

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Rupert Leitner; Michal Suk

Nobelova cena za fyziku v roce 1995

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 41 (1996), No. 3, 157--160

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137769>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1996

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nobelova cena za fyziku v roce 1995

Rupert Leitner a Michal Suk, Praha

Úvod

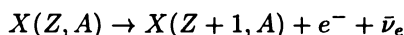
Prestižní Nobelova cena za fyziku byla koncem minulého roku udělena Frederiku Reinesovi z kalifornské univerzity v Irvine a Martinu Perlovi ze Stanfordské laboratoře.

Profesor Reines získal Nobelovu cenu za objev neutrina, který učinil spolu s Clyde Cowanem v roce 1956 v experimentu na reaktoru v Savannah River v Jižní Karolině. Za objev těžkého leptonu τ na urychlovači vstřícných svazků elektronů a pozitronů SPEAR obdržel Nobelovu cenu profesor Perl.

Neutrino objevené Reinesem a Cowanem (ten bohužel zemřel v roce 1974 a Nobelovy ceny se nedožil) bylo tzv. elektronové neutrino, které spolu s elektronem tvoří nejlehčí ze tří dubletů leptonů. Naopak τ je nejtěžší lepton, jehož neutrální partner tauonové neutrino dosud objeveno nebylo. Prostřední rodinu leptonů tvoří mion a mionové neutrino. Objevy prvního neutrálního (elektronového neutrina) a posledního nabitého (τ) ze všech tří existujících rodin leptonů měly rozhodující význam pro dnešní Standardní model elementárních částic.

Objev neutrina

Problém spojitých spekter elektronů pozorovaných v rozpadu beta přivedl Pauliho k předpokladu existence částice, jejíž přítomnost spojitost spektra vysvětlí a současně zajistí zachování momentu hybnosti (spinu). Tuto částici — neutrino — bylo však velmi obtížné experimentálně pozorovat. Jednou z možností bylo změřit odražené jádro $X(Z + 1, A)$ v beta rozpadu:



Avšak vzhledem k malým hybnostem částic (pc je asi 100 MeV; připomínáme, že p je velikost hybnosti částice a c je velikost rychlosti světla) je kinetická energie jádra asi 100 eV experimentálně neměřitelná.

Další možností je využití inverzní reakce k rozpadu beta neutronu. Volný neutron se rozpadá procesem



RNDr. RUPERT LEITNER, CSc. (1958), Prof. RNDr. MICHAL SUK, DrSc. (1933), Nukleární centrum MFF UK, V Holešovičkách 2, Praha 8

a inverzní reakci získáme převedením elektronu na „druhou stranu“ rovnice, při současném nahrazení částice antičásticí, tj. elektronu positronem.



Tento způsob použili Frederic Reines a Clyde L. Cowan [1].

Ze zákona zachování energie v reakci (2) můžeme snadno určit hodnotu prahové energie antineutrina:

$$E_{\bar{\nu}_e} = (m_n - m_p)c^2 + E_{e^+} + E_n^{\text{kin}} \quad (3)$$

Zanedbáme-li kinetickou energii E_n^{kin} neutronu v této reakci a vyjádříme-li rozdíl klidových energií neutronu s hmotou m_n a protonu s hmotou m_p ve tvaru $(m_n - m_p)c^2 = 2,53 m_e c^2$ v jednotkách klidové energie elektronu ($m_e c^2 = 0,51 \text{ MeV}$), získáme pro energii neutrina výraz:

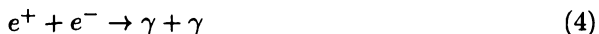
$$E_{\bar{\nu}_e} = 2,53 + E_{e^+}$$

Práh reakce (2) je tudíž

$$E_{\bar{\nu}_e}^{\text{práh}} = 3,53 m_e c^2 = 1,8 \text{ MeV}$$

Hlavním problémem pozorování reakce (2) je malý účinný průřez této reakce, který je řádu 10^{-44} cm^2 a s energií neutrin vzrůstá jako $E_{\bar{\nu}_e}^{3/2}$.

