

Obří ledová kostka v Antarktidě chytá neutrina

Fotonásobič – často označován jako PMT (PhotoMultiplier Tube), vakuová fotocitlivá součástka využívající zesilovacího efektu prostřednictvím sekundární emise na systému elektrod. Prvotní proud, iniciovaný dopadem světla na světlocitlivou vrstvu, fotokatodu, je tak mnohonásobně zesílen. Napětí mezi elektrodami je několik set voltů a je nastaveno tak, aby koeficient sekundární emise při dopadu elektronu na její povrch byl kladný. Fotonásobiče pracují v impulzním režimu.

Hluboko v antarktickém ledu, v blízkosti Amundsenovy-Scottovy základny, vyrostl na konci roku 2010 nový detektor neutrin obřích rozměrů s názvem ICECUBE (ledová krychle, kostka, ve skutečnosti hranol). V kilometru krychlovém ledu je zamrzlých 5 160 fotonásobičů, které detekují Čerenkovovo záření nabitých částic vznikajících interakcí neutrin s atomovými jádry v molekulách ledu. Nový detektor nevyrostl na „zelené louce“. Vznikl zvětšením předchozího detektoru AMANDA a umožní další rozvoj neutrinové astronomie. Pojdme se seznámit s tímto výjimečným přístrojem.

Troška historie

Při experimentech s beta rozpadem neutronu bylo již ve 30. letech zřejmé, že kromě protonu a neutronu musí vznikat ještě nějaká malá neutrální částice. Celková energie vzniklého protonu a elektronu totiž nedávala původní energii neutronu. Stejně tak tomu bylo s hybností. Existenci nové částice navrhl Wolfgang Pauli v roce 1931 a Enrico Fermi ji pojmenoval *neutrino* (v italštině „malý neutron“). Hledaná částice byla objevena až po čtvrt století v roce 1956 v americké jaderné elektrárně v Savannah River. Klíčový objev učinili Frederick Reines a Clyde Cowan v toku částic z reaktoru P-105.

Neutrino interagují jen slabou interakcí, látka je pro ně průhledná a tak jsou těžko polapitelná. Prolétnou bez problémů i celou Zemí nebo Sluncem. Právě proto jsou pro astronomy cenným zdrojem informací například o nitru hvězd, kde vznikají při termojaderné syntéze. Nejběžnějším typem neutrin jsou tzv. sluneční neutrina, která vznikají v nitru Slunce. Každým centimetrem čtverečním naší pokožky namířené kolmo na Slunce jich prolétnou za každou sekundu 60 miliard. Další neutrina vznikají při interakci kosmického záření s horními vrstvami atmosféry, říkáme jim atmosférická neutrina. Neutrino vznikají také při explozích supernov, v nitru Země při přirozeném radioaktivním rozpadu hornin, v našich jaderných reaktorech i v dalších zdrojích. Kolem jedné sekundy života vesmíru se z vesmírné pralátky oddělila tzv. *reliktní neutrina*, která v sobě nesou informaci o velmi raném vesmíru. Možná se v budoucnosti naučíme sledovat i tato neutrina.

Budova s reaktorem P-105 jaderné elektrárny v Savannah River, ve které bylo objeveno v roce 1956 neutrimo. Dobová fotografie neznámého autora.



První soustavný výzkum neutrin prováděl Raymond Davis v Jižní Dakotě ve starém zlatém dole Homestake v letech 1967 až 1993. Šlo o chlórový detektor naplněný 615 tunami tetrachloretylenu. Jádra chlóru se při náhodné interakci se slunečním neutrinem změnila na radioaktivní jádra argonu, která jsou snadno detekovatelná. Počet zachycených slunečních neutrin odpovídal zhruba třetině teoretické hodnoty. Dnes víme, že je to způsobeno tzv. oscilacemi neutrin. Neutrino totiž existují ve třech provedeních, tzv. generacích. Neutrino se za letu přeměňuje z jedné generace na druhou. Davisovy experimenty byly citlivé jen na jeden druh neutrin, proto objevily přibližně třetinový tok neutrin oproti teorii. První objevená neutrino z roku 1956 byla tzv. elektronová neutrino. Mionová neutrino objevili Leon Lederman, Melvin Schwartz a Jack Steinberger v roce 1962 na urychlovači v Brookhavenu (Long Island, USA). Tauonová neutrino byla objevena v laboratoři Fermilab v roce 1999 v experimentu DONUT. Existence oscilací neutrin (mezi elektronovým a mionovým) byla potvrzena na detektoru Super-Kamiokande v roce 1998 a nezávisle potvrzena na Sudburské neutrinové observatoři. Oscilace na tauonové neutrino byla prokázána v roce 2010 na detektoru OPERA v italském Gran Sasso. Poznamenejme, že oscilace neutrin jsou možné jen při nenulové klidové hmotnosti neutrin. Hmotnosti jednotlivých neutrin dosud přesně neznáme.

