

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky

LEPTONY - VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Michal Svatoš

Vedoucí práce: RNDr. Pavel Staroba, CSc., FzÚ AV ČR, Praha

Akademický rok 2005/2006

Název práce:

Leptony - vývoj a současný stav poznání

Autor: Michal Svatoš

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Pavel Staroba, CSc., FzÚ, AV ČR

Konzultant: —

Abstrakt: Tato práce je rozdělena na dvě části. První část popisuje historii objevů leptonů. Jsou zde také popsány důležité experimenty, které souvisejí s leptony - Millikanův a Stern-Gerlachův experiment a některé významné neutrinové experimenty. Druhá část popisuje význam jednotlivých členů lagrangiánu GWS modelu elektroslabé interakce.

Klíčová slova: lepton, elektron, mion, tau, neutrino

Title: Leptons - evolution and current status of understanding

Author: Michal Svatoš

Abstract: This project is divided into two parts. The first one describes history of lepton discoveries. There are also described important experiments bearing on leptons - Millikan and Stern-Gerlach experiment and several significant neutrino experiments. Second part describes meaning of particular terms of the lagrangian of the GWS theory of the electroweak interaction.

Key words: lepton, electron, muon, tau, neutrino

Obsah

1	Úvod	7
2	Stručná historie objevování leptonů a rozvoje teorie jejich interakcí	9
3	Elektron a pozitron	13
3.1	Objev elektronu	13
3.2	Experimenty, které určily základní vlastnosti elektronu	16
3.2.1	Millikanův experiment	16
3.2.2	Stern-Gerlachův experiment	18
3.3	Objev pozitronu	20
4	Mion	21
4.1	Objev mionu	21
4.1.1	Měření C.D. Andersona a S.H. Neddermeyera	21
4.1.2	Měření J.C. Streeta a E.C. Stevensona	23
5	Tau lepton	25
5.1	Objev leptonu tau	25
6	Neutrína a antineutrína	27
6.1	Objevy neutrin	27
6.1.1	Elektronové neutrino	27
6.1.2	Mionové neutrino	28
6.1.3	Tauonové neutrino	28
6.2	Objevy antineutrin	29
6.2.1	Elektronové antineutrino	29
6.3	Experimenty, které měří klidovou hmotnost neutrin	30
6.4	Experimenty, které detekují solární neutrína	33
7	Glashow-Weinberg-Salamova teorie elektroslabé interakce	35
7.1	Lagrangián GWS teorie elektroslabé interakce	35
7.1.1	Hustota lagrangiánu	35
7.1.2	Transformace polí $\mathbf{W}$ a B	36
7.2	Význam částí lagrangiánu	36
7.3	Interakční vrcholy GWS teorie elektroslabé interakce	37
7.4	Souvislost počtu leptonů s počtem kvarků	39
8	Shrnutí současného stavu	41
9	Doplňující informace	43
9.1	Pauliho matice	43
9.2	Diracovy γ matice	43
9.3	Helicita	43

Kapitola 1

Úvod

Cílem této práce je popsat vývoj a současný stav poznání leptonů. V přiměřeném rozsahu bude zobrazena historie objevů nejvýznamnějších leptonů a teorie popisující jejich interakce. Do této části spadá popis a vysvětlení významu jednotlivých členů lagrangiánu elektroslabé interakce.

Leptony [51], [52] jsou fermiony s poločíselným spinem, které podléhají Pauliho vylučovacímu principu. Nabité leptony interagují s elektromagnetickým, slabým a gravitačním polem, zatímco neutrální (neutrino) pouze se slabým a gravitačním polem. Jsou to fundamentální částice, tj. na současné úrovni vědeckého poznání nejeví žádné známky vnitřní struktury. Seznam všech leptonů je v tabulce (1.1).

Generace	Částice	Neutrino	Antičástice	Antineutrino
První	elektron	elektronové neutrino	pozitron	elektronové antineutrino
	e^-	ν_e	e^+	$\bar{\nu}_e$
Druhá	mion	mionové neutrino	antimion	mionové antineutrino
	μ	ν_μ	$\bar{\mu}$	$\bar{\nu}_\mu$
Třetí	tauon	tauonové neutrino	antitauon	tauonové antineutrino
	τ	ν_τ	$\bar{\tau}$	$\bar{\nu}_\tau$

Tabulka 1.1: Přehled členění leptonů - leptony a antileptony

V tabulce (1.2) jsou uvedeny náboje a leptonová čísla leptonů a antileptonů. Existují tři druhy leptonových čísel [16]. Jsou to elektronové (L_e), mionové (L_μ) a tauonové (L_τ) leptonové číslo. Jedná se o aditivní kvantová čísla. Tato kvantová čísla se zachovávají absolutně ve všech procesech. Leptonová čísla nabývají pro leptony hodnotu +1, pro antileptony -1 a pro ostatní částice hodnotu 0.

	Q	L_e	L_μ	L_τ			Q	L_e	L_μ	L_τ
e^-	-1	1	0	0		e^+	1	-1	0	0
ν_e	0	1	0	0		$\bar{\nu}_e$	0	-1	0	0
μ	-1	0	1	0		$\bar{\mu}$	1	0	-1	0
ν_μ	0	0	1	0		$\bar{\nu}_\mu$	0	0	-1	0
τ	-1	0	0	1		$\bar{\tau}$	1	0	0	-1
ν_τ	0	0	0	1		$\bar{\nu}_\tau$	0	0	0	-1

Tabulka 1.2: Tabulka nábojů a leptonových čísel leptonů a antileptonů

Kapitola 2

Stručná historie objevování leptonů a rozvoje teorie jejich interakcí

V roce 1897 objevil sir Joseph John Thomson [17] elektron při zkoumání jevu nazvaného "katodové záření" v době svého působení v Cavendishově laboratoři [58], (3.1).

V roce 1909 provedl Robert Millikan experiment, který dokazoval, že náboj existuje v diskretním množství, je kladný a záporný, a oba dva mají stejné velikosti (3.2.1).

Počátkem dvacátých let Otto Stern [19] a Walter Gerlach [18] provedli experiment [53], který ukázal, že magnetický moment elektronu má dva možné směry a je kvantován (3.2.2).

V roce 1925 holandský fyzikové Samuel A. Goudsmit [20] a George E. Uhlenbeck [21] ve snaze vysvětlit spektra atomů alkalických kovů postulovali existenci vnitřního úhlového momentu nezávislého na orbitální charakteristice a tedy existenci čtvrtého kvantového čísla, které nabývá pouze dvou hodnot a to $+\frac{1}{2}$ a $-\frac{1}{2}$ [22].

V roce 1927 vznikla Diracova rovnice [24]. Je to relativistické rozšíření Schrödingerovy rovnice pro jednu částici a alternativa Klein-Gordonovy rovnice [1]

$$H\psi = (\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{P} + \beta m)\psi$$

kde $\mathbf{P}$ je vektor hybnosti, m je hmotnost a matice α a β jsou matice 4×4 . Tato rovnice může být převedena do tvaru

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Tato rovnice má řešení pro kladné i záporné energie. V této době nebyl zřejmý význam řešení pro záporné energie. Po objevu pozitronu se ukázalo, že popisuje antičástice [23], [31].

Koncem dvacátých let 20. století pozoroval Wolfgang Pauli [25] vylétávající částice (elektrony) při β -rozpadu. Zjistil, že β -rozpad zdánlivě porušuje zákony zachování energie a hybnosti. Aby vyřešil tento problém, navrhl v roce 1931 existenci částice, která tuto hybnost a energii odnáší, která však nemá náboj, má malou hmotnost a slabě interaguje s hmotou. Tuto částici později Enrico Fermi nazval neutrinem.

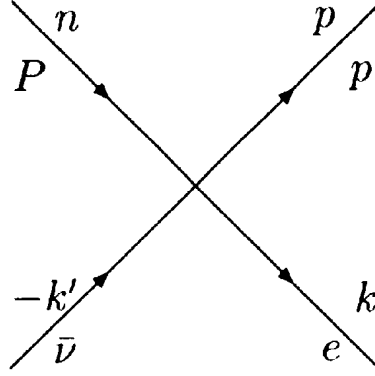
V letech 1930-1931 byla předpovězena P.A.M. Diracem [24] existence antičástic. Pozitron [26] byl objeven v roce 1932 C. Andersonem [27] v době jeho působení na Caltechu a to při studiu kosmického záření pomocí mlžné komory (3.3). Objev antičástice elektronu potvrdil platnost Diracovy rovnice.

Tento objev byl potvrzen o rok později britským fyzikem M.S. Blackettem [28] a italským fyzikem G. Occhialinim.

Nejznámější proces způsobovaný slabou silou je β -rozpad jádra, tj. spontánní vyzáření elektronu z jádra [3]

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

První teorii vysvětlující β -rozpad vytvořil v roce 1934 E. Fermi. Navrhl přímou interakci čtyř



Obrázek 2.1: Feynmanův diagram β -rozpadu neutronu v modelu přímé interakce čtyř fermionů

kvantových polí se spinem $\frac{1}{2}$, která odpovídají částicím v tomto procesu. Ten je popisován hustotou lagrangiánu

$$\mathcal{L} = -G(\bar{\psi}_p \gamma^\mu \psi_n)(\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu) + \text{hermitovsky sdružené}$$

kde ψ jsou čtyřsložkové spinory polí, γ^μ jsou Diracovy matice a G je vazbová konstanta.

V roce 1934 předpověděl Hideki Yukawa [29] existenci a některé vlastnosti částice zprostředkovávající silnou interakci mezi protonem a neutronem. V roce 1935 C.D. Anderson [27] a S.H. Neddermeyer objevili při zkoumání kosmického záření novou částici - mion (4.1). Mnoho z jejích vlastností souhlasilo s vlastnostmi Yukawovy částice (Yukawova částice je pion, objevený v roce 1947 C. Powellem [30]). Ukázalo se však, že mion neinteraguje silnou interakcí.

Počátkem třicátých let navrhl švédský teoretik Oskar Klein teorii slabé interakce. Kvantem této interakce byl neutrální boson se spinem 1. Tato teorie dávala správné spiny neutrina a elektronu při β -rozpadu. Částice zprostředkovávající interakci by byla asi 100-krát těžší než proton. Na druhé straně teorie dávala pro některé procesy nekonečné pravděpodobnosti [31].

Základy kvantové elektrodynamiky (QED) [36] položil P.A.M. Dirac svou rovnicí. Byla plně rozvinuta koncem čtyřicátých let nezávisle R.P. Feynmanem [34], J.S. Schwingerem [32] a S. Tomonagou [35]. QED je teorie, ve které nabitě částice interagují prostřednictvím výměny virtuálního fotonu. Feynman vyvinul kalkul, v němž lze maticové elementy zkoumaného procesu zobrazit grafickými symboly. Tyto symboly je možné názorně interpretovat. Tuto techniku (Feynmanovy diagramy [33]) lze použít pro každou teorii pole.

Při neustálé emisi a absorpci fotonu na elektronu vznikaly nekonečné hodnoty energie a hmotnosti fotonu. Předefinováním hmotnosti elektronu, aby zahrnovala tyto virtuální procesy a položením této hmotnosti rovné naměřené hmotnosti byl problém vyřešen. Tento proces se nazývá renormalizace [37].

V roce 1956 bylo poprvé pozorováno (6.2.1) elektronové antineutrino [40]. Svazek antineutrin vycházející z jaderného reaktoru produkoval neutrony a pozitrony při reakcích s protony. Ty byly detekovány.

V roce 1956 Tsung-Dao Lee [39] a Chen Ning Yang [38] navrhli nezachování parity ve slabých interakcích. Důvodem byla snaha vysvětlit rozpady podivných částic [31].

V roce 1957 Wu a jeho spolupracovníci provedli experimentální ověření nezachování parity ve slabé interakci pomocí β -rozpadu kobaltu 60 [3].



V roce 1958 Murray Gell-Mann [41] a Richard Feynman [34] popsali narušení parity ve slabé interakci. Použili k tomu V-A formalismus (vektor minus axial vektor). Tato teorie je založena na existenci kalibračních bosonů - částic, které přenášejí slabou sílu. Tato teorie funguje velmi dobře

pro nízké energie, ale pro velké nikoliv [31].

