

ČÁST VIII - MIKROČÁSTICE

32 Základní částice

33 Dynamika mikročástic

34 Atom - elektronový obal

35 Atomové jádro

36 Radioaktivita

37 Molekuly

Pod pojmem mikročástice budeme rozumět tzv. základní částice, atomy a molekuly. Jsou to objekty, v kterých se výrazně projevují kvantové a relativistické efekty, proto jejich vlastnosti a chování nemůžeme pochopit na základě klasické fyziky. Zatímco problémy atomů a molekul umíme již poměrně dobře vyřešit v rámci současné kvantové teorie, mnohé problémy základních částic nejsou dodnes, a v blízké budoucnosti sotva budou, vyřešeny.

32 ZÁKLADNÍ ČÁSTICE

Vlastnosti základních částic

Klasifikace základních částic

Základní částice definujeme jako částice, které podle současných představ nemůžeme považovat za soustavy vytvořené z jiných jednodušších samostatně existujících částic. U mnohých z nich sice pozorujeme rozpad na jiné částice, avšak nemůžeme tvrdit, že by ty složky, na které se určitá částice rozpadá, byly v ní přítomny jako "hotové" částice. Tyto "zplodiny" rozpadu vznikají až při energetické přestavbě částice. Neutron považujeme za základní částici, i když se přeměňuje na proton, elektron a neutrino, protože nemůžeme tvrdit, že se neutron skládá z těchto tří částic. Naproti tomu deuterium nepovažujeme za základní částici, protože se skládá z protonu a neutronu, které jsou v něm přítomny jako dva samostatné fyzikální objekty.

Přirozenou snahou fyziků je redukovat počet základních částic na minimum. Ve 30. letech našeho století se zdálo, že svět se skládá ze základních částic, které bylo možno spočítat na prstech jedné ruky. Byly to elektron, proton, neutron a foton, případně ještě hypotetický graviton. Později k nim přibýly některé nové částice (pozitrony, mezony, neutrina) a o některých známých částicích se ukázalo, že jsou složené z menších útvarů. Konkrétně to postihlo protony a neutrony, o kterých víme, že pozůstávají z tzv. kvarků. Současná "skladba" základních částic se vyznačuje pozoruhodnou symetrií: tvoří ji tři dvojice tzv. leptonů (elektron a elektronové neutrino, mion a mionové neutrino, τ lepton a τ neutrino) a tři dvojice kvarků: dolní (d) a horní (u), podivný (s) a půvabný (c), krásný (b) a vrchní (t). Leptony se vždy chovají jako bodové částice, těžší částice jsou složené, a to mezony z dvou kvarků a proton a neutron z tří kvarků. Vazbu mezi kvarky obstarávají tzv. gluony. Základní fyzikální principy vyžadují existenci tří druhů gluonů - fyzici je formálně rozlišují barvami (červenou, modrou a žlutou). S ohledem na tuto v podstatě fyzikální recesi se také celá teorie vazeb mezi kvarky nazývá chromodynamika (z řeckého "chromos" barva). Dodejme ještě, že kvarky jsou nosiči "zlomkového" náboje, a to $1/3e$ a $-2/3e$.

31.2 Vlastnosti základních částic

Zdá se, že by bylo nejrozumnější vyjmenovat nejprve všechny základní částice (tabulka základních částic je v následujícím článku), a až potom se zabývat jejich vlastnostmi. Takový postup by však nebyl výhodný, protože všechny základní částice nemůžeme účelně seskupit do několika skupin, takže tím získáme lepší přehled. Toto rozdělení do skupin, neboli klasifikace základních částic se uskutečňuje podle jejich nejtypičtějších

vlastností, proto nejprve se musíme seznámit s vlastnostmi základních částic. Jsou uvedeny v tvrzeních 32.1 - 32.4.

32.1

Základními vlastnostmi základních částic jsou: hmotnost, elektrický náboj, spin a magnetický moment (věta 32.2 - 32.4).

32.2

Spin základních částic je vlastní moment hybnosti \mathbf{b}_s (srovnej s definicí /11.12/) částice. Je kvantován v násobcích \hbar podle vztahu

$$\mathbf{b}_s = [s(s+1)]^{\frac{1}{2}} \cdot \hbar, \quad (32.1)$$

kde s je spinové kvantové číslo. U většiny základních částic má hodnotu 0, 1, 2 a výjimečně (u hyperonu Ω) 3/2.

