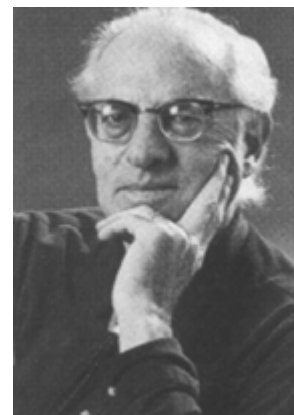


Neutrinová astronomie

Petr Kulhánek



F. Reines – objevitel neutrina

Málokdo si uvědomuje, že všude kolem nás je ještě jeden neviditelný svět: jsme ponořeni do moře neutrin, které procházejí nejen naším tělem, ale i celou Zemí. V tomto vyprávění se vydáme za dobrodružstvím poznávání nepatrných částic, které interagují s hmotou jen velmi sporadicky a které nás tolikrát zaskočily svými neočekávanými vlastnostmi.

Prehistorie

Začátek příběhu neutrin je kupodivu natolik přehledný, že si ho můžeme ilustrovat chronologicky:

1896: Henri Becquerel objevuje radioaktivitu jako podivné záření solí uranu. V následujících patnácti letech se ukáže, že existují tři typy tohoto záření a že atomy mají jádra, ze kterých toto záření vychází (Ernest Rutherford, Pierre a Marie Curie a další). Pro náš příběh je nejdůležitější záření beta - elektrony, které opouštějí atomové jádro.

1914: Podle zákona zachování energie by měl mít elektron opouštějící jádro přesně definovanou energii. Experimenty z roku 1914 (Lise Meitner, Otto Hahn, James Chadwick) však zasazují tomuto tvrzení citelnou ránu: energetické spektrum elektronů je spojité. To se stává záhadou pro následujících 16 let.

1930: Wolfgang Pauli navrhl, že pokud spolu s elektronem vzniká nějaká další částice, která přebírá část chybějící energie elektronu, je problém zákona zachování energie řešitelný. Tato částice by musela být neutrální a mít malou hmotnost.

1932: Neutrální částice je na světě! James Chadwick objevuje neutron. Ten je ale příliš hmotný na to, aby mohl být částicí navrženou Paulim, která má zachránit zákon zachování energie při beta rozpadu.

1933: F. Perrin ukazuje, že hmotnost hledané částice musí být výrazně menší než hmotnost neutronu. Enrico Fermi navrhuje, aby se nová částice nazývala neutrinum (v italštině „malý neutron“). Džin je vypuštěn a může začít honba za novou částicí. Bude trvat téměř čtvrt století.



Objev prvního neutrina (1956)

Slavnému okamžiku objevu neutrina předcházelo mnoho let teoretických prací i experimentálního úsilí. Zjistilo se, že neutrina by měla interagovat s hmotou jen velmi málo, milionkrát méně než elektron. Pro neutrina je zeměkoule průhledná jako kus skla pro světlo. Ukázalo se, že beta rozpad je jedním z příkladů nové, dosud neznámé, tzv. slabé interakce. V roce 1945 byla svržena první atomová bomba, která byla jistě silným zdrojem neutrin. Jen nebyl nikdo, kdo by měl chuť je detekovat. První poválečné návrhy na detekci neutrin proto uvažovali o detekci v blízkosti jaderného výbuchu. S rozvojem jaderné energetiky začalo být jasné, že jednodušší to bude v sousedství jaderného reaktoru. První pokusy byly ale

neúspěšné. Byl použit detektor s roztokem chlóru. Atom chlóru by se měl interakcí s neutrinem přeměnit na radioaktivní argon, který je snadno detekovatelný. Myšlenka to byla veskrze správná a chlorové detektory se využívají k detekci neutrin dodnes. Jen z jaderného reaktoru proudí antineutrina a nikoli neutrina. Bohužel.

