

OSTRAVSKÁ UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA



ATOMOVÁ A JADERNÁ FYZIKA

DÍL II

FYZIKA ATOMOVÉHO JÁDRA

A

**FYZIKA ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC A JEJICH
INTERAKCÍ**

IVAN JANEČEK

OSTRAVA 2007

Učební text.
Vydání třetí, opravené (2007).

O B S A H

Předmluva.....	3
Úvod do fyziky mikrosvěta.....	5
Díl I. Fyzika elektronového obalu atomu a interakce atomů	
1. Atomová fyzika	7
1.1 Vznik a vývoj atomové teorie	9
1.1.1 Základní chemické zákony	10
1.1.2 Daltonova atomová hypotéza	13
1.1.3 Thomsonův model atomu	14
1.1.4 Rutherfordův model atomu.....	18
1.1.5 Bohrův model atomu	21
1.1.6 Sommerfeldův model (relativistický)	26
1.2 Základy kvantové teorie	33
1.2.1 Podstata elektromagnetického záření	35
1.2.2 Vyzařovací zákon (absolutně) černého tělesa	36
1.2.3 Lenardův experiment – Einsteinovo objasnění	38
1.2.4 Comptonův jev	40
1.2.5 De Broglieho vlnová hypotéza	41
1.2.6 Schrödingerova rovnice	47
1.2.7 Navození Schrödingerovy rovnice	48
1.2.8 Fyzikální význam vlnové funkce	52
1.2.9 Bezčasová Schrödingerova rovnice	53
1.2.10 Heisenbergovy relace neurčitosti	55
1.3 Řešení SR pro atom vodíku	61
1.3.1 Kvantová čísla	64
1.3.2 Znázornění atomových orbitalů	66
1.3.3 Experimentální důvody pro zavedení spinu	69
1.3.4 Sternův-Gerlachův pokus	69
1.3.5 Einsteinův-de Haasův pokus	73
1.4 Víceelektronové atomy	79
1.4.1 Výstavba elektronového obalu atomu	81
1.4.2 Atom v elektrickém a magnetickém poli	86
1.4.3 Starkův jev	86
1.4.4 Zeemanův jev	87
1.4.5 Magnetický moment atomu	88
1.4.6 Zpřesnění popisu spekter atomů	91

1.5 Interakce atomů	99
1.5.1 Podmínky vzniku chemické vazby	100
1.5.2 Dvouatomové molekuly	103
1.5.3 Víceatomové molekuly	105
1.5.4 Molekula vodíku řešená metodou valenční vazby	106
1.5.5 Spektra molekul	112
1.6.6 Vibrace molekul	114
1.6.7 Rotace molekul	115
Řešení úloh.....	119
Literatura	121

Díl II. Fyzika atomového jádra a fyzika elementárních částic a jejich interakcí

2. Jaderná fyzika	7
2.1 Struktura a vlastnosti atomového jádra	9
2.1.1 Protonový model atomového jádra	10
2.1.2 Proton-elektronový model atomového jádra	12
2.1.3 Heisenbergův-Ivaněnkův model atomového jádra	13
2.1.4 Klasifikace atomových jader a jejich základní charakteristiky	16
2.1.5 Vlastnosti a podstata jaderných sil	22
2.2 Radioaktivita	29
2.2.1 Druhy radioaktivního záření	30
2.2.2 Typy radioaktivních přeměn	31
2.2.3 Deexcitace jader	33
2.2.4 Zákon radioaktivní přeměny	34
2.2.5 Řady radioaktivních přeměn	37
2.2.6 Stabilita jader	39
2.3 Jaderné reakce	47
2.3.1 Zákony zachování v jaderných reakcích	48
2.3.2 Typy jaderných reakcí	52
2.3.3 Reakce štěpná	55
2.3.4 Reakce termojaderná	60
2.3.5 Modely jader	61
2.4 Fyzika elementárních částic	69
2.4.1 Třídění elementárních částic a jejich charakteristiky	70
2.4.2 Antičástice	82
2.4.3 Kvarkový model hadronů	83
2.4.4 Současný systém základních částic a základních fyzikálních interakcí	87
Řešení úloh.....	99
Literatura	101

