

## Kapitola 4

# Objevy základních částic

Podívejme se nyní na objevy některých částic. Je poučné sledovat, jak se experimentátoři důmyslně vypořádali s různými obtížemi, danými především omezenými technickými možnostmi.

Objev elektronu J. J. Thomsonem (1897) a objev atomového jádra E. Rutherfordem v rozptylovém experimentu (1912) jsou dobře popsány v jiné literatuře (např. [5, 3]), zde se proto soustředíme na další milníky částicové fyziky.

### 4.1 Objev neutronu

Začátkem 30. let 20. století W. Bothe, H. Becker a také I. Curie a F. Joliot bombardovali beryliový terč částicemi alfa. Přitom pozorovali pronikavé neutrální záření (n):



I. Curie a F. Joliot navíc prokázali, že toto neutrální záření uvolňuje z parafínu jádra vodíku (protony). Pozorovaný jev tehdy chybně přisoudili odrazu  $\gamma$ -záření na protonech.

Vysvětlení přinesl J. Chadwick v roce 1932, který také studoval reakci (4.1), přičemž sledoval pružný rozptyl neutrálního záření v různých materiálech pomocí tehdy nedávno vynalezené mlžné komory. Studovanými materiály byly mimo jiné parafín, umístěný před komorou, a jádra dusíku (součást náplně komory), šlo tedy o interakce:



Maximální rychlost odražených protonů v reakci (4.2a) byla určena  $v_p^{\max} \approx 3 \times 10^7$  m/s, zatímco maximální kinetická energie odraženého jádra dusíku v reakci (4.2b) činila  $T_N^{\max} \approx 1,2$  MeV.

Chadwick správně usoudil, že neznámá elektricky neutrální částice má hmotu velmi blízkou hmotě protonu. Podívejme se blíže na jeho argumenty:

1. Neutrální částice nemůže být foton. Abychom totiž mohli pozorovat odražené protony v reakci (4.2a) s uvedenou maximální rychlostí, musela by energie fotonu být téměř 50 MeV. Uvědomme si, že tehdy známé energie fotonů pocházely z měření  $\gamma$ -přechodů v jádrech, největší známé energie fotonů dosahovaly přibližně 4 MeV (přechod v jádře  ${}^{90}\text{Sr}$ ).

2. Kdyby se skutečně jednalo o foton s energií 50 MeV, dostali bychom maximální energii odraženého jádra dusíku přibližně 360 keV, což neodpovídá pozorování (1,2 MeV).
3. Vstupuje-li do reakce (4.2b) neutrální částice s hmotou stejnou jako proton, hodnota maximální kinetické energie odraženého jádra dusíku vyjde ve shodě s pozorováním.

V reakci (4.1) vzniká tedy neutrální částice s hmotou přibližně stejnou jako má proton. Tuto částici (n) nazval Chadwick neutron [6].

## 4.2 Elektronové neutrino

Existence elektronového (anti)neutrína byla postulována v roce 1930. Wolfgang Pauli se tak snažil vysvětlit známý experimentální fakt, totiž že elektrony z  $\beta$ -rozpadu mají spojité spektrum. To znamená, že musí jít (alespoň) o tříčásticový rozpad.

Kromě toho je zavedení neutrína nutné k zachování momentu hybnosti např. v rozpadu neutronu



Pokud by v koncovém stavu byly jen dva fermiony (proton a elektron), nemohl by se zachovat celkový moment hybnosti. Bude-li vznikat i do té doby nepozorovaná neutrální částice se spinem  $1/2$ , může mít elektron spojité energetické spektrum (půjde tedy o rozpad  $1 \rightarrow 3$ ) a zároveň se zachová moment hybnosti.

Dodejme zde, že existence neutrína, resp. antineutrína, byla přímo experimentálně potvrzena až v roce 1956, viz kapitola 10.1.

## 4.3 Objev pozitronu

V létě roku 1932 fotografoval C. D. Anderson stopy částic kosmického záření ve Wilsonově komoře. Komoře byla umístěna v magnetickém poli o indukci  $B = 1,5$  T a byla v ní umístěna olověná destička. Fotografie jednoho z pozorovaných případů je zobrazena na obr. 4.1.

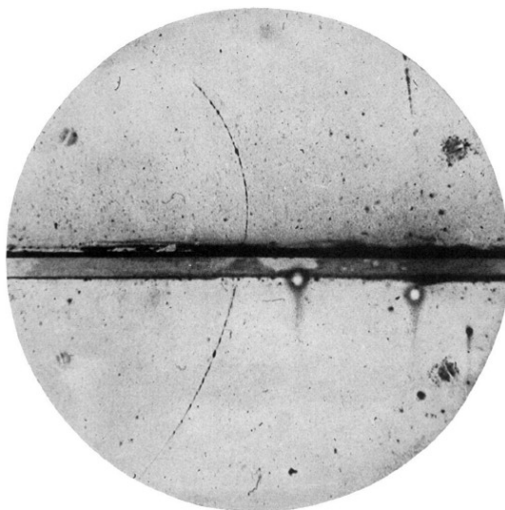
Z naměřených údajů vyplynulo, že se jedná o kladně nabitou lehkou částici s hmotou odpovídající hmotě elektronu, viz příklad 4.2. Rozhodně se nemohlo jednat o proton. Proton s naměřenou počáteční hybností by se musel zastavit v olověné destičce, navíc délka jeho dráhy v komoře by musela být díky velkým ionizačním ztrátám alespoň  $10\times$  kratší, než bylo naměřeno. Stejně tak se nemohlo jednat o částici s hmotou  $m_e < M < m_p$ , viz příklad 4.3. Jednalo se tedy o novou částici, která dostala jméno pozitron [7].

