

Jozef Rosina, Jana Vránová, Hana Kolářová

Biofyzika

Pro zdravotnické a biomedicínské obory

2., doplněné vydání





Jozef Rosina, Jana Vránová, Hana Kolářová

Biofyzika

Pro zdravotnické
a biomedicínské obory

2., doplněné vydání

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude trestně stíháno.

**Prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA, doc. Ing. Jana Vránová, CSc.,
prof. RNDr. Hana Kolářová, CSc.**

Biofyzika

**Pro zdravotnické a biomedicínské obory
2., doplněné vydání**

Hlavní autor/editor:

Prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA

Kolektiv autorů:

Prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA – *Fakulta biomedicínského inženýrství, České vysoké učení technické v Praze, Kladno*

Ústav lékařské biofyziky a lékařské informatiky, 3. lékařská fakulta Univerzity Karlovy v Praze

Doc. Ing. Jana Vránová, CSc. – *Ústav lékařské biofyziky a lékařské informatiky, 3. lékařská fakulta Univerzity Karlovy v Praze*

Prof. RNDr. Hana Kolářová, CSc. – *Ústav lékařské biofyziky, Ústav molekulární a translační medicíny, Lékařská fakulta Univerzity Palackého v Olomouci*

Recenze:

Prof. RNDr. Evžen Amler, CSc.

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2021

Cover Photo © depositphoto, 2021

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 8063. publikaci

Odpovědná redaktorka Mgr. Helena Vorlová

Sazba, zlom Josef Lutka

Obrázky převzaty z publikace Rosina J, Kolářová H, Stanek J. Biofyzika pro studenty zdravotnických oborů. Grada Publishing 2006; obr. 3.1, 3.2, 5.1, 14.11 a 14.15 dle podkladů autorů překreslila Miloslava Krédlová; obr. 12.12 převzat z publikace Bulíková T. EKG pro záchranáře *nekarđiology*. Grada Publishing 2015 a obr. 21.5 z publikace Kittnar O, a kol. Přehled lékařské fyziologie. Grada Publishing 2020.

Počet stran 296 + 8 stran barevné přílohy

2. vydání, Praha 2021

Práce vznikla za podpory projektu Inženýrské aplikace fyziky mikrosvěta, reg. č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000766 financovaného z EFRR. The work was supported from European Regional Development Fund-Project Engineering applications of microworld physics“ (No. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000766).

Výtisklo TISK CENTRUM s.r.o., Moravany u Brna

ISBN 978-80-271-4276-7 (ePub)

ISBN 978-80-271-4275-0 (pdf)

ISBN 978-80-271-2526-5 (print)

Obsah

Seznam použitých zkratk	13
Úvod	14
1 Stavba hmoty, síly v přírodě	15
1.1 Elementární částice hmoty	15
1.2 Atomové jádro	17
1.3 Elektronový obal	18
1.4 Interakce v přírodě	19
1.5 Formy hmoty	21
1.6 Disperzní systém	22
1.7 Transportní jevy	22
1.7.1 Viskozita	22
1.7.2 Difuze	24
1.7.3 Dialýza	25
1.7.4 Osmóza	26
1.8 Jevy na rozhraní mezi dvěma fázemi	27
1.8.1 Tekutost	27
1.8.2 Povrchové napětí	27
1.9 Pohyb látek	28
2 Přeměna energie v organismu	31
2.1 Termodynamika	31
2.2 Hlavní termodynamické zákony	32
2.3 Potřeba energie	33
2.4 Energetická bilance	35
3 Biofyzikální aspekty regulace teploty, využití tepla a chladu	37
3.1 Regulace teploty lidského těla	37
3.2 Mechanismy termoregulace lidského těla	39
3.2.1 Kondukce (vedení)	39
3.2.2 Konvekce (proudění)	40
3.2.3 Radiace (sálání)	40
3.2.4 Evaporace (vypařování)	41
3.3 Měření teploty	43
3.4 Infračervené záření (IR)	45
3.4.1 Využití infračerveného záření	46
3.5 Koupele	47
3.6 Lokálně používané tepelné procedury	49
3.7 Chlad	49

3.8	Využití kryoterapie v medicíně	51
3.9	Priessnitzovy obklady	51
4	Odstředivá síla	53
4.1	Využití odstředivé síly ve zdravotnictví	53
5	Sedimentace krve	57
5.1	Fyzikální podstata sedimentace krve	57
6	Vnější tlak a organismus	61
6.1	Působení vnějšího tlaku na organismus	61
6.2	Vliv podtlaku na organismus	62
6.2.1	Výšková hypoxie	63
6.2.2	Krevní doping	64
6.3	Vliv přetlaku na organismus	65
6.3.1	Další účinky přetlaku	67
6.3.2	Léčebné využití přetlaku	68
6.4	Otrava kyslíkem	68
7	Biofyzikální aspekty letecké dopravy	69
7.1	Biofyzikální aspekty letecké dopravy	69
7.2	Biofyzikální aspekty kosmických letů	70
7.3	Přetížení	71
7.4	Beztížný stav	73
8	Sterilizace	77
8.1	Základní pojmy	77
8.2	Fyzikální postupy sterilizace	77
8.2.1	Var za normálního atmosférického tlaku	77
8.2.2	Var pod tlakem	78
8.2.3	Výpalování v plamenu	79
8.2.4	Sterilizace v horkovzdušném sterilizátoru	79
8.2.5	Ultrafialové záření	80
8.2.6	Ionizující záření	80
8.2.7	Sterilizace plazmatem	80
8.2.8	Ultrazvuk	81
8.2.9	Sterilizace v oleji	81
8.2.10	Sterilizace filtrací	81
8.3	Chemické postupy sterilizace	81
8.4	Destilace, termostat, inkubátor	83
8.4.1	Destilace	83
8.4.2	Termostat	83
8.4.3	Inkubátor	83
9	Zvuk a audiometrie	85
9.1	Základní pojmy	85

