

Neutrinové okno do vesmíru

Vladimír Wagner

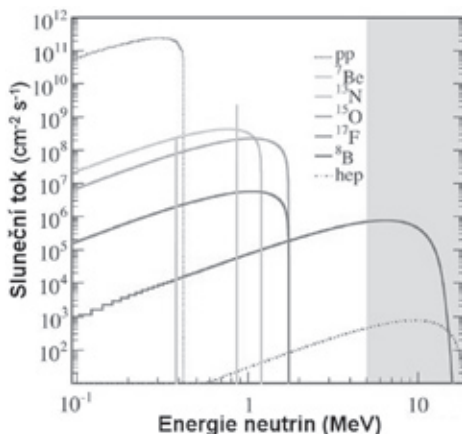
Neutrína jsou částicemi, které jen velice slabě interagují s hmotou. To jednak skrývá velký potenciál pro naše poznání vesmírných objektů a dějů, zároveň však přináší problémy při jejich detekci. Efektivní detekce neutrin by nám mohla pomoci nahlédnout do nitra hvězd i supernov. Vznik neutrin velmi často doprovází ty vesmírné děje, při kterých se uvolňuje velké množství energie, a jejich schopnost proniknout i velmi hustým prostředím nám dává možnost studovat hmotu v extrémně hustém a horkém stavu. Umožnila by nám nahlédnout dokonce i do nitra naší rodné planety, což je úkol velice náročný.

Zachycování neutrin je extrémně náročné a i to je důvod, proč musí být jejich detektory tak velké. Podstatná není ani tak velikost, ale spíše kolik protonů, neutronů a elektronů, se kterými neutrína mohou interagovat, detektor má, tedy spíše hmotnost jeho citlivého objemu. Je tomu tak zvláště v případě, kdy chceme zachytit neutrína přicházející z vesmírných objektů, které jsou ve velkých vzdálenostech. Intenzita izotropně vyzářených neutrin klesá zhruba s kvadrátem vzdálenosti od jejich zdroje. Dalším problémem je, že řada konečných produktů reakcí jiných částic je podobná těm, které vyvolávají neutrína. Tyto reakce však probíhají s pravděpodobností o mnoho řádů větší než je pravděpodobnost reakcí neutrin. Proto se detektory neutrin umísťují hluboko do podzemí, kam jiné částice než neutrína těžko pronikají, a jednou z nejdůležitějších činností je potlačení a odlišení různých nežádoucích reakcí.

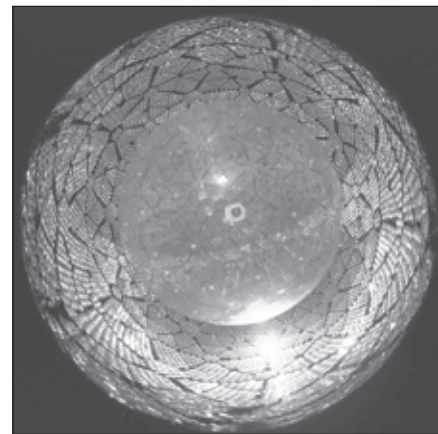


První detektor slunečních neutrin R. Davise Jr.

© R. Davis Jr., BNL



Vypočtené spektrum slunečních neutrin



Detektor SNO využíval těžkou vodu, po rekonstrukci na SNO+ se bude využívat kapalný scintilátor

ty, s jistou pravděpodobností přemění během svého letu k detektoru na neutrino jiného typu, což je specifický kvantový jev, který v našem klasickém makroskopickém světě možný není a který by bez nenulové a různé hmotnosti jednotlivých neutrin neprobíhal.

Různé typy reakcí neutrin s hmotou

Konkrétní možnosti interakce neutrin s hmotou můžeme rozdělit do dvou skupin. Do jedné patří reakce specifické pro různé typy neutrin a do druhé ty, které probíhají pro všechny typy.

Nejdříve se podíváme na reakce, které *odlišují jednotlivé typy neutrin*. První sada reakcí s atomovými jádry je možná pouze pro elektronové neutrino či antineutrino. V případě, že elektronové neutrino zasáhne jádro, může v něm přeměnit neutron na proton a vyprodukovat elektron. Dostaneme tak jádro se stejným počtem nukleonů, ale bude se jednat o jiný prvek s počtem protonů o jedničku větším než byl původní (plus zmíněný elektron). K detekci pak využijeme buď zmíněné radioaktivní jádro nebo elektron. Při stejné situaci v případě reakce elektronového antineutrína s jádrem se jeden jeho proton přemění na neutron a vznikne pozitron. Tyto sady reakcí se často označují jako inverzní rozpad beta. V obou případech mohou proběhnout jedině tehdy, pokud má neutrino nebo antineutrino dostatek energie, aby konkrétní reakci způsobilo. Tato energie je dána vlastnostmi jádra, se kterým reakce

RNDr. Vladimír Wagner, CSc. (*1960) vystudoval jadernou fyziku na MFF UK. Pracuje v Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži, kde se věnuje srážkám těžkých iontů urychlených na relativistické energie a možnostem přeměny jaderného odpadu. Přednáší na JFI ČVUT a též popularizuje jadernou a částicovou fyziku.

probíhá a v extrémním případě se může blížit k nule. Můžeme tak detekovat i neutrina s velmi nízkými energiemi a detektory, které tyto reakce využívají, jsou zaměřeny právě na oblast relativně nízkých energií neutrin. Bohužel se při detekci ztrácí informace o směru příletu a energii původního neutrina.

