

10 Elementárne častice a sily, ktoré na ne pôsobia

10.1 Ako sa skúma mikrosvet

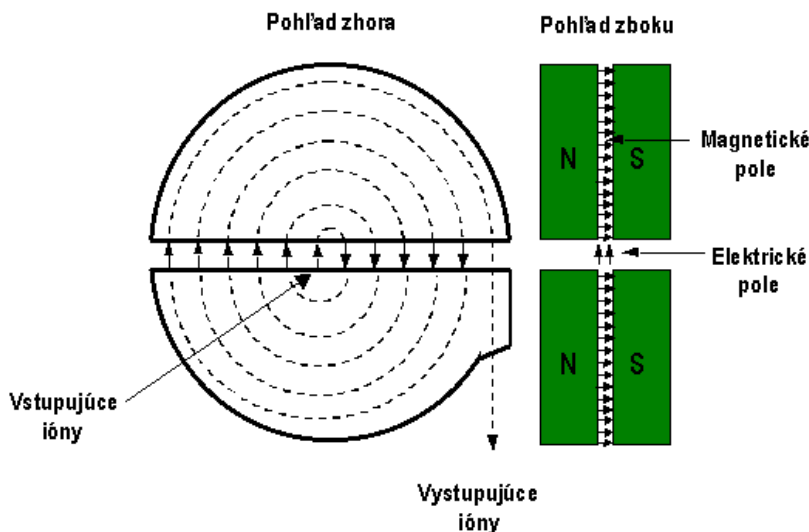
Pri skúmaní mikrosвета prechádzame do rozmerov menších ako 10^{-14} m, ktoré sú primálne na to, aby sme ich mohli priamo pozorovať našimi zmyslami, preto si najprv povieme niečo o spôsoboch skúmania týchto oblastí. Základný spôsob predstavuje Rutherfordov pokus ostreľovania tenkej kovovej fólie α časticami. Aby zistil štruktúru atómu, musel sa Rutherford „pozrieť“ do jeho vnútra a použil na to malú časticu s dosť veľkou energiou, ktorú mal k dispozícii z rádi-oaktívneho rozpadu. Teda princíp je taký, že **terčik**, ktorý je v pokoji, sa ostreľuje **nalietavajúcou časticou**, ktorá akoby bola vystrelená z nejakého praku. Platí pritom pravidlo, že do čím menších rozmerov sa chceme dostať, tým väčšiu hybnosť musí mať „strela“. Toto vyplýva z Heisenbergových relácií neurčitosti, pomocou ktorých môžeme získať veľmi jednoducho niektoré zaujímavé odhady. Pre neurčitosť polohy a hybnosti platí súvis: $\Delta r \Delta p \geq \hbar$. Za neurčitosť hybnosti možno uvažovať rozdiel hybností nalietavajúcej a odrazenej častice - tzv. prenos hybnosti. Potom na skúmanie oblastí čoraz menších rozmerov $r \geq \Delta r$ potrebujeme odpovedajúco čoraz väčšie prenosi hybností $\Delta p \geq \frac{\hbar}{r}$. Ak teda chceme skúmať atóm ($r \approx 10^{-10}$ m), potrebujeme prenos hybnosti $\Delta p \approx 0,000002$ GeV/c, pre štúdium štruktúry jadra ($r \approx 10^{-15}$ m) už potrebujeme prenosi hybnosti $\Delta p \approx 0,2$ GeV/c a ak chceme zisťovať štruktúru nukleónu ($r \approx 10^{-16}$ m), je potrebných (2 – 3) GeV/c. Teda čím je **väčší rozdiel hybností**, tým **menšie oblasti priestoru** môžeme skúmať.

K realizácii potrebujeme dve základné veci - mať dostatočne rýchlu nalietavajúcu časticu (s dostatočne veľkou hybnosťou) a zariadenie, pomocou ktorého budeme môcť nejakým spôsobom sledovať, čo sa udialo, keď nalietavajúca častica zasiahla terčik.