Počátkem šedesátých let začali Sheldon Glashow [45] v USA a Abdus Salam [47] a John Ward v Anglii pracovat na vytvoření sjednocené teorie elektroslabé interakce. Za kalibrační grupu své teorie vybrali $SU(2) \times U(1)$. Tato teorie obsahuje čtyři částice se spinem 1, které zprostředkují interakci - dvě neutrální a dvě nabitě. Jednu z neutrálních částic lze ztotožnit s fotonem. Zbývající tři částice (neutrální, záporně a kladně nabitá) zprostředkovávaly slabou interakci. Dnes je nazýváme Z^0 , W^- a W^+ [7]. Experimentální data vyžadovala, aby tyto částice měly klidovou hmotnost rovnou přibližně stonásobku hmotnosti protonu. Přímé zahrnutí odpovídajících členů do lagrangiánu teorie však naruší její renormalizovatelnost [31].

V roce 1962 objevil tým vedený L. Ledermanem [42], M. Schwartzem [44], a J. Steinbergerem [43] v Brookhaven National Laboratory v rozpadu π mezonu (6.1.2) mionové neutrino [40]. Bylo identifikováno prostřednictvím své interakce s protony a neutrony.

Koncem šedesátých let objevili nezávisle na sobě Abdus Salam [47] a Steven Weinberg [46], jak do teorie elektroslabé interakce zavést hmotné částice a přitom neporušit její kalibrační symetrii [31]. Použili k tomu Higgsův mechanismus. Tato teorie elektroslabé interakce se nazývá Glashow-Weinberg-Salamův model (GWS model) [7].

V roce 1971 holandští teoretici Gerard 'tHooft [48] a Martin Veltman [49] dokázali, že tato teorie elektroslabé interakce je renormalizovatelná [31].

GWS model obsahuje částici nazvanou Z^0 boson. Tato částice zprostředkuje slabé interakce, při nichž nedochází k přenosu náboje (tzv. neutrální proudy). Do té doby však byly pozorovány pouze procesy s tzv. nabitými proudy. Nalezení slabých procesů s neutrálními proudy bylo proto považováno za důkaz platnosti teorie. Došlo k tomu v roce 1973 v CERN na bublinové komoře Gargamelle. Svazek mionových antineutrín procházejících touto komorou se rozptyloval na elektronech. Neutrino nezanechává žádnou stopu, ale interakce prostřednictvím Z^0 způsobuje pohyb elektronů, jejichž dráha je viditelná [31].

V letech 1975-1977 byl skupinou, kterou vedl Martin Lewis Perl [50] objeven a potvrzen tau lepton. Experiment se uskutečnil na elektron-pozitronovém urychlovači SPEAR v laboratoři SLAC ve Stanfordu (5.1). Nový lepton byl pojmenován τ dle řeckého slova $\tau\rho\iota\omega\nu$, což v znamená třetí. Objev byl uveřejněn ve třech článcích:

- V prvním článku z roku 1975 bylo pojednáno o pozitron-elektronových srážkách, při kterých byly detekovány elektrony a antimiony, nebo pozitrony a miony. Nicméně kvůli zachování energie je třeba předpokládat existenci další částice, která nebyla detekována.
- Ve druhém článku z roku 1976 byly tyto události interpretovány jako vznik páru těžkých leptonů s hmotností mezi 1.6 a 2.0 GeV/c^2
- Ve třetím článku z roku 1977 byla potvrzena existence tau leptonu a byly změřeny některé jeho vlastnosti (například hmotnost $1.90 \pm 0.10 GeV/c^2$)

V roce 1979 získali Sheldon Glashow [45], Steven Weinberg [46] a Abdus Salam [47] Nobelovu cenu za fyziku. Tato cena jim byla udělena za vytvoření teorie elektroslabé interakce.

Bosony W^+ , W^- a Z^0 byly objeveny v roce 1983 v CERN. Stalo se tak na experimentech UA1 a UA2 na urychlovači SPS. Byly zde urychlovány vstřícné svazky proton-antiproton o energii 270 GeV, tedy 540 GeV v těžišti. Nobelova cena za tento objev byla udělena Carlo Rubbiovovi a Simonu van der Meerovi v roce 1984.

V roce 1975 byla po objevu tau leptonu předpovězena existence tauonového neutrina. Bylo objeveno v roce 2000 na experimentu DONUT ve Fermilabu (6.1.3).

Kapitola 3

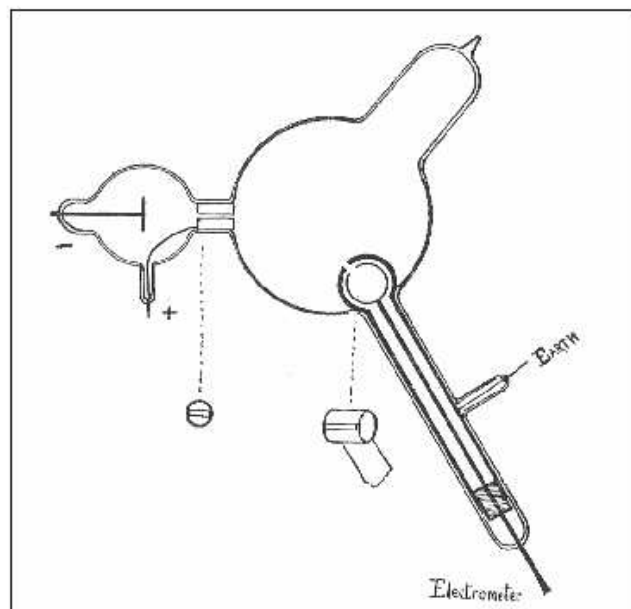
Elektron a pozitron

3.1 Objev elektronu

Objevitelem elektronu je sir J.J. Thomson. Jeho experimenty naznačovaly, že katodové záření je proud částic menších než atomy, které nazval "korpuskule". K tomuto názoru dospěl na základě výsledků tří experimentů provedených v roce 1897.

První experiment

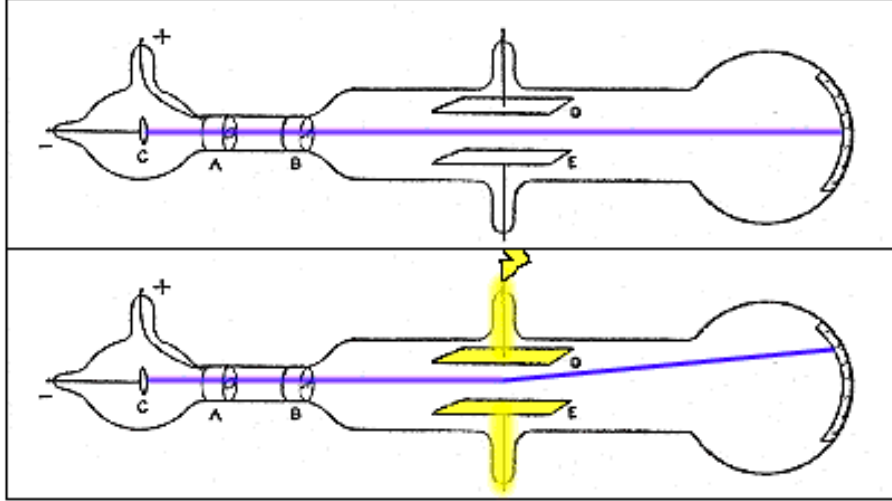
Thomson se inspiroval experimentem provedeným v roce 1895 Jeanem Perrinem. Perrin zjistil, že katodové záření přenáší elektrický náboj. Thomson si položil otázku, zda lze oddělit náboj od záření pomocí magnetu. Zjistil, že pokud záření prochází štěrbinou, elektroměr naměří velké hodnoty náboje. Pokud ne, tak naměří jen malé hodnoty. Z toho usoudil, že záření a náboj musí být nějakým způsobem spojeny.



Obrázek 3.1: Schéma prvního experimentu. Katodové záření vychází z trubice vlevo nahoře do větší baňky, kde je odkloněno magnetickým polem. Když je odkloněno tak, že prochází štěrbinou, elektroměr začne zaznamenávat náboj přenesený do trubice.

Druhý experiment

Cílem druhého experimentu bylo vyloučit, že se v elektrickém poli ohýbají jen zbytky plynu v trubici. Bylo však pozorováno, že paprsky se odchyľují nezávisle na množství plynu v trubici.



Obrázek 3.2: Schéma druhého experimentu. Záření vychází z katody C, prochází štěrbinou v anodě A a další štěrbinou v uzemněné kovové výpusti B. Na hliníkové desky D, E je přivedeno napětí. Na konci trubice je nalepené měřítko, ze kterého se odečítají hodnoty odchylky paprsku od přímé dráhy. Na obrázku nahoře jsou desky bez napětí, na obrázku dole pod napětím.

Závěr z prvních dvou experimentů

Katodové záření je proud částic, které jsou záporně nabité.

Třetí experiment

V dalším experimentu se Thomson pokusil zjistit poměr hmotnosti a náboje, tj. $\frac{m}{e}$. Používal různé trubice a různé druhy plynů.

Pro elektron, který vylétává z katody, platí [57], [15]

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU$$

kde U je anodové napětí, m hmotnost elektronu, v jeho rychlost a e jeho náboj. Odtud lze vyjádřit rychlost jako

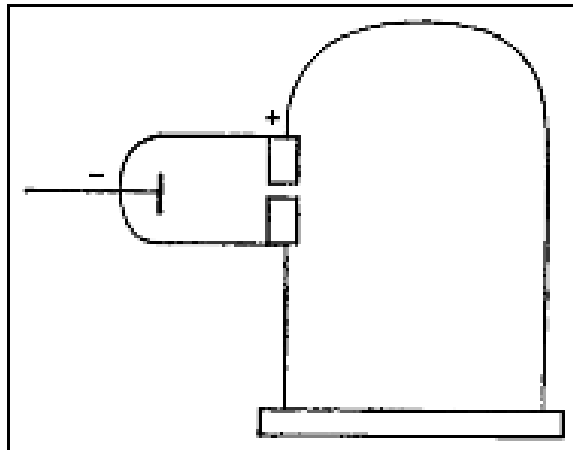
$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$$

V magnetickém poli působí na elektron Lorentzova síla $\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B})$, která se projevuje jako dostředivá síla. Pro rovnost těchto sil platí

$$\frac{mv^2}{r} = evB$$

Odtud lze zjistit, že

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2}$$



Obrázek 3.3: Schéma třetího experimentu. Paprsky vycházejí z katody vlevo a procházejí štěrbinou v anodě do zvonu, který obsahuje velmi řídký plyn. Odchýlené částice jsou pak vyfotografovány proti skleněné desce s měřítkem.

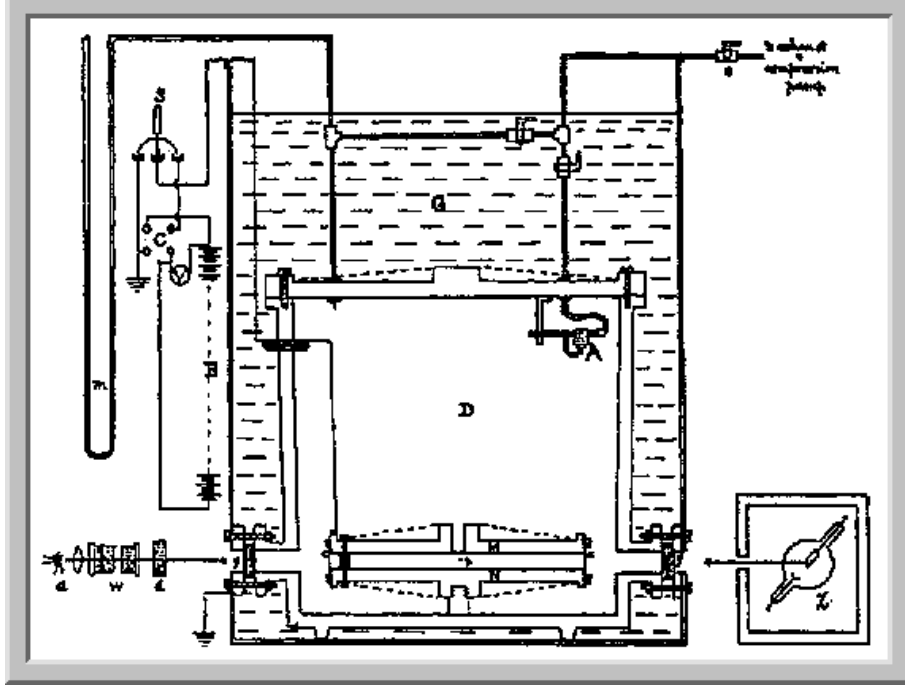
Závěry z experimentů

Katodové záření je proud částic, které jsou záporně nabitě. Poměr hmotnosti a náboje $\frac{m}{e}$ vyšel tisíckrát menší než u nabitého vodíkového atomu. Z toho vyplývá, že náboj korpuskule katodového záření je mnohem větší než náboj vodíkového iontu, nebo že se jedná o částici, která je mnohem lehčí než atom vodíku. To vyplynulo z dalších experimentů, které provedl Philipp Lenard [58].