PŘEDMLUVA

Text podává základní informace z atomové fyziky, kvantové fyziky, jaderné fyziky a fyziky elementárních částic. Je určen především pro distanční a kombinované studium učitelství fyziky a bakalářské studium neučitelství fyziky. Jedná se o 3., opravenou verzi textu, který se snaží především o výklad základních poznatků uvedených oborů v pokud možno utříděné a přehledné formě. Soustředí se na důležité fyzikální jevy, experimenty a jejich objasnění na základě fyzikálních zákonitostí, teorií a modelů. Obsahuje i příklady, úkoly a testy, nicméně hlavní těžiště kontroly studia spočívá v zodpovězení otázek na konci každé kapitoly a vypracování zadaného korespondenčního úkolu. Součástí některých kapitol jsou i testy s výběrem variant. Získání početních dovedností se zatím předpokládá hlavně v rámci prezenční formy studia na semináři či tutoriálu. Jak již bylo řečeno, soustředí se text především na podání základních teoretických a experimentálních poznatků a nezabývá se jejich praktickými aplikacemi s výjimkou jaderné fyziky. Důvodem této výjimky je jednak jistá tradice v učebnicích jaderné fyziky a jednak stálá aktuálnost tohoto tématu v našich médiích. Do původního textu se bohužel vloudily některé chyby a nedostatky, které byly ve 2. verzi této publikace odstraněny zásluhou Zdeňka Maníka, který provedl jazykovou a věcnou revizi. Opět hlavně jeho zásluhou byly ve 3. verzi opraveny další většinou drobnější a formální nedostatky, které unikly kontrole ve verzi předchozí.

Pro snadnější manipulaci je celý text rozdělen do dvou částí – samostatných sešitů. První část obsahuje problematiku elektronového obalu atomu a v závěru se věnuje i interakcím atomů. Druhá část zahrnuje fyziku atomového jádra doplněnou v poslední kapitole také o přehled základních poznatků fyziky elementárních částic. Pro usnadnění orientace v obou sešitech jsou zde prezentované úvodní informace a obsah připojeny k oběma sešitům. Na konci každého sešitu je uvedeno řešení testů, seznam literatury a vysvětlení významu ikon použitých v textu.

Po prostudování textu budete znát:

- experimentální východiska atomové a jaderné fyziky včetně fyziky elementárních částic i kvantové teorie;
- důležité pojmy používané v těchto fyzikálních oborech;
- zákony, které musí být splněny během procesů na mikroskopické úrovni;
- základní stavební jednotky hmoty a jejich vlastnosti;
- předpoklady, důsledky a nedostatky modelů používaných pro objasnění jednotlivých fyzikálních jevů na mikroskopické úrovni.

Budete schopni:

- vysvětlit podstatu atomové teorie a dalších teorií, které objasňují stavbu látky;
- popsat hierarchii stavebních jednotek hmoty;
- objasnit složení a stabilitu jednotlivých stavebních jednotek látky;
- zařadit atomy prvků, jádra nuklidů a elementární částice v rámci příslušného klasifikačního systému;
- popsat interakci stavebních jednotek látky a vysvětlit ji prostřednictvím pole;
- interpretovat jevy pozorované v mikrosvětě s pomocí fyzikálních modelů, které jsou založeny na představách kvantové teorie;
- uvést některé významné praktické aplikace vědeckých poznatků z oblasti atomové fyziky, jaderné fyziky a fyziky elementárních částic;
- ve většině případů odhadnout, zda postupy a poznatky prezentované v médiích a tiskovinách jsou založeny na vědecké metodě.

Získáte:

- ucelenou představu o stavbě hmoty na mikroskopické úrovni, která se bude opírat o základní poznatky, zákony, modely atomové a jaderné fyziky a fyziky elementárních částic;
- přehled o základních pojmech a metodách kvantové mechaniky.

Čas potřebný k prostudování učiva modulu:

32 + 18 hodin (teorie + řešení úloh)

ÚVOD DO FYZIKY MIKROSVĚTA

Co to je onen mikrosvět? Svět titěrných objektů tak vzdálený naší běžné zkušenosti. Řídí se zákony, které zdánlivě odporují zdravému rozumu, a přesto ovlivňují i náš každodenní život.

Lidé se od pradávna setkávali s různými objekty a jevy ve svém blízkém i vzdáleném okolí. Od doby, kdy začali myslet, se snažili zjistit, jaká je stavba okolních objektů, a objasnit podstatu pozorovaných jevů.