Na urýchľovanie nalietavajúcich častíc slúžia **urýchľovače**. Podľa tvaru dráhy, pozdĺž ktorej je častica urýchľovaná, sa delia na lineárne a kruhové. Elektricky nabitú časticu sa v nich urýchľujú pri prechode pozdĺžnym elektrostatickým poľom. V röntgenovej trubici (1895) boli elektróny urýchlené potenciálom okolo 1000V. Keď sa elektróny spomalili dopadom na antikatódu, emitovali elektromagnetické žiarenie (tento jav sa využíva v televíznej obrazovke). Ak sa trubica predĺži, elektróny môžu byť urýchľované pozdĺž celej jej dĺžky na vyššie energie (**lineárny urýchľovač**). Súčasné technológie umožňujú zvýšiť energiu elektrónu asi o 7 MeV na každý meter trubice. Napr. lineárny urýchľovač v Stanforde v

Kalifornii je dlhý 2 míle a elektróny tak môžu byť urýchlené na energiu nad 20 GeV. Takéto elektróny môžu „skúmať“ vnútornú štruktúru protónov.

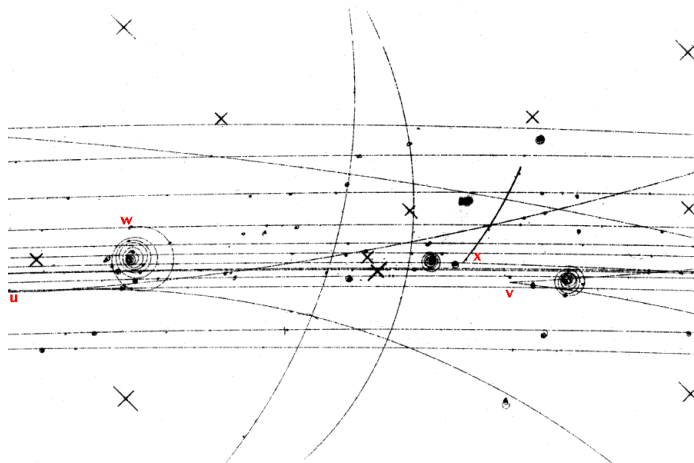
Keďže protóny sú ťažšie ako elektróny, ich urýchľovanie na vyššie energie si



Obr. 10.1

vyžaduje väčšie vzdialenosti, pozdĺž ktorých môže urýchľovacia sila pôsobiť. Lawrence urýchlil protóny pozdĺž dráhy tvaru kružnice (kruhový urýchľovač). Magnetické pole zakrivovalo ich dráhu pozdĺž jednej polkružnice a elektrické pole na prechode medzi polkružnicami ich lineárne urýchlilo, potom ich dráha bola opäť zakrivená magnetickým poľom pozdĺž druhej polkružnice. Protóny takto mnohokrát obiehali až sa urýchlili na energie okolo 1 MeV. Toto klasické zariadenie sa nazýva **cyklotrón** Obr.10.1 .

Čo sa týka zariadení - tzv. **detektorov**, pomocou ktorých môžeme „pozorovať“, čo sa udialo (úvodzovky sú tam preto, aby sme si uvedomili, že v žiadnom prípade nič nepozorujeme priamo, ale skúmame iba nejaké stopy, ktoré zanechali častice). V dráhovom detektore sa zviditeľňuje dráha nabitých častíc. Prvým dráhovým detektorom bola **hmlová komora**, ďalším dráhovým detektorom, ktorý umožnil množstvo významných objavov, je **bublinová komora**. V nej



Obr. 10.2

je dráha častice zviditeľnená bublinkami, ktoré vznikajú v prehriatej kvapaline (Obr. 10.2). Nabitá častica pozdĺž svojej dráhy ionizuje atómy kvapaliny, ktoré sa stávajú zárodkami bubliniek (varu). Keď tieto bublinky narastú do pozorovateľnej veľkosti, celá komora sa fotografuje viacerými fotoobjektívmi a na filmoch ostane zachovaná rovinná informácia-priemety skutočnej dráhy častice do viacerých rovín, z ktorých sa potom určia parametre dráhy častice v priestore (napr. krivosť, dĺžka dráhy). Celá komora je uložená v magnetickom poli, ktoré spôsobí, že dráhy častíc (všetky majú elektrický náboj) sa zakrivia. Zo smeru zakrivenia sa určí, či častica nesie kladný alebo záporný elektrický náboj a z jeho veľkosti, ktorá je nepriamo úmerná hybnosti častice, je možné získať hybnosť. V prípade, že nalietajúca častica sa zrazila s časticou kvapaliny - terčíkom a interagovala s ňou, je na filmoch zachovaná informácia o interakcii, ktorá sa ďalej spracúva až po fyzikálny výstup - aké častice vznikli a aké majú vlastnosti. Je treba si uvedomiť, že bublinová komora poskytuje síce úplnú informáciu o interakcii, ale celý postup spracovania až po fyzikálny výstup, kde je treba získať dostatočne vysokú štatistiku, je časovo veľmi náročný.