3.2 Experimenty, které určily základní vlastnosti elektronu

3.2.1 Millikanův experiment

Tento experiment provedl Robert Millikan v roce 1909. Schéma tohoto experimentu [54] a [15] je znázorněno na obrázcích (3.4) a (3.5).



Obrázek 3.4: Originální schéma Millikanova kapkového experimentu

Rozprašovač produkuje jemné olejové kapky [15]. Systém je umístěn ve vakuové komoře za sníženého tlaku a udržován na stejné teplotě. Některé kapky propadnou dírou v elektrodě. Kapka získá náboj třením při vstřikování. Pokud není na elektrodách napětí, působí na kapku gravitační a vztlačková síla a síla odporu prostředí, kterou je možno popsat Stokesovou silou

$$F_S = 6\pi\eta rv$$

kde r je poloměr kapky, v rychlost a η dynamická viskozita vzduchu (při daném tlaku). Za těchto podmínek se kapka pohybuje konstantní rychlostí v_g .

Když na elektrody připojíme napětí, začne se nabitá kapka pohybovat konstantní rychlostí v_E vzhůru k opačně nabitě elektrodě. Pokud v obou případech vyjádříme rovnováhu sil, dostaneme

$$\begin{aligned} mg - m'g - 6\pi\eta rv_g &= 0 \\ qE - mg + m'g - 6\pi\eta rv_E &= 0 \end{aligned}$$

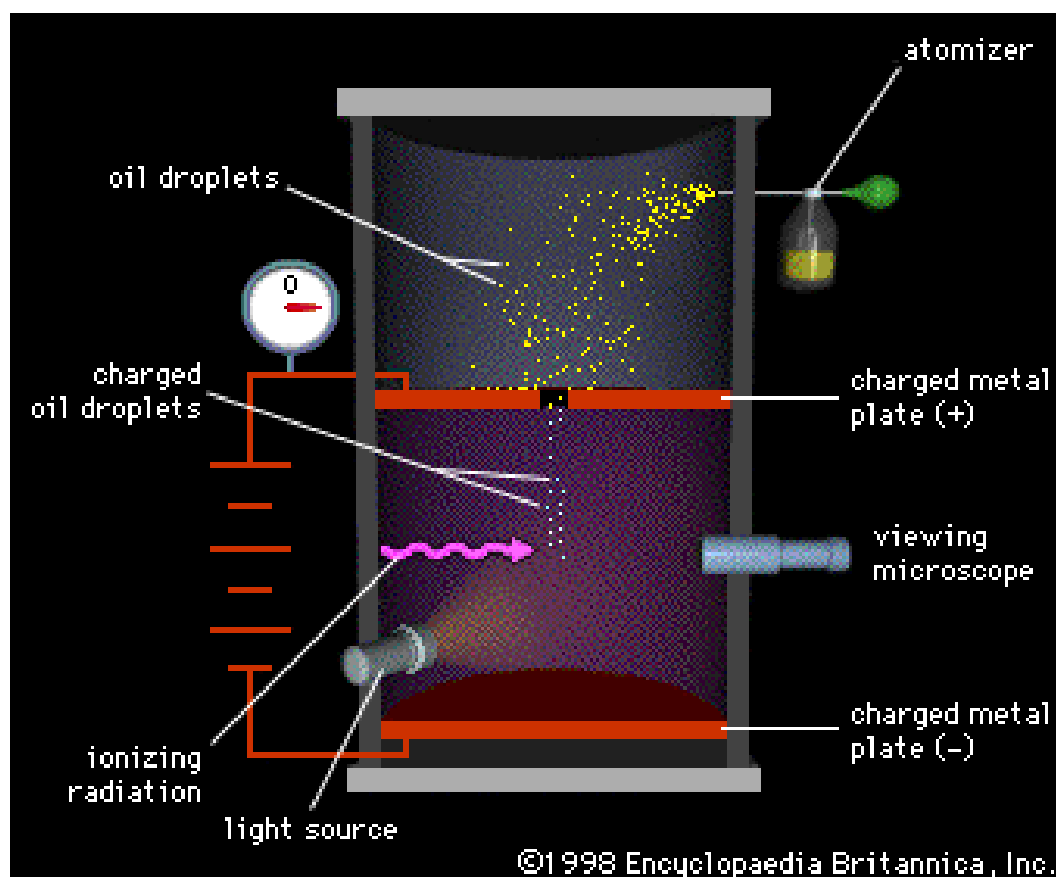
kde m je hmotnost kapky, m' hmotnost objemu vytlačeného vzduchu a E intenzita elektrostatického pole. Pro poloměr kapky, který lze jen těžko změřit, platí vztah

$$r = 3\sqrt{\frac{\eta v_g}{2(\sigma - \rho)g}}$$

kde σ je hustota oleje a ρ hustota vzduchu. Pro náboj kapky platí

$$q = \frac{6\pi\eta r}{E}(v_g + v_E)$$

Millikan používal intenzitu elektrického pole v rozmezí $E = 10^4 - 10^5 \text{ V.m}^{-1}$. Typické hodnoty pozorované Millikanem byly $r = 2 - 4 \text{ } \mu\text{m}$, $v \approx 0.1 \text{ mm.s}^{-1}$. Millikanovi vyšla velikost elementárního náboje $e = (1.591 \pm 0.003) \cdot 10^{-19} \text{ C}$. V současné době je výsledek měření elementárního náboje $e = 1.60217653(14) \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

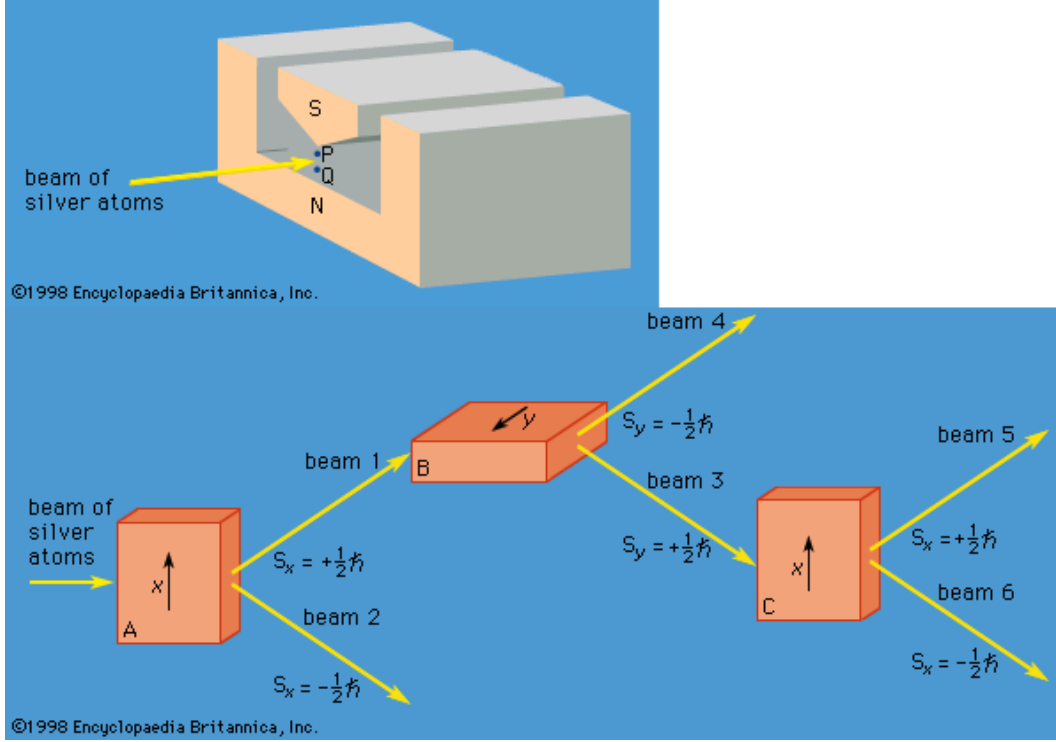


Obrázek 3.5: Zjednodušené schéma Millikanova experimentu [54]

3.2.2 Stern-Gerlachův experiment

Tento experiment provedli Otto Stern a Walter Gerlach počátkem dvacátých let.

Z pece vychází svazek atomů stříbra, který je zkolimován řadou štěrbin. Vchází do vysoce nehomogenního magnetického pole. Směr svazku je kolmý na směr pole a jeho gradientu [5].



Obrázek 3.6: Schéma Stern-Gerlachova experimentu. Z pece vychází svazek atomů stříbra, prochází nehomogenním magnetickým polem a dopadá na fotografickou desku [53].

Bez působení pole je vektor magnetického momentu náhodně orientován v prostoru. V homogenním poli tento vektor koná precesi kolem z-tové složky pole. V nehomogenním poli působí na magnetický moment dodatečná síla, jejíž směr a velikost závisí na orientaci magnetického dipólu vůči magnetickému poli. Magnetický dipól orientovaný rovnoběžně s polem se pohybuje ve směru zvětšující se síly pole. Magnetický dipól orientovaný kolmo na směr pole se působením magnetického pole nepohybuje.

Sílu působící na dipól lze určit z potenciální energie magnetického pole

$$V_{mag} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$$

kde $\boldsymbol{\mu}$ je vektor magnetického momentu a $\mathbf{B}$ je vektor magnetické indukce. Pak pro sílu platí

$$F_z = -\frac{\partial V_{mag}}{\partial z} = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z} = \mu \frac{\partial B}{\partial z} \cos \alpha$$

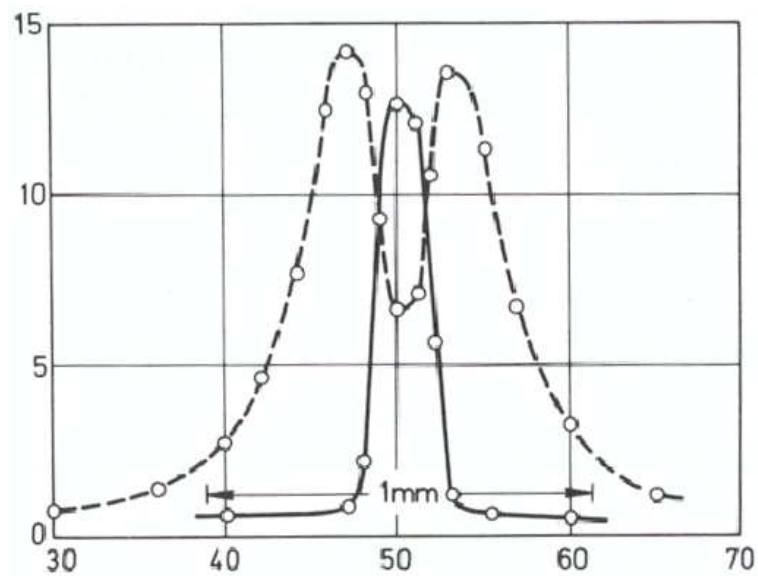
kde μ je velikost magnetického momentu a α je úhel mezi magnetickým momentem a gradientem magnetického pole.