První neutrinum, přesněji řečeno antineutrinum, bylo detekováno až v roce 1956 Frederickem Reinesem a Clydem Cowenem v experimentu pečlivě připraveném v jaderné elektrárně Savannah River v Jižní Karolině. Za detektor posloužilo 400 litrů vody s kadmium chloridem. Proud antineutrin z jaderného reaktoru je obrovský. Drtivá většina projde detektorem bez povšimnutí. Ale přece jenom: někdy antineutrinum zainteraguje s protonem, kterých je ve vodě vskutku velmi mnoho. Vzniká pozitron a neutron. Osud pozitronu je velmi rychle naplněn. Anihiluje s všudypřítomnými elektrony za vzniku dvou fotonů. A co se stane s neutronem? Ten je zpomalován srážkami a ve finále je zachycen atomem kadmia. Stane se tak asi 15 mikrosekund po anihilaci pozitronu. I zachycení neutronu kadmium je doprovázeno emisí fotonů. Závěr? Bylo-li zachyceno antineutrinum protonem, objeví se dva záblesky fotonů s charakteristickým odstupem asi 15 mikrosekund. A právě tyto signály naměřil F. Reines a C. Cowen v roce 1956. Neutrinum přestalo být chimerou a stalo se skutečnou částicí.



Jaderná elektrárna v Savannah River

Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (*1959)

vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře FEL ČVUT.

A je tu celá rodinka (1999)

Jak se vše zdálo v roce 1956 jednoduché! Dlouho hledané neutrino bylo na světě. V tu chvíli nikdo netušil, že neutrina jsou dokonce tři. Kdekoli vzniká elektron, doprovází ho elektronové neutrino či anti-neutrino. Právě toto neutrino objevili Reines a Cowen v roce 1956.

Při srážkách kosmického záření s horními vrstvami atmosféry vznikají miony, objeveny byly již v roce 1934. Tyto částice jsou velmi podobné elektronům, jen jsou těžší (mají hmotnost 207 krát větší než elektrony) a za dvě mikrosekundy se rozpadají na normální elektrony. Říkáme jim proto těžké elektrony. Při různých srážkách vznikají miony také v urychlovačích. V roce 1962 ukázali T. D. Lee a C. N. Yang na urychlovači v Brookhaven (patří Kolumbijské universitě a je na ostrově Long Island v USA), že miony doprovází jiný typ neutrina – mionové neutrino.

V roce 1977 Martin Perl objevil další elektron – supertěžký elektron neboli tauon. Jeho hmotnost je 3 484 násobek hmotnosti elektronu a má dobu života jen 3×10^{-13} s. Rozpadá se na své lehčí bratry (elektron nebo mion) a neutrino. Je jasné, že musí existovat další typ neutrina, tauonové neutrino. Toto poslední neutrino bylo objeveno až v roce 1999 v laboratoři Fermilab.

Celé rodině těchto částic říkáme leptony. Jde o tři elektrony a jejich neutrina. A samozřejmě také antičástice. Dohromady 6 částic a 6 antičástic, u kterých je prokázána bodová struktura až do 10^{-18} m:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}.$$

Většinou hovoříme o třech generacích leptonů. První generaci tvoří elektron se svým neutrinem. Vyskytují se zcela běžně. Druhou generaci nalezneme ve vysoce energetických procesech, například při interakci kosmického záření s atmosférou, jde o mion a jeho neutrino. Třetí generaci (tauon a jeho neutrino) umíme připravit jen uměle. Podobně existují také tři generace kvarků, ze kterých jsou tvoře-

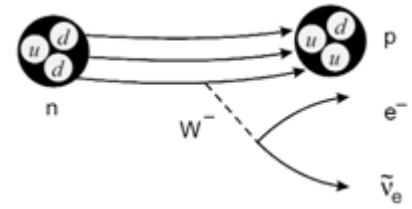
ny hadrony (těžké částice, například neutron a proton). Jistě se ukrádá otázka: až budeme mít ještě větší a dokonalejší urychlovače, objevíme čtvrtou nebo dokonce pátou generaci? Zdá se, že odpověď je záporná. Existence čtvrté či páté generace částic by měla v ranných fázích vzniku vesmíru dominantní vliv na jeho pozdější uspořádání. Zkrátka: vesmír by dnes vypadal úplně jinak, kdyby existovaly další generace leptonů a kvarků. Svědčí o tom i jiné nezávislé teoretické úvahy a experimenty.

