

Neutrinová astrofyzika

Zpracovala Michaela Kryšková

Čtyři experimenty na různých místech Země, které registrují sluneční neutrina, stále potvrzují rozdíl v neutrinovém toku vzhledem k předpovědím jaderné fyziky. Budoucí pokusy s novými detektory neutrin slibují odhalit příčinu tohoto deficitu. Plánované detektory mohou také vytvořit nové pole astronomie, založené na pozorování neutrin ze vzdálených, energetických astrofyzikálních zdrojů.

Během tří uplynulých desetiletí postoupila neutrinová astrofyzika od teoretických výpočtů k experimentálnímu odvětví. Sluneční neutrina jsou pozorována ve čtyřech podzemních detektorech a byl zachycen tok neutrin ze supernovy ve Velkém Magellanově mračnu. Pozorovaný příliv slunečních neutrin je však dva až třikrát nižší než teoretické předpovědi. Rozdíly existují ve všech čtyřech přístrojích. To vede k domněnkám, že neutrina mohou mít malé hmotnosti a mohou oscilovat mezi různými typy.

Ve dvacátých a třicátých letech vyvinuli vědci teoretický základ pro pochopení dějů, které se odehrávají ve slunečním nitru. Termonukleární reakce mezi nejllehčími prvky probíhají poblíž středu Slunce a poskytují energii, kterou Slunce vysílá již po čtyři a půl miliardy let. Hlavní formou energie je samozřejmě elektromagnetické záření, ale odhaduje se, že přibližně tři procenta energie jsou vysílána ve formě neutrin.

V průkopnickém experimentu, který probíhal 25 let, Davis a jeho spolupracovníci poprvé zachytili sluneční neutrina pomocí radiochemických postupů - terčem pro neutrina byl perchlorethylen. Další z experimentů, japonský vodní detektor *Kamiokande*, měří směr přichodu neutrin pomocí reakčních elektronů. Dva radiochemické detektory používající galium (*Galex* v Itálii a *Sage* v Rusku) zachytily hojná neutrina s nízkými energiemi (pod 400 keV), která jsou primární složkou slunečního neutrinového toku.

V únoru 1987 byla zachycena neutrina ze supernovy 1987A jako série pulsů ve dvou vodních

Čerenkovových detektorech (*Kamiokande* v Japonsku a *IMB* ve Spojených státech). Neutrina přicházela, jak se očekávalo, několik hodin před světlem z exploze. Vypočítaná energie, jež je výsledkem smrštění supernovy, je téměř tisíckrát větší, než pozorujeme jako světelné záření. Teorie naznačuje, že více než 99% energie je emitováno ve formě neutrin.

Registrace slunečních neutrin a zachycení neutrin ze SN1987A jsou dva z nejpozoruhodnějších vědeckých objevů minulého desetiletí. Poskytují potvrzení základních teorií týkajících se nitra hvězd. Detekce slunečních neutrin ukazuje, že fúzní energie je základním zdrojem energie přicházející ze Slunce.

Pozorování astrofyzikálních neutrin umožňuje zkoumat nejnvnitřnější části hvězd, husté oblasti, ze kterých nemůže uniknout světlo. Díky velmi malé schopnosti interagovat mohou neutrina z těchto oblastí uniknout; ale ze stejného důvodu je velice těžké tyto částice zachytit.

Motivace pro plánování prvního experimentu se slunečními neutrinami byla astrofyzikální - přímo testovat hypotézu, že hvězdy září a vyvíjejí se díky reakcím jaderné fúze ve svém středu. Ale začalo být jasné, že pomocí neutrin lze také zkoumat zákony částicové fyziky. To se týká především studia vnitřních vlastností neutrin.

