

Kdyby byla vyhlášena soutěž o nejpodivuhodnější částici, hlasoval bych pro neutrino. Podpořila by mne jistě řada částicových fyziků, astrofyziků a kosmologů, protože tato základní částice hmoty hraje důležitou úlohu ve světě nejmenších i největších rozměrů. V roce 1930, kdy seznam základních částic měl jen dvě položky – proton (jádro nejlehčího izotopu vodíku) a elektron – našel Wolfgang Pauli¹ odvahu postulovat existenci další částice. Učinil tak „zoufalý pokus“ zachránit zákon zachování energie, o jehož platnosti v mikrosvětě tenkrát začali pochybovat i někteří vynikající fyzikové. Experimenty totiž jednoznačně prokázaly, že by emise samotných elektronů v radioaktivním rozpadu beta tento univerzální zákon porušovala. Při současné emisi elektronu a neutrina je naopak vše v pořádku.

Pauliho rmoutilo to, že jeho hypotéza byla prakticky neověřitelná. Z výpočtů totiž vyplývalo, že neutrino působí na veškerou ostatní hmotu až neověřitelně slabě. O čtvrtstoletí později však američtí fyzikové Frederic Reines a Clyde Cowan jr. existenci neutrina přece jen prokázali. Umožnil jim to mocný tok neutrin z jaderného reaktoru a vynález scintilačních detektorů záření. Reines za to



PŘEDSTAVUJE

Největší váhy pro nejlehčí částici

Co prozradí spektrometr KATRIN?

**OTOKAR
DRAGOUN**

Ing. Otokar Dragoun, DrSc., (*1937) vystudoval fyziku na Fakultě technické a jaderné fyziky ČVUT v Praze. V Ústavu jaderné fyziky AV ČR se zabývá jadernou elektronovou spektroskopií a neutrinovou fyzikou. Je spoluzakladatelem mezinárodního neutrinového experimentu KATRIN.

dostal Nobelovu cenu r. 1995, Cowan se bohužel této pocty nedožil.

Všudypřítomná neutrina

Dnes víme, že se neutrina vyskytují nejen v radioaktivním rozpadu beta, ale v mnoha dalších procesech způsobených slabou interakcí.²

Mohutným zdrojem neutrin je termojaderná fúze, probíhající v nitru Slunce. Neutrina odtud vyletují téměř rychlostí světla a na každý čtvereční centimetr plochy zemského povrchu jich dopadá za vteřinu 60 miliard.³ Narozdíl od slunečního světelného záření jsme neutrinům vystaveni dnem i nocí, protože Země je pro tyto částice téměř dokonale „průhledná“. Nemusíme však mít obavy o své zdraví, za celý život zachytí naše tělo stěží jedno či dvě neutrina. Výrazně slabší spršky neutrin vznikají při průchodu kosmického záření zemskou atmosférou. Ani neutrina vyrobená v jaderných reaktorech a urychlovačích částic nikoho neohrožují a je-



jich výzkum významně pomáhá k poznání vlastností těchto podivuhodných částic.

Nejmocnějším zdrojem neutrin je výbuch supernovy. K takovému gravitačnímu zhroucení masivní hvězdy došlo před 168 000 lety ve Velkém Magellanově mračnu, tj. za okrajem naší Galaxie. Podle současných teoretických představ při tom vzniklo 10^{58} neutrin, která převzala téměř všechnu uvolněnou energii a rozletěla se všemi směry. Nepatrná část těchto neutrin (10^{16}) prošla 23. února 1987 v 7 hodin 35 minut univerzálního času během dvanácti vteřin třemi velkými pozemskými detektory. Registrovat se jich podařilo jen čtyřiaadvacet. Tak nízká účinnost je důsledkem zmíněné neochoty neutrin jakkoliv interagovat s prostředím. Přesto neutrina poskytují jedinou možnost jak nahlédnout do nitra Slunce a supernov. Právě proto dostali r. 2002 Nobelovu cenu dva zakladatelé neutrinové astronomie: Američan Raymod



Davis jr. za první detekci slunečních neutrin a Japonce Masatoshi Toshiba za první detekci neutrin ze supernovy (viz J. Niederle: Kosmická neutrina, *Vesmír* 82, 102, 2003/2).

Neutrina vznikají při každé radioaktivní přeměně beta, tedy i při rozpadu přirozených radionuklidů. Jedním z nich je radioaktivní draslík ^{40}K s poločasem rozpadu 1,2 miliardy let, který je srovnatelný se stářím sluneční soustavy. V těle dospělého člověka je asi 140 g draslíku, přičemž 0,01 % tohoto množství tvoří zmíněný ^{40}K . Každý z nás proto vysílá nevědomky a do všech směrů asi 4000 neutrin za vteřinu. Tito poslové nejspíše poletí vesmírem statisíce let bez jakékoliv interakce.

Téměř určitě existuje i obrovské množství reliktních neboli zbytkových neutrin, která společně s reliktními fotony (kosmickým mikrovlnným pozadím) předpověděl model vzniku vesmíru velkým třeskem. Spektrum reliktního fotonového záření je dnes již dů-

kladně prozkoumáno; odpovídá záření absolutně černého tělesa s průměrnou teplotou 2,7 K (podrobněji viz Jiří Langer: Pohled na okraj nedohledna, *Vesmír* 85, 658, 2006/11). Dokonce jsou pozorovány i směrové teplotní odchylky na úrovni tisíciny procenta. Reliktní neutrina, která se měla oddělit od ostatní hmoty již za 1 s od vzniku vesmíru, však dosud pozorována nebyla. V každém krychlovém metru vesmíru by jich průměrně mělo být 336 milionů. Při určité hmotnosti by tato neutrina mohla tvořit zčásti, popř. úplně skrytou, nezářící hmotu ve vesmíru. Původ této temné hmoty je jednou z největších záhad současné fyziky.