V súčasnosti sa používajú **kombinované dráhové a elektronické detektory** (Obr. 10.3), ktoré umožňujú efektívne študovať aj veľmi zriedkavé javy.



























Obr. 10.3

10.2 Elementárne častice

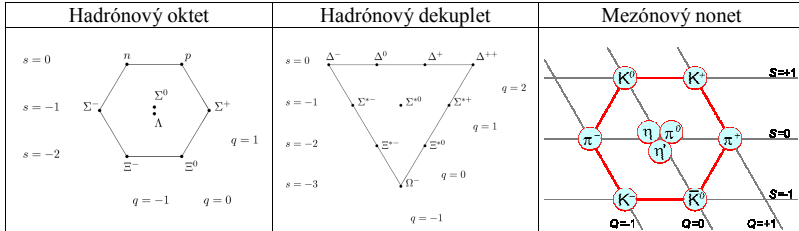
Z častíc, o ktorých sme doteraz hovorili, sú elektróny a neutrína (a samozrejme aj ich antičastice) naozaj elementárne častice, to znamená, že **nemajú vnútornú štruktúru**. Patria do skupiny elementárnych častíc, ktoré sa nazývajú **leptóny** (z gréckeho - malý) a dajú sa rozdeliť na tri generácie (Obr. 10.4). Prvú generáciu tvoria elektrón a elektrónové neutríno, druhú tvoria mión (je to častica, o ktorej by sme mohli povedať, že je to o niečo ťažší elektrón) so svojim neutrínom a tretiu tau (to už je naozaj „ťažký elektrón“ - jeho hmotnosť je väčšia ako je hmotnosť protónu) so svojim neutrínom. Tieto častice, keďže sú elementárne, sa teda spontánne nemenia na žiadne jednoduchšie častice, dochádza iba k premenám nestabilných ťažších leptónov - tau a mionu na najľahší elektrón, ktorý je stabilný. Z týchto častíc náš dnešný Vesmír obsahuje iba elektróny a elektrónové neutrína. Pozitróny a antineutrína vznikajú iba pri niektorých rádioaktívnych rozpadoch a ťažšie leptóny a ich neutrína vznikajú iba v laboratórnych podmienkach. Všetky leptóny majú poločíselný spin a teda musia spĺňať Pauliho princíp a ich ďalšou významnou spoločnou vlastnosťou je, že nikdy neinteragujú prostredníctvom silnej interakcie, jednoducho ju necítia, interagujú slabo a pokiaľ majú elektrický náboj, aj elektromagneticky.

Ostatné častice, napríklad protóny a neutróny, ktoré sa nachádzajú v jadrách atómov, majú vnútornú štruktúru, teda nie sú elementárne v takom zmysle ako leptóny. A tak ako je jadro držané pokope silnou interakciou, všetky tieto častice interagujú aj prostredníctvom silnej interakcie. Nazývajú sa spoločným názvom **hadróny** (z gréckeho - silný). Postupne sa ukázalo, že takýchto častíc je veľké množstvo. Začiatkom šesťdesiatych rokov začal Gell-Mann zaraďovať tieto častice do symetrických mnohouholníkov s 8 (oktet), 9 (nonet) alebo 10 členmi (dekuplet) podľa niektorých ich zachovávajúcich sa charakteristík. Vytvoril tak triedy častíc a vytvoril tak pre ne obdobu periodickej tabuľky prvkov (Obr. 10.5).