Atomy s magnetickým momentem kolmým ke směru pole se neodchylují, atomy s magnetickým momentem rovnoběžným s polem se odchylují nejvíce. V klasické mechanice jsou povoleny všechny orientace dipólu vzhledem k poli. V experimentu však byly naměřeny pouze dvě orientace (viz obrázek (3.7)).

Z těchto zjištění tedy lze učinit závěry:

- Existuje směrové kvantování, tj. pouze dvě možnosti orientace magnetického momentu vzhledem ke směru pole B - paralelní a antiparalelní.
- $\mu_z = \pm \mu_B$

V experimentu byly použity atomy stříbra, protože mají pouze jeden elektron ve valenční slupce s . Magnetické momenty všech zbývajících elektronů se vzájemně vyruší.



Obrázek 3.7: Výsledek Stern-Gerlachova experimentu. Srovnání rozdělení intenzity svazku atomů s vypnutým polem (1 vrchol) a se zapnutým polem (2 vrcholy).

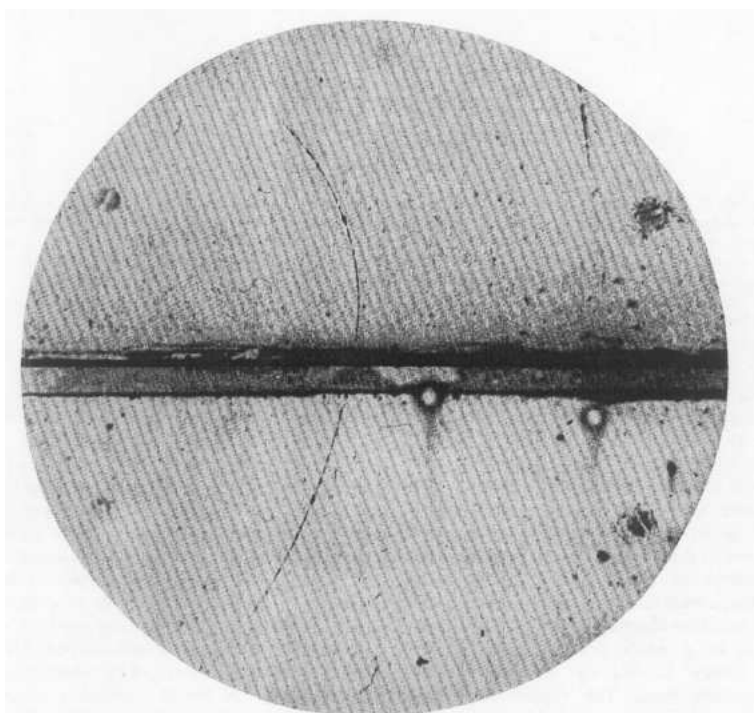
3.3 Objev pozitronu

Carl David Anderson objevil pozitron pomocí vertikální Wilsonovy komory při pozorování kosmického záření. Použité magnetické pole bylo $15\,000\text{ Gauss} = 1,5\text{ T}$. Na sestrojení této komory se podílel i Millikan.

15 z 1300 fotografií ukazovalo průchod částice s kladným nábojem, jehož velikost je zhruba stejná jako náboje volného elektronu, ale s hmotností daleko menší než hmotnost protonu.

Z energetické ztráty a vztahu mezi ní a nábojem byla stanovena horní mez pro náboj pozitronu v hodnotě dvojnásobku náboje elektronu. Pro hmotnost byla stanovena horní mez dvacetinásobku hmotnosti elektronu.

P. M. S. Blackett a G. Occhialini o něco později potvrdili v rozsáhlé studii kosmického záření existenci těchto lehkých kladně nabitých částic [6].



Obrázek 3.8: Pozitron procházející 6 mm silnou olověnou deskou. Dráha vycházejícího pozitronu je alespoň desetkrát delší, než by bylo možné u protonu stejného impulsu.

Kapitola 4

Mion

4.1 Objev mionu

V roce 1935 C.D. Anderson a S.H. Neddermeyer pozorovali pomocí mlžné komory při studiu kosmického záření novou částici - mion. Existence mionu byla potvrzena J.C. Streetem a E.C. Stevensonem o dva roky později.

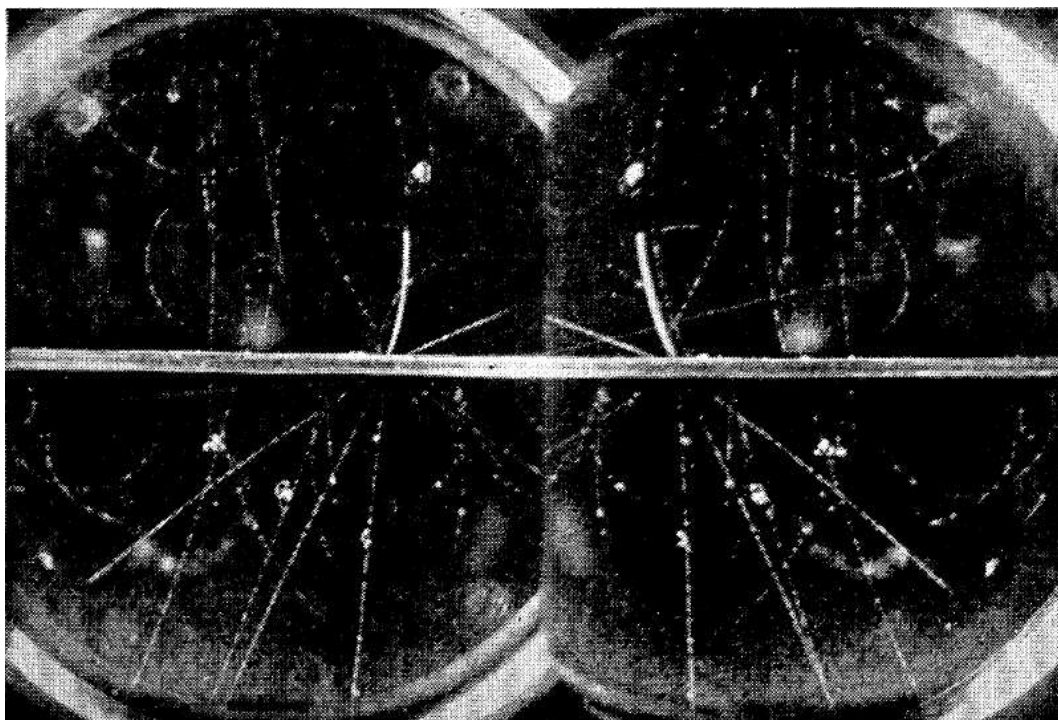
4.1.1 Měření C.D. Andersona a S.H. Neddermeyera

Anderson a Neddermeyer měřili dopadající kosmické záření pomocí mlžné komory na dvou různých místech - v Pike's Peak (4300 metrů nad mořem) a v Pasadeně (na úrovni mořské hladiny). V mlžné komoře bylo homogenní magnetické pole 7900 gauss (0,79 T). V jejím středu byla položena 0,35 cm silná olověná deska. Nad ní i pod ní byly umístěny Geigerovy počítače.

Úkolem experimentu bylo změřit četnost elektronových spršek v závislosti na nadmořské výšce a ztráty energie částic při průchodu olověnou deskou.

Bylo zjištěno, že jsou značné rozdíly v počtu registrovaných elektronů a fotonů z kosmického záření. Z toho vyplývá, že se většina záření (elektrony a fotony) rychle pohltí. Zaregistrovali také několik velmi pronikajících částic. Předpokládali, že jsou to elektrony s vysokou energií. Když pak změřili energetické ztráty při průchodu olověnou deskou, zjistili, že u těchto částic je produkováno méně sekundárních částic než předpovídala teorie (Bethe-Heitler). Z toho vyplývalo, že buď tato teorie pro vysoké energie neplatí, anebo pozorovaná částice není elektron. Vzhledem k tomu, že neplatnost teorie by způsobila i další jevy, které nebyly pozorovány, usoudili, že jde o jinou částici.

Z 9188 fotografií z Pike's Peak ukazuje 113 výskyt 123 silně ionizujících částic pocházejících z kosmického záření. Vzhledem ke směru pohybu nabitých částic v magnetickém poli (kde záporná částice může být kladná částice pohybující se opačným směrem) usoudili, že neznámou částicí může být proton [7].



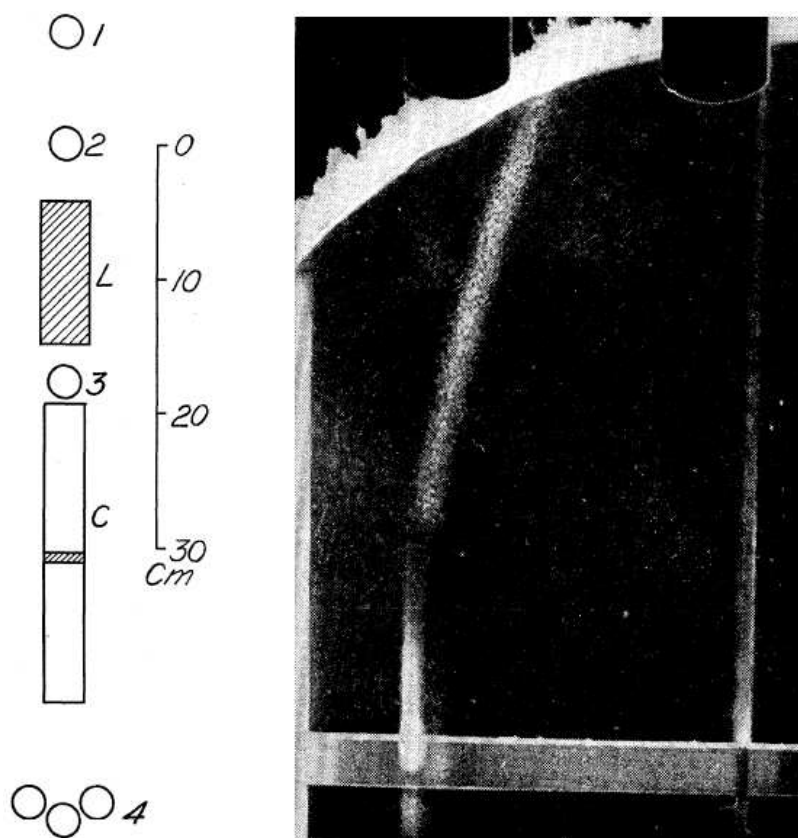
Obrázek 4.1: Fotografie z Pike's Peak. Pole 7900 gauss (0.79 T). Interakce způsobená dopadem neionizujícího paprsku na olověnou desku. Z bodu interakce vyletuje 6 částic. Jedna z nich je vystřelena téměř přímo vzhůru. S danou energií by v případě protonu měla dráha mít poloměr 20 cm, což je třikrát více než je pozorováno. Z toho vyplývá, že pokud je zakřivení vytvářeno jen magnetickým odchylováním, pak musí mít tato částice $\frac{e}{m}$ mnohem větší než proton. Autoři se však domnívali, že zakřivení mohlo být výrazně ovlivněno mnohonásobným rozptylem. Proto tuto částici prozatím identifikovali jako proton. Další částice mohou být identifikovány takto: částice vpravo nahoře jako elektron nebo rychlý proton, čtyři částice dole jako pozitrony.

4.1.2 Měření J.C. Streeta a E.C. Stevensona

Street a Stevenson publikovali výsledky svého experimentu v roce 1937. Odkazují se na experiment, který provedli C.D. Anderson a S.H. Neddermeyer. Vycházejí z předpokladu, že částice pozorovaná Andersonem není proton, ale nová částice s hmotností větší než elektron a menší než proton. Vytvořili experimentální uspořádání znázorněné na obrázku (4.2) vlevo. Bylo pořízeno asi 1000 snímků.