Proč neutrimo zatím neumíme zvážit?

Jednoduchý návod na změření hmotnosti neutrina, opírající se jen o zákon zachování energie v rozpadu beta, by mohli navrhnout i středoškolská studenta. Mohl by spočívat ve dvou krocích:

1. Nesnadný průjezd vakuové komory hlavního spektrometru KATRIN ulicemi Leopoldshafenu nedaleko Výzkumného centra v Karlsruhe vzbuzoval velkou pozornost.

1) W. Pauli byl jedním z tvůrců kvantové mechaniky. Za svůj vylučovací princip, určující obsazení kvantových stavů systému částic s poločíselným spinem, získal v roce 1945 Nobelovu cenu.

2) Neutrina necítí ani silnou interakci, charakteristickou pro procesy uvnitř atomových jader, ani interakci elektromagnetickou, typickou pro nabitě částice.

3) Tj. $6 \cdot 10^{10}$ v praktickém způsobu zápisu příliš velkých a příliš malých čísel.



2. Spektrometr záření beta téhož typu jako na obr. 4, vyvinutý nezávisle v Ústavu jaderného výzkumu ruské Akademie věd v Trojicku u Moskvy. Pro určení horní hranice hmotnosti neutrina měřil spektrum záření beta z plynného tritiového zdroje v levé části obrázku. Po instalaci zvětšené vakuové komory bude pokračovat ve výzkumu vlastností plynného zdroje pro experiment KATRIN.

- Změřme hmotnostním spektrometrem rozdíl hmotností ΔM (${}^3\text{H}$ - ${}^3\text{He}$) mateřského a dceřiného atomu. Jestliže výsledek vynásobíme čtvercem rychlosti světla, dostaneme celkovou energii, která se při rozpadu tritia uvolní.
- Změřme elektronovým spektrometrem maximální kinetickou energii částic beta (E_{max}) v tomto rozpadu. Rozdíl celkové energie uvolněné při rozpadu tritia a maximální energie částic beta (tj. $\Delta M \cdot c^2 - E_{\text{max}}$) je – až na malé korekce – energie, která se spotřebuje na vznik neutrina. Z ní lze hmotnost neutrina stanovit.

Zatím nejlepší měření hmotnosti jader tritia ${}^3\text{H}$ a helia ${}^3\text{He}$, provedené s vynikající relativní přesností $5 \cdot 10^{-10}$, vede k hodnotě $\Delta M \cdot c^2 = 18\,590,1 \pm 1,7 \text{ eV}$. Kdybychom spektrometrem beta zjistili, že v případě rozpadu beta tritia je $E_{\text{max}} \approx 13,6 \text{ keV}$, znamenalo by to, že $m_\nu \cdot c^2 \approx 5 \text{ keV}$. Hmotnost neutrina by tudíž byla rovna asi 1% hmotnosti elektronu (druhé nejlehčí stavební částice hmoty). Ve skutečnosti však je $m_\nu \cdot c^2$ tak malé, že se v nejistotě měřených hodnot rozdílu celkové energie uvolněné při rozpadu tritia a maximální energie částic beta ztrácí.

Pro určení hmotnosti neutrina proto musíme použít citlivější metodu. Tou je přesné měření tvaru koncové části spektra beta. Již v roce 1934 ukázal Enrico Fermi (Nobelovu cenu dostal r. 1938), že tvar spektra beta v blízkosti maxima závisí na hodnotě m_ν^2 . Měření tvaru spektra beta v této úzké oblasti nevyžaduje přesnou absolutní kalibraci ani energetické stupnice spektrometru, ani detektoru částic beta. Elektronový spektrometr však musí mít:

- co nejlepší rozlišení, aby dokázal rozlišit ve spektru jemný rozdíl mezi spektry beta

3. Pohled do tritiové laboratoře Výzkumného centra v Karlsruhe. Budou v ní umístěny všechny části experimentu KATRIN obsahující tritium.



odpovídajícími nulové nebo malé nenulové hodnotě m_ν ,

- co největší světelnost, aby mohl efektivně měřit spektrum beta v blízkosti E_{max} , kde je jeho relativní intenzita velmi nízká,
- co nejnižší pozadí, aby v něm hmotnostně citlivá část spektra beta nezanikla.

První dva požadavky jsou protichůdné a s jejich současným splněním se potýkají odborníci všech spektroskopických oborů. Vysoké rozlišení je zpravidla dosaženo za cenu nízké světelnosti a naopak. Podstatného zlepšení lze dosáhnout jen vývojem spektrometrů nových typů. Ve spektroskopii záření beta o to usiluje již třetí generace fyziků, jejich úsilí však zatím vedlo jen k snižování horní hranice m_ν . Z dlouhé řady měření uvedme alespoň tři výsledky: $m_\nu < 5 \text{ keV}/c^2$ v roce 1948, $m_\nu < 55 \text{ eV}/c^2$ v roce 1972 a současnou hranici $m_\nu < 2,3 \text{ eV}/c^2$ (tj. $m_\nu < 4,1 \cdot 10^{-33} \text{ g}$) z roku 2005. Tu dosáhli fyzikové z Univerzity v Mainzu (Mohuči) originálním elektrostatickým spektrometrem s magnetickou kolimací částic beta filtrem MAC-E (obr. 4).⁴

Hmotnost neutrina je nenulová!

V přírodě se setkáváme s neutriny tří typů. Podle toho, který elektricky nabitý partner je doprovází, jsou označovány jako elektronová, mionová či tauonová. Mimořádně úspěšný standardní model mikrosvěta považuje pro jednoduchost všechna neutrina za nehmotná ($m_\nu = 0$), i když to žádný obecný fyzikální zákon nevyžaduje. Pro hmotná neutrina ($m_\nu > 0$) předpověděl Bruno Pontecorvo, jeden ze zakladatelů neutrinové fyziky, již r. 1957 zvláštní kvantověmechanický jev – *neutrinovou oscilaci*. Předpokládal, že každé neutrinum je kvantověmechanickou superpozicí stavů s různou hmotností. Pochopit takový jev je obtížné, protože ve světě našich rozměrů nemá analogii. Pro nás je důležitý teoretický poznatek, že oscilovat mohou jen neutrina s *nenulovou hmotností*.