32.3

Magnetický moment elementárních částic \mathbf{m} souvisí se spinem podle vztahu

$$\mathbf{m} = \frac{e}{m_\zeta} \mathbf{b}_s, \quad (32.2)$$

kde e je elektrický náboj a m_ζ je hmotnost částice.

32.4

Další vlastnosti základních částic charakterizujeme tzv. leptonovým kvantovým číslem, podivností, izospinem a paritou.

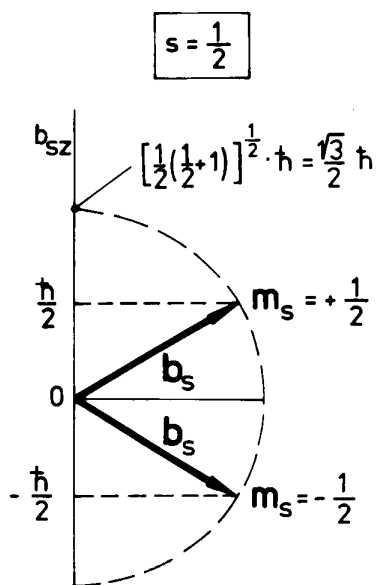
GOUDSMIT Samuel Abraham, nar. 1902, americký fyzik holandského původu. Spolu s G.E.Uhlenbeckem je otcem závažné hypotézy, kterou elektronu přiřadili vlastní moment hybnosti (spin) a tím i vlastní moment magnetický, určený pomocí Planckovy konstanty.

Podle teorie relativity je potřebné důsledně rozlišovat klidovou hmotnost a hmotnost za pohybu. U základních částic je tento požadavek zvlášť odůvodněný, protože tyto částice se mohou pohybovat i rychlostmi blízkými rychlosti světla. Foton, graviton a prakticky i neutrino se pohybují rychlostí světla, proto jejich klidová hmotnost se musí rovnat nule. Na druhé straně právě tato vlastnost fotonů a gravitonů způsobuje, že elektromagnetické a gravitační pole jsou "dalekodosahová" pole (rozprostírají se do nekonečna), zatímco silová pole např. v jádrech atomů, která jsou realizována částicemi s nenulovou klidovou hmotností (mezony), jsou krátkodosahová. (Dosah sil je v důsledku Heisenbergových relací neurčitosti nepřímo úměrný hmotnosti částic, které je přenášejí.)

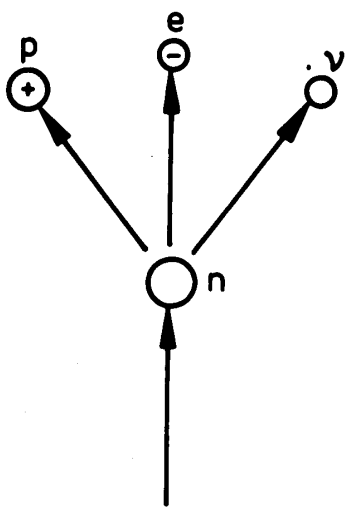
Zajímavým a doposud nevyřešeným problémem je hmotnostní spektrum základních částic. Na zdánlivě jednoduchou otázku, proč se v přírodě vyskytují jen částice s přesně určenou hmotností (a ne např. částice se spojitým spektrem hmotností) nemáme zatím uspokojivou odpověď. Určitou naději slibuje již zmíněná představa kvarků. Jestliže se spekulativně navrhne potenciál sil, který působí mezi kvarky a řeší se potom Schrödingerova rovnice, dostaneme řešení s diskretním hmotnostním spektrem, která dost dobře vyhovují pozorovanému spektru elementárních částic. Zajímavostí je, že tyto síly by měly mít principiálně odlišné vlastnosti od doposud známých sil: měly by být tím větší, čím jsou kvarky od sebe více vzdáleny a nulové, jsou-li v těsné blízkosti. Tím by se současně zdůvodnilo, proč individuální kvarky nebyly doposud pozorovány.