Další možné reakce, které odlišují různé typy neutrin, jsou reakce neutrin s jádry nebo elektrony, při kterých dochází k přeměně neutrina na odpovídající nabitý lepton (elektron, mion nebo tauon). V tomto případě se jedná o možnost detekce neutrin s vyššími energiemi. Při velmi vysokých energiích neutrin se v reakcích s hmotou uvolňuje hodně energie a může vznikat velké množství dalších částic (tzv. spršky částic). Vznikající nabitě částice můžeme detekovat pomocí ionizace v materiálu detektoru. Částice s dostatečně vysokou energií, které se pohybují rychlostí větší, než je rychlost světla v materiálu detektoru, pak mohou být detekovány pomocí *Čerenkovova záření*. V tomto případě se informace o směru příletu neutrina alespoň částečně zachovává, čím je energie neutrina vyšší, tím přesněji. Pokud se v detektorech využívá tato reakce, lze zjistit polohu vesmírného zdroje neutrin na obloze a je možné zhruba určit i energii původního neutrina.

Mezi typy reakcí, které *nerozlišují typ detekovaného neutrina*, patří pružný a nepružný rozptyl neutrin. Pružný rozptyl na elektronech nebo na jádrech lze využít pro detekci neutrin s velmi nízkou energií. Neutrino může předat objektu, od kterého se odrazí, tím více energie, čím je objekt lehčí. Nejvýhodnější je využívat pružný rozptyl na elektronech, i při něm však předává neutrino jen část své energie. Energie odražených elektronů či jader, na kterých se neutrino rozptyluje, je ještě daleko menší než původní energie neutrina, což znesnadňuje konstrukci detektoru, který by odražená jádra a elektrony zaznamenal. Zatím existují pouze návrhy experimentů s možností zhruba určit i nízkou energii neutrina a přibližně odhadnout i směr jeho příletu.

Při nepružném rozptylu se část kinetické energie neutrina přemění například na energii potřebnou k rozbití deuteronu, kterou zjistíme detekcí uvolněného neutronu. V dalších případech dochází k reakci s emisí gama záření, jehož fotony pak můžeme využít k identifikaci neutrina. V tomto případě se informace o směru příletu neutrina ztrácí. Vysokoenergetická neutrina pak mohou předat jádru či elektronu velkou hodnotu energie. V sekundárních reakcích dojde k produkci velkého množství částic a vzniku už

zmíněné spršky částic. Směr pohybu spršky je zhruba stejný jako směr pohybu původního neutrina a lze také určit energii původního neutrina z celkové energie částic ve spršce.

Detekce neutrin ze Slunce

Prvním vesmírným objektem, jehož neutrina byla zachycena, se stalo Slunce. V jeho nitru vznikají elektronová neutrina nejvíce v jaderných reakcích, při kterých se přeměňuje vodík na helium. Během těchto přeměn se musí část protonů přeměnit na neutrony a to je možné pouze za současného vzniku elektronových neutrin. Příspěvek ostatních jaderných reakcí k produkci neutrin je mnohem menší.

Na připojeném obrázku jsou jednotlivé příspěvky do spektra neutrin vyzařovaných Sluncem podle současných slunečních modelů. Je vidět, že neutrina ze Slunce mají hodnoty energií až do 20 MeV. Celkový tok slunečních neutrin je na Zemi $6,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

První detektory neutrin

Díky obrovskému úsilí *Raymonda Davise Jr.*, který využil reakcí elektronových neutrin, které přeměňovaly chlór (izotop ^{37}Cl) na radioaktivní argon, vznikl první detektor neutrin, a to radiochemický. Experiment v podzemí dolu *Homestake* využíval 615 tun tetrachlorethenu, z toho chloru bylo 133 tun. Jenom část přírodního chloru je potřebný izotop, zbytek je izotop ^{35}Cl , takže užitečná hmotnost detektoru byla zhruba 32 tun. Samotné měření probíhalo v měsíčních cyklech. Po měsíci ozařování byl pomocí probublávání heliem velice efektivně extrahován radioaktivní argon. Nastavená perioda cyklu měření byla založena na poločas rozpadu radioaktivního argonu, která je 35 dní.