Zkoumání, zda k oscilacím neutrin opravdu dochází, se věnuje velká pozornost již léta. V roce 1998 se japonským fyzikům podařilo obřím podzemním detektorem Superkamio-kande dokázat, že neutrina vytvořená kosmickým zářením v zemské atmosféře skutečně oscilují. Následovala měření s neutrinou ze Slunce, reaktorů a urychlovačů (viz též Dave Wark: Neutrina, Vesmír 85, 33, 2006/1). Dnes již přijímáme neutrinové oscilace jako fakt, který byl opakovaně potvrzován nezávislými experimenty. Tím je jednoznačně prokázáno, že předpoklad nehmotného neutrina platit nemůže. V oscilačních experimentech je měřenou veličinou rozdíl čtverců hmotností, a proto z nich hodnoty hmotnostních stavů v principu určit nelze. Lze však určit *spodní* hranici alespoň jednoho z nich na $0,04$ až $0,07 \text{ eV}/c^2$.

Je spektroskopie záření beta na hranici svých možností?

„Není vyloučeno, že hmotnost elektronového neutrina lze přímo změřit ze spektra beta tritia, i když si nejsme jisti, že to lze uskutečnit vzhledem k fantastické, řek bych akrobatické obtížnosti takového experimentu.“

Bruno Pontecorvo (1980)

PODÍL ČESKÝCH FYZIKŮ NA EXPERIMENTU KATRIN

Nyní na experimentu KATRIN pracuje 120 fyziků, techniků a studentů z 15 výzkumných ústavů a univerzit pěti zemí. Podmínkou účasti je odpovědnost za konkrétní část projektu. My fyzikové z Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži jsme jako spoluzakladatelé experimentu KATRIN převzali již na začátku (v roce 2001) odpovědnost za kalibraci, a zejména za *monitorování stability energetické stupnice* hlavního spektrometru.* Závažnost tohoto úkolu ukázal jeden z našich kolegů již ve své diplomní práci: kdyby se v průběhu dlouhodobého měření spektra beta tritia nepozorovaně posunula energetická stupnice spektrometru o 50 meV (tj. o necelé tři miliontiny z 18,6 keV), mohla by způsobit systematickou chybu rovnou 20% očekávané citlivosti KATRIN na hmotnost neutrina.

Elektrická napětí na elektrodách spektrometru se budou trvale měřit s největší možnou relativní přesností 1–2 miliontin. Komerční digitální voltmetry dosahují takovou přesnost jen pro nízká napětí, a proto nezbyvá než vyvíjet precizní vysokonapěťové děliče. V oblasti do 11 kV máme dobré zkušenosti. Pro vyšší napětí vyvíjejí kolegové z Univerzity v Münsteru ve spolupráci s Fyzikálně-technickým ústavem v Braunschweigu dvojici děličů z nejkvalitnějších odporů, které lze pro tento účel získat.

KATRIN však nemůže spolupracovat jen na elektrická měření, a proto bude retardační napětí hlavního spektrometru připojeno ještě k monitorovacímu spektrometru. Tím se stane filtr MAC-E z dřívějšího neutrinového experimentu v Mainzu, který bude zdokonalen na vyšší energetické rozlišení.

Naším nejdůležitějším úkolem je vyvinout pro tento spektrometr stabilní radioaktivní zdroje monoenergetických elektronů. Cílem je opírat energetickou stupnici hlavního spektrometru KATRIN nejen o přesná elektrická měření, ale i o vhodný fyzikální standard. Takovým standardem by mohly být konverzní elektrony emitované ze slupky K atomu kryptonu při přechodu jádra ^{83m}Kr do základního energetického stavu. Tyto elektrony mají kinetickou energii 17 821,4±2,0 eV, tedy jen o 751 eV nižší, než je hraniční energie beta-spektra tritia, $E_{\text{max}} = 18\,572,6 \pm 3,0$ eV.

Nevýhodou je krátký poločas rozpadu ^{83m}Kr , jen 1,8 hod. Proto se snažíme vyvinout zdroj ^{83}Rb , které se na ^{83m}Kr rozpadá s příznivějším poločasem 86 dnů. Narážíme zde však na potíž, kvůli které dosud neexistují dostatečně přesné radioaktivní standardy monoenergetických elektronů. Vazbová energie atomových elektronů není (ani na vnitřních slupkách) konstantní, ale závisí na fyzikálně-chemickém prostředí vytvořeném sousedními atomy molekuly nebo pevné látky. S měřením těchto změn, které mohou dosáhnout až několik eV, máme naštěstí zkušenosti. Snažíme se též vyvinout monoenergetický zdroj, který by využíval fotoelektrický kvant gama ^{241}Am na slupce K kovového kobaltu. Energie takto vzniklých fotoelektronů se liší od hraniční energie spektra beta tritia o pouhých 60 eV; máme však určité problémy s jejich intenzitou a pozadím vytvořeným fotony jiné energie. Naším cílem je vyvinout pro monitorovací účely KATRIN zdroje elektronů, jejichž energie v okolí 18 keV bude stabilní nejméně na ±50 meV.