Částice mohou být : kladně nabitě, záporně nabitě a částice bez elektrického náboje. Elektricky

UHLENBECK George Eugene (úlenbek), nar. 1900, americký fyzik indonéžského původu. Spolu s S.Goudsmitem přisoudili vlastní mechanický a magnetický moment (spin) elektronu.



Obr. 32.1 Projekce momentu hybnosti elektronu (spinu) do význačného směru



Obr. 32.2 Rozpad neutronu

nabité částice přenášejí elementární kvantum náboje $e=1,6023 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Resp. zlomkový náboj ($+1/3e$, resp. $-2/3e$), jako je to u kvarků.

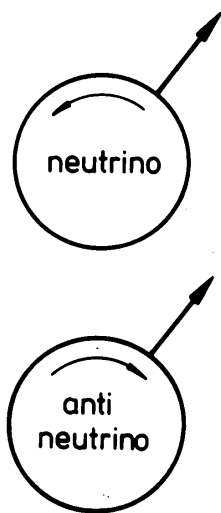
Velmi významnou vlastností základních částic je tzv. spin. Nesouhlas teoretických výpočtů s experimentálními pozorováními týkajícími se spekter záření vysílaného atomy a změn spekter v magnetickém poli vysvětlili Goudsmit a Ulenbeck zavedením vlastního mechanického momentu elektronu - spinu. Na základě porovnání teorie s experimentem bylo zjištěno, že spin elektronu má velikost určenou vztahem (32.1) a že při působení vnějších sil (např. magnetického pole) může mít spin jen dvě hodnoty svého průmětu do směru pole (obr. 32.1).

$$(b_s)_{1,2} = \pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi} = \pm \frac{\hbar}{2}.$$

(32.3)

Goudsmit a Ulenbeck spojovali tento moment s vlastní rotací elektronu kolem své osy (analogicky s rotací Země kolem své osy). Použitím známých klasických vztahů však lehce zjistíme, že látka elektronu na jeho rovníku by se musela pohybovat rychleji než rychlostí světla, což je v rozporu s teorií relativity. Z těchto příčin považujeme spin elektronu (a ostatních elementárních částic) za jejich primární vlastnost, kterou nemůžeme redukovat na známé mechanické jevy. V Diracově teorii elektronu vyplývá tato vlastnost z relativistické Schrödingerovy rovnice. Spin základních částic je důležitý i z hlediska statistiky, kterou se příslušné částice řídí (věta 9.20 a 9.21).

Z názorné, (ale velmi přibližné) představy o spinu bychom mohli dedukovat i další důležitou vlastnost elektronu a základních částic: vlastní magnetický moment. Rotující elektron nesoucí na svém povrchu elektrický náboj totiž představuje uzavřený elektrický obvod a ten je podle věty 21.12



Obr. 32.3 "Pravotočivé" a "levotočivé" neutrino

ekvivalentní magnetickému momentu. I v tomto případě však vznikají vážné interpretační obtíže. Je např. známo, že neutron nemá elektrický náboj, avšak jeho magnetický moment se nerovná nule. Je sice možné vysvětlit tuto anomálii na základě představy, že neutron obsahuje v sobě dvě částice: kladný proton a záporný elektron a že magnetický moment neutronu je výslednicí magnetických momentů těchto dvou částic. Kdyby tomu však tak skutečně bylo, nepovažovali bychom neutron za základní částici. I v případě magnetického momentu se nám proto jeví rozumnější považovat ho za primární vlastnost základních částic. Jeho velikost udává vztah (32.2) a podobně jako spin i magnetický moment má ve vnějším poli dvě možné orientace se složkami

$$m_{1,2} = \frac{e}{m_{\xi}} \left(\pm \frac{\hbar}{2} \right) = \pm \frac{e\hbar}{2m_{\xi}}.$$

(32.4)

Uvedené kvantum magnetického momentu se nazývá Bohrov magneton.