Základní důležitost má otázka, zda mají neutrina hmotnost a zda se přeměňují (oscilují) z jednoho typu ve druhý. Předpokládá se, že jsou tři typy neutrin: elektronová (ν_e), mionová (ν_μ) a τ -neutrina (ν_τ). Slunce vytváří jen elektronová neutrina, zatímco supernovy mohou pro-

dukovat všechny tři typy. Hmotnost neutrina může poskytnout klíč k problému původu hmotností všech částic. Teorie velkého sjednocení naznačují, že silná, elektromagnetická a slabá interakce se ve velkých energetických měřítkách sjednocují a že hmotnost neutrina je nepřímo úměrná této hodnotě. Jednou cestou k ověření teorie je hledání rozpadu protonu a druhou hledání velmi malých hmotností neutrin.

Základní poznatky o kosmologii, které vysvětlují příčinu záření mikrovlnného pozadí, vedou k závěru, že existuje podobné pozadí reliktních neutrin. Jestliže nejtěžší z těchto neutrin (uvažuje se ν_τ) má hmotnost několika elektronvoltů, mohou být reliktní neutrina důležitou součástí temné hmoty.

Velmi malé hmotnosti neutrin lze ověřovat jen pomocí oscilací. Pro neutrina s hmotností větší než 10^{-2} eV jsou oscilace hledány v různých experimentech. Tyto pokusy užívají neutrina vytvořená v zemské atmosféře kosmickým zářením nebo produkovaná v laboratoři reaktory a urychlovači. Pro nižší hmotnosti neutrin je jedinou možností studium toku slunečních neutrin. Oscilace vyčerpávají tok elektronových neutrin přeměnami na ν_μ a ν_τ . Možnost přeměny může být zvětšena koherentní interakcí neutrin se sluneční látkou - tzv. MSW (Michejevův, Smirnovův a Wolfensteinův) efekt.

Některé budoucí experimenty jsou navrženy k pozorování neutrin s mnohem vyšší energií, než mají sluneční. Jedná se o neutrina ze vzdálených a málo probádaných astrofyzikálních zdrojů. Neutronové hvězdy, černé díry, jádra dalekých galaxií - tyto objekty mohou být zdroji velkého počtu neutrin.

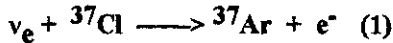
Pokračující experimenty se slunečními neutrinami

Podle teoretických výpočtů mají neutrina z proton-protonové reakce o energiích menších než 0.4 MeV tok okolo $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; vzácnější neutrina s energiemi až do 14 MeV z ${}^8\text{B}$ -rozpadu mají tok asi $6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Díky velkému rozsahu energií a toků je k výzkumu zapotřebí sady rozličných detektorů.

Chlórový detektor

Neutrína jsou zachycována ve velké nádrži obsahující 615 tun perchlórethylenu, C_2Cl_4 . Cílový izotop, ^{37}Cl , může zachytit neutrino a vytvořit radioaktivní izotop ^{37}Ar následujícím procesem :



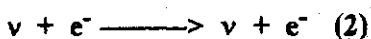
Tato reakce může probíhat pro elektronová neutrína s energií větší než 0.8 MeV. Reakce jsou registrovány počítáním radioaktivních jader ^{37}Ar . Aby se předešlo nežádoucím interakcím způsobeným kosmickými paprsky na povrchu, je experiment zaveden 1500 m pod zemí, ve zlatém dole Homestake v Leadu, Jižní Dakotě. Asi po dvou měsících na slunečním neutrinovém "světle" je utváření atomů ^{37}Ar z neutrinového zachytu ^{37}Cl přibližně vyrovnané ztrátě způsobené rozpadem. V tomto bodě teorie předvídá přítomnost 54 atomů ^{37}Ar v 615 tunách C_2Cl_4 . Průměrný počet pozorovaných atomů však dosahuje jen 17. To odpovídá produkci 0.5 atomů za den, mnohem méně než 1.5 atomů očekávaných na základě standardního slunečního modelu.

Ve slunečních neutrinových jednotkách, SNU, (1 SNU = 10^{-36} interakcí na cílový atom za sekundu) získala pozorování hodnotu 2.55 ± 0.25 SNU, což je okolo jedné třetiny teoretické předpovědi.