Toto však nestačilo, lebo ani Mendelejevova tabuľka prvkov nebola uspokojivo vysvetlená, kým sa nepodarilo popísať vnútornú stavbu atómov a odkryť význam rozdielu v usporiadaní elektrónov v jednotlivých hladinách. Tak aj Gell-Mannovi sa zdalo, že hadróny musia mať vnútornú štruktúru, ktorá by vysvetľovala, prečo sa delia do jednotlivých skupín. Pokúsil sa teda nájsť skupinu častíc, ktoré by boli elementárne a mali také vlastnosti, že ich vhodným zostavením by sa dali získať všetky hadróny s ich známymi vlastnosťami - napr. jedna kombinácia by dala protón, druhá neutrón, ďalšia pión, atď. Pritom ale veľmi rýchle

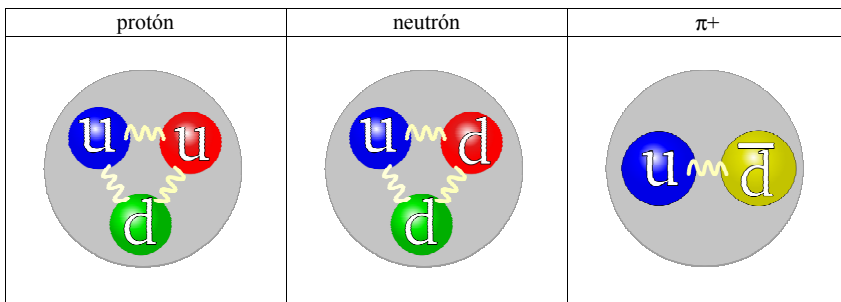
Rodina	Častica	Náboj	Hmotnosť (GeV/c ²)	
Prvá generácia	Kvarky	Horný (Up)   	$\frac{2}{3}$	0.330
		Dolný (Down)   	$-\frac{1}{3}$	0.333
	Leptóny	Elektrón 	-1	5.11×10^{-4}
		Elektrónové neutrino 	0	$< 1.4 \times 10^{-4}$
Druhá generácia	Kvarky	Pôvabný (Charm)   	$\frac{2}{3}$	1.65
		Podivný (Strange)   	$-\frac{1}{3}$	0.486
	Leptóny	Mión 	-1	0.106
		Miónové neutrino 	0	$< 2.5 \times 10^{-4}$
Tretia generácia	Kvarky	Vrchný (Top)   	$\frac{2}{3}$	≈ 188
		Spodný (Bottom)   	$-\frac{1}{3}$	4.5
	Leptóny	Tau 	-1	1.78
		Tau neutrino 	0	< 0.035

Obr. 10.4



Obr. 10.5

zistil, že túto úlohu nemôže úspešne vyriešiť, ak sa má držať zásady, že každá elementárna častica musí mať celočíselný náboj (ako majú všetky známe častice). Prišiel na to, že častice, z ktorých sú zložené hadróny, musia mať náboje zlomkové - tretinové z náboja elektrónu či protónu. Navrhol tri takéto častice, z ktorých by sa skladali hadróny - baryóny (ako protón či neutrón) by sa skladali z troch častíc a mezóny (ako pión) by sa skladali z dvoch. Pomenoval ich **kvarky** a stanovil tri druhy - **u** (up - hore) s nábojom $+2/3$, **d** (down - dole) s nábojom $-1/3$ a **s** (strange - podivný). Potom napr. protón sa skladá z 2 u-kvarkov a 1 d-kvarku, neutrón z 2 d-kvarkov a 1 u-kvarku. Mezóny sa skladajú z kvarku a antikvarku, napr. kladný pión z u-kvarku a d-antikvarku (Obr. 10.6) Dnes sú



Obr. 10.6

známe tri dvojice kvarkov (podobne ako tri dvojice leptónov), ďalšie tri kvarky sú **c** (charm - pôvabný), **b** (bottom - spodný) a **t** (top - vrchný) (Obr.10.4).

Nikdy sa nepodarilo pozorovať samostatný kvark a zdá sa, že to vyplýva zo samotnej povahy silnej interakcie, ktorá drží kvarky v hadrónoch. Silná interakcia má totiž takú zvláštnu vlastnosť, že narastá s rastom vzdialenosti častíc, medzi ktorými pôsobí (podobne ako narastá pružná sila pri ťažovaní pružiny). Ostreľovanie protónov vysokoenergetickými elektrónmi na začiatku 70. rokov poskytlo dôkazy, že vo vnútri protónov sú rozptyľujúce body, ktoré odpovedajú kvarkom a že kvarky vo vnútri protónov naozaj existujú.