Experimentální uspořádání (na obrázku (4.2) vlevo) bylo zvoleno tak, aby byly detekovány pouze ty částice, které proniknou olověnou deskou a aby v mlžné komoře došlo k jejich úplnému pohlcení. Detektory 1, 2 a 3 jsou zde umístěny tak, aby detekovaly miony pocházející z kosmického záření. Mezi detektory 2 a 3 je olověná deska, která pohlcuje elektrony a fotony za spršek kosmického záření. Za detektorem 3 je mlžná komora, která zobrazuje dráhy nabitých částic v magnetickém poli 3500 gauss (0,35 T). Za touto komorou je ještě čtvrtá skupina detektorů, která určuje, jestli se částice v komoře zastavila nebo jestli prošla. Fotografie se pořídí pouze tehdy, když detektory 1, 2, 3 zaznamenají průlet nabitě částice, ale detektory 4 ne.

Ze zakřivení a ionizace dráhy z obrázku (4.2) vpravo lze zjistit, že dráhu zanechala záporně nabitá částice s klidovou hmotností rovnou stotřicetinásobku klidové hmotnosti elektronu. Relativní chyba určení hmotnosti je zhruba 25 % [8].



Obrázek 4.2: Vlevo je schéma experimentu. Částice prochází přes detektory 1, 2, 3. Olověný filtr L zadrží fotony a elektrony. Prochází jen pronikavé záření, které dopadá do mlžné komory C s magnetickým polem 3500 gauss (0,35 T). Pro snížení počtu fotografií vysokoenergetických částic slouží skupina detektorů 4. Dráha se vyfotografuje jen tehdy, když průlet nabitě částice zaznamenají detektory 1, 2, 3, ale ne 4. Tím se zaručí, že nebudou fotografovány částice, které komorou jen procházejí. Vpravo je detekovaná neznámá částice se záporným nábojem a klidovou hmotností, která je rovna zhruba stotřicetinásobku klidové hmotnosti elektronu.

Kapitola 5

Tau lepton

5.1 Objev leptonu tau

Tau lepton byl objeven na elektron-pozitronovém urychlovači se vstřícnými svazky SPEAR v laboratoři SLAC ve Stanfordu. Energie svazku byla 2.4 GeV (4.8 GeV v těžišti). Experiment nabíral data od roku 1972 do roku 1974.

Při interakcích elektronu a pozitronu vznikají těžké nabité leptony

$$e^+ + e^- \longrightarrow L^+ + L^-$$

které se následně rozpadají:

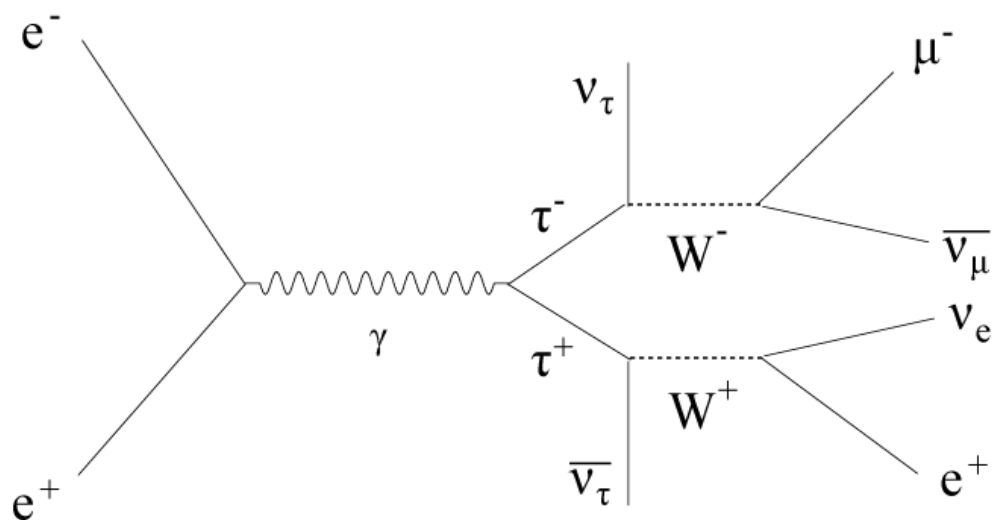
$$L^+ \longrightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

a

$$L^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu} + \nu$$

Bylo zaznamenáno 139 případů, z nichž 34 bylo považováno za pozadí.

Dále byla existence τ potvrzena dvěma experimenty na urychlovači DORIS - Pluto a DASP. Byla také změřena hmotnost $m_\tau = 1.9 \pm 0.1 \text{ GeV}$. Zároveň byla stanovena horní mez hmotnosti tau neutrína $600 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ [9].



Obrázek 5.1: Feynmanův diagram procesu, ve kterém byl poprvé pozorován tau lepton

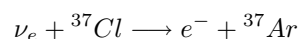
Kapitola 6

Neutrína a antineutrína

6.1 Objevy neutrin

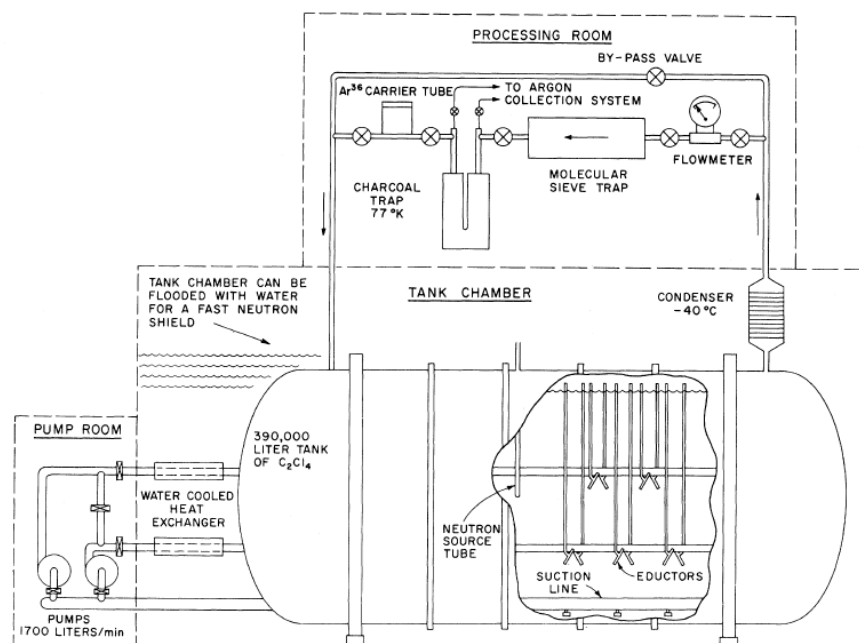
6.1.1 Elektronové neutrinó

Elektronové neutrinó bylo objeveno v roce 1964 týmem vedeným Raymondem Davisem, Jr. v experimentu Homestake v interakcích solárních neutrin s ^{37}Cl . Experiment Homestake se nachází v bývalém zlatém dole v Lead v Jižní Dakotě 1400 m pod zemí. Toto umístění snižuje produkci argonu z částic vznikajících v atmosféře. Neutrína byla objevena pomocí této interakce [10]



Z množství argonu bylo možné zjistit hustotu toku solárních neutrin. Byla pozorována třetina teoreticky předpovězeného počtu neutrin [11].

Detektor na obrázku (6.1) se skládá z 390 000 litrů C_2Cl_4 (což je 520 tun chlóru) ve vodorovné válcové nádobě.



Obrázek 6.1: Schéma experimentu Homestake

6.1.2 Mionové neutrino

Mionové neutrino objevil v roce 1962 tým vedený Leonem Ledermanem, Melvinem Schwartzem, a Jackem Steinbergerem [10]. Bylo pozorováno při rozpadu pionu

$$\begin{aligned}\pi^+ &\longrightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^- &\longrightarrow \bar{\mu} + \nu_\mu\end{aligned}$$

Neutriny, vzniklémi při rozpadu pionů, byly ozařovány nukleony. Pokud by existoval jen jeden druh neutrin, byl by při těchto reakcích pozorován vznik mionů a elektronů. V experimentu však byl pozorován pouze vznik mionů. To potvrdilo existenci dvou druhů neutrin [14].

6.1.3 Tauonové neutrino

Bylo objeveno v experimentu DONUT ve Fermilabu [10] v roce 2000. V tomto experimentu byla neutrina vytvářena v interakcích protonů s energií 800 GeV s wolframem.

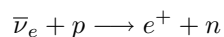
Hlavním zdrojem neutrin byl rozpad D_S mezonu na τ a $\bar{\nu}_\tau$ a následný rozpad τ , z něhož vznikají ν_τ .

Výsledkem tohoto experimentu bylo 203 potvrzených interakcí neutrin. Čtyři z nich splňovaly všechny požadavky na rozpad τ leptonu [12].

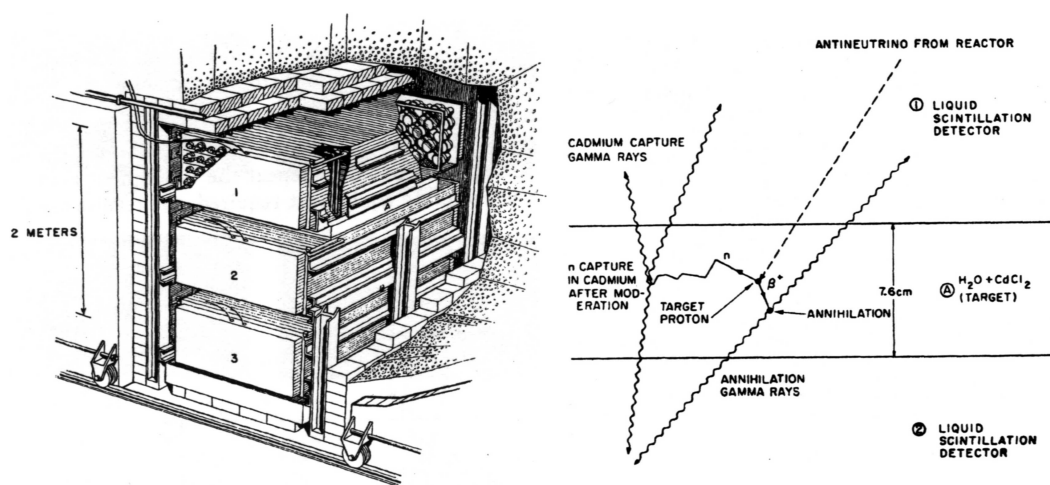
6.2 Objevy antineutrin

6.2.1 Elektronové antineutrino

Elektronové antineutrino objevili v roce 1956 Frederick Reines a Clyde Cowan z Los Alamos National Laboratory na reaktorech v Hanfordu a Savannah River [10]. Bylo objeveno prostřednictvím inverzního neutronového rozpadu



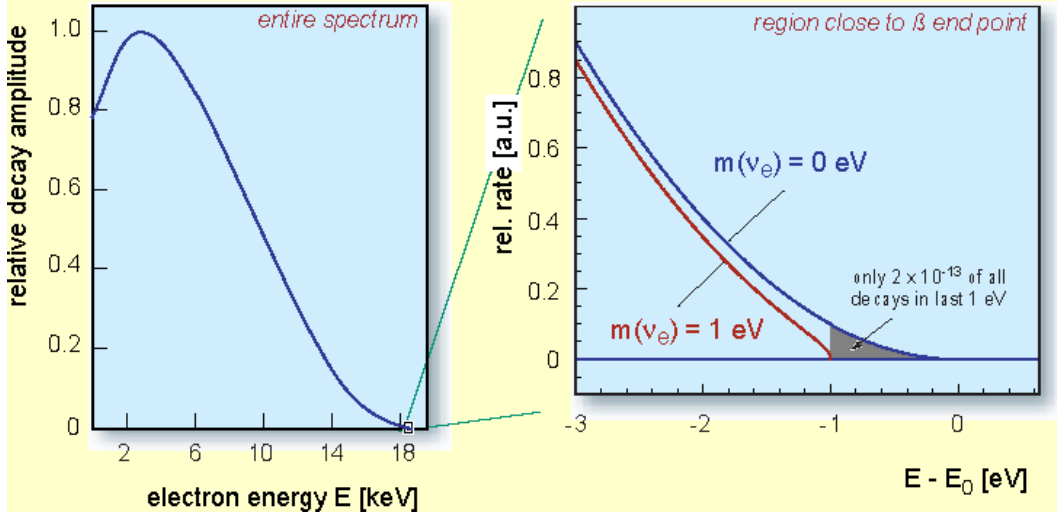
Jak je vidět z obrázku (6.2), antineutrino vyletí z reaktoru a dopadá do vodního terče, ve kterém je rozpuštěn $CdCl_2$. Inverzním β -rozpadem vzniká z protonu neutron a pozitron. Pozitron se zpomalí a anihiluje s elektronem za vzniku γ . Neutron je zpomalen a zachycen kadmíem, přičemž se vyzáří γ . Záření γ pak detekují scintilátory [13].