Kamiokande

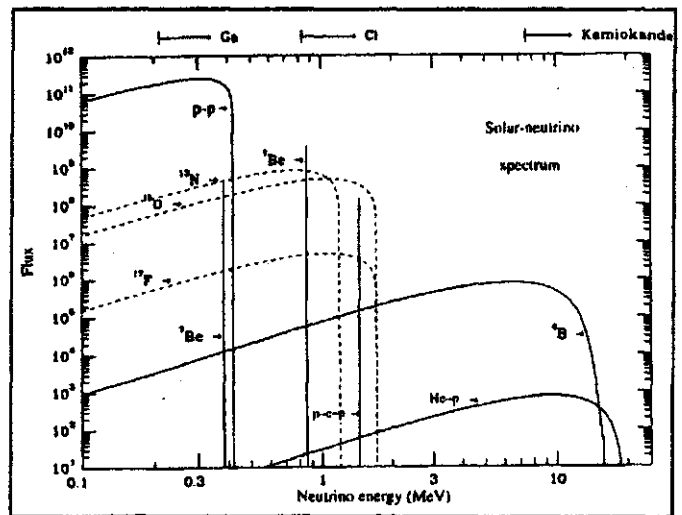
Nabitá částice pohybující se skrze hmotu rychlostí blízkou rychlosti světla může za určitých podmínek vytvářet kuželovou světelnou vlnu, nazývanou Čerenkovovo záření. Citlivé elektronky fotonásobiče zaznamenávají záblesky světla, které prozrazují přítomnost a směr takových částic.

Pokusy prováděné v dole v japonských horách užívají 3000 tunový vodní detektor *Kamiokande* s fotonásobiči schopnými zachytit elektrony, které byly zasaženy slunečními neutrinami. Pozorovaná reakce je :



Při energiích vhodných pro detekci slunečních neutrin je reakce (2) asi

Obr. 1 - Energetické spektrum předpovídané standardním slunečním modelem. Neutrinový tok je udáván v jednotkách počtu na cm^2 za sekundu a MeV; čárové toky jsou udávány v počtu na cm^2 za sekundu.



6x příznivější pro ν_e než pro ν_μ nebo ν_τ . I přes nezanedbatelné radioaktivní pozadí ze skal v dole, z vody a z kosmického záření, byla neutrína jednoznačně určena, protože elektrony zasažené neutrinami reagovaly především ve směru od Slunce k Zemi.

Kamiokande, první "aktivní" (spíše elektronický než radiochemický) experiment, ukázal, že zachycená neutrína jistě přicházejí ze Slunce a že pozorovaný tok (nad prahem kolem 8 MeV) je poloviční ve srovnání s teorií. Rozdíl mezi předpovědí a pozorováním je méně ostrý pro energie nad 8 MeV (*Kamiokande*) než pro všechny energie nad 0.8 MeV (chlórový experiment).

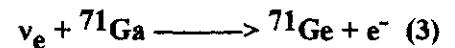
Není možné pozměnit stávající sluneční model nebo vytvořit novou teorii tak, aby současně vyhovovala výsledkům z *Kamiokande* a z chlórového detektoru. Neutrína 8B , která jsou pozorována v *Kamiokande*, odpovídají hodnotě v chlórovém experimentu okolo 3.21 ± 0.46 SNU, zatímco naměřená hodnota (viz výše) je jen 2.55 ± 0.25 SNU. V chlórovém detektoru teorie předpovídá navíc 1.2 SNU díky neutrinům s nízkými energiemi (7Be a p-p neutrína). To naznačuje, že nízkoenergetická neutrína jsou přednostně vyčerpávána nějakým novým procesem slabé interakce (což by mohl být MSW efekt).

Galiové detektory

Neutrína produkovaná základní fúzní reakcí ve Slunci (proton-protonová reakce) mají příliš nízkou energii na to, aby byla zachycena chlórovým detektorem nebo *Kamiokande*. P-p neutrína jsou však

nejpočetnějšími neutrinami vysílanými Sluncem a jejich tok je nejspolehlivěji předpovězen. Možnost použití galia jako detektoru pro tato neutrína byla diskutována již před třiceti lety. Avšak tento důležitý experiment bylo možné uskutečnit teprve v předcházejících šesti letech.