KATRIN plánuje využít konverzní elektrony z plynného ^{83m}Kr i k absolutní

kalibraci. Ta pro získání experimentální informace o hmotnosti neutrina není nezbytná, ale umožňuje srovnat změřenou hraniční energii E_{max} s nezávisle určeným rozdílem $\Delta M(^3\text{H}-^3\text{He}) \cdot c^2$. Nesouhlas těchto hodnot by upozornil na systematickou chybu a zpochybnil věrohodnost údaje o hmotnosti neutrina z téhož experimentu. Dosavadní hodnotu kinetické energie konverzních elektronů se nám podařilo čtyřnásobně zpřesnit díky tomu, že energii jaderného přechodu v ^{83m}Kr jsme určili s menší nejistotou ±0,5 eV a vazbovou energií elektronů K v plynném kryptonu dokonce s nejistotou pouhé ±0,04 eV.

Pozornost věnujeme i vývoji nových metod statistického srovnávání spekter změřených v různých časových intervalech. Naše zkušenosti totiž ukázaly, že jde o velmi citlivý způsob kontroly toho, zda dlouhodobé měření skutečně probíhalo za *neproměnných podmínek*.

Intenzivně využíváme režský elektrostatický spektrometr, který může pracovat s vynikajícím energetickým rozlišením. Při přípravě experimentu KATRIN se podobně uplatňují i filtry MAC-E v Mainzu a Trojicku. První z nich perfektně ověřil zmíněnou ideu, že lze snížením pozadí drátovými elektrodami, které odpuzují sekundární elektrony z pláště vakuové komory. Tím pozadí detektoru pokleslo ze 70 mHz na 1,2 mHz. Trojický spektrometr s nepatrným množstvím plynného ^{83m}Kr zkoumá rozložení elektrického potenciálu uvnitř plynného tritiového zdroje.

*) Naši práci podporuje již pátým rokem Grantová agentura České republiky (granty č. 202/03/0889 a 202/06/0002).

Nedávná měření tritiových spekter beta sice významně snížila horní hranici hmotnosti neutrina zhruba na $2\text{ eV}/c^2$, avšak přístroje, na nichž byly tyto experimenty provedeny, dosáhly hranice svých možností. Měření tvaru spektra záření beta je přitom jedinou známou metodou *modelově nezávislého* určení hmotnosti neutrina. Výsledky ostatních metod závisí na modelových představách o atomovém jádru (při odvozování informace o hmotnosti neutrina z dolní hranice poločasu dvojného bezneutrinového rozpadu beta), o supernově (při analýze časového a energetického rozložení impulzů v neutrinovém detektoru) a podobně. Teorie zatím nedokáže hmotnost neutrina předpovědět a uvítala by její spolehlivou experimentální hodnotu.

Proto se v lednu 2001 uskutečnilo na hradě v Bad Liebenzell světové setkání padesáti odborníků z nejrůznějších oborů od astrofyziky po vakuovou techniku, aby všestranně posoudili fyzikální účelnost a technickou realizovatelnost stavby výrazně výkonnějšího spektrometru záření beta. Ten by měl zvýšit citlivost určení hmotnosti neutrina až na *desetiny eV/c²*. Porada vývoje takového zařízení jednoznačně podpořila a v červnu téhož roku vznikl projekt KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment).

Fyzikové se s nadšením pustili do podrobného návrhu experimentu a dospěli k závě-

ru, že pomocí filtru MAC-E o průměru 7 m (tj. desetkrát větším než v Mainzu) mohou docílit citlivosti určení hmotnosti neutrina $0,35\text{ eV}/c^2$. V červnu 2002 posoudil tento návrh mezinárodní výbor specialistů. Uvážil, že jde o jediný projekt ve světovém měřítku na celé příští desetiletí, a doporučil účastníkům projektu KATRIN, aby se pokusili o ještě vyšší citlivost. Po jedenapůlročním úsilí tak vznikl zdokonalený projekt založený na filtru MAC-E o průměru 10 m a délce 23 m. Bude-li tento dvěstětunový spektrometr beta fungovat podle výpočtů, dosáhne hranice $m_\nu < 1\text{ eV}/c^2$ již za jediný den měření. Hranice $m_\nu < 0,35\text{ eV}/c^2$ by měl dosáhnout po dvouměsíční expozici. Plná citlivost $m_\nu < 0,2\text{ eV}/c^2$ však bude vyžadovat 1000 měřicích dnů, tj. s uvážením kalibrací a údržby pět kalendářních let.