Základní částice se mohou rozpadat, resp. navzájem integrovat. Ukazuje se přitom, že některé procesy probíhají bez těžkostí, jiné, které by z hlediska našich představ měly být stejně pravděpodobné, se vůbec nevyskytují. To vedlo k zavedení dalších charakteristik základních částic (věta 32.4), které mají tu vlastnost, že se jejich hodnoty při určitých reálných procesech zachovávají. Leptonové číslo L má hodnotu 1 pro elektron a neutrino, $L=-1$ pro jejich antičástice, $L=0$ pro ostatní částice, leptonové číslo M má hodnotu 1 pro mezon μ a jeho neutrino, $M=-1$ pro jejich antičástice a $M=0$ pro ostatní částice. Baryonové číslo $B=1$ patří všem baryonům (viz tabulka ve 32.2), $B=-1$ antibaryonům a $B=0$ ostatním částicím. Zákon zachování těchto čísel vysvětluje např. proč je neutron nestabilní (může se přeměňovat na proton, elektron a neutrino - obr. 32.2, protože se přitom zachovává leptonové i baryonové číslo) a proč je proton naopak stabilní. Neznáme baryon s menší hmotností než proton, proto při rozpadu protonu ba se nemohlo zachovat baryonové číslo.

Z podobných příčin se zavádějí ještě další charakteristiky: podivnost S a izospin I (příslušná čísla jsou uvedena v tabulce článku 32.2). Jejich hodnoty se rovněž musí zachovávat, avšak - a tím se liší od čísel L , M a B - ne při všech procesech. Podivnost S se zachovává jen při tzv. silných interakcích, zatímco při tzv. slabých interakcích se nemusí zachovávat. Slabá interakce se odlišuje od silné tím, že se při ní zúčastňují relativně slabé síly podmíněné hlavně neutrinami (např. radioaktivní beta rozpad), zatímco v druhém případě se objevují velké jaderné síly podmíněné mezony. Poměr velikostí těchto dvou druhů sil je přibližně 10^{-15} . I to naznačuje, že při silných interakcích dochází k uvolnění podstatně větších energií, než při slabých interakcích.

Další zajímavou vlastností základních částic, kterou ještě uvedeme, je tzv. parita. Stručně řečeno, parita

vyjadřuje symetrii přírody vzhledem k záměně prostorových souřadnic x za $-x$ (prostorová parita P), vzhledem k inverzi času (t za $-t$ - časová parita T) a vzhledem k elektrickému náboji ($+e$ za $-e$ - nábojová parita C). Považovalo se za samozřejmé, že při všech v přírodě probíhajících procesech se tyto parity zachovávají, např. se stejnou pravděpodobností se v přírodě vyskytuje "pravé" a "levé", obrácení toku času vede k procesům, které rovněž mohou nastat, a jestliže existuje látka, stejně může existovat i antilátka, ve které částice jsou nahrazeny antičásticemi. Ke všeobecnému překvapení se zjistilo, že uvedené dílčí parity se nemusí vždy zachovávat. Ukázalo se např., že neutrino existují vždy jen jako "pravotočivá" a antineutrino jako "levotočivá" s ohledem na svůj spin (obr. 32.3), proto při procesech, ve kterých vznikají jen neutrino, resp. antineutrino (při beta rozpadu) není zachována prostorová parita. Podobně se našly příklady na porušení časové parity. Usuzuje se, že "součin" všech tří parit se vždy zachovává, což značí, že jakmile se poruší prostorová parita, současně je narušena např. i časová parita, atd.

32.2 Klasifikace základních částic

Nejznámější dělení základních částic se zakládá na stoupající velikosti jejich hmotností. S ohledem na různé možné rozpady a interakce je potřebné částice charakterizovat dále elektrickým nábojem, spinem, leptonovým a baryonovým číslem, podivností, izospinem a tzv. poločasem rozpadu. Je to čas, za který se rozpadne polovina z počátečního počtu daných částic. Všechny tyto údaje s názvem jednotlivých částic a jejich skupin jsou uvedeny v tabulce. Základní dělení částic poskytuje věta 32.5.

32.5

Současné známé základní částice dělíme na fotony, leptony, mezony a baryony. K leptonům počítáme elektron, neutrino a mion, k mezonům patří mezony π , k a η , k baryonům nukleony (proton a neutron) a hyperony.

32.6

Ke každé částici existuje antičástice, která se od dané částice odlišuje opačným elektrickým nábojem, opačným spinem (u elektricky nabitých částic) a jen spinem u elektricky neutrálních částic. Z důvodů úplné symetrie tvrdíme, že foton a graviton jsou samy sobě i antičásticemi.