Princip ledové kostky

Neutrino s vysokou energií, která k nám přilétají z hlubin vesmíru, ve většině případů bez problémů proletí dokonale čistým antarktickým ledem. Jen málokterá z nich zachytí atomová jádra ledu. Pokud se tak stane, z místa interakce vylétne s vysokou rychlostí elektron nebo mion. Tyto nabitě částice se v ledu pohybují rychleji než světlo a zanechávají za sebou charakteristický kužel elektromagnetického

LED – Light Emitting Diode, světlo emitující dioda. LED je polovodičová optoelektronická součástka, která emituje nekoherentní monochromatické světlo při průchodu proudu v propustném směru. Emise světla vzniká na základě elektroluminiscence.

Čerenkovovo záření – kužel elektromagnetického záření v podobě rázové vlny, který vzniká za nabitou částicí pohybující se nadsvětelnou rychlostí v daném prostředí.

Detektor Opera pod horou Gran Sasso, na kterém byla v roce 2010 prokázána oscilace na tauonové neutrino. Zdroj: Expedice Aldebaranu.



záření, tzv. Čerenkovovo záření. Pokud je v ledu rozmístěn dostatečný počet detektorů elektromagnetického záření, je možné zrekonstruovat tvar kuželu tohoto záření a určit, který druh neutrin ho způsobil a z jakého směru neutrino přilétlo. Od poloviny minulého století bylo jasné, že přesné určení parametrů dopadajícího neutrina potřebuje detektor velmi velkých rozměrů. Proto byl v roce 2000 uveden do provozu malý prototyp detektoru tohoto typu s názvem AMANDA (*Antarctic Muon and Neutrino Detector Array*), který pracoval do roku 2009. Na 19 strunách bylo v ledu umístěno celkem 677 fotonásobičů. Současný

Otvor pro detektory vrtaný v antarktickém ledu do hloubky téměř 3 km. Zdroj: University of Wisconsin.



detektor IceCube vznikl výrazným rozšířením detektoru AMANDA. Ledovou krychli tvoří 86 strun, na každé je zavěšeno 60 detektorů (celkem 5 160), celkový objem zaujímaný detektory je 1 kilometr krychlový.

Prvním krokem je vyvrtání otvoru do antarktického ledu. Otvor hloubí speciální vrtná souprava za pomoci horkovodního vrtáku. Do vrtu je vháněna horká voda, která udržuje vrtnou hlavici na teplotě 66 až 85 °C. Voda je přiváděna speciální vysokotlakou hadicí s vnitřním průměrem 10 cm a vnějším 15 cm. Hadice je dlouhá 2 700 metrů a tlak v ní je 6,89 MPa. Jeden vrt má průměr cca 50 cm a sahá do hloubky 2 500 metrů. Vrtání trvá 27 hodin. Po vyvrtání otvoru se do vrtu zavěsí struna, která je osazena 60 detektory rozmístěnými v hloubce mezi 1 450 a 2 450 metrů pod povrchem ledu. Vrt se nakonec zalije a nechá zamrznout.

Na každé struně je zavěšeno 60 detektorů DOM (*Digital Optical Module*) s rozestupy 17 metrů (v dolní části vnitřního detektoru jsou na šesti strunách rozestupy jen 7 metrů). Struna je tvořena napájecím kabelem a balíkem 30 dvojic kroucených kabelů, každá dvojice je přivedena ke dvěma detektorům DOM. Detektor DOM je zcela samostatnou jednotkou tvaru koule o průměru 35 cm, která je schopná vydržet tlak až 70 MPa. Vnitřek koule je naplněn dusíkem o tlaku 0,5 atmosféry. Základním prvkem detektoru je fotonásobič o průměru 25 cm. Je zde ale i zdroj vysokého napětí pro fotonásobič, který transformuje nízké napětí přiváděné kabelem na 1 300 až 1 500 V. Další součástí detektoru je LED dioda využívaná pro kalibraci fotonásobiče.