Reakce v detektoru je



a má energetický práh okolo 0.2 MeV.

Galiové detektory pracují podobně jako chlórové, extrahují a počítají radioaktivní atomy ^{71}Ge . Podle teorie by po měsíci chodu mělo být ve 30 tunách galia přítomno přibližně 16 atomů ^{71}Ge .

Jeden z galiových detektorů, *Galex*, pracuje v tunelu Gran Sasso nedaleko Říma. *Galex* užívá 30 tun galia v roztoku $GaCl_3 - HCl$. Další detektor, *Sage*, rusko-americký galiový experiment, se nachází v podzemní laboratoři pod horou Andyrši v Kavkaze. *Sage* obsahuje 60 tun taveniny galia.

Tyto detektory využívají galium ve dvou velmi odlišných chemických podobách. To poskytuje jistou důslednost v kontrole výsledků. Současná měření udávají 79 ± 12 SNU (*Galex*) a 74 ± 14 SNU (*Sage*). Hodnoty jsou opět nižší než předpověď, která pro galiové detektory činí 132 ± 7 SNU.

§§§

Problém slunečních neutrin nezmizel. Pro všechna dostupná data se nehodí žádná stávající teorie. Výsledky získané ze čtyř zmíněných detektorů mohou být vysvětleny jen v



Obr. 2 - Umělcova představa neutrinové observatoře v Sudbury, která je již před dokončením v Ontariu v Kanadě. Detektor bude umístěn 2100 metrů pod zemí a bude obsahovat 1000 tun těžké vody (D_2O). Čerenkovovo záření bude detekováno v 9500 fotonásobičích, obklopujících těžkou vodu.

případě, kdyby ν_μ nebo ν_τ měla hmotnosti okolo 0.003 eV a elektronová neutrina by se přeměňovala na ν_μ nebo ν_τ při průchodu sluneční látkou (MSW efekt). Jen budoucí experimenty mohou stanovit, zda se jedná o správné vysvětlení.

Detektory slunečních neutrin ve stavbě

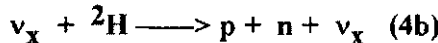
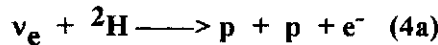
Detektory slunečních neutrin spadají do dvou tříd, "aktivní" (*Kamiokande*) a "radiochemické" (chlórový a galiový). Aktivní detektory poskytují informaci o čase příchodu, směru a energii jednotlivých neutrin a v některých případech i o typu neutrin. Jsou však komplikované a často se potýkají s radioaktivním pozadím. Radiochemické detektory jsou citlivé jen na elektronová neutrina a poskytují pouze hodnotu počtu reakcí.

Jeden radiochemický detektor a tři aktivní jsou ve stavbě. Všechny tyto detektory budou mít mnohem vyšší hodnotu počtu reakcí; pro aktivní detektory činí tento počet několik tisíc reakcí za rok. Vysoké hodnoty umožní hledat časovou závislost neutrinového toku, zejména očekávanou sezónní proměnlivost

způsobenou orbitální excentricitou Země (efekt okolo 7%).

Neutrinová observatoř Sudbury (SNO)

Deuterium ("těžký vodík", 2H , s neutronem a protonem v jádře) je výborným cílem pro neutrina. Mohou probíhat dvě interakce :



Reakce (4a) může být způsobena pouze elektronovými neutrinami, zatímco křížek v reakci (4b) platí pro neutrina všech 3 typů. Kdyby bylo registrováno více neutrin pomocí reakce (4b) než pomocí (4a), byl by to přímý důkaz přeměny elektronových neutrin na neutrina jiného typu.

SNO leží poblíž Sudbury v Ontariu, v jednom z nejhlubších dolů na západní polokouli. V hloubce 2070 m pod povrchem byla vyhloubena velká jeskyně, aby pojmula detektor obsahující 1000 tun těžké vody. SNO začne pracovat v roce 1996. Očekávaná hodnota je více než 10 reakcí za den.