10.3 Sily v mikrosvete

Keďže gravitačná sila medzi elementárnymi časticami je zanedbateľne slabá, v mikrosvete sa prejavujú tri zo štyroch základných silových pôsobení (interakcií) prírody - elektromagnetická, slabá a silná. Najslabšia z nich je slabá a najsilnejšia silná interakcia. Ďalší podstatný rozdiel medzi nimi je ten, že kým elektromagnetická interakcia má nekonečný dosah, silná a slabá majú veľmi krátky dosah rovný rozmeru jadra - asi 10^{-15} m. Bola prijatá predstava, že každý typ interakcie medzi dvomi časticami prebieha prostredníctvom vzájomnej výmeny iných častíc - tzv. výmenných častíc danej interakcie (nositeľov interakcie). Trochu si priblížime túto predstavu.

Je to niečo podobné, ako keď dvaja ľudia sediaci každý v jednom člne pokojne sa vznášajúcom na pokojnej hladine jazera, si začnú naraz vzájomne prehadzovať lopty. Dôsledkom bude, že člny sa pohnú smerom od seba - teda došlo tu k silovému pôsobeniu bez vzájomného dotyku, prostredníctvom prehadzovanej (vymieňanej si) lopty.

Z princípu neurčitosti vyplýva jeden veľmi prekvapujúci záver, že je možné porušiť zákon zachovania energie „zapožičaním“ množstva energie ΔE , pokiaľ sa vráti do uplynutia časového intervalu Δt , pričom súvis medzi časom a „zapožičanou“ energiou je daný princípom neurčitosti:

$$\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta E}.$$

Táto energia sa môže využiť na kreáciu častíc - energia sa premení na hmotnosť Δm podľa Einsteinovho ekvivalenčného vzťahu:

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

takže časový interval, počas ktorého musí byť energia vrátená, je potom:

$$\Delta t = \frac{\hbar}{\Delta mc^2}.$$

Keďže energia musí byť vrátená predtým ako uplynie časový interval Δt , vytvorené častice žijú iba veľmi krátko - majú veľmi krátku dobu života a nazývajú sa **virtuálne častice**.

Môžeme približne určiť ako ďaleko od reálnej častice môže dôjsť virtuálna častica, ak sa pohybuje maximálne rýchlosťou svetla. Keďže po vzdialení sa do uplynutia časového intervalu Δt musí aj vrátiť späť, vzdialenosť určíme:

$$d = c \frac{\Delta t}{2}.$$

Ak budeme napríklad uvažovať, že reálnou časticou je protón a produkuje virtuálny pión, ktorého hmotnosť je $2,48 \cdot 10^{-28}$ kg, dostaneme pre dobu života hodnotu $\Delta t = 4,7 \cdot 10^{-24}$ s a pre vzdialenosť, kde sa až môže vzdialiť $d = 0,75 \cdot 10^{-15}$ m. Ako vidieť, virtuálny pión sa môže vzdialiť do vzdialenosti približne rovnej rozmerom jadier.

Ak budeme uvažovať dva protóny v jadre, potom si možno predstaviť, že jeden protón emituje virtuálny pión, ktorý sa priblíži k druhému protónu a ten ho bude absorbovať a následne bude opäť emitovať virtuálny pión, ktorý sa vráti k prvému protónu a ten ho absorbuje, takže energia sa vráti tak, ako to požaduje Heisenbergov princíp neurčitosti. Takto si protóny medzi sebou môžu **vymieňať virtuálne pióny**. Hideki Yukawa v roku 1934 vyslovil domnienku, že ak si dva protóny vzájomne vymieňajú pióny (mezóny), výsledkom tejto výmeny bude veľmi silná príťažlivá sila medzi protónmi. Podobne je tomu s neutrónmi. Táto sila musí mať veľmi krátky dosah, pretože sa nepozoruje mimo jadra. Predpovedaný pión bol objavený v roku 1947 Cecilom Powellom (Nobelove ceny: Yukawa - 1949, Powell - 1950).

Zásadný význam koncepcie „požičiavania“ energie na produkovanie virtuálnych častíc, ako to umožňuje princíp neurčitosti, tkvie v zovšeobecnení tejto myšlienky: všetky **interakcie** v prírode môžu byť spôsobené **vzájomnou výmenou virtuálnych častíc**.