Vlastností neutrín

Všechna neutrina jsou velmi málo hmotné částice (některá mají možná i nulovou klidovou hmotnost) se spinem 1/2. Patří tedy mezi tzv. fermiony, „nesnášenlivé“ částice, které podléhají Pauliho vylučovacímu principu. Dvě takové částice se nemohou nacházet ve stejném kvantovém stavu.

Neutrina nemají elektrický náboj a proto jsou necitlivá na elektromagnetickou interakci. Nemají ani barevný náboj silné interakce a proto neinteragují ani silně. Vzhledem k tomu, že gravitační interakce je na mikroskopické úrovni zanedbatelnou silou, zbývá jedině slabá interakce, kterou mohou tyto částice interagovat s hmotou. A to je důvod, proč hmotou tak snadno procházejí. To, že naše ruka neprojde například skrz desku stolu je způsobeno elektromagnetickou silou, díky níž existují elektronové atomární obaly. Mezi nimi a jádrem je pusto prázdno. Samo jádro drží pohromadě silnou interakcí. A na obě tyto interakce jsou neutrina necitlivá!

Slabá interakce je velmi zvláštní interakce. Způsobují ji částice W^+ , W^- a Z^0 objevené v roce 1983 Carlo Rubbiou a Simonem van der Meerem. Při této interakci se elektron a neutrino stejné generace chovají jako jedna jediná částice. Proto se píší v jedné závorce. Asi si řeknete, vždyť elektron a neutrino jsou úplně jiné. To ale posuzujete očima elektromagnetické interakce. Při slabé interakci bychom je od sebe opravdu nerozeznali. Jak už jsme si řekli, existují ještě tři generace kvarků, ze kterých jsou tvořeny složitější částice, hadrony. I kvarky jsou seskupeny po dvou do generací a slabá interakce kvarky dané generace nerozliší. To už je ale úplně jiný příběh. Slabá



Beta rozpad

interakce je zodpovědná za mnoho rozpadů elementárních částic, například za rozpad tauonu nebo mionu nebo za beta rozpad, díky němuž bylo objeveno neutrino. Při beta rozpadu se jeden z kvarků d tvořících neutron slabou interakcí přemění na kvark u , vznikne tak proton, elektron a elektronové antineutrino.

Další zajímavou vlastností je točivost neboli chiralita neutrín. Učená definice říká, že jde o projekci spinu do směru pohybu částice. Neutrino si můžete představit jako střelu vypálenou z hlavně s levotočivým nebo pravotočivým drážkováním. Střela bude roztočená na jednu nebo druhou stranu. Kdyby v přírodě platila levoprávní symetrie, bude existovat stejný počet levotočivých i pravotočivých neutrín. A mnohem více: kdybychom postavili kopii nějakého stroje podle jeho zrcadlového obrazu, choval by se úplně stejně. Zkrátka nebyl by rozdíl mezi levým a pravým. Příroda taková bohužel není.

V roce 1956 byly pozorovány slabé rozpady K^+ mezonů, které nezachovávaly pravolevou symetrii. Zrcadlový obraz rozpadu vypadal jinak než obraz původní. K ověření tohoto důležitého tvrzení navrhli T. D. Lee a C. N. Yang experiment s izotopem kobaltu ^{60}Co . Experiment provedla C. S. Wu z Kolumbijské university v roce 1957. Kobalt reaguje na magnetické pole. Proto byl izotop ^{60}Co podroben působení velmi silného magnetického pole za nízkých teplot. Magnetické momenty atomů kobaltu se při nízké teplotě zorientovaly ve směru magnetického pole. Předem tedy byl znám směr magnetického momentu atomů kobaltu (ve směru vnějšího magnetického pole). Atom kobaltu podléhá beta rozpadu, při kterém se ukázalo, že ve směru orientace vnějšího pole vylétá méně elektronů než ve směru opačném. Narušení pravolevé symetrie tak bylo definitivně potvrzeno.