Jestliže se sluneční neutrina skutečně přeměňují a oscilační parametry jsou příhodné, projeví se to rozptylovým efektem na tvaru energetického spektra elektronů v reakci (4a).

Superkamiokande

Jedná se o mnohem dokonalejší verzi současného *Kamiokande*. Tento ohromný detektor bude užívat 50 000 tun vody. Začne pracovat také v roce 1996. Změna ve tvaru energetického spektra neutrin předpovězená MSW efektem zde může být pozorována pomocí spektra energií rozptýlených elektronů.

Superkamiokande i *SNO* registrují pouze neutrina s energiemi nad 5 MeV.

Borexino

Borexino bude první aktivní detektor s cílem pozorovat tok neutrin s nízkými energiemi díky elektronovému záchytu na jádru berylia. Detektor obsahuje standardní scintilační kapalinu. Jestliže MSW inter-

pretace je správná, bude pozorovaný tok 7Be neutrin velmi redukován.

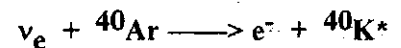
Jódový detektor

Jódový radiochemický detektor (^{127}I) bude podobný chlórovému, ale očekává se vyšší počet reakcí na cílový atom za den. Plánovaný 100 tunový detektor je nyní ve stavbě v dole Homestake poblíž současného chlórového experimentu a začne pracovat v polovině roku 1995.

Byla prováděna kalibrační měření - zkoumala přeměnu ^{127}I na ^{127}Xe , vyvolanou neutrinami. Tyto pokusy jsou nutné k stanovení relativní citlivosti přístroje na 7Be a 8Be neutrina.

Vývoj nových detektorů slunečních neutrin

5000 tunový detektor *Ikarus* bude instalován v laboratoři Gran Sasso a měl by zahájit činnost v roce 1998. *Ikarus* je založen na inverzním β -procesu :



Detektor užívá kapalného argonu s cílem měřit produkované elektrony a gama paprsky z rozpadu excitovaného stavu draslíku $^{40}K^*$.

§§§

Hlavním budoucím cílem je měřit energii a čas příchodu neutrin s nejnižší energií, p-p neutrin, která jsou registrována radiochemickým postupem v galiových detektech.

Neutrino s vysokými energiemi

Tato neutrino mají energie nad 1 TeV ($=10^{12}$ eV = 10^6 MeV). Mohou být vytvářena vysoce energetickými srážkami mezi jádry nebo mezi protony a fotony, které vyrábějí sekundární částice. Mezi ně patří piony a miony, které vysílají neutrina jako produkty svého rozpadu.

Srážky jsou předpokládány v dvojhvězdných systémech, kde je jedna složka neutronovou hvězdou a padá na ní hmota z druhé složky. Srážky se také mohou odehrávat v aktivních galaktických jádrech (AGN).

Tok vysoce energetických neutrin z takových zdrojů však nemůže být přesně vypočten. Teprve hledáním

astrofyzikálních neutrin ověříme procesy, jež se odehrávají hluboko v nitrech hvězdných systémů.

Neutrina mohou být registrována pomocí reakce mionového neutrina s jadernou částicí - produktem je nabitý mion. Tento mion s energií několika TeV bude cestovat mnoho kilometrů v zemi nebo ve vodě. Rychle se pohybující miony prozradí modrý záblesk Čerenkovova záření, který se vytvoří při průchodu mionů látkou, konkrétně vodou nebo ledem.

Detektory s účinnými oblastmi několika set čtverečních metrů byly postaveny v dolech; stavějí se čtyři nové přístroje s oblastmi okolo 20 000 m² a plánují se přístroje s rozsa- hem 1 km².

Dosud nebyla pozorována žádná neutrina ze zdrojů mimo sluneční soustavu, s výjimkou neutrin ze supernovy SN1987A. Odhady toků astrofyzikálních neutrin ze zdrojů jako např. AGN naznačují, že pro účelnou registraci je zapotřebí oblast větší než 0.1 km². Navíc je nezbytná velká tloušťka detektoru. Těmto požadavkům vyhovuje pouze užití velkých vodních mas - jezer, moří, oceánů - nebo polárního ledu.