Pomocí tohoto detektoru se podařilo poprvé potvrdit, že neutrina v nitru Slunce vznikají. Je třeba zdůraznit, že detektor neměřil směr, odkud neutrina přicházejí, ani jejich energetické spektrum. To, že se detekovaná neutrina přisuzovala Slunci, bylo postaveno na předpokladu, že neznáme žádný reálný trvale fungující zdroj, který by poskytoval na Zemi srovnatelný tok neutrin s energií v dané oblasti. Ukázalo se, že

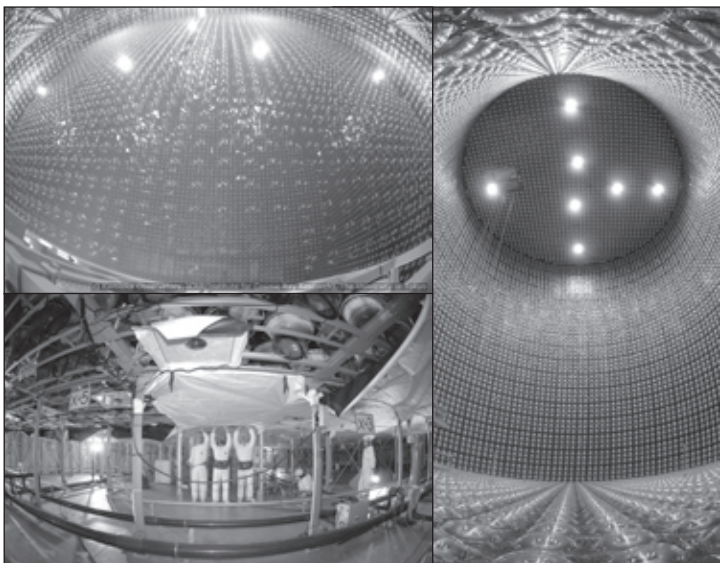
detekovaný počet neutrin sice řádově odpovídá předpokladům získaným na základě slunečních modelů, avšak byl pouze čtvrtinový. Postupně se podařilo zmenšovat nejistoty ve výpočtech pomocí slunečních modelů i měření neutrin detektorem v *Homestake*. Rozdíl mezi předpovědí a naměřenou hodnotou však zůstával zhruba stejný a stal se prvním krokem na cestě k objevu oscilací neutrin. Detektor v *Homestake* pracoval zhruba 31 let od roku 1968 do roku 1999 a dohromady zaznamenal zhruba 2000 interakcí slunečních neutrin s jádry chloru.

Detektor založený na reakci neutrina s chlorem neumožňoval pozorovat neutrina vzniklá v průběhu proton–protonového cyklu. Tyto reakce jsou dominantním zdrojem energie i neutrin na Slunci. Proto byla snaha najít vhodnou reakci pro detekci neutrin s energií nižší. Při využití reakce neutrina s galiem, které se v přírodě opět vyskytuje ve formě směsi dvou stabilních izotopů, probíhá reakce na izotopu ^{71}Ga , které se přeměňuje na radioaktivní germanium. Výhodou této reakce je, že její prahová energie je zhruba čtvrtinová ve srovnání se zachycením na chloru. Zachycují se tak neutrina s daleko nižší energií, a tedy i část těch z proton–protonového cyklu.

V mezinárodní spolupráci byly postaveny a pracovaly dva detektory využívající tuto reakci. Jedním z nich byl experiment *GALLEX* (zkratka z *Gallium Experiment*) přebudovaný v roce 1997 na experiment *GNO* (*Gallium Neutrino Observatory*), který v této podobě pracoval až do roku 2003 v podzemní laboratoři *Grand Sasso*. Ten měl k dispozici 30 tun přírodního galia, tedy zhruba 12 tun toho správného izotopu. Druhým je experiment *SAGE* (*Soviet-American Gallium Experiment*), který je stále v činnosti v ruské podzemní observatoři



Radiochemické detektory využívající galium umožnily detekovat neutrina z *p-p* cyklu. Experiment *GNO* byl pokračovatelem experimentu *GALLEX*.



Detektor Super-Kamiokande je naplněn vodou a fotonásobiče zachycují Čerenkovovo záření nabitých leptonů s vysokou energií

v *Baksanu* a studuje neutrina ze Slunce už dvacet let. Ten má k dispozici zhruba 57 tun přírodního galia, tedy necelých 23 tun toho správného izotopu. Každý z experimentů používal jinou chemickou metodu nakládání s galiiem i separace radioaktivního germania, což bylo velice důležité pro vzájemnou kontrolu a ověření správnosti získaných výsledků.

Poločas rozpadu izotopu ^{71}Ge je zhruba 11,5 dne, ale i v tomto případě byla hlavně kvůli velmi omezenému počtu detekovaných neutrin zvolena zhruba měsíční délka cyklu měření. Také zde byl pozorován výrazný deficit neutrin oproti slunečním modelům. Vzhledem k okolnosti, že galiový detektor zachytává i neutrina z proton–protonového cyklu, se potvrdilo, že deficit neutrin je pozorován i u neutrin vzniklých v procesech, které jsou dominantním zdrojem energie na Slunci. Vzhledem k malému počtu neutrin registrovaných za měsíc je možno studovat pouze v dlouhodobém měřítku, zda nedochází k variacím produkce slunečních neutrin. I tak je velmi užitečné, že detektor SAGE pokračuje v pozorování slunečních neutrin. Kromě hledání dlouhodobých variací se stále také daří snižovat systematické nejistoty v měřeních, a tím je zpřesňovat. Nevýhodou radiochemických detektorů je hlavně nemožnost průběžného měření a nemožnost určení směru přiletu neutrina a jeho energie. Zároveň jsou citlivé pouze na jeden typ neutrina.