Připomeňme, že existence pozitronu jakožto antičástice elektronu byla předpovězena teoreticky jako jedno z řešení Diracovy rovnice.

## 4.4 Objev mionu

Mion byl poprvé pozorován v roce 1937 C. D. Andersonem a S. H. Neddermayerem, kteří měřili stopy částic kosmického záření v mlžné komoře umístěné v magnetickém poli. V této komoře měli navíc umístěn absorbátor v podobě platinové destičky. Byly pozorovány dva typy částic:

1. částice, jejichž ztráty byly úměrné jejich energii, a které navíc byly doprovázené sprškami částic. Tyto částice byly identifikovány jako elektrony a pozitrony.



Obrázek 4.1: Fotografie jedné pozorované stopy v experimentu [7]. Zakřivení dráhy částice bylo změřeno před i po průchodu olověnou destičkou tloušťky 6 mm.

2. pronikavé částice, které v platinové destičce ztratily jen malou část své energie a nebyly doprovázeny žádnými sprškami. Muselo se tedy jednat o částice mnohem těžší než elektron, avšak lehčí než proton.<sup>1</sup> Částice proto dostaly název mezony, nyní jim říkáme miony ( $\mu$ ).<sup>2</sup>

Přesnější měření provedli v témže roce Street a Stevenson [8], kteří měřili současně ionizační ztráty a hybnost částic v kosmickém záření. Schéma experimentálního uspořádání je na obr. 4.2. Aparatura sestávala z Geigerových-Müllerových (GM) čítačů 1, 2, 3 zapojených v koincidenci a GM čítače 4 zapojeného v anti-koincidenci. Detekované částice tedy projdou olověným absorbátorem až do mlžné komory, kde se zastaví nebo rozpadnou. Mlžná komora je umístěna v magnetickém poli o indukci  $B = 0,35$  T kvůli měření hybnosti.

Z Betheho-Blochovy formule (3.1) vyplývá, že ionizační ztráty jsou jen velmi málo závislé na rychlosti částice, s výjimkou malých energií, kde platí

$$-\frac{dE}{\rho dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \quad (4.4)$$

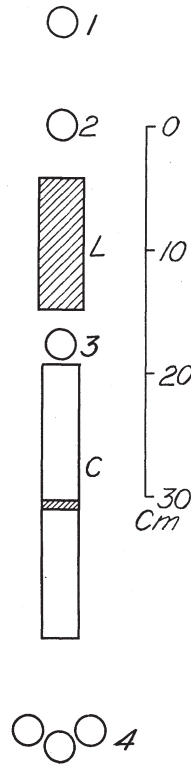
Ve zmíněném experimentu se proto snažili určit ionizaci a hybnost částice těsně před jejím zastavením. Street a Stevenson pozorovali dva rozdílné druhy případů, viz příklad 4.4. Po zpracování svých měření odhadli hmotu mionu  $m_\mu \approx 130$  MeV s chybou měření přibližně 25 %.

## 4.5 Mezony $\pi$ (piony)

V roce 1934 navrhl japonský teoretik H. Yukawa způsob, jak popsat jaderné síly mezi nukleony (protony, neutrony). Protože v atomovém jádře jsou vázány i kladně nabitě protony, musí

<sup>1</sup>Energetické ztráty protonů by při změřených hodnotách hybnosti silně závisely na hybnosti, pokud by vůbec takové protony prošly platinovou destičkou.

<sup>2</sup>Jako mezony dnes označujeme hadrony s nulovým baryonovým číslem, např.  $\pi$ , K, ...



Obrázek 4.2: Schéma experimentu, kde byl pozorován mion [8]. Geigerovy-Müllerovy čítače 1–4 sloužily k výběru případů. Vlastní měření ionizace a hybnosti nabitých částic byla prováděna ve Wilsonově mlžná komoře C, jež byla umístěna v magnetickém poli.

jaderné síly převážit odpudivou coulombickou interakci mezi nimi. Na velkých vzdálenostech však tyto síly musí být zanedbatelné vůči elektromagnetickým silám, neboť např. vazby mezi atomy v molekulách jsou plně vysvětlitelné pomocí elektromagnetické interakce. Tyto podmínky lze splnit zavedením výměny těžkých částic, tj. tvarem potenciální energie mezi dvěma nukleony:

$$V(r) = -\alpha_j \frac{\hbar c}{r} e^{-\frac{mr}{\hbar c}} = -\alpha_j \frac{\hbar c}{r} e^{-\frac{r}{r_0}}, \quad (4.5)$$

kde  $m$  je hmota výměnné částice,  $r_0 = \hbar c/m$  pak označujeme jako dosah částice a  $\alpha_j \gg \alpha = 1/137$ . Z požadavku na velikost dosahu jaderných sil  $r_0 \approx 1$  fm plyne pro hmotu výměnné Yukawovy částice

$$m = \frac{\hbar c}{1 \text{ fm}} \approx 200 \text{ MeV} \quad (4.6)$$

Dále bylo ukázáno, jak by se tyto Yukawovy částice měly chovat při průchodu prostředím:

- Záporně nabitě částice (nyní označované  $\pi^-$ ) se zpomalí a zachytí se v atomu na K-orbitě. Protože mají mnohem vyšší hmotu než elektron, je poloměr jejich K-orbity mnohem menší, než odpovídá elektronu (škáluje se jako  $1/m$  – viz příklad 4.5). Záporná Yukawova částice tedy s určitou pravděpodobností „prochází“ jádrem atomu, a proto spolu interagují silnou (jadernou) silou dříve, než by se Yukawova částice mohla rozpadnout. Díky těmto silným interakcím se záporně nabitě Yukawovy částice v látce absorbují.