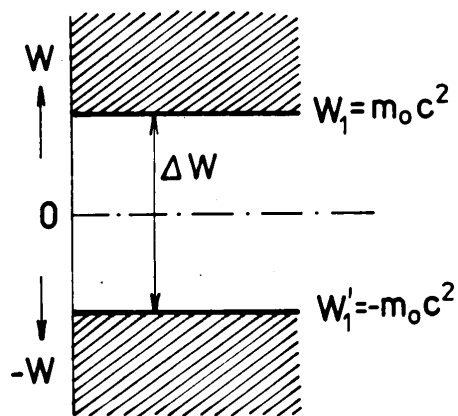
Objev fotonu se spojuje se jmény Planck a Einstein, objev elektronu můžeme ztotožnit s objevem tzv. katodových paprsků tehdy ještě neznámé povahy Hittorfem r. 1869. V roce 1930 vypracoval Dirac kvantověmechanickou teorii elektronu, ze které vplynuly dva důležité poznatky:

1. Při hmotnostech $m = 10^{-30}$ kg a elektrickém náboji $e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$ má mít tato částice spin určený vztahem (32.1), resp. (32.3) a magnetický moment určený vztahem (32.2).

2. Energie elektronu je (podle vztahu /16.30/) určena

$$W = \pm (m_0^2 c^4 + p^2 c^2)^{\frac{1}{2}} \leq \pm m c^2,$$

přičemž obě znaménka jsou rovnocenná. Jak však interpretovat energii se znaménkem $-$? Na obr. 32.4 je situace znázorněna graficky. Elektron může nabývat všech energií nad hladinou $W_1 = +m_0 c^2$, přičemž energetická mezera $\Delta W = 2m_0 c^2$ obsahuje zakázané stavy. Fyzikálně nic nebrání tomu, aby



Obr. 32.4 Hladiny elektronů a pozitronů v Diracově interpretaci

elektrony z horních dovolených stavů přecházely po emisi kvanta $h\nu \geq 2m_0c^2$ do dolních dovolených stavů a postupně zmenšovaly svou energii až do $-\infty$. To by však znamenalo, že všechny elektrony by v krátkém čase přešly do stavů se zápornou energií.

Jelikož tento jev nepozorujeme, vyslovil Dirac hypotézu, že všechny stavy se zápornou energií jsou obsazeny. Předpokládejme, že v určitém okamžiku je všech N stavů se zápornými energiemi obsazeno elektrony. Jejich elektrický náboj je tedy $Q = -Ne$. Jestliže jeden z nich po absorpci energie $2m_0c^2$ přeneseme do oblasti kladných energií, zůstane ve stavech se zápornou energií elektrický náboj

$$Q' = -Ne - (-e) = Q + e.$$

Tento výsledek můžeme interpretovat tak, že po úniku elektronu ze záporných stavů do kladných přibude v oblasti záporných stavů částice s kladným nábojem a stejně velkou hmotností. Dirac ji nazval pozitron. Ukázalo se, že tato Diracova myšlenka není o nic méně reálnější, než myšlenka Plancka a L.de Broglie. Roku 1932 byl pozitron v kosmickém záření Andersonem skutečně objeven.

Podle Diracovy interpretace se musí při interakci elektronu s pozitronem uvolnit energie $W \geq 2m_0c^2$, resp. naopak, absorpcí záření s energií kvanta $W \geq 2m_0c^2$ (tzv. gama kvanta) se může generovat pár elektron + pozitron. Oba uvedené procesy, tzv. anihilace páru elektron + pozitron, resp. "materializace" fotonu se experimentálně pozorovaly.

Pozitron tvoří tzv. antičástici elektronu a jelikož analogické úvahy platí pro všechny částice, musí mít každá z nich svou antičástici. To se skutečně potvrdilo. V případě fotonu však neexistuje řádná mezera, protože $m_{0f} = 0$, proto foton je současně sám sobě i antičásticí.