Detektor, který potvrdil oscilace neutrin

Detektor, který by s konečnou platností rozřešil, zda jsou chybějící neutrina v radiochemických

experimentech problémem slunečních modelů nebo fyziky samotného neutrina (tedy oscilací), musel detekovat nejen elektronová neutrina, ale také všechna neutrina dohromady. To byl hlavní důvod, proč se začal budovat detektor *SNO* (*Sudbury Neutrino Observatory*) umístěný v kanadském dole *Creighton Mine*. Pracovní objem detektoru byl vyplněn tisíci tunami těžké vody.

Nádrž s ní byla vnořena do bazénu se sedmi tisíci tunami obyčejné vody, která sloužila pro odstínění pozadí. Celý objem detektoru sledovalo téměř 9 500 velkých fotonásobičů, které zaznamenávaly světlo vznikající Čerenkovovým jevem.

V tomto typu detektoru se využívají pro detekci slunečních neutrin tři typy jejich reakcí s elektrony nebo jádry deuteronu. První je pružný rozptyl na elektronech. Ten sice probíhá pro všechny typy neutrin, ale v případě elektronového neutrina zhruba s šestkrát větší pravděpodobností. To znamená, že nelze rozhodnout, zda se v nitru Slunce produkuje méně elektronových neutrin, než se předpokládalo, nebo se jejich část přeměnila na jiné typy těchto částic. Druhou možností je reakce elektronového neutrina s neutronem v deuteronu, při které dojde k jeho přeměně na proton a produkci elektronu. Tato reakce je citlivá pouze ke zmíněnému typu neutrina.

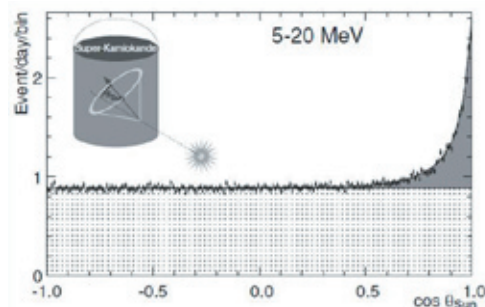
Velice důležitá pak je reakce třetí, kdy dochází k nepružnému rozptylu libovolného neutrina na deuteronu, kterému předá energii přesahující jeho energii vazebnou. Tuto reakci lze identifikovat pomocí vzniklého neutronu. V první fázi se využíval pouze záchyt neutronu na deuteronu. Neutrony intenzivně zpomalené pružným rozptylem na deuteronech v těžké vodě jsou s velmi vysokou pravděpodobností zachyceny deuteronem. Vznikne jádro tritia s velkým přebytkem energie, kterého se zbavuje vyzářením sekvence fotonů gama, které předávají energii elektronům fotoefektem, Comptonovým rozptylem nebo produkcí páru elektronu a pozitronu. Pokud má elektron do-

statečnou energii, produkuje Čerenkovovo záření a detektor jej tak „uvidí“. V druhé fázi byla do těžké vody navíc přidána sůl (dvě tuny), která obsahuje chlor. Izotop ^{35}Cl tvoří téměř 76 % přírodního chloru a záchytem zpomaleného neutronu tímto izotopem chloru vzniká jádro ^{36}Cl s velmi vysokým přebytkem energie a ještě větší pravděpodobností detekce.

Reakce rozbití jádra deuteronu v nepružném rozptylu neutrina umožnila zjistit celkový počet neutrin, které přicházely ze Slunce a ten odpovídal předpovědím slunečních modelů. Naopak první dvě reakce ukázaly, že i detektor SNO zaznamenává méně elektronových neutrin a zbytek musí být jiné typy. Potvrdilo se tak, že dochází k přeměnám mezi jednotlivými typy neutrin – jejich oscilacím. V první fázi bylo v letech 1999–2001 získáno zhruba 306 dní čistého měření a detekováno bylo téměř 3000 neutrin. V druhé fázi s doplněním soli pak detektor pracoval v letech 2001–2003, získal zhruba 395 dní čistého času měření a detekoval něco málo přes 4700 neutrin. Oboje měření vzájemně velice dobře souhlasila a ukázala, že pouze zhruba 35 % neutrin ze Slunce dorazí na Zemi i v podobě elektronového neutrina, zbytek dorazí jako neutrina jiného typu. Studovaly se i časové změny toku neutrin ale kromě těch, které jsou dány excentricitou oběžné dráhy Země kolem Slunce, tedy změnou vzdálenosti Země od Slunce, se žádné najít nepodařilo. Detektor SNO už svoji činnost ukončil a v současnosti probíhá jeho přestavba, při které dojde ke úplné jiné náplni.