Pro velmi malou hodnotu účinného průřezu je pro úspěšný experiment nutno použít velice intenzivní svazek antineutrin s energií vyšší než 1,8 MeV a terčik a detektor velkého objemu. Jako zdroje neutrin byly využity rozpady beta vysoce radioaktivních štěpných fragmentů vznikajících při štěpné reakci v reaktoru. První experiment byl proveden v roce 1953 na jaderném reaktoru v Hanfordu (USA), avšak vzhledem k menší intenzitě nebyly výsledky prokazatelné. Po dalších pokusech a zkouškách byl v roce 1956 realizován průkazný experiment na reaktoru v Savannah River (USA) s tokem antineutrin $10^{13} \bar{\nu}/\text{cm}^2 \text{ s}$, z nichž většina má energii větší, než je práh reakce (2). Účinný průřez reakce zprůměrovaný přes energetické spektrum antineutrin je přibližně 10^{-43} cm^2 . Jako terč a současně detektor byl použit tank naplněný kapalným scintilátorem s příměsí kadmia, citlivý objem tohoto detektoru byl 1 400 litrů. Protony obsažené ve scintilátoru (triethylbenzen) tvoří terč reakce (2). V tanku rozměrů $2 \times 1,5 \times 0,7 \text{ m}^3$ probíhaly reakce (2). Při tom vznikal neutron s kinetickou energií několik keV a positron s kinetickou energií od 0 do 8 MeV. Positron se v náplni velmi rychle zbrzdil (za dobu řádově 10^{-10} s) a pak s některým z elektronů z atomového obalu anihiloval reakcí:



Anihilační fotony odnášely každý energii 0,511 MeV (tj. $m_e c^2$). Neutron se srážkami s jádrem zpomalil a difundoval až do záchytu jádrem kadmia v reakci:



(v průměru jsou vyslána čtyři kvanta γ , celková uvolněná energie je 9 MeV). Proces zpomalování a difuze neutronů probíhá během doby až asi $30 \mu\text{sec}$. Ve scintilátoru konvertovala kvanta γ vzniklá v obou reakcích (4) a (5), scintilační fotony byly zaznamenávány fotonásobiči a signály byly dále elektronicky zpracovány. Byla měřena velikost pulsů a tím získána informace o předané energii. Příklad reakce (2) se projeví následujícím způsobem:

- je zaznamenán signál odpovídající energii 1 až 8 MeV (registrace positronu)
- současně je spuštěno měření času
- objeví-li se do $25 \mu\text{s}$ další signál odpovídající energii 3 až 10 MeV (registrace neutronu), lze signály považovat za důkaz, že proběhla reakce (2).

K vyloučení pozadí byl detektor obklopen vrstvou parafinu a olova a soustavou antikoincidenčních detektorů. Počet zaznamenaných signálů reakce (2) za hodinu byl 36 ± 4 . Celková doba měření reakce (2) trvala asi 113 hodin (12 experimentů) a měření pozadí asi 69 hodin. Změřený účinný průřez reakce (2)

$$\sigma(\bar{\nu}) = (11,0 \pm 2,6) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$$

byl v souladu s očekávanou hodnotou. Z výsledků bylo možno usoudit, že reakce (2) skutečně probíhá a že tedy existuje částice, která ji vyvolává — elektronové antineutrino.

Objev leptonu τ

Objev těžkého leptonu τ [2] týmem vedeným M. Perlem byl učiněn v letech 1975–6 na urychlovači SPEAR vstříčných svazků elektronů a positronů v laboratoři SLAC ve Stanfordu, USA. Rok před objevem τ byla na stejném urychlovači a na témže detektoru Mark I spoluobjevena částice J/ψ složená z půvabného (c — charm) kvarku a antikvarku. Tento objev s definitivní platností prokázal existenci dvou rozdílných pokolení kvarků a leptonů.

Lepton τ objevený ve SLAC následně po J/ψ byl první objevenou částicí dalšího — třetího — pokolení kvarků a leptonů. Toto pokolení obsahuje kvarky b — bottom (objevený v roce 1977) a top (1995) a leptony τ a příslušné neutrino ν_τ .