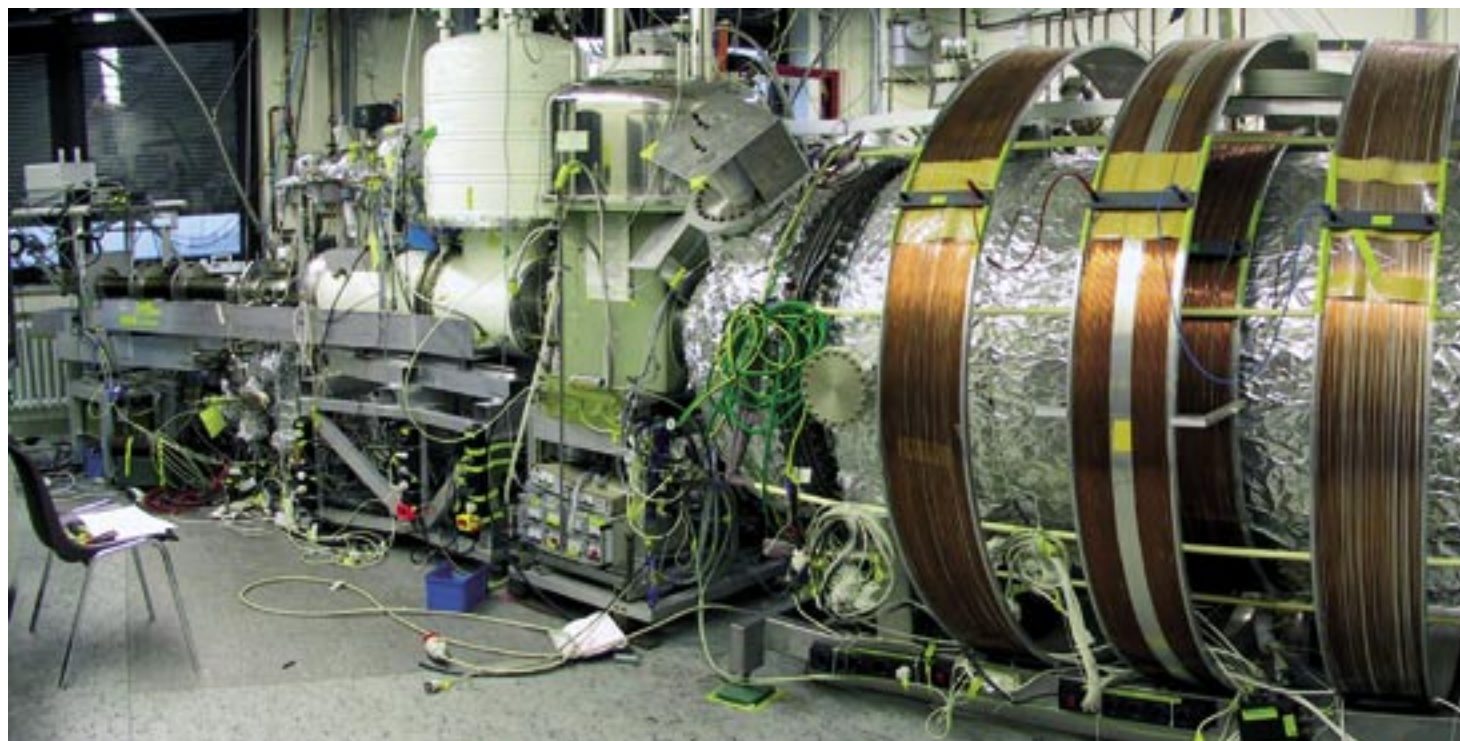
Výzva pro fyziky a techniky začátku 21. století

Jediný způsob jak zjistit hranice možného je zkusit dosáhnout alespoň kousek nemožného.

Alvan Clark (1804–1887),
americký optik a konstruktér největších astronomických
dalekohledů své doby

Hlavní překážkou spolehlivého měření spekter záření beta jsou ztráty energie elektronů, k nimž dochází jak uvnitř ultratenkého radioaktivního zdroje, tak ve spektrometru, například rozptylem na clonách vymezujících svazek analyzovaných částic. Energetické

4) Stejný typ spektrometru vyvinuli nezávisle na nich fyzikové z Ústavu jaderného výzkumu v Trojicku u Moskvě (obr. 2). Pro m_ν určili podobnou horní mez jako jejich kolegové z Mainzu, potýkají se však ještě s malou dosud nevysvětlenou anomálií ve změřeném spektru beta.



4. Elektrostatický spektrometr záření beta s magnetickou kolimací částic vybudovaný ve Fyzikálním ústavu Univerzity Johana Gutenberga v Mainzu (Mohuči). Změřil současnou nejspolehlivější horní hranici hmotnosti neutrina. Po úpravě bude sloužit jako monitorovací spektrometr KATRIN ve Výzkumném centru Karlsruhe.

ztráty zkreslují skutečný tvar spektra a s jejich správným započtením se potýkaly všechny experimenty pátrající po hmotných neutrinech.⁵

Pro minimalizaci energetických ztrát ve spektru beta tritia je nevhodnější plynný radioaktivní zdroj. Volba plynného radioaktivního zdroje jednoznačně umísťuje experiment KATRIN do Výzkumného centra Karlsruhe (FZK). Tam je totiž jediná vědeckotechnická laboratoř v Evropě (obr. 3), která je schopna zajistit dostatečné množství vysoce čistého tritia. Nejde jen o obvyklou chemickou čistotu, ale i o izotopickou čistotu, tj. minimální příměs velmi rozšířeného nejllehčího izotopu vodíku ^1H a deuteria ^2H . Kromě toho je ve FZK potřebné zázemí v kryogenní technice, supravodivých magnetech, vakuové technice a elektronice. Důležitá je i zkušenost FZK s velkými vědeckoinženýrskými projekty. Na rozdíl od předchozích beta-spektroskopických experimentů totiž požadavky KATRIN přesahují možnosti jednoho ústavu či univerzity a vyžadují mezinárodní spolupráci odborníků řady profesí.

Zařízení KATRIN (obr. 5) je 75 m dlouhé. Hlavní částí *plynného zdroje radioaktivního tritia* je trubka z nemagnetické nerezavějící oceli o průměru 9 cm a délce 10 m. Kapilárami v její střední části do ní bude proudit pod tlakem 0,3 Pa molekulární tritium. Mohutné turbomolekulární vývěvy na obou otevřených koncích tritium odčerpají a vrátí je zpět do středu trubky. Trubkou, ochlazenou na teplotu 30 K, tak bude proudit $5 \cdot 10^{19}$ tritiových molekul za vteřinu. Cílem tohoto diferenciálního čerpání je zajistit potřebný počet molekul tritia uvnitř trubky a zároveň zabránit průniku tritia do dalších částí aparatury. Trubka totiž nemůže být uzavřena ani tenkou přepážkou, protože by v ní částice beta ztrácely při průchodu k spektrometru část své původní energie.