První přístroje navržené speciálně pro detekci vysoce energetických neutrin jsou nyní ve stavbě na Sibíři v Bajkalském jezeře, poblíž Havajských ostrovů v oceánu (*Dumand*), na jižním pólu v silném polárním ledu (*Amanda*) a ve Středomoří poblíž Pylosu v Řecku (*Nestor*).

Neutrinová astronomie však bude potřebovat teleskop s efektivní mionovou registrační oblastí nejméně 1 km². Dva z hlavních cílů takového teleskopu jsou: 1) hledání neutrin z procesu anihilace slabě interagujících částic temné hmoty a 2) pozorování jednotlivých AGN s dobrou statistikou.

Čtyři experimenty ve stavbě představují 50 násobný nárůst velikosti prvních detektorů, ale je potřebný další takový vzrůst k dosažení požadované citlivosti.

§§§

Astronomie posledních padesáti let se rozvinula od optické až k astronomii zkoumající celé elektromagnetické spektrum. Neutrinová astronomie a astrofyzika otevírá nové

okno do vesmíru. Budeme schopni nahlížet do nejhlubších částí hvězd a galaxií. Neutrinová astrofyzika je předzvěstí nových možností výzkumu pro 21. století.

Literatura :

"Progress and prospects in neutrino astrophysics" - J. N. Bahcall, K. Lande, L. Wolfenstein et al., Nature, vol. 375, 4. květen 1995

"Neutrinos and Sun astrophysics" - G. Berthomieu, J. Provost, P. Morel & Y. Lebreton, Astronomy & Astrophysics, vol. 268, 1993

"Stručná historie času" - Stephen W. Hawking, Mladá Fronta 1991

Společnost Astropis

vydala sbírku básní s kosmickým nádechem

HVĚZDOTŘESENÍ

autora Zdeňka Potměšila
(viz báseň v A 3/94)

Sbírka má 42 stran A5 a stojí 26 Kč.

Objednávky přijímá redakce.

Dovolena s dalekohledem 95

se koná od 19. do 27. srpna 1995 v zařízení letního tábora ve Zhořci u Nečtin (okres Plzeň-sever)

Dovolena s dalekohledem je určena majitelům amatérské astronomické techniky a jejich rodinám či přátelům. Přihlásit se může samozřejmě i jednotlivec. Dalekohled, případně měřicí zařízení je pro účastníka, resp. celou jeho rodinu podmínkou účasti. Skutečně vážný zájemce, který stojí o společný pobyt pod oblohou a vzájemnou výměnu zkušeností, se však může zúčastnit třeba i s vypůjčeným dalekohledem.

Zkušenosti z minulých let ukázaly, že z připravovaného programu si vyberou skutečně všichni starší 1 roku. Letos budou pro zájemce připraveny astronomické přednášky a promítání astronomických filmů, výlety, táborák, tradiční tombola (tentokrát budeme hrát mj. o okulary firmy ATC Pterov v ceně 10 000 Kč a o zahraniční dalekohledy dovezené firmou Dalekohledy Matoušek v ceně 10 000 Kč), obchodování na burze (prodej publikací, ale také si každý bude moci přivést a prodat cokoliv s astronomií spojeného) a další. Také děti nepřijdou zkrátka - je pro ně připraven velmi pestrý program.

Předpokládaný maximální počet účastníků je 80. Podrobné informace a přihlášku si můžete vyzádat na adrese Hvězdárna a planetárium hl.m. Prahy, Petřín 205, 118 46, Praha 1, telefon 02/24 51 07 09-11.

Pavel Suchan

CORONA PRAGENSIS

ve spolupráci s pražskou pobočkou ČAS
si Vás dovoluje pozvat na výstavu astronomického
softwaru pod názvem

> ASTROSOFT 2000 <

výstava se bude konat koncem října nebo začátkem listopadu
v pražském planetáriu (přesný termín se dozvíte
z astronomického tisku)

svůj stánek bude mít na výstavě i Společnost Astropis