Obrázek 6.2: Schéma antineutrinového experimentu. Nalevo nákres detektoru, napravo schéma experimentu.

6.3 Experimenty, které měří klidovou hmotnost neutrin

Troitsk, Mainz a Katrin jsou experimenty, které měří hmotnost $\bar{\nu}_e$ pomocí β -rozpadu tritia .



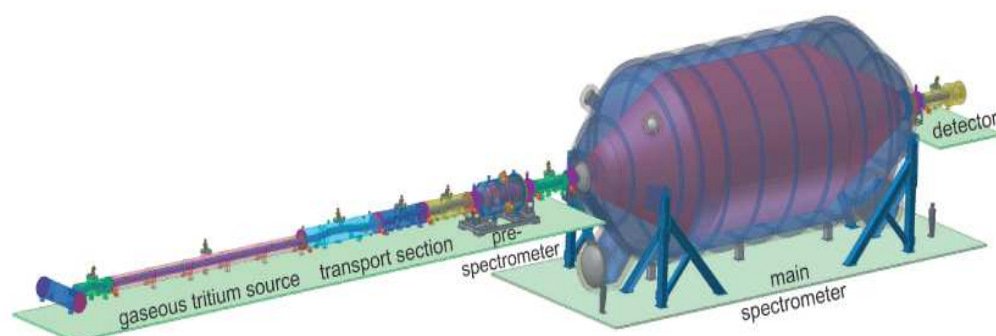
Obrázek 6.3: Srovnání spektra elektronů z β -rozpadu pro nulovou a nenulovou hmotnost neutrina

Na obrázku (6.3) vlevo je vidět spektrum elektronů z β -rozpadu tritia. Jeho konec je zobrazen v levé části obrázku.

Pokud je hmotnost neutrin nenulová, pak elektrony pocházející z této reakce budou mít o něco nižší energii, než kdyby neutrino mělo nulovou hmotnost. Experiment tedy spočívá v měření konce spektra s přesností lepší než 1 eV.

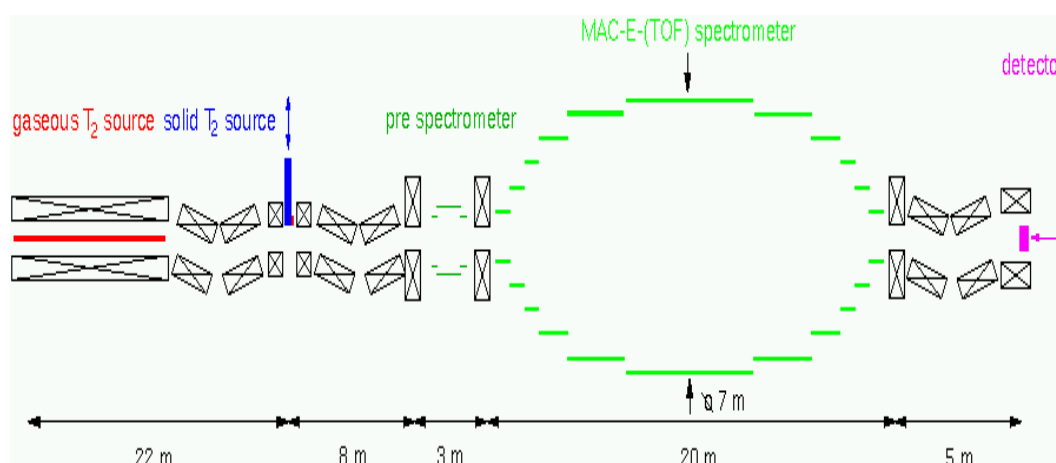
Pro filtrování elektronů se používá potenciálový rozdíl. Jeho hodnota se nastaví tak, aby jej překonaly jen elektrony s energií nedaleko konce spektra.

Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN) - Na začátku experimentálního uspořádání je 10 m dlouhá trubice. Její průměr je 90 mm. Je naplněna plynným tritiem. Odtud prochází elektrony z β -rozpadu a některé molekuly tritia do transportní sekce. Zde je tritium odfiltrováno a elektrony jsou vedeny do přípravného spektrometru. Je to menší verze hlavního spektrometru. Jeho úkolem je odstranit všechny elektrony kromě těch s nejvyšší energií (10^{-7} všech elektronů). Je to nezbytné kvůli snížení pozadí. Pak elektrony vstupují do hlavního spektrometru. Je to nádoba 23 m dlouhá a 10 m v průměru. Zde dochází k filtrování elektronů s energií menší než je prahová energie spektrometru (o něco níže, než je konec spektra - $E_0 = 18.57 \text{ keV}$). Tyto elektrony pak padají do detektoru [59].



Obrázek 6.4: Detektor experimentu KATRIN

Mainz Neutrino Mass Experiment - Jako zdroj je zde použito plynného tritia i desky z tritiového kondenzátu (17 mm v průměru, tloušťka 40 nm) [62].

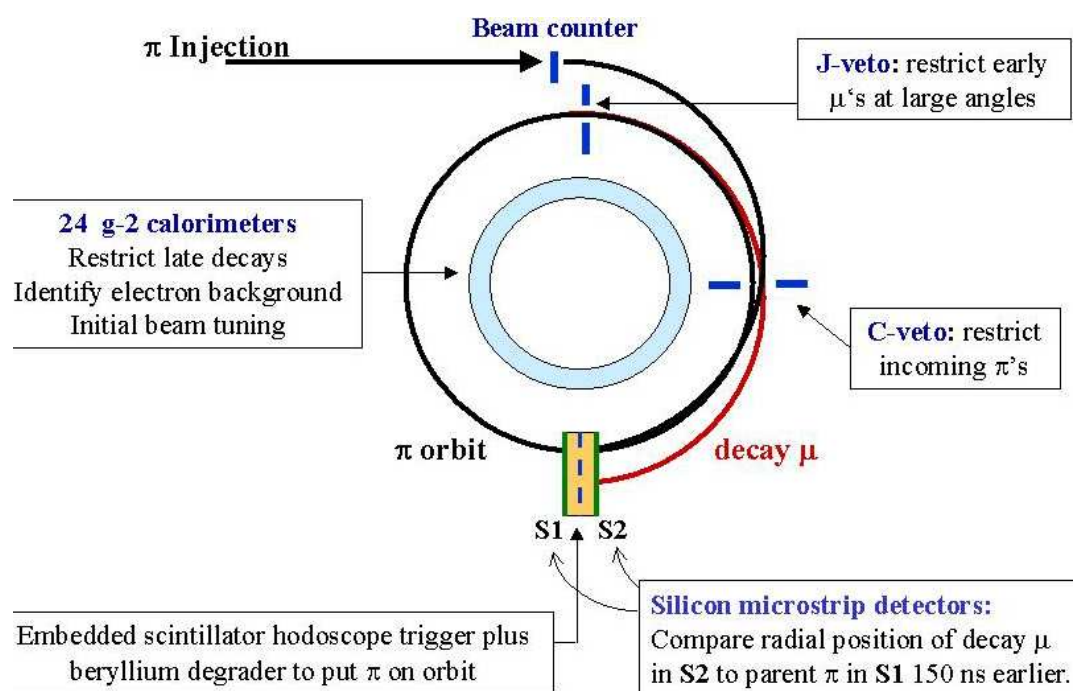


Obrázek 6.5: Schéma Mainz Neutrino Mass Experiment

Experiment, který měří hmotnost ν_μ - NuMass Měří hmotnost mionového neutrina. Využívá k tomu rozpad pionu na mion a neutrino.

$$\pi \longrightarrow \mu + \nu$$

Pion se vstřelí do kruhového zásobníku v magnetickém poli. Zde opisuje kruhovou dráhu. Po opsání půlkruhu narazí na 5,2 cm silnou desku berylia. Tím se sníží jeho kinetická energie. Zde je detektorem změřena jeho pozice. Odtud letí dál po kruhové dráze a rozpadá se. Piony, které se nerozpadnou, dopadají na stejné místo jako předtím. Když se piony rozpadnou na mion a neutrino, mion letí dál v magnetickém poli a dopadá dále od středu než piony. Z tohoto posunutí lze zjistit hmotnost neutrina [61].



Obrázek 6.6: Schéma experimentu NuMass

6.4 Experimenty, které detekují solární neutrína

Neutrína vznikají ve slunci při fúzi - ze čtyř protonů vzniká jádro hélia. Tento proces je hlavním zdrojem sluneční energie. V procesu fúze se uplatňují různé termojaderné reakce. Při některých vznikají neutrína, většinou nízkých energií.

Experimenty, které detekují solární neutrína, lze rozdělit do tří skupin. První dvě skupiny tvoří radiochemické experimenty, které využívají chlór nebo galium. Třetí skupinu tvoří experimenty, které používají vodní Čerenkovovy detektory. Tyto experimenty se snaží podat důkaz o oscilacích neutrin [10].

Typ	Experiment	Procesy	Energetický práh
Chlór	Homestake	$\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \longrightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$	$E_\nu > 817 \text{ keV}$
Galium	SAGE GALLEX+GNO	$\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \longrightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$	$E_\nu > 235 \text{ keV}$
H_2O voda	Kamiokande Super-Kamiokande	$\nu_x + e^- \longrightarrow \nu_x + e^-$	$E_\nu > 6.5 - 7 \text{ MeV}$ $E_\nu > 5.5 \text{ MeV}$
D_2O těžká voda	SNO	$\nu_x + e^- \longrightarrow \nu_x + e^-$ $\nu_e + d \longrightarrow p + p + e^-$ $\nu_x + d \longrightarrow p + n + \nu_x$	$E_\nu > 6.75 \text{ MeV}$ $E_\nu > 6.75 \text{ MeV}$ $E_\nu > 2.2 \text{ MeV}$

Tabulka 6.1: Experimenty detekující solární neutrína

V šedesátých letech vznikl experiment Homestake viz (6.1.1). Princip experimentu byl založen na zachytu neutrína na chlóru, který se přemění na argon a elektron. Detektor samotný tvořila válcová nádrž o průměru 6,1 m a délce 14,6 m. Obsahoval asi $2 \cdot 10^{30}$ jader chlóru. Za třicet let měření bylo detekováno asi dva tisíce slunečních neutrin. To činí asi třetinu počtu předpovězeného teorií. To byl počátek tzv. problému slunečních neutrin. Pro vysvětlení tohoto problému vznikla teorie oscilace neutrin. Podle této teorie se elektronová sluneční neutrína během svého letu k Zemi mění v mionová a tauonová neutrína.

Počátkem osmdesátých let se začal v Japonsku budovat neutrinový detektor Kamiokande. Začal pracovat v roce 1983. Byl založen na principu srážek neutrin s elektrony v molekulách čisté vody, při nichž vznikají relativistické elektrony, které se pohybují téměř ve směru pohybu neutrína. Tyto elektrony emitují Čerenkovovo záření. Detektor se nacházel 1600 m pod zemí a byl tvořen nádrží obsahující 4500 tun čisté vody. Na stěnách nádrže byly fotonásobiče, které registrovaly fotony Čerenkovova záření. Tento detektor byl schopen zaznamenávat čas, ve kterém došlo k reakci a směr odkud neutrino přiletělo. Tento detektor byl 24. února 1987 zasažen vlnou neutrin vzniklých při explozi supernovy SN1987A. Z této vlny zaregistroval 12 neutrin.