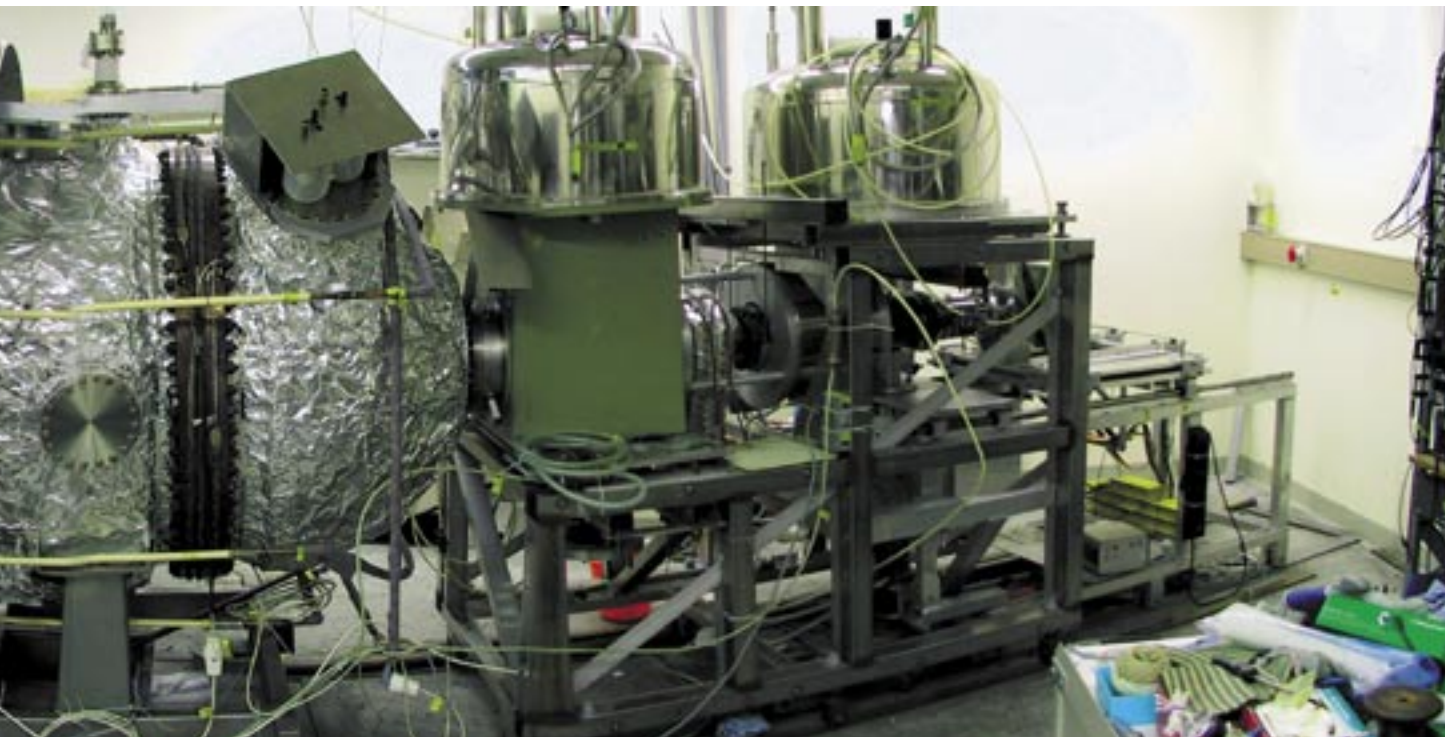
Z poločasu rozpadu tritia $T_{1/2} = 12,3$ roku vyplývá, že uvnitř trubky se na dceřiná jádra ^3He přemění sice jen nepatrná část tritiových jader, přesto však v ní vznikne mnoho částic beta, které se pod vlivem vodičích pole supravodivých magnetů budou pohybovat po šroubovici. Z plynného tritiového zdroje tak postoupí směrem k spektrometrům za vteřinu $2 \cdot 10^{10}$ částic beta s různou energií až do 18,6 keV. Celé zařízení KATRIN bude vybaveno více než 30 supravodivými magnety, které povedou částice beta od místa jejich vzniku přes dva elektrostatické spektrometry až k detektoru. Stopy radioaktivního tritia, které se přes čerpací systém nevrátily do plynného zdroje, zachytí vymrazovací systém na teplotě 4,5 K.

Novinkou uspořádání KATRIN je *předsazený elektrostatický spektrometr*, který k další analýze propustí jen částice beta s energií větší než 18,3 keV. Do hlavního spektrometru, jehož úkolem je analyzovat koncovou část spektra citlivou na hmotnost neutrina, tak vstoupí jen 10^3 částic beta za vteřinu. Tím se výrazně sníží nebezpečí, že by převládající část „neživotných“ částic beta mohla v hlavním spektrometru vyvolat procesy zvyšující pozadí detektoru.

Detektor částic beta je konstruován tak, aby zajistil 90% účinnost detekce a měl extrémně nízké pozadí, nejvýše 10 mHz. Při snaze zachovat plánovanou citlivost experimentu KATRIN na hmotnost neutrina $0,2 \text{ eV}/c^2$ by totiž zvýšení pozadí o 1 mHz nad uvedenou hodnotu prodloužilo dobu měření o 1,5 měsíce. Detektor bude rozdělen na 145 nezávislých částí, které budou registrovat částice beta z různých částí objemu radioaktivního zdroje i spektrometrů. To je důsledkem působení vodičích magnetického pole, kdy se každá částice beta po celou dobu pohybuje po šroubovici kolem „své“ siločáry. Díky tomuto jevu lze korigovat různé drobné nedokonalosti reálné konstrukce zaří-

5) Dvakrát dokonce vznikl planý poplach, že se hmotná neutrina ve spektrech beta již projevila. Poprvé vycházela zdánlivá hmotnost m , okolo $30 \text{ eV}/c^2$, podruhé zkreslená spektra ukazovala na malou příměs neutrin s hmotností $17 \text{ keV}/c^2$. Po určité době trápila experimentátory i záporná hodnota čtverce hmotnosti (m^2), která prozrazovala systematickou chybu měření. Vyjasnění příčin těchto nesrovnalostí si často vyžádalo několikaletou úpornou práci. Potíže nezpůsobila nedbalost fyziků, byly důsledkem práce na „hranici možného“.