Takými to časticami sú vždy častice s celočíselným spinom (bozóny). Pre elektromagnetickú interakciu sú týmito časticami **fotóny**, ktoré majú nulovú pokojovú hmotnosť a práve preto je dosah tejto interakcie neobmedzený. (Podobne by to malo byť pre gravitačné pole - jeho výmenná častica tzv. gravitón má mať tiež nulovú pokojovú hmotnosť pretože gravitácia má tiež neobmedzený dosah. Problémom je, že gravitón nebol doteraz pozorovaný pre spomínanú slabosť

tejto interakcie).

Môžeme si teda predstaviť, že protóny a neutróny v jadre si neustále medzi sebou vymieňajú pióny a tým vzniká vzájomné silové pôsobenie, ktoré ich drží pokope. My však už vieme, že ani protóny, ani neutróny nie sú elementárne častice, ale že sa skladajú z troch kvarkov, a ani pióny nie sú elementárne, ale keďže sú mezónmi, skladajú sa z dvojice kvark - antikvark. Takže ak sa dostávame do rozmerov vnútra protónu ($< 10^{-15}$ m) vyvstáva otázka, čo drží kvarky v hadrónoch - čo je silná interakcia na elementárnej úrovni. Túto otázku (a mnohé ďalšie) rieši **kvantová chromodynamika** - teória silných interakcií. Podľa nej je výmennou časticou silnej interakcie medzi kvarkami **gluón** a táto interakcia má takú zvláštnu vlastnosť, že je veľmi slabá pokiaľ sú kvarky blízko seba (napr. vo vnútri hadrónu), ale stáva sa veľmi silnou, ak sa snažíme kvarky od seba oddialiť. Možno si tu predstaviť analógiu so silou pružiny, ktorá tiež narastá s rozťahovaním pružiny. A je tu ešte jedna analógia: ak sa nám aj podarí vyvinúť dostatočnú silu na roztrhnutie pružiny, dva takto získané útržky budú opäť podobnými pružinami s dvomi koncami. Podobne, ak sa nám dostatočne energetickou nalietajúcou časticou podarí rozbiť hadrón, to čo vznikne budú opäť hadróny a kvarky ostanú naďalej v nich skryté. Kvantová chromodynamika zavádza ďalšiu vlastnosť kvarkov - tzv. **farbu**, pričom existujú tri rôzne farby a rôzne farby sa priťahujú (podobne ako náboje rôznych typov). Spomínané zvláštne vlastnosti silnej interakcie sú dané aj tým, že aj jej nositeľ gluón má farbu (na rozdiel od fotónu v prípade elektromagnetickej interakcie, ktorý nemá elektrický náboj).

Napr. protón je zložený z troch kvarkov rôznych farieb a navonok je farebne neutrálny (tri farby zmiešaním dajú neutrálnu - bielu farbu). Pozorovať môžeme iba **farebne neutrálné objekty** a to je dôvod, prečo nepozorujeme samostatný kvark.

Slabá interakcia je slabšia ako elektromagnetická, ak pôsobí na hranici svojho dosahu, teda na vzdialenosť rozmeru jadra. Ak ale sa interagujúce častice k sebe priblížia, intenzita slabej interakcie sa zvyšuje a pri vzdialenostiach $\approx 10^{-17}$ m sa stáva porovnateľnou s elektromagnetickou. V 70. rokoch bola navrhnutá teória, ktorá zjednocovala elektromagnetickú a slabú interakciu - tzv. **elektroslabá teória**. Nositeľom elektromagnetickej časti interakcie bol fotón a slabá časť zjednotenej interakcie mala mať dva elektricky nabité nositele a jeden elektricky neutrálny, všetky veľkej hmotnosti (krátky dosah tejto interakcie) - rádovo stokrát ťažšie ako protón. Tieto častice, tzv. **ťažké bozóny** W^+ , W^- , Z boli experimentálne objavené začiatkom 80. rokov, pričom snaha o ich objav bola motiváciou kvalitatívnej zmeny v experimente, boli produkované tzv. **protižeňné zväzky** vysokoenergetických častíc, takže už nie nalietajúca strela

narážajúca na nehybný terčik, ale dva zrážajúce sa zväzky nalietajúce oproti sebe, čo umožnilo značne zvýšiť energiu zrážky a tým pravdepodobnosť objavu takých hmotných častíc, ako boli predpovedané ťažké bozóny. Elektroslabá teória bola týmto potvrdená. Tento objav a jeho následné experimentálne potvrdenie bolo také významné, že ako teoretici Glashow, Weinberg a Salam, tak aj experimentálni fyzici Rubia a Van der Meer získali Nobelove ceny.