Super-Kamiokande

Toto zařízení je v současnosti stále zdaleka největší detektor pro zachycování neutrin ze Slunce. Jedná se o detektor, který je vlastně velkou válcovou nádrží vyplněnou velmi čistou vodou. Její rozměry jsou úctyhodné, výška je 41,4 m a průměr 39,3 m. Celkově obsahuje 50000 tun vody, ovšem pro detekci slouží jen vnitřní část s hmotností 22000 tun. Vznikající



Super-Kamiokande určil, že sluneční neutrina opravdu přicházejí ze Slunce

Čerenkovovo záření zachytává 11 000 velkých fotonásobičů. Jeho předchůdcem byl detektor *Kamiokande*, jehož vnitřní část obsahovala pouhých 680 tun vody. Na rozdíl od detektoru SNO využívá Super-Kamiokande pro detekci slunečních neutrin pouze jejich pružný rozptyl na elektronech.

Byl to první detektor, který umožnil určit směr příletu neutrina. Při rozptylu přebírá elektron původní směr neutrina jen částečně, výsledkem je tak jisté rozmazání. Zatím je úhlové rozlišení tohoto měření pouze zhruba 26° , tedy mnohem více, než je úhlový rozměr Slunce na obloze. I tak se však spolehlivě potvrdilo, že pozorovaná neutrina přicházejí ze Slunce.

V současnosti se uvažuje o budoucí rekonstrukci tohoto zařízení, která by Super-Kamiokande přeměnila na *Hyper-Kamiokande*. Ten by měl v maximální předpokládané variantě až milion tun vody.

Současná generace detektorů – BOREXINO, KamLAND a SNO+

Vcelku pochopitelně chceme pozorovat neutrina z reakcí, které jsou v nitru Slunce nejčastější, a tedy potřebujeme detekovat neutrina s co nejnižší energií. Proto byly postaveny dva detektory založené na využití kapalného scintilátoru a další (upravený SNO, nazývaný SNO+) se plánuje. Elektron, který nemá dostatečnou kinetickou energii, neprodukuje Čerenkovovo záření. Může však ionizovat a excitovat atomy a molekuly v materiálu, kterým se pohybuje. Pokud vybereme vhodný materiál, bude se při vybíjení vybuzených stavů molekul vyzařovat světlo, které mohou zachytit fotonásobiče. V současnosti se využívá velice čistý minerální olej, tedy v podstatě směs uhlíku a vodíku. Reakce, které se využívá pro detekci nízkenergetických neutrin, je pružný rozptyl na elektronech.

Nejnižší dostupná energie detekovaných neutrin je velmi silně závislá na čistotě použitého materiálu a co nepečlivějším odstranění radioaktivních příměsí, hlavně radonu. V současnosti se podařilo detekovat neutrina vznikající i v průběhu přeměny ${}^7\text{Be}$.

Menším z detektorů je *Borexino*, které má citlivý objem 300 tun minerálního oleje a nachází se v evropské podzemní laboratoři *Gran Sasso*. Začal pracovat v polovině roku 2007. Průběh čištění je v jeho případě úspěšný, a tak se mu jako prvnímu podařilo detekovat neutrina z reakce přeměny ${}^7\text{Be}$, jejich počet byl zhruba 48 za den na 100 tun oleje.

Druhým takovým detektorem je pak *KamLAND* (*Kamioka Liquid-scintillator Anti-*

Neutrino Detector), který má oleje už 1000 tun a je umístěn na stejném místě jako detektor Super-Kamiokande. Má za sebou řadu úspěchů v detekci elektronových antineutrin z japonských reaktorů a studiu jejich oscilací. Byl první, který detekoval antineutrina z rozpadu radioaktivních prvků v nitru Země.

Kapalný scintilátor nahradí těžkou vodu také v detektoru *SNO*. V tomto případě bude mít vzniklý detektor *SNO+* také zhruba 1000 tun tekutiny, kterou bude opět uhlovodík (*LAB – linear alkyl benzen*). V nejbližších letech tak budou pracovat tři scintilační detektory zaměřené na snížení dolní energetické hranice pro pozorování neutrin ze Slunce. Můžeme se tedy těšit na intenzivní zkoumání příspěvku jednotlivých reakcí do produkce energie naší hvězdy.

Co se zatím zjistilo

Neutrina v nitru Slunce opravdu vznikají a neutrina detekovaná na Zemi přicházejí opravdu ze Slunce. Existuje hrubý souhlas mezi slunečními modely a detekovaným tokem neutrin u Země. Pokud si uvědomíme, že energii trvá zhruba 40 000 let, než se dostane z nitra Slunce k povrchu, je jasné, že v současnosti pozorované světelné záření ze Slunce odpovídá průběhu jaderných reakcí v nitru zhruba před touto dobou. Naopak neutrina proletí hmotou Slunce bez zdržení, a pozorujeme tak aktuální stav jeho nitra. Pozorování ukazují, že během této doby se stav nitra Slunce nezměnil. Jak se předpokládalo, v toku neutrin nejsou pozorovány krátkodobé změny odpovídající jedenáctiletému slunečnímu cyklu, ten se týká pouze vnějších vrstev. Pozorují se pouze roční variace způsobené změnami vzdálenosti Země od Slunce.