Úspěšným nástrojem, nejdříve filozofů a učenců a později přírodovědců, se stala fyzika, která se vyvíjela od obecné vědy snažící se objasnit všehomír, tedy svět jako celek, až po vědu specializovanou, zabývající se nejzákladnějšími formami pohybu hmoty. Na jejích zákonitostech ovšem dnes staví své základy i další vědy jako chemie, biologie, geologie a ostatní vědní obory zabývající se studiem složitějších systémů.

Pozornost fyziků se nejdříve soustředila na jevy probíhající v systémech, které jsou svými rozměry srovnatelné s rozměry člověka a jsou tedy i nejbližší jeho smyslovému vnímání. Při jejich pozorování se totiž zpravidla obejdeme bez vylepšení svých smyslů pomocí citlivých přístrojů. Svět jevů a systémů této úrovně rozměrů nazýváme **makrosvět**, případně **makrokosmos**.

Už od prehistorických dob je pro člověka typický zájem rovněž o jevy a objekty **megasvěta** neboli **megakosmu**, tedy světa velkých rozměrů a vzdáleností. Souvisí to zajisté s tím, že od nepaměti znal člověk ze své zkušenosti význam pohybu nebeských těles pro životní cykly rostlin a živočichů. Později zobecnil tyto poznatky a využil je i prakticky. Umožnily mu například měření času či určování polohy na zeměkouli.

Nejnižší úroveň světa představuje **mikrosvět**, nazývaný též **mikrokosmos**. Svět malých vzdáleností a rozměrů. Svět, který je našim smyslům nepřístupný, pokud nejsou vyzbrojeny složitými a citlivými přístroji. Jedině ony jsou nám schopny zprostředkovat dění v mikrosvětě, v němž platí exotické zákony. Zákony, které jsou na jedné straně vzdálené naší každodenní zkušenosti, na straně druhé přecházejí v makrosvětě na jednodušší zákony klasické.

Zatímco snaha o poznání obou předchozích úrovní světa byla alespoň zpočátku vedena hlavně praktickými důvody, v případě mikrosvěta byla hybnou silou především touha po poznání, praktické využití poznatků přichází mnohem později. Zájem o jevy a stavbu hmoty na **mikroskopické úrovni** poprvé projevíli starověcí učenci a filozofové, kteří se pokusili na čistě spekulativním základě vytvořit první neověřené teorie - hypotézy o stavbě hmoty. Experiment je ale východiskem i kriteriem správnosti každé přírodovědné teorie. Modely stavby hmoty vycházející z experimentů – a dalšími experimenty potvrzené – byly vytvořeny poměrně nedávno.

Nepředstavujme si hranici mezi třemi úrovněmi světa jako ostrý předěl. Naopak je značně neostrá. Jedna úroveň pozvolna přechází v druhou, navzájem se prolínají a

neexistují mezi nimi hraniční kameny. Řadu jevů, které svými projevy patří do oblasti makrosvěta, lze vysvětlit pouze s pomocí zákonitostí mikrosvěta. Tak tomu je například u supratekutosti, supravodivosti či u fotoelektrického jevu. Někdy tyto zákonitosti ovlivňují dokonce i megasvět, jako je tomu v případě klidových hmotností neutrin.

Takzvané kvantové zákonitosti, jimiž se řídí objekty mikrosvěta, jsou na první pohled mnohem složitější, než zákonitosti makrosvěta. Zejména tato odlišnost nás vede k zahrnutí některých fyzikálních oborů a oborů na pomezí fyziky či jejich částí pod společný termín *fyzika mikrosvěta*.

Základem fyziky mikrosvěta jsou tyto fyzikální obory:

- *kvantová teorie,*
- *atomová fyzika,*
- *jaderná fyzika,*
- *fyzika elementárních částic.*

Můžeme k nim počítat též další obory či jejich části, které se bez znalostí zákonů fyziky mikrosvěta neobejdou. Jsou to např.:

- *kvantová chemie,*
- *teorie pevných látek,,*
- *molekulární teorie kapalin,*
- *fyzika plazmatu.*

Jednoznačné vymezení obsahu uvedených oborů ovšem není jednoduché. Měnilo se v průběhu historického vývoje. I v současnosti se může lišit v pojetí jednotlivých autorů.