Homestake – nádoba detektoru

Vratme se ale k neutrinům. Zde je narušení pravolevé symetrie stoprocentní. Neutrino se totiž vyskytuje jen v levotočivém provedení. Pravotočivé neutrino prostě nenajdete! Nemusíme ale věšet hlavu. Tam, kde příroda ubrala na jedné straně, přidala na druhé. U antineutrin je to přesně obráceně. Všechna jsou pravotočivá.

Ještě jedné důležité vlastnosti neutrin jsme se prozatím vyhnuli. Tou je klidová hmotnost. Mají-li neutrino nulovou klidovou hmotnost, pohybují se rychlostí světla a navždy zůstanou sama sebou (alespoň do příští srážky). Nemají-li ale nulovou klidovou hmotnost, budou se pohybovat rychlostí slabě podsvětelnou a může dojít k tzv. oscilacím neutrin. Například neutrino je chvíli neutrinem elektronovým a pak zase mionovým, atd. Právě tyto oscilace byly pozorovány v roce 1998 na aparatuře Super-Kamiokande. Z pozorovaných oscilací plyne, že rozdíl hmotnosti mionového a elektronového neutrina je $0,07 \pm 0,04$ eV (V článku jsou energie a hmotnosti, tak jak je v částicové fyzice zvykem, uvedeny v elektronvoltech ($1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}$ C). Hmotnost a energie spolu souvisí známým Einsteinovým vztahem $E=mc^2$), což nutně znamená ne-

nulovou hmotnost mionového neutrina a možná i elektronového. Naměřená hmotnost je velmi malá. Kdyby ale byla větší jak 17 eV, stačila by jen hmotnost všech neutrin ve vesmíru k jeho kladnému zakřivení a zabránila by neustálé expanzi vesmíru. O tom se v minulosti hodně spekulovalo, dnes je jasné, že neutrino tuto úlohu ve vesmíru neplní, jejich hmotnost na takový úkol nestačí.

Výskyt neutrin

Reliktní neutrina:

V době přibližně jednu sekundu po Velkém třesku (vesmír měl teplotu 10^{10} K) vzrostla střední volná dráha neutrin natolik, že přestala interagovat s látkou. Do této doby byla díky srážkám v termodynamické rovnováze s ostatním zářením a hmotou. Od této chví-

le neutrino žijí vlastním životem a postupně chladnou. Dnes by reliktní neutrino měla mít teplotu kolem 2 K, všude kolem nás jich je 300 v každém cm^3 a nesou v sobě obraz vesmíru z doby jejich oddělení od látky. Mnohem později došlo k podobnému oddělení fotonů od látky, které dnes pozorujeme jako reliktní mikrovlnné záření o teplotě 2,73 K. Teplota reliktního mikrovlnného záření je vyšší než teplota reliktních neutrin, protože mezitím došlo k anihilačním procesům, které vesmír zahřály.

Sluneční neutrina: V centru Slunce probíhá termojaderná syntéza vodíkových atomů na hélium (pp řetězec a v menším měřítku CNO cyklus), při které dochází ke vzniku neutrin s energiemi až do 20 MeV. Ta se z nitra Slunce šíří prostorem a zaplavují celou sluneční soustavu. U naší Země by každým centimetrem čtverečním nastaveným směrem ke Slunci mělo za každou sekundu protéct 70 miliard neutrin. Většina z nich prolétne bez povšimnutí naší Zemí, ale některá přece jen uvízou v neutrinových detektorech. Zde se zachycená neutrino počítají v tzv. Slunečních neutrinových jednotkách (SNU – Solar Neutrino Unit, 1 zachycené sluneční neutrino na 10^{36} atomů detektoru). Již

první experimenty v detektoru Homestake ukázaly, že detektor zachytí přibližně třetinu očekávaného počtu neutrin. Tento výsledek byl později potvrzen na detektoru Gallex (zcela jiného typu). Problém nedostatku slunečních neutrin je s největší pravděpodobností vysvětlitelný oscilacemi neutrin (detektor je necitlivý k jiným typům neutrin, která vznikla oscilacemi).