Štyri sily v prírode				
sila	pôsobí na	intenzita	dosah	sprostredkujúca častica
gravitačná	Všetky leptóny a hadróny	6×10^{-39}	neohraničený	gravitón
slabá	Všetky leptóny a hadróny	10^{-5}	$\approx 10^{-17}$ m	W^{\pm} a Z^0
elektromagnetická	Nabité leptóny a hadróny	1/137	neohraničený	fotón
silná	Všetky hadróny	1	$\approx 10^{-15}$ m	gluón

Obr. 10.7

Dnes teda poznáme štyri typy interakcií (Obr.10.7). Gravitačná interakcia je hybnou silou vo Vesmíre. Elektromagnetická interakcia drží elektróny v atómoch a silná nukleóny v jadrách. Slabá interakcia je zodpovedná za rozpady (a teda z nášho pohľadu nie je také dôležitá pre náš svet ako ostatné tri interakcie). Keďže, ako sme uviedli, existuje jediná elektroslabá interakcia, môžeme sa pýtať, prečo sú elektromagnetické a slabé aspekty tohto jediného javu také odlišné. Je tomu tak preto, lebo žijeme za nízkych teplôt. Keby bola teplota oveľa, oveľa vyššia ako je v dnešnom našom svete (ako skutočne bola v určitej vývojovej etape Vesmíru a ako dnes vieme simulovať v experimente s vysokoenergetickými protibežnými zväzkami), existovala by naozaj len jediná interakcia. S poklesom teploty sa oba aspekty od seba oddeľujú - jediná interakcia sa prejavuje v dvoch nápadne odlišných podobách. Opäť môžeme použiť analógiu: voda existuje v troch skupenstvách - ako kvapalina, ľad a para. Ľuďom neznalým nášho sveta by sa zdalo, že sú to tri úplne rôzne látky, medzi ktorými nie je žiaden súvis. Predpokladajme, že teplota by bola dostatočne vysoká, takže všetka voda by existovala iba v plynnom skupenstve, bola by teda viditeľne jedinou látkou s jediným súborom vlastností. Ak teplota klesne, časť pary skvapalnie a voda a para budú v rovnováhe. Takto máme dve rôzne látky s dvomi veľmi rozdielnymi

súbormi vlastností. Ak teplota klesne ešte nižšie, časť vody zamrzne a máme ľad, vodu a paru, všetko v rovnováhe, vzhľad a vlastnosti všetkých troch súčastí sú úplne odlišné. Napriek tomu všetky tri sú v podstate tou istou látkou.

Potvrdenie elektroslabej zjednocujúcej teórie nás povzbudzuje v našich ďalších zjednocovacích úvahách. Podľa týchto predstáv na počiatku Vesmíru (bezprostredne po tzv. veľkom tresku) bola nepredstaviteľne vysoká energia a v tomto okamžiku existovala jediná interakcia. S poklesom teploty (podľa našich merítok veľmi rýchlym) sa oddelila ako samostatná interakcia gravitácia, ktorá s pokračujúcim poklesom teploty slabla. Potom sa oddelila silná interakcia a nakoniec slabá a elektromagnetická a takto v dnešnom (chladnom) svete máme štyri interakcie.

Použitá literatúra

Murla, M., Pekárek, S.: Physics I, Department of Physics FEE, CTU, Praha, 1992

Pekárek, S., Murla, M.: Physics II, Department of Physics FEE, CTU, Praha, 1994

Beiser, A.: Úvod do moderní fyziky, Academia, Praha 1978

Feynman, R., Leighton, R.B., Sands, M.: Feynmanove prednášky z fyziky, ALFA, Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava, 1980

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika, VUT v Brne, Nakladatelství Vutium a Prometheus, Praha, 2001

Hajko, V., Daniel-Szabó, J.: Základy fyziky, Veda, Vydavateľstvo SAV, Bratislava, 1980