Závěr

Ledová kostka IceCube je navržena tak, aby zachytávala všechny generace neutrin s energiemi nad 100 GeV. Detektor pracuje zejména v oblasti stovek TeV, která je nedosažitelná konvenčními urychlovači. Mion s energií 100 TeV vytvoří například kužel záření o průměru 130 metrů. Pro záchyt vysoce energetických částic je proto zapotřebí mimořádně rozsáhlého detektoru, jakým je IceCube. Malá vnitřní část detektoru je schopná zachytit i neutrina s nízkými energiemi kolem 10 GeV. Neutrina s velmi vysokou energií přicházejí s kosmickým zářením. Detektor IceCube zkoumá mechanismy urychlení kosmického záření v různých oblastech energií a hledá směry, ze kterých kosmické záření přichází. Druhým významným úkolem je záchyt neutrin, která

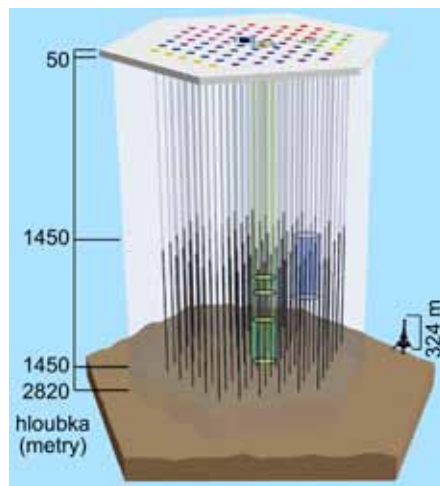


Schéma ledové kostky. Struny jsou osazeny detektory. Modrým válcem je označen předchozí detektor AMANDA. Zeleným válcem je označeno 6 strun vnitřního detektoru, který slouží k záchytu neutrin s nízkou energií. Celkový počet strun je 86, objem 1 km³. Pro představu je ukázána výška známé Eiffellovy věže. Zdroj: IceCube.

Digitální optický modul DOM. Ve spodní polokouli je umístěn fotonásobič, v horní zdroj a kalibrační LED dioda. Zdroj: IceCube.





V levé části je patrná vrtná věž napájená horkou vodou z ohřivačů (uprostřed). Mezi ohřivači a vrtnou soupravou leží vysokotlaká hadice o průměru 15 cm. Budova napravo je Scottova-Amundsenova základna s Jižním polárním dalekohledem a přístrojem BICEP 2, který hledá v polarizaci reliktního záření stopy po reliktních gravitačních vlnách. Zdroj: University of Wisconsin.

pocházejí z explozí supernov a studium mechanismu těchto explozí. Projekt je z podstatné části financován americkou Národní vědeckou nadací (NSF), z menší části z prostředků jednotlivých univerzit a dalších zemí, například Belgie, Německa, Japonska a Švédska. Cena detektoru se vyšplhala v přepočtu na přibližně 5 miliard Kč, což dá pouhých 5 Kč na 1 metr krychlový využitého ledu. Předpokládá se, že detektor IceCube bude svá data kombinovat s obdobnými menšími detektory pod mořskou nebo jezerní hladinou, zejména s detektory ANTARES (středozemní moře) a BAIKAL (v jezeře Bajkal). V letech 2011 až 2013 bylo zachyceno 28 neutrin, jejichž původ je mimo sluneční soustavu, v roce 2013 dalších devět. Dne 4. prosince 2012 bylo zachyceno neutrino s dosud nejvyšší energií – dva petaelektronvolty. Toto neutrino získalo přezdívku Velký pták (*Big Bird*). Autory projektu čeká nyní mnoho let sbírání dat. Jedině rozsáhlá statistika umožní odpovědi na zvědavé otázky neutrinové fyziky.

■ Petr Kulháněk, 14. 1. 2011, AB 2/2011, aktualizováno