6) Udávají $\langle m \rangle \approx 0,4 \text{ eV}/c^2$. To by sice byla příznivá zpráva pro budovatele experimentu KATRIN s citlivostí na hmotnost neutrina rovnou $0,2 \text{ eV}/c^2$, avšak spektra ^{76}Ge obsahují i několik sporných čar a nezbývá než počkat na potvrzení či vyvrácení tohoto tvrzení ještě citlivějšími experimenty.



zení. Vodicí magnetické pole se postará i o to, aby částice beta nikde nenasazily na stěnu - na rozdíl od ostatních spektrometrů nejsou proto třeba žádné clony vymezující svazek částic. Na těch, jak víme, může dojít k rozptylu částic, a tím k zkrácení jejich původní energie.

Podari se určit hmotnost neutrina v příštím desetiletí?

Jak jsme se zmínili, měření neutrinových oscilací ve velkých podzemních detektorech prokázala, že hmotnost všech neutrin nemůže být nulová. Tyto náročné a nesmírně důležité experimenty nejsou v rozporu s představou, že $m_1 \approx 0 \text{ eV}/c^2$, $m_2 \approx 0,01 \text{ eV}/c^2$ a $m_3 \approx 0,05 \text{ eV}/c^2$. Nevylučují však ani možnost, že platí $m_1 \approx m_2 \approx m_3$ a hmotnosti jsou mnohem větší. Z nejnovějších měření tvaru spektra beta víme, že $m_\nu \leq 2,3 \text{ eV}/c^2$. Víme též, že v důsledku neutrinových oscilací není význam veličiny m_ν tak jednoduchý, jak jsme byli zvyklí u ostatních částic. Jde o vážený průměr hmotnostních stavů m_1 , m_2 a m_3 , jejichž váhu určují právě nezastupitelné oscilační experimenty. Zásadně důležité je, že hodnota hmotnosti neutrina určená z tvaru spektra beta je *modelově nezávislá*. Tak tomu bohužel není u ostatních experimentů, z nichž některé udávají již dnes nižší hranici hmotnosti neutrina.

Soustavné pátrání po tom, jestli v přírodě existuje bezneutrinový dvojný rozpad beta ($0\nu\beta\beta$), vede k efektivní hodnotě $\langle m_\nu \rangle \leq 0,35 \text{ eV}/c^2$, která však obsahuje veličiny m_1 , m_2 a m_3 v méně průhledném tvaru a může se změnit o faktor 2-3 podle jaderného modelu použitého k interpretaci měřeného poločasu. Malá část účastníků experimentu s ^{76}Ge dokonce tvrdí, že již bezneutrinový dvojný rozpad beta pozorovala.⁶

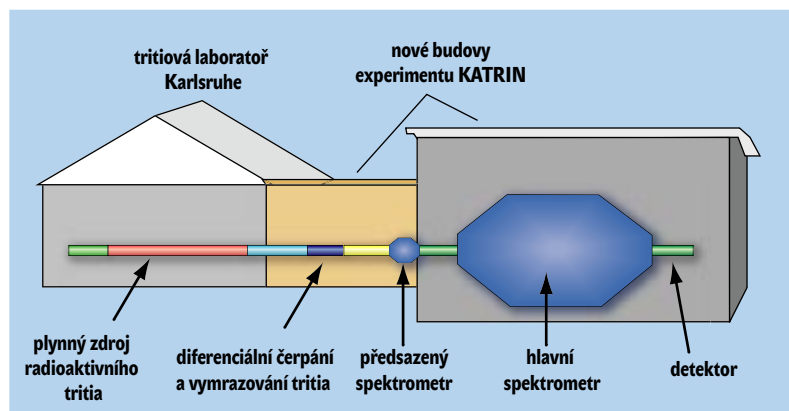
Pozoruhodné jsou i odhady součtu hmotností jednotlivých neutrinových stavů ($\Sigma m_i = m_1 + m_2 + m_3$) vyplývající ze soustavného měření nepatrné teplotní anizotropie kos-

mického mikrovlnného pozadí a rozložení obrovského počtu galaxií. Při analýze těchto experimentálních dat podle standardního kosmologického modelu se hledají optimální parametry řady vzájemně souvisejících fyzi-

5. Schematické uspořádání zařízení KATRIN, které bude na hmotnost neutrina desetkrát citlivější než dosavadní nejlepší přístroje.

Obří rozměry *hlavního spektrometru* osvědčeného typu filtru MAC-E vyplývají z potřeby analyzovat částice beta o energii okolo 18,6 keV s rozlišením lepším než 1 eV. To je určeno poměrem nejslabšího magnetického pole 0,3 mT v analyzační rovině spektrometru a nejsilnějšího magnetického pole 6 T, kterému jsou částice beta vystaveny. Pro správnou funkci hlavního spektrometru je nezbytné mít v jeho komoře o objemu 1250 m³ a vnitřním povrchu 650 m² vakuum lepší než 10⁻⁹ Pa, které se dosud dosahovalo jen v mnohem menších komorách. Při vakuovém vypékání na 350 °C se komora prodlouží o 14 cm. Proto bude na jedné straně zakotvena a druhá strana s detektorem částic bude posuvná. Vzhledem k svým rozměrům musela být komora spektrometru dopravena do Karlsruheu z továrny v Deggendorfu, vzdálené vzdušnou čarou jen 220 km, po vodě kolem Evropy, cestou dlouhou 8800 km.