Ukázalo se, že základní představy o průběhu jaderných reakcí v nitru Slunce jsou v pořádku a pozorování neutrin je potvrzují. Zatím se daří studovat energetické spektrum neutrin ze



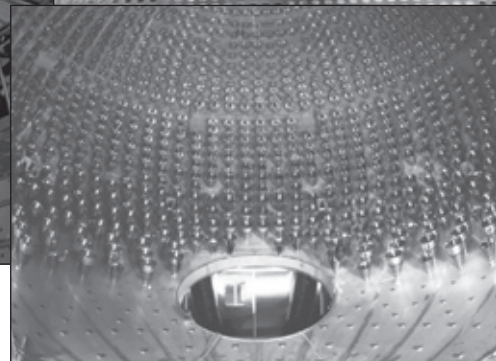
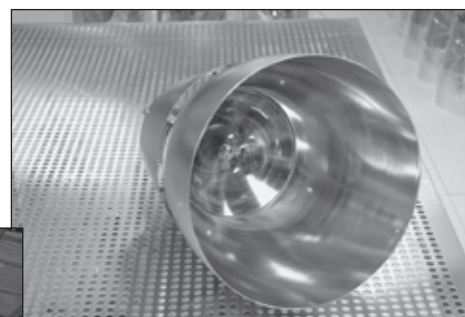
Různé pohledy na detektor BOREXINO spolu s detailním vyobrazením používaného fotonásobiče (vpravo nahoře)

Slunce jen velmi hrubě, takže dokážeme ocenit podíl různých reakcí jen velmi přibližně. V budoucnu by však přesně změřené neutrinové spektrum mohlo přispět k určení přesných poměrů mezi různými reakcemi. To by se dalo využít jako velmi přesný teploměr slunečního nitra. Na stavbě nitra Slunce závisí i přesný průběh oscilací slunečních neutrin, takže poměr mezi jednotlivými neutrinami může přinést další důležité informace o něm.

Úhlové rozlišení je zatím velmi malé. V současnosti je náš obraz Slunce v neutrinovém oboru o více než řád větší než optický, přestože termojaderné reakce, při kterých vznikají neutrina, probíhají pouze v jednom procentu celkového objemu Slunce. I v této oblasti by se situace měla v budoucnu zlepšovat.

Detekce neutrin ze supernov

Bohužel se dosud podařilo detekovat neutrina pouze z jedné supernovy. Od té doby se čeká na supernovu v blízkém okolí, kterou by mohly stále se zlepšující detektory zachytit. Během výbuchu supernovy se zhruba 99 % energie uvolní právě v podobě neutrin. Vznikají všechny typy neutrin i antineutrin v značně širokém rozmezí energií. Samotný hlavní záblesk neutrin trvá něco mezi deseti až patnácti sekundami, přičemž maximum se nachází v prvních pár sekundách. Teprve za nějakou dobu, která je závislá na řadě vlastností vnějších obálek supernovy, se za ním vydá záblesk světelný. Prvními zařízeními, která nás o supernově mohou informovat, jsou tak neutrinové experimenty.



Ta první a zároveň zatím poslední supernova, za které se nám podařilo zaznamenat neutrina (přesněji antineutrina), se na pozemském nebi rozzářila 23. února 1987. Detektor *Kamiokande* v Japonsku detekoval 11 antineutrin, velice podobný detektor *IMB* (*Irvine-Michigan-Brookhaven*) v USA pozoroval 8 antineutrin a scintilační detektor *BNO* (*Baksan Neutrino Observatory*) v Baksanu na Kavkaze pozoroval 5 antineutrin. Pozorovaný neutrinový záblesk byl kratší než třináct sekund. Připomeňme, že zaznamenaná supernova vybuchla ve Velkém Magelanově oblaku ve vzdálenosti ca 150 000 světelných let.

Na zachycování neutrin ze supernov je zaměřen jeden speciální detektor, a sice scintilační detektor *LVD* (*Large Volume Detector*) v podzemní laboratoři Gran Sasso v Itálii. Ten obsahuje zhruba 1000 tun kapalného uhlovodíkového scintilátoru. Detekuje neutrina, stejně jako už zmíněné podobné detektory Borexino a KamLAND, pomocí jejich pružného rozptylu na elektronech a reakcích na protonu a uhlíkovém jádře (ať už nepružného rozptylu nebo reakcí s produkcí elektronu či pozitronu). Neutrina ze supernovy mohou mít vyšší energii než ty ze Slunce a navíc jde i o antineutrina, takže se uplatní i reakce na jádrech.