Detektor Super-Kamiokande je založen na stejném principu jako Kamiokande, ale je schopen pracovat s větší přesností. Skládá se z nádoby vysoké 41 m a široké 39 m. Obsahuje 50000 tun čisté vody. Pracoval od roku 1996 do roku 2001, kdy jej postihla nehoda [63]. Měření detektorů Kamiokande a Super-Kamiokande potvrdilo výsledky dosažené detektorem Homestake.

Experiment SNO je vylepšením všech předchozích experimentů, které jsou schopny detekovat pouze elektrony z elastického rozptylu. Tato interakce má malou citlivost pro ν_μ a ν_τ . Ale SNO je díky těžké vodě schopno detekovat také reakce s nabitými i neutrálními proudy. Je tedy stejně citlivé pro všechny druhy neutrin [10]. V roce 2002 fyzikové z SNO zkombinovali svá data s komplementárními daty experimentu Super-Kamiokande a získali tak přímý důkaz o existenci dosud chybějících dvou třetin slunečních neutrin [55].

Kapitola 7

Glashow-Weinberg-Salamova teorie elektroslabé interakce

7.1 Lagrangián GWS teorie elektroslabé interakce

7.1.1 Hustota lagrangiánu

Hustota lagrangiánu GWS teorie elektroslabé interakce je dána výrazem

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} \quad (7.1)$$

$$+ \bar{L}\gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu \right) L + \bar{R}\gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu \right) R \quad (7.2)$$

$$+ \left| \left(i\partial_\mu - g\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu \right) \phi \right|^2 - V(\phi) \quad (7.3)$$

$$- (G_1\bar{L}\phi R + G_2\bar{L}\phi_C R + \text{hermitovsky sdružené}) \quad (7.4)$$

Grupa kalibrační symetrie tohoto lagrangiánu je $SU(2)_L$ (slabý hypernáboj) $\times U(1)$ (slabý izospin). $\mathbf{W}$ je isotriplet tří polí se spinem 1, B je čtvrté pole se spinem 1, L je levotočivý fermionový dublet, R je pravotočivý fermionový singlet. $\boldsymbol{\tau}$ je generátor slabého isospinu. Y je hypernáboj. G_1, G_2, g, g' jsou konstanty a $V(\phi)$ je Higgsův potenciál. ϕ je Higgsovo pole. Je to isodublet komplexních skalárních polí s $Y=1$ a se střední vakuovou hodnotou v .

Levotočivé fermionové dublety a pravotočivé fermionové singlety teorie jsou

$$L^{(e)} = \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix} \quad L^{(\mu)} = \begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix} \quad L^{(\tau)} = \begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L \end{pmatrix}$$

$$L_0^{(d)} = \begin{pmatrix} u_{0L} \\ d_{0L} \end{pmatrix} \quad L_0^{(s)} = \begin{pmatrix} c_{0L} \\ s_{0L} \end{pmatrix} \quad L^{(b)} = \begin{pmatrix} t_{0L} \\ b_{0L} \end{pmatrix}$$

$$\begin{array}{ccc} e_R & \mu_R & \tau_R \\ d_{0R} & u_{0R} & s_{0R} \end{array} \quad \begin{array}{cc} & c_{0R} \\ s_{0R} & \end{array} \quad \begin{array}{cc} & t_{0R} \\ b_{0R} & \end{array}$$

Zde $e_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)e$ a $e_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)e$. $\mathbf{W}_{\mu\nu}$ a $B_{\mu\nu}$ jsou dány vztahy

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu \quad (7.5)$$

a

$$\mathbf{W}_{\mu\nu} = \partial_\mu \mathbf{W}_\nu - \partial_\nu \mathbf{W}_\mu - g\mathbf{W}_\mu \times \mathbf{W}_\nu \quad (7.6)$$

7.1.2 Transformace polí W a B

Pole W_μ^+, W_μ^-, Z_μ a A_μ popisující kvanta interakce W^+, W^-, Z^0 a γ jsou tvořena lineárními kombinacemi polí $\mathbf{W}_\mu, B_\mu$. Správné hmotnosti nových polí byly vygenerovány Higgsovým mechanismem. Platí tyto vztahy:

$$A_\mu = \frac{g'W_\mu^3 + gB_\mu}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \quad (7.7)$$

$$Z_\mu = \frac{gW_\mu^3 - g'B_\mu}{\sqrt{g^2 + g'^2}} \quad (7.8)$$

$$\mathbf{W}^+ = \frac{W^1 - iW^2}{\sqrt{2}} \quad (7.9)$$

$$\mathbf{W}^- = \frac{W^1 + iW^2}{\sqrt{2}} \quad (7.10)$$

Pro hmotnosti kvant interakce platí

$$M_A = 0 \quad (7.11)$$

$$M_Z = \frac{1}{2}v\sqrt{g^2 + g'^2} \quad (7.12)$$

$$M_W = \frac{1}{2}vg \quad (7.13)$$

$$M_W = \frac{1}{2}vg \quad (7.14)$$

Pole A_μ a Z_μ můžeme také vyjádřit pomocí Weinbergova úhlu [1], [2]

$$A_\mu = \cos \theta_W B_\mu + \sin \theta_W W_\mu^3 \quad (7.15)$$

$$Z_\mu = -\sin \theta_W B_\mu + \cos \theta_W W_\mu^3 \quad (7.16)$$

Analýzou části (7.2) lagrangiánu teorie lze ukázat, že platí tento vztah

$$e = g \sin \theta_W = g' \cos \theta_W$$

Odtud se již snadno dokáže, že platí

$$\frac{g'}{g} = \tan \theta_W$$

Pro poměr hmotností bosonů W a Z dostáváme

$$\frac{M_W}{M_Z} = \cos \theta_W$$

Tento vztah je předpovědí standartního modelu.

7.2 Význam částí lagrangiánu

První část (7.1)

$$-\frac{1}{4}\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu}$$

představuje kinetickou energii $W^\pm$, Z a γ a jejich interakce mezi sebou. Definice polí $\mathbf{W}_{\mu\nu}$, $B_{\mu\nu}$ a jejich transformace uvedené v předchozí části (vztahy (7.5) až (7.10)), umožňují oddělit kinetickou a interakční část polí. Kinetickou část popisuje výraz

$$-\frac{1}{2}\mathbf{W}_{\mu\nu}^-\mathbf{W}^{+\mu\nu}-\frac{1}{4}Z_{\mu\nu}Z^{\mu\nu}-\frac{1}{4}A_{\mu\nu}A^{\mu\nu}$$

kde

$$\mathbf{W}_{\mu\nu}^-=\partial_\mu\mathbf{W}_\nu^--\partial_\nu\mathbf{W}_\mu^-$$

Interakční část obsahuje skupinu trilineárních a kvadrilineárních interakcí vektorových bosonů. Tvoří ji interakce $WW\gamma$, WWZ , $WWWW$, $WWZZ$, $WWZ\gamma$ a $WW\gamma\gamma$ (viz obrázek (7.1)).

Další část

$$\bar{L}\gamma^\mu\left(i\partial_\mu-g\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau}\cdot\mathbf{W}_\mu-g'\frac{Y}{2}B_\mu\right)L+\bar{R}\gamma^\mu\left(i\partial_\mu-g'\frac{Y}{2}B_\mu\right)R$$

představuje kinetickou energii leptonů a kvarků a jejich interakce s $W^\pm$, Z a γ . Tato část popisuje interakce $ff\gamma$, ffZ a f_1f_2W (viz obrázek (7.1)).

Část (7.3)

$$\left|\left(i\partial_\mu-g\frac{1}{2}\boldsymbol{\tau}\cdot\mathbf{W}_\mu-g'\frac{Y}{2}B_\mu\right)\phi\right|^2-V(\phi)$$

představuje hmotnosti $W^\pm$, Z , γ a Higgsovy částice a vazby $W^\pm$, Z a γ s Higgsovou částicí. Výraz

$$V(\phi)=\mu^2\phi^\dagger\phi+\lambda(\phi^\dagger\phi)^2$$

představuje Higgsův potenciál s $\mu^2 < 0$ a $\lambda > 0$. Spontánního narušení symetrie se dosahuje volbou

$$\phi_0\equiv\sqrt{\frac{1}{2}}\begin{pmatrix}0\\v\end{pmatrix}$$

v je vakuová střední hodnota. Hmotnost Higgsovy částice je

$$m_h=\sqrt{2v^2\lambda}$$

Tento část obsahuje interakce WWH , ZZH , $WWHH$, $ZZHH$, HHH a $HHHH$ (viz obrázek (7.1)).

Část (7.4) má tvar

$$(G_1\bar{L}\phi R+G_2\bar{L}\phi_C R+\text{hermitovsky sdružené})$$

představuje hmotnosti leptonů a kvarků a jejich interakci s Higgsovým polem ffH (viz obrázek (7.1)).

Pro elektron má tato část lagrangiánu tvar

$$-G_e\left[\overline{(\nu_e, \bar{e})}_L\begin{pmatrix}\phi^+\\\phi^0\end{pmatrix}e_R+\overline{e}_R(\phi^-, \bar{\phi}^0)\begin{pmatrix}\nu_e\\e\end{pmatrix}\right]$$

G_e je libovolná konstanta. Při spontánním narušení symetrie dostáváme

$$-\frac{G_e}{\sqrt{2}}v(\bar{e}_Le_R+\bar{e}_Re_L)-\frac{G_e}{\sqrt{2}}(\bar{e}_Le_R+\bar{e}_Re_L)h$$

Po substituci

$$m_e=\frac{G_ev}{\sqrt{2}}$$

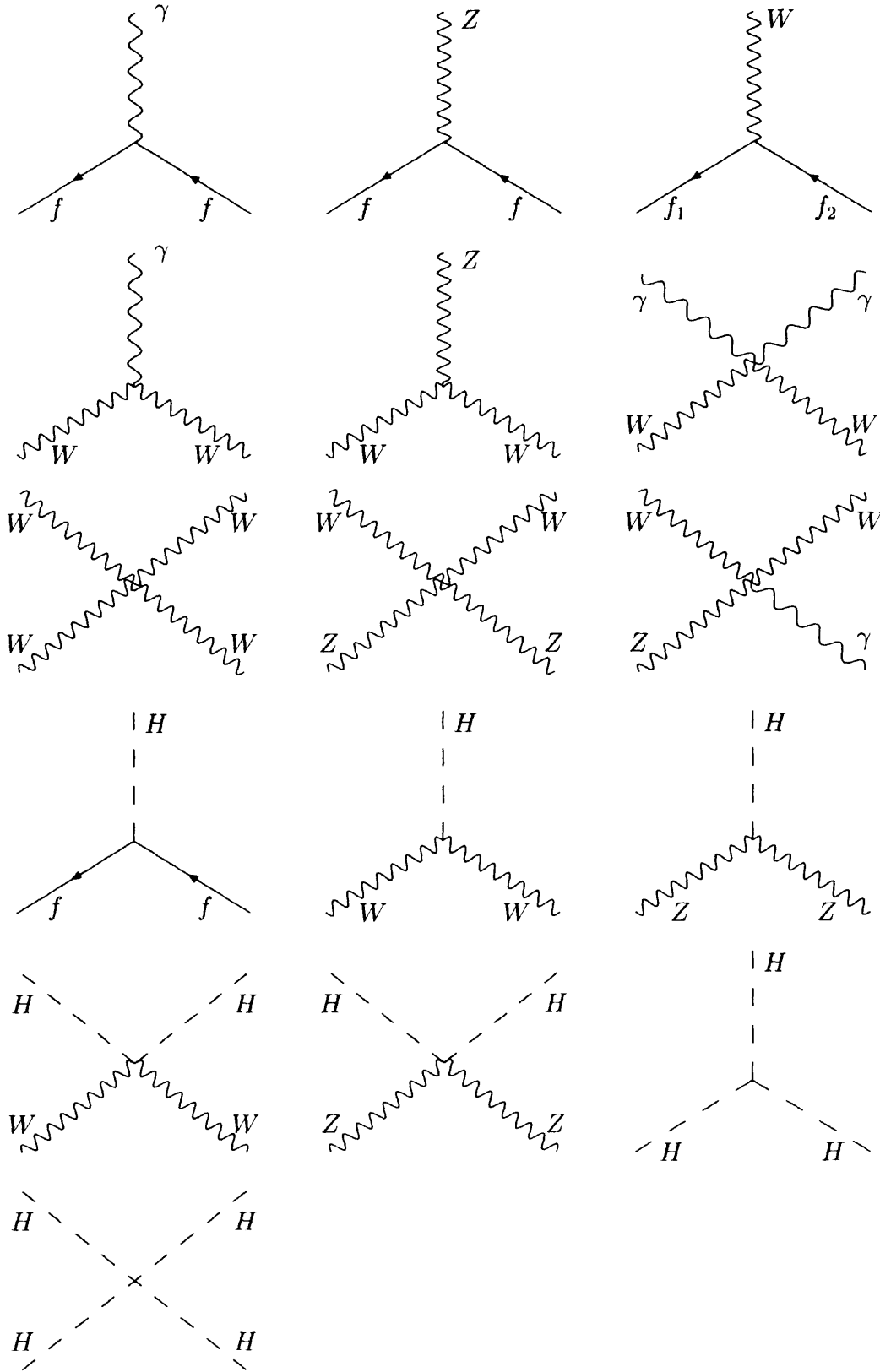
dostáváme

$$-m_e\bar{e}e-\frac{m_e}{\sqrt{2}}\bar{e}eh$$

Jelikož G_e je libovolná konstanta, neposkytuje teorie předpověď hmotnosti leptonů. Hodnota v je 246 GeV. Síla interakce leptonů s Higgsovou částicí je tedy určena jejich hmotností.