Neutrino z explozí supernov: Exploze supernov jsou doprovázené překotnou termojadernou syntézou a k jejím produktům samozřejmě patří i neutrino. Odhaduje se, že supernovu při explozi může jednorázově opustit kolem 10^{57} neutrin. Poprvé byla neutrino tohoto typu zaznamenána při explozi supernovy SN 1987A ve Velkém Magellanově mračnu. Detektor IMB (Irvine–Michigan–Brookhaven) detekoval 8 neutrin za pouhých 5 sekund. Normální frekvence je jedno neutrino za týden.

Neutrino atmosférická: Při interakci částic kosmického záření s horními vrstvami atmosféry vznikají asi 20 km nad zemí spršky částic, jejichž součástí jsou i neutrino. Jde sice o nepravidelné, ale zato vytrvalé zdroje neutrin. Právě díky atmosférickým neutrinům byly objeveny na detektoru Super-Kamiokande v Japonsku oscilace neutrin a nenulová hmotnost alespoň jednoho neutrina.

Neutrino umělého původu: V dnešní době již i člověk při své činnosti, někdy chtěně a někdy nechtěně, produkuje neutrino. Neodmyslitelně doprovází výbuch atomové bomby, činnost všech jaderných elektráren (antineutrino se střední energií 4 MeV) a vznikají zpravidla jako vedlejší produkty v některých urychlovačích (typické energie 10 MeV až 100 GeV). Například na komplexu urychlovačů v Brookhavenu vznikají stovky milionů neutrin za hodinu.

Principy detektorů

Chlorové detektory: Chlorové detektory jsou vlastně obří nádrže s roztokem látky obsahující chlór, například s tetrachlorethylenem. Procházející neutrino se občas zachytí v jádře chlóru a přemění jeden z neutronů na proton a elektron:



Touto reakcí se atom chlóru ^{37}Cl přemění na snadno detekovatelný radioaktivní argon ^{37}Ar s poločasem rozpadu 35 dnů. Chlorové detektory jsou citlivé na

neutrína s energiemi vyššími než 0,8 MeV. Na tomto principu je založen například první neutrinový detektor Homestake.

Galiové detektory: Jsou založeny na podobném principu jako detektory chlorové, jen účinnou látkou je roztok solí galia. Neutron v jádře galia se po zachycení neutrína změnil na proton a z galia Ga 71 se stane snadno detekovatelné radioaktivní germanium Ge 71 s poločasem rozpadu 11,4 dne. Galiové detektory jsou citlivé na neutrína s energiemi vyššími než 0,2 MeV, polapí tedy větší množství neutrin než detektory chlorové. Jako typický příklad galiových detektorů jmenujme detektor Gallex nebo detektor SAGE.

Vodní detektory: Zpravidla jde o velkou nádobu naplněnou lehkou nebo těžkou vodou. Využívá se slabé interakce neutrin s neutronem, při které vzniká elektron nebo mion s rychlostí vyšší než je rychlost světla ve vodě. Za letícím elektronem nebo mionem se vytváří charakteristická kuželovitá rázová vlna elektromagnetického záření (tzv. Čerenkovovo záření), která je detekována fotonásobiči na stěně nádoby. Z velikosti kužele lze zjistit, zda šlo o neutrinu elektronové nebo mionové. Nádoba s vodou je umístěna hluboko pod povrchem Země. Typickými detektory tohoto typu jsou Super-Kamiokande, SNO a IMB. Detektory na stejném principu existují i pod mořskou hladinou nebo hluboko pod antarktickým ledem (například detektor AMANDA) a využívají přirozeného výskytu molekul vody.