Kvantovou teorii dnes můžeme chápat jako obecný nástroj (či teoretický aparát) pro objasnění jevů v oblasti mikrosvěta, ale též některých makroskopických jevů (supratekutost, supravodivost), které jsou projevem kvantových zákonitostí (zákonitostí mikrosvěta). I když se často pojmy *kvantová fyzika* a kvantová teorie považují za synonyma, je přesnější kvantovou teorii chápat jako pojem obecnější, protože tato představuje účinný prostředek studia i nefyzikálních systémů včetně biologických.

V počátcích svého vývoje byla kvantová fyzika téměř těsně spjata s *atomovou fyzikou*, která původně zahrnovala nejen fyziku atomového obalu, ale též základy fyziky jádra, dnes vyčleňované do *jaderné fyziky*. Později nachází kvantová fyzika výrazné uplatnění zejména ve *fyzice elementárních částic*.

2. JADERNÁ FYZIKA

V této kapitole se dozvíte:

- co je předmětem studia jaderné fyziky a také fyziky elementárních částic;
- o historii vývoje modelů stavby atomového jádra;
- které fyzikální veličiny jsou důležitými charakteristikami atomových jader a jak podle nich jádra klasifikujeme;
- o vlastnostech a podstatě jaderných sil;
- o podstatě radioaktivity, o jaderných reakcích, o zákonitostech, jimiž se tyto procesy řídí, a o modelech jader a jejich přeměn;
- o stavbě hmoty na subjaderné úrovni, o vlastnostech, třídění a zákonitostech přeměny elementárních částic;
- o jednotném teoretickém popisu stavby látky a pole na základě současného systému základních částic a základních fyzikálních interakcí.

Budete schopni:

- pohovořit o tom, jak se na základě nových objevů či experimentů měnily názory na složení atomového jádra;
- uvést základní vlastnosti jader a jaderných sil, provést na základě vlastností jader jejich klasifikaci a také vysvětlit podstatu jaderných sil;
- popsat a třídit jaderné procesy, jako jsou radioaktivní přeměny, deexcitace jader a jaderné reakce, s využitím zákonitostí, jimiž se tyto procesy řídí;
- popsat stavbu hmoty na subjaderné úrovni s využitím poznatků fyziky elementárních částic.

Klíčová slova této kapitoly:

atomové jádro, proton, neutron, jaderné síly, radioaktivita, jaderná reakce, elementární částice, základní fyzikální interakce



Čas potřebný k prostudování učiva kapitoly:

12 + 8 hodin (teorie + řešení úloh)

Jaderná fyzika (nukleonika) je obor fyziky, který se zabývá popisem a studiem **atomových jader**, včetně jejich vnitřní struktury a přeměnami těchto jader. Obor navíc úzce souvisí s **fyzikou elementárních částic**, což je dáno skutečností, že se jádro skládá z elementárních částic jádra – **nukleonů**. Další elementární částice

pak vznikají při určitých přeměnách jader. **Jaderné přeměny** i přeměny elementárních částic se tak řídí stejnými obecnými zákony, respektive zákonitosti jaderných přeměn jsou speciálním případem zákonitostí přeměn elementárních částic.

Atomové jádro je centrální oblast atomu zaujímající prostor řádově 10^{-15} m. V této oblasti je soustředěna skoro celá hmotnost atomu. Na elektronový obal zbývá řádově jedna tisícinu celkové hmotnosti atomu (Rutherfordův experiment). Atomové jádro má kladný elektrický náboj. Z hlediska vnitřní struktury představuje atomové jádro systém sestávající nejméně z jednoho **protonu** a libovolného počtu dalších protonů a **neutronů** vázaných **jadernými silami**.

Atomové jádro bylo objeveno při tzv. **Rutherfordově experimentu**, ve kterém byl sledován rozptyl částic alfa na tenké kovové folii. V rozporu s tehdejšími poznatky o struktuře atomu bylo zjištěno, že částice alfa většinou procházejí folií velmi lehce, na druhé straně dochází k jejich rozptylu i do značně velkých úhlů. Tyto výsledky bylo možno objasnit právě představou o velmi malém, ale velmi těžkém jádru atomu s kladným elektrickým nábojem.