Kromě elektronu a fotonu jsou nejznámějšími částicemi proton a neutron. Proton se od začátku ztotožňoval s jádrem nejlehčího prvku - vodíku, zatímco neutron byl objeven při ozařování berylia alfa částicemi Chadwickem r. 1932. Je to elektricky neutrální částice s hmotností přibližně rovnou hmotnosti protonu a na rozdíl od něho je nestabilní - s poločasem asi 6.10^2 s se rozpadá proton, elektron a antineutrino. Neutrino je elementární částice, která byla hypoteticky zavedena k vysvětlení spojitého spektra energie beta záření a zákona zachování spinu. Její experimentální pozorování je nesmírně těžké, protože díky prakticky nulové klidové hmotnosti téměř vůbec neinteraguje s látkou (střední volná dráha neutrina v pevných látkách je mnoho milionů světelných let). Jak jsme již uvedli, neutrina a antineutrina způsobují narušení zákona o zachování parity.

Další významnou skupinou základních částic jsou mezony. Jejich první zástupce, tzv. π mezon, byl podobně jako pozitron nejprve teoreticky předpovězen japonským fyzikem Yukawou a později experimentálně potvrzen Powellem. Může být kladný, záporný i neutrální a tvoří vlastně "foton" jaderných sil. Smysl existence π mezonu je tedy právě tak zřetelný, jako smysl existence elektronů, protonů a neutronů, avšak smysl existence "kolegů" o něco lehčích μ mezonů je doposud záhadou. Mohou být jen kladné nebo záporné a vzhledem k jejich malé hmotnosti je zařazujeme mezi leptony.

Nejtěžší známé základní částice tvoří skupinu tzv. hyperonů. Zatím jsou známy čtyři druhy těchto rovněž dosti záhadných částic, které mají i některé podivuhodné vlastnosti (např. spin $3/2$).

DIRAC Paul Adrien (dyrak), nar. 1902 v Bristolu (Anglie). R. 1928 využitím speciální teorie relativity zformuloval vlnovou rovnici pro elektron nacházející se v elektromagnetickém poli. Geniálním zobecněním tohoto výsledku byla Diracova hypotéza o existenci antičástic, potvrzená r. 1932 Andersonovým objevem pozitronu. Za svůj základní objev a plodné rozvinutí kvantové mechaniky a elektrodynamiky byl P. Dirac r. 1933 odměněn Nobelovou cenou (spolu s E. Schrödingerem). Dirac se zabýval i kvantovou teorií záření a statistickou mechanikou. Spolu s E. Fermim odvodil Kvantovou statistiku pro částice s poločíselným spinem (např. elektrony).

CHADWICK James (čedvik), 1891, anglický fyzik, spolupracovník E. Rutheforda v oblasti zkoumání přirozené radioaktivity i umělé přeměny prvků. Mimořádnou cenu pro rozvoj fyziky v první pol. našeho století měl jeho objev neutronu r. 1932, za který byl odměněn r. 1935 Nobelovou cenou za fyziku.

TABULKA: Základní částice

Druh	Název	Spin	Klidová hmotnost (m_e)	Energetický ekvivalent (MeV)	Poločas rozpadu (s)
částice pole	foton	1	0	0	stabilní
	graviton	1	0	0	stabilní
Leptony	neutrino e	1/2	0	0	stabilní
	neutrino ν	1/2	0	0	stabilní
	elektron	1/2	1	0,51	stabilní
	mezon μ	1/2	207	106	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Mezony	mezon (neutr.) π	0	264	135	$7 \cdot 10^{-17}$
	mezon (elektr. nabitý) K	0	273	140	$1,8 \cdot 10^{-8}$
	mezon η	0	1073	548	$1 \cdot 10^{-18}$

Baryony	proton	1/2	1836	938	stabilní
	neutron	1/2	1839	940	$6,5 \cdot 10^2$
	hyperon	1/2	2182	1115	$1,7 \cdot 10^{-10}$
	hyperon (neutr.) Λ	1/2	2332	1194	$1,0 \cdot 10^{-12}$
	hyperon (elektr. nabitý)	1/2	2341	1197	$1,2 \cdot 10^{-10}$
	Σ	1/2	2571	1310	$1,0 \cdot 10^{-10}$
	hyperon (neutr.) Σ	1/2	2583	1320	$0,9 \cdot 10^{-10}$
	hyperon (elektr. nabitý)	3/2	3290	1676	$1 \cdot 10^{-10}$
	Σ				
	hyperon Ω				