Pro kvarky lze postupovat podobným způsobem.

7.3 Interakční vrcholy GWS teorie elektroslabé interakce



Obrázek 7.1: Všechny interakční vrcholy obsažené v GWS teorii elektroslabé interakce. Značení - $ff\gamma$, ffZ , f_1f_2W , $WW\gamma$, WWZ , $WW\gamma\gamma$, $WWWW$, $WWZZ$, $WWZ\gamma$, ffH , WWH , ZZH , $WWHH$, $ZZHH$, HHH , $HHHH$ [2].

7.4 Souvislost počtu leptonů s počtem kvarků

V současné době jsou známy tři rodiny leptonů a tři rodiny kvarků. Při podrobnějším rozboru GWS teorie elektroslabé interakce se ukazuje, že stejný počet leptonových a kvarkových dubletů umožňuje, aby teorie byla renormalizovatelná [1], [2].

Kapitola 8

Shrnutí současného stavu

Vývoj poznání leptonů probíhá již více než sto let. Jako první byl při zkoumání katodového záření objeven elektron. Poté byly provedeny experimenty, které určily jeho základní vlastnosti (hmotnost, náboj a magnetický moment).

V této době se začala rozvíjet teorie popisující interakce leptonů. Za zmínku stojí zvláště Pauliho předpověď existence neutrina (jako vysvětlení zdánlivého nezachování energie v β -rozpadu), Diracova rovnice (potvrzená objevem pozitronu) a Fermiho teorie slabé interakce (přímá interakce čtyř fermionových polí).

Poté již následovaly objevy dalších leptonů. V kosmickém záření byl objeven mion. Bylo detekováno elektronové antineutrino a neutrino. Bylo zjištěno, že existují neutrina nejméně dvou druhů. Byl objeven tau lepton. Jako poslední bylo přímo detekováno tauonové neutrino.

Rozvíjela se kvantová elektrodynamika, jejíž základy položil P.A.M. Dirac. Počátkem šedesátých let začala vznikat teorie elektroslabé interakce. Problémy spojené s nenulovou hmotností slabých vektorových bosonů se povedlo vyřešit pomocí Higgsova mechanismu. Podle této teorie probíhá slabá interakce prostřednictvím vektorových bosonů Z^0, W^- a W^+ . Nositelem elektromagnetické interakce je foton. Zásadním experimentálním potvrzením platnosti této teorie byl objev neutrálních slabých proudů počátkem sedmdesátých let minulého století a přímé pozorování slabých vektorových bosonů v roce 1983 v CERN.

V současné době probíhá řada experimentů v oblasti neutrinové fyziky. Na jedné straně jsou to experimenty, které detekují solární neutrina a zkoumají jejich oscilace. Na straně druhé jsou to experimenty, které měří klidovou hmotnost neutrin. Významným pokrokem neutrinové fyziky je vyřešení problému slunečních neutrin.

GWS teorie elektroslabé interakce tvoří spolu s QCD (kvantová chromodynamika) současnou teorii elementárních částic, nazývanou standardní model. Tato teorie je ověřována v experimentech již několik desítek let. V blízké budoucnosti bude standardní model prověřován v nové oblasti energií na urychlovači LHC v CERN. Na tomto urychlovači se budou srážet svazky protonů s těžišťovou energií 14 TeV. Tyto interakce budou zkoumány experimenty ATLAS, ALICE, CMS a LHC-B.

Současné hodnoty hmotnosti, střední doby života a magnetického momentu jsou uvedeny v tabulce 8.1[4].

	e	ν_e
Hmotnost $\left[\frac{MeV}{c^2}\right]$	$0.510998918 \pm 0.000000044$	$M < 3 \times 10^{-6}$
Střední doba života	$\tau > 4.6 \times 10^{26} \text{ let}$	$\frac{\tau}{m_\nu} > 7 \times 10^9 \text{ s/eV}$
Magnetický moment	$1.001159652187 \pm 0.000000000004 \mu_B$	$\mu_\nu < 1.0 \times 10^{-10} \mu_B$
	μ	ν_μ
Hmotnost $\left[\frac{MeV}{c^2}\right]$	$105.6583692 \pm 0.0000094$	$M < 0.19$
Střední doba života	$\tau = (2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6} \text{ s}$	$\frac{\tau}{m_\nu} > 15.4 \text{ s/eV}$
Magnetický moment	$1.0011659160 \pm 0.0000000006 \frac{e\hbar}{2m_\mu}$	$\mu_\nu < 6.8 \times 10^{-10} \mu_B$
	τ	ν_τ
Hmotnost $\left[\frac{MeV}{c^2}\right]$	$1776.99^{+0.29}_{-0.26}$	$M < 18.2$
Střední doba života	$\tau < (290.6 \pm 1.0) \times 10^{-15} \text{ s}$	
Magnetický moment		$\mu_\nu < 3.9 \times 10^{-7} \mu_B$
Anomálie magnetického momentu	> -0.052 < 0.058	

Tabulka 8.1: Některé vlastnosti leptonů

Kapitola 9

Doplňující informace

9.1 Pauliho matice

Jsou matice 2×2

$$\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Tvoří generátory grupy $SU(2)$ a splňují antikomutační relaci

$$\{\sigma_j, \sigma_k\} = 2ie_{jkl}\sigma_l$$

9.2 Diracovy γ matice

Jsou to matice 4×4 vystupující v Diracově rovnici. Jejich vlastnosti vyplývají z požadavků kladených na Diracovu rovnici. Jejich tvar v Dirac-Pauliho reprezentaci je

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & \boldsymbol{\sigma} \\ -\boldsymbol{\sigma} & 0 \end{pmatrix} \quad \gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{pmatrix}$$

Pro hermitovské sdružení matic $\gamma^0, \gamma^1, \gamma^2, \gamma^3$ platí

$$\gamma^{\mu\dagger} = \gamma^0\gamma^\mu\gamma^0$$

9.3 Helicita

Helicita je kvantové číslo popisující projekci spinu do směru letu částice. Kladnou helicitu má částice se spinem orientovaným ve směru pohybu. Označuje se jako pravotočivá. Levotočivá je částice se spinem orientovaným proti směru letu.

Literatura

- [1] Francis Halzen, Alan D. Martin : Quarks and Leptons, John Wiley and Sons 1984
- [2] Jiří Hořejší : Fundamentals of Electroweak Theory, Karolinum, Praha 2002
- [3] B.R.Martin, G.Shaw : Particle Physics, second edition, Willey, 1997
- [4] S. Eidelman et al. : "Review of particle physics", Physics Letters B 592, Issues 1-4, 2004
- [5] H. Haken, H.C. Wolf : The Physics of Atoms and Quanta, 6th edition, Springer Verlag, 2001
- [6] C. D. Anderson, Phys. Rev. **43** (1933) 491.
- [7] Carl D. Anderson, Seth H. Neddermayer, Phys. Rev. 50, 4, (1936), 236
- [8] J. C. Street and E. C. Stevenson, Phys. Rev. **52** (1937) 1003.
- [9] G. J. Feldman, PRINT-92-0321 (HARVARD) *To be publ. in Proc. of 20th SLAC Summer Inst. on Particle Physics, Stanford, CA, Jul 13-24, 1992*
- [10] S. Aoki [CHORUS and DONUT Collaborations], Int. J. Mod. Phys. A **17** (2002) 3393.
- [11] R. J. Davis, D. S. Harmer and K. C. Hoffman, Phys. Rev. Lett. **20** (1968) 1205.
- [12] K. Kodama *et al.* [DONUT Collaboration], Phys. Lett. B **504** (2001) 218 [arXiv:hep-ex/0012035].
- [13] F. Reines, C. L. Cowan, F. B. Harrison, A. D. McGuire and H. W. Kruse, Phys. Rev. **117** (1960) 159.
- [14] G. Danby, J. M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz and J. Steinberger, Phys. Rev. Lett. **9** (1962) 36.
- [15] I. Štoll: Elektřina a magnetismus, Skriptum FJFI, Vydavatelství, ČVUT, Praha, 1994
- [16] Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz, Kolektiv autorů, Prometheus 2001
- [17] "Thomson, Sir J.J.." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [18] "Gerlach, Walther." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [19] "Stern, Otto." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [20] "Goudsmit, Samuel Abraham." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.

- [21] "Uhlenbeck, George Eugene." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [22] "subatomic particle." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [23] "subatomic particle." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 12, 2003.
- [24] "Dirac, P.A.M.." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [25] "Pauli, Wolfgang." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CD-ROM. Copyright © 1994-2003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 6, 2006.
- [26] "positron." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [27] "Anderson, Carl David." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [28] "Blackett, Patrick M.S., Baron Blackett of Chelsea." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [29] "Yukawa Hideki." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [30] "Powell, Cecil Frank." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [31] "subatomic particle." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 12, 2003.
- [32] "Schwinger, Julian Seymour." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [33] "Feynman diagram" Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [34] "Feynman, Richard P.." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [35] "Tomonaga Shin'ichiro." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.

- [36] "quantum electrodynamics." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [37] "renormalization." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 17, 2003.
- [38] "Yang, Chen Ning." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [39] "Lee, TsungDao." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [40] "neutrino." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [41] "GellMann, Murray." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [42] "Lederman, Leon Max." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [43] "Steinberger, Jack." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [44] "Schwartz, Melvin." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [45] "Glashow, Sheldon Lee." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [46] "Weinberg, Steven." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [47] "Salam, Abdus." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [48] "Hooft, Gerardus 't." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [49] "Veltman, Martinus J.G.." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. September 19, 2003.
- [50] "Perl, Martin Lewis." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [51] "lepton." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.

- [52] "fermion." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [53] "SternGerlach experiment." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [54] "Millikan oildrop experiment." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [55] "Physics." Encyclopaedia Britannica from Encyclopaedia Britannica 2003 Ultimate Reference Suite CDROM. Copyright © 19942003 Encyclopaedia Britannica, Inc. April 10, 2006.
- [56] <http://www-troja.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/node67.html>
- [57] http://fyzport.fjfi.cvut.cz/Praktika/edm/praktika/wwwpraktika/Zakladn_i_pojmy_vztahy.html
- [58] <http://www.aip.org/history/electron/>
- [59] <http://www-ik.fzk.de/~katrin/overview/index.html>
- [60] <http://www.inr.troitsk.ru/~trdat/description.html>
- [61] <http://www.hep.umn.edu/numass/>
- [62] http://www.physik.uni-mainz.de/exakt/neutrino/en_experiment.html
- [63] J. Niederle: Kosmická neutrina, Vesmír, 82, strana 102-105