Detektory založené na inverzním beta rozpadu: Detektory využívají záchytu antineutrina protonem, produktem reakce je neutron a pozitron:

Sledují se charakteristické záblesky vzniklé anihilací pozitronu a záchytem



neutronu v jádře vhodného prvku. Na tomto principu bylo objeveno první neutrino v jaderné elektrárně Savannah River v roce 1956.

Detektory s neutrinovými svazky: Neutrinové svazky vznikají v protonových urychlovačích při interakci protonů s beryliovým terčem. Detekují se produkty interakce neutrinového svazku s protony, neutrony a elektrony při vysokých energiích. Na tomto principu bylo objeveno mionové neutrino v Brookhavenu v roce 1962.

Slavné detektory

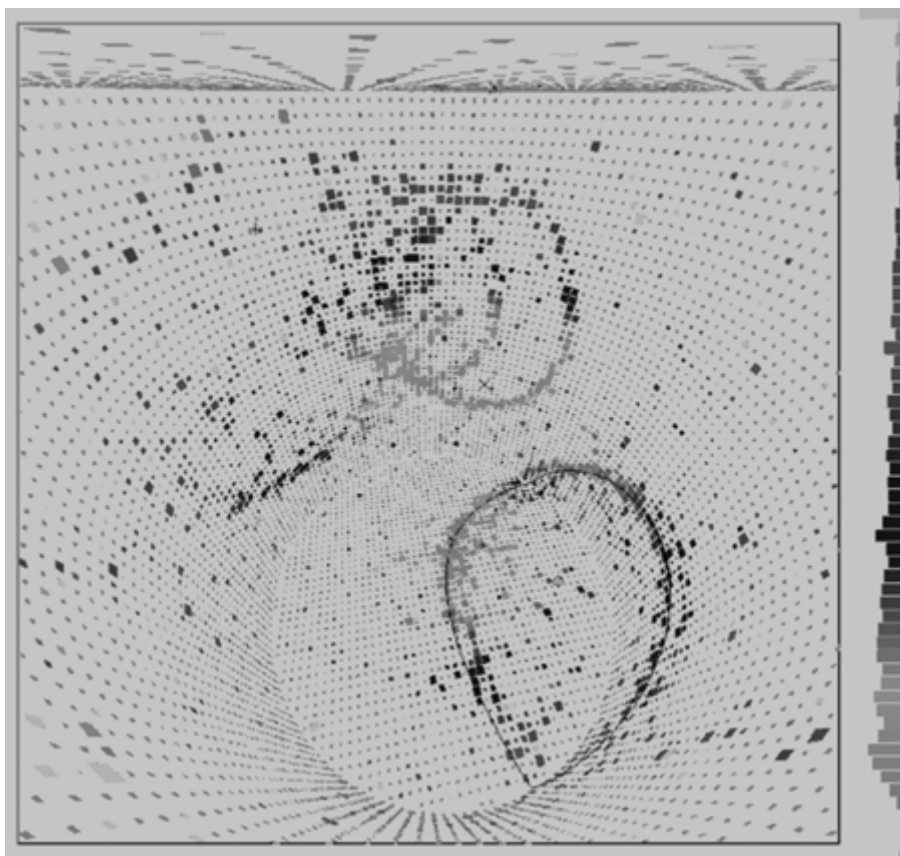
Homestake (1967–1993): První detektor neutrin byl postaven v opuštěném zlatém dole v Jižní Dakotě. Šlo o vodorovně uloženou válcovou nádobu naplněnou 615 tunami tetrachloretylenu. Detektor byl uveden do provozu v roce 1967 za vydatného příspěvní R. Davise. Administrativně spadá pod Brookhavenskou laboratoř. Jde o chlorový detektor, ve kterém měl být podle teorie měřen tok neutrin 8 SNU. Skutečně naměřená hodnota byla jen 2,5 SNU. Tím byl poprvé v historii otevřen výše zmíněný problém slunečních neutrin.