Další zvláštností obou spektrometrů je to, že jejich vakuové komory nebudou jako obvykle uzemněny, ale budou připojeny na vysoké napětí okolo -18 kV. Uvnitř komory v blízkosti pláště bude systém drátových elektrod na napětí ještě o asi 100 V zápornějším. Potenciální rozdíl mezi pláštěm a elektrodami zajistí, aby se nízkoeenergetické elektrony, které budou vyraženy z pláště kosmickým zářením a zářením gama okolních přirozených radionuklidů, nedostaly dovnitř spektrometru. Tvar drátových elektrod byl pečlivě vypočten tak, aby uvnitř spektrometru nevznikly žádné magnetické pastě, v nichž by částice beta uvízly a zvětšovaly ionizaci zbytkových molekul plynu pozadí detektoru.





6. Vzhledem k svým rozměrům musela být komora spektrometru dopravena do Karlsruhe z továrny v Deggendorfu, vzdálené vzdušnou čarou jen 220 km, po vodě kolem Evropy, cestou dlouhou 8800 km.

kálních veličin včetně součtu hmotností neutrinových stavů. Konzervativnější přístupy uvádějí pro tento součet horní hranici 1–2 eV/c². Odvážnější odhady udávají $\Sigma m_i \leq 0,7 \text{ eV}/c^2$, což by za předpokladu $m_1 \approx m_2 \approx m_3$ znamenalo maximální hodnotu m_i asi 0,2 eV/c². Je však třeba mít na paměti, že současný kosmologický model nedokáže vysvětlit původ 95 % gravitační potenciální energie, tj. původ neznámé temné hmoty a energie ve vesmíru.⁷

Jaké experimentální údaje o hmotných neutrinech můžeme očekávat v příštích deseti letech? Je-li skutečná hmotnost neutrina v oblasti několika desetin eV, bude s velkou pravděpodobností změřena. Je-li mnohem menší, můžeme od budovaných či plánovaných experimentů očekávat horní hranice 0,2 eV/c² z měření tvaru spektra beta tritia, 0,03 eV/c² z pátrání po bezneutrinovém dvojném rozpadu beta a 0,07 eV/c² z kosmologie.

Je možné, že se údaje získané ze spektra beta tritia podaří doplnit mikrokalorimetrickým měřením spektra beta z rozpadu ¹⁸⁷Re. Tento izotop rhenia má nejnižší známou hraniční energii spektra beta (pouhých 2,5 keV), jeho poločas rozpadu 44 miliard let však vylučuje obvyklé spektroskopické postupy. To může být i výhoda, protože v krystalku rhenia se všechna energie uvolněná z rozpadu beta vyjma klidovou a kinetickou energii neutrina přemění na teplo. A právě tuto nepatrnou změnu teploty dokážou zaznamenat

mikrokalorimetry pracující při ultranízkyých teplotách. Současná hranice 15 eV/c² určena ze spekter beta izotopu rhenia by podle ambiciózního projektu MARE měla být v roce 2010 zlepšena asi na 2 eV/c². Bude-li tento krok úspěšný, měl by soubor 50 000 rheniových mikrokalorimetrů dosáhnout v roce 2016 citlivosti budovaného experimentu KATRIN, tj. 0,2 eV/c². Pak bychom měli dva metodicky zcela odlišné, modelově nezávislé způsoby určení hmotnosti neutrina.

Spolupráce, nebo konkurence?

Mezinárodní výzkumné kolektivy, které se snaží získat informace o hmotnostních stavech neutrin a jejich směšování, si nekonkurují, naopak se vzájemně doplňují a kontrolují. Mimořádný význam má přitom tvůrčí spolupráce experimentálních a teoretických fyziků nejrůznějších oblastí. Na první konferenci o projektu KATRIN se mne jeden teoretický astrofyzik opakovaně ptal, jakou hmotnost neutrina bych si přál změřit. Mou odpověď byl velmi zklamán. Řekl jsem mu totiž, že jako experimentátor nemám právo si cokoli přát, musím se snažit, abych objektivně změřil skutečnou hodnotu této fyzikální veličiny. On si sice může přát cokoli, ale musí prozkoumat, jak jeho přání obstojí ve světle známých poznatků. Historie ukazuje, že zásadní rozpor přitom může vést k hlubšímu, kvalitativně novému poznání přírody.

Na přednáškách či při exkurzích slýchám otázku, jaké podmínky musí splnit mladý člověk, aby se mohl zúčastnit mezinárodního výzkumného projektu. Jsem přesvědčen, že podmínka je vlastně jediná: musí sám doopravdy chtít. Vysoký podíl mladých v experimentu KATRIN i v jiných mezinárodních projektech je toho důkazem. Většina z nich se do výzkumné práce zapojuje již v době studia. Platí to i pro tři mladé kolegy z naší výzkumné skupiny v Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Řeži.

7) Ze současných modelově nezávislých údajů o hmotnosti neutrina (mezi 0,05 eV/c² a 2,3 eV/c²) vyplývá příspěvek neutrin do celkové hmotnosti a energetické bilance vesmíru mezi 0,1% až 15%.

K DALŠÍMU ČTENÍ

- O. Dragoun, V. Brabec: Záhada 17 keV neutrina vyřešena, *Vesmír* 73, 65, 1994/2
- F. Reines: Neutrino – od poltergeista k částici, *Čs. čas. fyz.* A46, 199, 1996
- Ch. Sutton: *Spaceship Neutrino*, Cambridge University Press 1992
- V. Wagner: Temná hmota in flagranti, *Vesmír* 85, 727, 2006/12
- Ch. Kraus et al.: Final results from phase II of the Mainz neutrino mass search in tritium β decay, *Eur. Phys. J.* C40, 447, 2005
- J. Chýla: O vážení neutrin a nepoctivém prodáváči podivných jablek, *Vesmír* 73, 67, 1994/2
- KATRIN Home page <http://www-ik.fzk.de/katrin/>
- Projekt KATRIN <http://ojs.ujf.cas.cz/~rysavy/katrl1.htm>
- J. Angrik et al.: KATRIN Design Report 2004, <http://www-ik.fzk.de/katrin/>