Rozdíl mezi detektory, které zachytily neutrina ze supernovy SN1987A, a současnými je nejen ve zvýšení hmotnosti pracovního objemu detektoru, ale i ve snížení energetického prahu detekce a efektivním potlačení radioaktivního pozadí. To znamená, že současné detektory jsou schopné zachytit zhruba o řád až dva řády více neutrin než ty původní. Pokud navíc supernova

vybuchne v naší Galaxii, může detektor neutrin zachytit několik tisíc až desítek ti-

síc. Pokud se spustí nová generace detektorů, jako je například Hyper-Kamiokande, mohou jich být až stovky tisíc. Taktó by bylo možné získat velice slušná energetická spektra a určit i poměr mezi jednotlivými typy neutrin, a díky tomu dostat podrobnější informace o průběhu výbuchu supernovy a procesech, které při nich probíhají. Na druhé straně lze pozorovat neutrina ze supernov vybuchujících v daleko větších vzdálenostech. Plánovaná nová generace detektorů by měla dohlédnout do vzdálenosti, kde se nachází zhruba padesátka galaxií. Četnost registrovaných výbuchů by tak mohla být v relativně blízké budoucnosti dokonce zhruba jeden za rok.

Toho, že neutrina přicházejí dříve než začíná světelné zjasnění, se snaží využít organizace SNEWS (Supernova Early Warning System). Jde o sdružení několika velkých neutrinových detektorů, které jsou schopné neutrinový záblesk zaznamenat. V případě, že jej zachytí, okamžitě odešlou informaci jak profesionálním, tak amatérským astronomickým pracovištím. Ta pak mohou okamžitě zaměřit dalekohledy příslušným směrem a zachytit co nejdříve zrod světelného zjasnění. Prostřednictvím sítě AstroAlert časopisu Sky & Telescope mohou obdržet tuto informaci i čeští amatérští astronomové.

Každý ze zúčastněných detektorů sleduje, jestli v nastaveném časovém okně zhruba deset sekund nezaznamená spršku z více neutrin. Signál od vzdálené supernovy může být velmi slabý, proto je důležité, aby do sledovací sítě bylo zapojeno více detektorů. Důležité je, aby od sebe jednotlivé neutrinové detektory byly co nejvíce vzdálené. Jen tak lze vyloučit koincidence signálů vzniklých jinými procesy.

Z těch, které jsme již zmiňovali, jsou v současnosti do organizace aktivně zapojeny experimenty Super-Kamiokande, Borexino a LVD.

Mezi dalšími detektory zapojenými do tohoto pro-

Různé pohledy na detektor KAMLAND a zařízení, které čistí náplň tohoto detektoru

jektu jsou i ty, které se snaží detekovat neutrina s velmi vysokými energiemi, která mohou vznikat právě i při výbuchu supernovy.

Detekce neutrin s velmi vysokými energiemi

Neutrina s vysokou energií lze detekovat i v řadě již zmíněných detektorů. Při jejich reakcích vznikají nabitě leptony odpovídající příslušným neutrinům či antineutrinům. Při vyšších energiích se kromě pružného rozptylu uskutečňuje i celá řada reakcí neutrin s elektrony a jádry s produkcí leptonů. Pokud dochází k reakci s jádrem a neutrinu má vysokou energii, mohou se produkovat i hadrony.

Pokud chceme zachytit neutrina s vysokou energií, která k nám přicházejí z vesmíru, musíme se vypořádat s jedním problémem. Při reakcích jader kosmického záření vysokých energií s jádry v atmosféře vzniká sprška hadronů, tedy částic interagujících silnou interakcí. Patří mezi ně jak nukleony, tak i mezony. Nejlehčí mezony pí vznikají ve velmi velkém množství a většinou se rozpadají za vzniku velkého množství neutrin, která vytváří pozadí, v němž se primární neutrina z vesmíru ztrácejí. V principu jsou tři možnosti jejich vylovení z pozadí atmosférických neutrin. První případ, kdy budeme mít časově krátký intenzivní záblesk těchto neutrin, např. již zmiňovaný výbuch blízké supernovy nebo záblesk gama záření. Druhým případem je intenzivní lokalizovaný zdroj, v tomto případě je důležité úhlové rozlišení a přesnost určení směru přiletu neutrina. Třetí možnost vyplývá z toho, že počet atmosférických neutrin klesá velice rychle s energií. Primární neutrina vznikající ve velmi energetických procesech by měla mít vyšší energii. Pokud tedy budou neutrinové detektory dostatečně velké a dokáží zachytit i velmi řídké případy neutrin s velmi vysokou energií, uloví i primární neutrina z kosmických dálek.

Počet kosmických neutrin s vysokou až extrémně vysokou energií je však malý a s rostoucí energií velmi rychle klesá. Detektory, které je mají šanci zachytit, tak potřebují velmi velký objem průsvitného prostředí. Jako citlivý objem detektoru se proto využívá voda ve velkých jezerech či mořích, led v Antarktidě nebo atmosféra Země.

Využití mořské vody – projekt Antares

Jednou z možností je využití rozsáhlých přírodních vodních rezervoárů, jako jsou velká a hluboká jezera nebo moře. Je potřeba využít kilometrové vrstvy vody, které slouží ne-





Linie s fotonásobiči projektu Antares připravena ke spuštění z lodi do vody. Nahoře je zobrazen detailní pohled na jednotlivé fotonásobiče.

jen k detekci neutrin, ale i jako stínění od kosmického záření. Takovým detektorem je systém *Antares* budovaný v hloubce 2500 m ve Středozemním moři. Lano o délce zhruba 460 m je ukotveno na dně a nadnášeno bóji na druhém konci. Pracovní část osazená fotonásobiči je dlouhá zhruba 300 m a začíná 100 m nade dnem. V současné době má detekční systém dvanáct těchto linií, vzdálenost mezi nimi je zhruba 70 m. Dohromady mají zhruba tisícovku fotonásobičů, které pozorují plochu ca 0,1 km². V budoucnu by měl detektorový systém pokrýt několik čtverečních kilometrů.