Gallex (1991–1997): Mezinárodní detektor byl umístěn v Itálii mezi městy Teramo a Řím v blízkosti tunelu pod horou Grand Sasso. Nádoba obsahovala 30 tun vodného roztoku galia ve formě gali-umtrichloridu. Pro tento detektor teorie předpovídala tok zachycených slunečních neutrin 132 SNU. Naměřená hodnota byla (78 ± 6) SNU a potvrdila tak nezávisle výsledky měření detektoru v Homestake. Od roku 1998 je na stejném místě provozován ryze italský detektor GNO (Gallium Neutrino Observatory), ve kterém bude

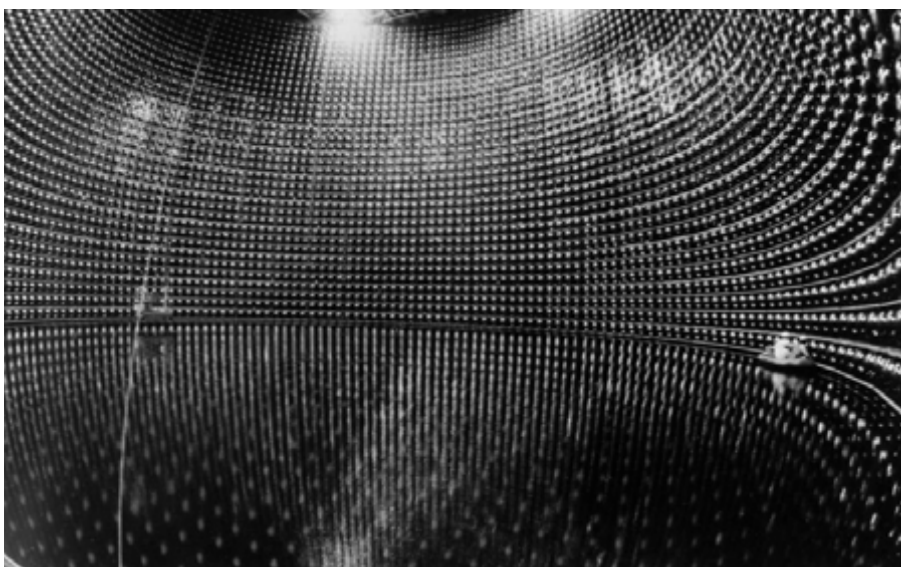
postupně množství roztoku galia zvýšeno na 100 tun.

Super-Kamiokande (1996): Japonská neutrinová observatoř z roku 1996 umístěná 1700 m pod povrchem hory Ikeno Jama ve starém zinkovém dole poblíž městečka Kamioka. Nádoba detektoru obsahuje 50 000 tun vody, na stěnách je 13 000 fotonásobičů, průměr nádoby je 40 metrů. Detektor detekuje Čerenkovovo záření elektronu nebo mionu vzniklého srážkou elektronového nebo mionového neutrina s neutronem. Z tvaru kužele Čerenkovova záření lze snadno odlišit elektronové a mionové neutrino. V průměru je zachyceno jedno atmosférické neutrino (vzniklé z kosmického záření v atmosféře) za hodinu a půl. V roce 1998 byl oznámen objev oscilací neutrin: byla pozorována jiná skladba neutrin ze směru nad detektorem než ze směru skrze Zemi. Neutrína prošlá Zemí měla čas na oscilace.

AMANDA (Antarctic Muon and Neutrino Detector, 1995): Detektor vrtaný v antarktickém ledu. První předběžné vrty pocházejí již z let 1991 a 1993. Problémy s bublinami v ledu byly překonány až