Po objevu již zmíněné částice J/ψ byla na urychlovači SPEAR zvyšována energie svazků s cílem nalézt částice s novým kvantovým číslem c (charm — půvab). V experimentu vedeném M. Perlem byly však neočekávaně zaznamenány podivné případy interakcí

$$\begin{aligned} e^+e^- &\rightarrow e^+\mu^- + \geq 2 \text{ nedetekovatelné částice} \\ e^+e^- &\rightarrow e^-\mu^+ + \geq 2 \text{ nedetekovatelné částice} \end{aligned} \quad (6)$$

Nezaregistrovaná částice se pozná v interakci snadno podle chybějící energie a hybnosti v koncovém stavu. Skutečnost, že chybí více než jedna částice, se rozpozná podle rozdělení chybějící invariantní hmoty v případech interakce (6), která nabývá vysokých

hodnot a nevykazuje rezonanční Breit-Wignerovo chování v případě, že chybějí alespoň dvě částice.

Vzhledem k tomu, že počet zaznamenaných případů interakcí (6) vykazoval prahové chování (případy byly zaznamenány pouze pro energie svazku vyšší než určitá hodnota), jediným možným vysvětlením původu případů (6) bylo párové rození dosud neznámých těžkých nabitých částic s následným rozpadem na elektron a neutrino (neutrino) jedné z nich a rozpadem na mion a neutrino (neutrino) druhé částice.

Analýza dat byla zaměřena na zkoumání tří různých hypotéz:

– Interakce

$$e^+e^- \rightarrow L^+L^- \rightarrow \bar{\nu}_L e^+ \nu_e \nu_L \mu^- \bar{\nu}_\mu, \quad (7a)$$

kde L^+L^- je pár nových těžkých leptonů, který se rozpadá na lehké leptony positron a mion a celkem čtyři neutrino a antineutrino, která neinteragují v detektoru.

– Interakce

$$e^+e^- \rightarrow B^+B^- \rightarrow e^+ \nu_e \mu^- \bar{\nu}_\mu, \quad (7b)$$

při níž vzniká pár těžkých bosonů B^+B^- .

– Interakce

$$e^+e^- \rightarrow V^+V^- \rightarrow e^+ \nu_e \mu^- \bar{\nu}_\mu, \quad (7c)$$

při níž vzniká pár těžkých vektorových mesonů V^+V^- .

Rozhodnutí mezi těmito hypotézami bylo provedeno pomocí podrobné kinematické analýzy zaznamenaných případů, která ukázala, že se jedná s největší pravděpodobností o případ (7a), tj. že v anihilacích elektronů a positronů byl objeven nový těžký lepton, který byl později nazván τ podle řeckého slova triton — třetí, jehož hmota byla určena okolo 1800 MeV, což je mnohem více než dva lehčí leptony — elektron (0,5 MeV) a mion (105 MeV). Současná hodnota hmoty τ je 1777 MeV. Existence τ byla následně potvrzena v dalších experimentech v DESY a SLAC. V současnosti jsou vlastnosti τ podrobně studovány v mnoha experimentech, např. na urychlovači LEP v evropském středisku CERN a přesná měření hmoty τ byla provedena na urychlovači BEPC v Beijingu v Číně.

Podle současných údajů z experimentů na urychlovači LEP v CERN a SLC ve SLAC víme, že kromě dnes známých tří pokolení kvarků a leptonů neexistuje žádné další pokolení, tj. že τ je posledním třetím nabitým leptonem v hierarchii elementárních fermionů.

Poznámka redakce: Na výslovné přání autorů ponecháváme termín „hmota“ i tam, kde se běžně užívá termín „hmotnost“.

L i t e r a t u r a

- [1] F. REINES, C. L. COWAN JR.: *Free Antineutrino Absorption Cross Section. I. Measurement of the Free Antineutrino Cross Section on Protons.* Phys. Rev. 113 (1959), 273.
- [2] M. L. PERL et al.: *Evidence for anomalous lepton production in e^+e^- annihilation.* Phys. Rev. Lett. 35 (1975), 1489.