 miliardami let. Z její látky před pěti miliardami

Reliktní záření – záření, které se od látky oddělilo přibližně 400 000 let po vzniku vesmíru, tedy v době, kdy se vytvářely atomární obaly prvků, a končilo plazmatickou fází existence vesmíru nazýváme Velký třesk a reliktní záření tedy pochází z období konce Velkého třesku. Dnes má teplotu 2,73 K a vlnovou délku v milimetrové oblasti. Je jedním ze základních zdrojů informací pro naše poznání raného vesmíru. V anglické literatuře se označuje zkratkou CMB (Cosmic Microwave Background, mikrovlnné záření pozadí).

Částice atomového jádra, neutrony a protony, jsou složeny ze tří kvarků. Zdroj: Josip Kleczek / Toulky Vesmírem.



Hypernova – zhroutil extrémně hmotné hvězdy (tzv. hyperobra) přímo na černou díru, doprovázené zábleskem gama a mohutnou explozí, která je ještě výraznější než u supernovy. Svítivost objektu je srovnatelná s celou galaxií. Nejvážnějším kandidátem na hypernovu v našem okolí je v budoucnosti hyperobrň hvězda Éta Carinae z naší Galaxie, která je na jižní obloze v souhvězdí Lodního kýlu.

let vznikala naše sluneční soustava. Není ale jasné, zda jsme uhnětení z materiálu jediné supernovy, nebo zda takových supernov bylo více. V každém případě platí, že lehké prvky, z nichž jsme my lidé stvořeni, mají původ v několika minutách po vzniku vesmíru, zatímco těžší prvky jsou pozůstatkem explozí supernov, které v naší části vesmíru žily před námi.

■ Petr Kulhánek, 6. 8. 2010, AB 28/2010, aktualizováno