Super-Kamiokande – kužele Čerenkovova záření zachycené fotonásobiči



Super-Kamiokande – kontrola fotonásobičů na člunu uvnitř ne zcela zaplněného detektoru

v roce 1995, který lze považovat za počátek práce neutrinového detektoru. Do antarktického ledu jsou hloubeny horkovodním vrtákem vrty o průměru 50 cm do hloubky asi 2 km. Vrty zamrzou za dva dny. Ve vrtu zůstává zamrzlá struna s optickými moduly. Každý modul je spojen s povrchem nezávislým elektrickým kabelem a optickým vláknem, které vede k YAG laseru na povrchu. Optické vlákno slouží ke kalibraci optického modulu. Veškerá pomocná elektronika je na povrchu. Vrty jsou soustředěny v kruhové oblasti o průměru 120 m. Neutrino interagující s neutronem vytvoří relativistický elektron či mion, který za sebou zanechává v ledu charakteristický kužel Čerenkovova záření. Právě ten je detekován zamrzlými optickými moduly. Rozmístění modulů umožňuje prostorovou rekonstrukci kužele. Získané úhlové rozlišení pro neutrina z kosmického záření je pod 1° . Zařízení je schopné detekovat kromě běžných neutrin s energiemi několik MeV i vysoce energetická neutrina s energiemi vyššími než 1000 GeV a otvírá nám tak zcela nové okno pro pozorování vesmíru.

Další významné detektory: Neutrinových detektorů je dnes na světě mnoho desítek. Kromě výše uvedených detektorů k těm známějším patří ještě:

- *SNO* (Sudbury Neutrino Observatory) – podzemní těžkovodní Čerenkovův detektor v Ontariu v USA. Je určen zejména pro detekci slunečních neutrin.

- *SAGE* (Soviet American Gallium Experiment) – galiový sovětsko americký detektor, je umístěn na Kavkaze hluboko pod vesničkou Bakšan. Detekuje sluneční neutrina od energie 233 keV. V provozu je od roku 1990.

- *NOMAD* (Neutrino Oscillation MAGnetic Detector) – detektor u synchrotronu SPS v komplexu CERN. Detektor pracoval do roku 1999.

- *IMB* (Irvine-Michigan-Brookhaven) – podzemní vodní detektor, proslavil se detekcí neutrin ze supernovy SN 1987A a nezávislým potvrzením oscilací neutrin z analýzy starších dat.

- *CHOOZ* – detektor v Ardenách v severní Francii pod jadernou elektrárnou Chooz. Pracuje od roku 1996.

Neutrina tvoří svět sám pro sebe. Je všude kolem nás a my ho příliš nevnímáme. Výzkum neutrin nám ale může pomoci korigovat naše představy o světě elementárních částic, zkoumat termojaderné reakce v nitru hvězd, sledovat procesy při explozích supernov. Jednou, možná v nadcházejícím století, se snad astronomům podaří detekovat reliktní neutrina. Pak bychom

neutrinovými očima uviděli svět pouhou sekundu po jeho zrodu. Fantazie? Snad, i když nikdy neříkejme nikdy.

Dodatek – Nobelovy ceny udělené protagonistům příběhu

- 1906: J. J. Thompson – objevitel elektronu.
- 1908: E. Rutherford – objevitel atomového jádra, odlišil alfa a beta rozpad.
- 1935: J. Chadwick – objevitel neutronu, našel strukturu deuteronu.
- 1938: E. Fermi – pojmenoval neutrino, konstruktér prvního jaderného reaktoru, významné práce v kvantové teorii.
- 1945: W. Pauli – navrhl existenci neutrina, významné práce v kvantové teorii.
- 1957: T. D. Lee a C. N. Yang – objevitelé mionového neutrina, práce k narušení levoprávé symetrie, významné práce v kalibračních teoriích.
- 1979: S. L. Glashow, A. Salam, S. Weinberg – teorie elektroslabé interakce.
- 1984: C. Rubbia, S. Meer – objevitelé částic slabé interakce.
- 1995: F. Reines – objevitel neutrina; M. Perl – objevitel taonu (těžkého elektronu).

Další informace

- <http://www.aldebaran.cz, sekce ASTRO. Elementární částice, interakce, fotogalerie.>
<http://www.lapp.in2p3.fr/neutrinos/anexp.html>,
 přehled neutrinových experimentů.
http://www.hep.anl.gov/ndk/hypertext/solar_experiments.html, přehled detektorů slunečních neutrin.



Jaderná elektrárna Chooz ve Francii