Fotonásobiče zaznamenávají Čerenkovovo záření způsobené nabitými částicemi vzniklými v reakcích neutrin ve vodě ve směru letu původního neutrina. Detektor zatím pozoroval pouze neutrina vznikající v interakci jader kosmického záření v atmosféře. Hledání diskretních zdrojů zatím nebylo úspěšné a detektor je zatím příliš malý, aby zachytil neutrina s dostatečně vysokou energií, kde už by bylo atmosférických neutrin méně než primárních.

Využití ledu – projekt Ice Cube

Další možností je využití mohutných vrstev ledu antarktického pevninského ledovce. Tloušťka ledu zde dosahuje několika kilometrů. Pomocí horké vody v něm lze vytvořit díru hlubokou dva kilometry, do které se spustí lano osazené v dolní kilometrové části fotonásobiči. Voda opět zamrzne a fotonásobiče umožňují zachytit Čerenkovovo záření vznikající při průletu nabitých částic vzniklých v reakcích neutrin. Přesně tak funguje detektor *Ice Cube*. Do konce roku 2011 by měl být detektorový systém o osmdesáti liniích s celkově 4800 fotonásobičovými moduly dokončen. Vzdálenost mezi liniemi je 125 m. Celkový objem detektoru bude po dokončení zhruba jeden krychlový kilometr.

Ice Cube je již nyní daleko větší než *Antares*, přesto i on zatím zachytil pouze atmosférická neutrina. Obrovskou výhodou neutrin oproti

vysokoenergetickým nabitým částicím z vesmírných objektů je fakt, že jejich dráha není ovlivněna magnetickými poli v mezigalaktickém prostoru a zachovává se u nich informace o poloze zdroje, ze kterého přiletěly. Žádné časově nebo prostorově diskretní zdroje kosmických neutrin se však zatím identifikovat nepodařilo. Zvětšování detektoru a dlouhodobé jeho využívání by mohlo tuto situaci změnit.

Využití atmosféry Země – projekt Auger

Třetí možnost je využití vzdušného oceánu. Tento způsob využívá projekt *Auger*, jehož hlavní činností ovšem není detekce neutrin. Více informací o *Augeru* najdete v samostatném článku J. Ebra v tomto čísle.

Závěr

Na předchozích stránkách jsem se snažil ukázat, že neutrinová astronomie se už vymanila z dětských plenek a hlavně v oblasti detekce slunečních neutrin bylo dosaženo významných úspěchů. Podařilo se získat důležité informace o procesech probíhajících v nitru Slunce, ale

Experiment IceCube je budován v Antarktidě – vpravo jsou zobrazeny detailní pohledy na experimentální zařízení, dole pak záznam detekce neutrina v rámci tohoto experimentu.



také o velmi exotických vlastnostech samotných neutrin. Tyto objevy byly oceněny v roce 2002 Nobelovou cenou (Raymond Davis Jr., Masatoši Košiba). V současnosti dokončované neutrinové detektory slibují významný pokrok ve zkoumání teploty, chemického složení nitra Slunce i procesů, které v něm probíhají. Přitom by se dalo využít i vlastnosti jejich oscilací, jejichž průběh závisí na parametrech prostředí, kterým se pohybují. V blízké době se dá očekávat detekce druhé supernovy v neutrinovém oboru a postupný přechod na jejich detekci s frekvencí zhruba jedné za rok. To by mohlo postupně vést k velmi časným záchytům světelných záblesků a v případě zachycení supernovy v naší galaxii nebo v jejím nejbližším okolí i k podrobnému zkoumání průběhu kolapsu velmi hmotné hvězdy a vlastností extrémně husté jaderné hmoty, která při výbuchu supernovy vzniká. Dokončované velké přístroje pro detekci vysokoenergetických neutrin by mohly umožnit první identifikaci kosmických neutrin ze vzdálených vesmírných objektů. Ta by měla nést informace o těch nejenergetičtějších procesech, které ve vesmíru probíhají, jako jsou například záblesky gama záření.

Poznámka závěrem

Článek o neutrinech je zaměřen na detektory vesmírných neutrin a jejich možnosti. To je důvodem, proč jsem napsal článek, který na něj volně navazuje, zaměřený na podrobný popis astrofyzikálních procesů, při kterých neutrina vznikají. Příspěvek by měl vyjít ve slovenském časopise *Kozmos*, bude také obsahovat filozofické úvahy o tom, jak by mohla neutrina i ve velmi vzdálené budoucnosti přispět k našemu poznání, případně i rozvoji lidské civilizace.