Hecht, E.: Physics, Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, California, 1994

Horák, Z., Krupka, F.: Fyzika, SNTL, ALFA, Praha, 1976

Close, F.: The Cosmic Onion, Quarks and the Nature of the Universe, Heinemann Education Books, Ltd., 1990

Isaev, P.S.: Obyknovennye, strannye, očarovannye, prekrasnye..., Energoatomizdat, 1995

Červeň, I.: Fyzika po kapitolách, FEI STU, Bratislava, 2005

<http://particleadventure.org/>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

Obsah

1	Elektrostatické pole	3
1.1	Coulombov zákon	3
1.2	Intenzita elektrostatického poľa	4
1.3	Tok intenzity elektrostatického poľa, Gaussov zákon	7
1.3.1	Niektoré aplikácie Gaussovho zákona	10
1.4	Práca a potenciálna energia v elektrostatickom poli,	12
1.5	Pohyb nabitej častice v elektrickom poli	16
1.6	Energia sústavy nábojov, nabitého vodiča a elektrostatického poľa	18
1.7	Kapacita vodiča, elektrický kondenzátor	20
1.8	Dielektriká	22
2	Elektrický prúd v kovoch	29
2.1	Intenzita prúdu, hustota prúdu	29
2.2	Ohmov zákon, Jouleov zákon	31
2.2.1	Ohmov zákon	31
2.2.2	Jouleov zákon	34
2.3	Elektromotorické napätie	35
3	Magnetické pole	39
3.1	Indukcia magnetického poľa, pohyb náboja v magnetickom poli . .	39
3.2	Gaussov zákon magnetického poľa	41
3.3	Biotov - Savartov zákon	42
3.4	Zákon celkového prúdu (Ampérov zákon)	44
3.5	Sila pôsobiaca na vodič, ktorým tečie prúd, v magnetickom poli .	45
3.5.1	Sila pôsobiaca medzi dvomi rovnobežnými priamymi vo-	46
	dičmi	
3.5.2	Sily pôsobiace na prúdovú slučku, magnetický moment . .	47
3.6	Magnetické vlastnosti látok	48
4	Elektromagnetické pole	54
4.1	Elektromagnetická indukcia	54
4.2	Indukčnosť	56
4.3	Energia a hustota energie v magnetickom poli	59
4.4	Elektrický oscilačný obvod	62
5	Maxwellove rovnice	68
5.1	Zákon zachovania elektromagnetickej energie, Poyntingov vektor	72

6	Elektromagnetické vlnenie	74
6.1	Opis elektromagnetického vlnenia	74
6.2	Elektromagnetické spektrum	77
6.3	Vlnové vlastnosti elektromagnetického žiarenia	78
6.3.1	Youngov interferenčný pokus	78
6.3.2	Interferencia svetla na tenkej vrstve	80
7	Základy kvantovej mechaniky	84
7.1	Časticové vlastnosti elektromagnetického žiarenia	84
7.1.1	Žiarenie absolútne čierneho telesa	84
7.1.2	Fotoelektrický jav	88
7.1.3	Comptonov jav	90
7.2	Vlnové vlastnosti častíc	94
7.2.1	De Broglieho vlny, vlnovo-časticový dualizmus	94
7.2.2	Experimentálne potvrdenie de Broglieho hypotézy	95
7.2.3	Popis častice pomocou vlnového balíka	98
7.3	Heisenbergove vzťahy neurčitosti	100
7.4	Schrödingerova rovnica	102
7.4.1	Zostavenie Schrödingerovej rovnice	102
7.4.2	Častica v jednorozmernej, nekonečne hlbkej jame	105
8	Atóm	110
8.1	Úvod	110
8.2	Bohrov model vodíkového atómu	111
8.3	Výsledky kvantovomechanického popisu vodíkového atómu	115
8.4	Viacelektrónové atómy	117
9	Jadro atómu	119
9.1	Úvod	119
9.2	Hmotnosť jadra, väzbová energia	119
9.3	Prirodzená rádioaktivita	122
9.4	Jadrové reakcie	124
10	Elementárne častice a sily, ktoré na ne pôsobia	127
10.1	Ako sa skúma mikrosvet	127
10.2	Elementárne častice	131
10.3	Sily v mikrosvete	134