9.2	Veličiny objektivní	87
9.2.1	Intenzita zvuku	87
9.2.2	Hladina intenzity zvuku	88
9.3	Veličiny subjektivní	88
9.3.1	Hlasitost a hladina hlasitosti zvuku	88
9.4	Audiometrie	91
9.4.1	Vyšetřovaná onemocnění sluchu	92
9.5	Sluchový orgán	92
10	Ultrazvuk (UZ)	95
10.1	Charakteristika a vlastnosti	95
10.1.1	Akustický tlak	95
10.1.2	Fázový posun	95
10.1.3	Vlnový odpor	96
10.1.4	Rychlost šíření ultrazvukového vlnění v biologické tkáni	96
10.1.4.1	Rychlost šíření ultrazvukového vlnění v kapalném a plynném prostředí	96
10.1.4.2	Rychlost šíření ultrazvukového vlnění v pevném prostředí	96
10.1.5	Útlum	98
10.1.5.1	Útlum v pevných látkách	98
10.1.5.2	Útlum v kapalinách a plynech	98
10.1.5.3	Odraz a lom	98
10.1.6	Dopplerův jev	100
10.2	Výroba ultrazvuku	101
10.3	Účinky ultrazvuku	102
10.3.1	Mechanické účinky	102
10.3.2	Tepelné účinky	103
10.3.3	Fyzikálně chemické a disperzní účinky	103
10.3.4	Chemické a elektrochemické účinky	103
10.3.5	Biologické účinky	103
10.4	Obecný princip sonografie	104
10.4.1	A-mód zobrazení	105
10.4.2	B-mód zobrazení	105
10.4.3	M-mód zobrazení	106
10.4.4	D-mód zobrazení	106
10.4.5	3D zobrazení	107
10.5	Diagnostický ultrazvuk	107
10.5.1	Ultrazvuk v gynekologii	108
10.5.2	Ultrazvuk v kardiologii	108
10.5.3	Denzitometrie	109
10.6	Terapeutické užití ultrazvuku	109
10.7	Rázové vlny	110
11	Biologické membrány, klidový a akční membránový potenciál	111
11.1	Biologické membrány	111

11.2 Klidový membránový potenciál	112
11.3 Akční membránový potenciál	114
12 Elektrický proud	117
12.1 Obecná charakteristika	117
12.1.1 Vodiče	117
12.1.1.1 Kovy	118
12.1.1.2 Elektrolyty	119
12.1.2 Izolanty	120
12.1.3 Polovodiče	120
12.1.4 Supravodiče	121
12.1.5 Dielektrika	121
12.2 Stejnosměrný a střídavý elektrický proud	121
12.3 Elektrické vlastnosti organismu	123
12.4 Pasivní elektrické vlastnosti tkání	123
12.4.1 Stejnosměrný proud	124
12.4.2 Střídavý proud	124
12.4.2.1 Nízkofrekvenční střídavý proud	125
12.4.2.2 Vysokofrekvenční střídavý proud	126
12.4.3 Účinky elektrického proudu	126
12.4.3.1 Stejnosměrný proud	126
12.4.3.2 Nízkofrekvenční střídavý proud	126
12.4.3.3 Vysokofrekvenční střídavý proud	126
12.4.4 Využití elektrického proudu v medicíně	126
12.4.4.1 Stejnosměrný proud	126
12.4.4.2 Nízkofrekvenční střídavý proud	130
12.4.4.3 Středněfrekvenční střídavý proud	133
12.4.4.4 Vysokofrekvenční proud a elektromagnetické vlnění	135
12.4.5 Úrazy elektrickým proudem	136
12.4.5.1 Zasažení bleskem	138
12.4.5.2 Sekundární příznaky úrazů elektrickým proudem	138
12.5 Aktivní elektrické vlastnosti vzrušivých tkání	139
12.5.1 Činnostní potenciály svalové	140
12.5.2 Činnostní potenciály srdeční	140
12.5.3 Činnostní potenciály mozkové	143
12.5.4 Jiné akční potenciály	144
12.6 Elektroklima	144
13 Fyzikální základy dýchání, krevní oběh a krevní tlak	147
13.1 Dýchání	147
13.2 Plíce	148
13.3 Krevní oběh a krevní tlak	151
13.3.1 Měření krevního tlaku	156

14 Optické záření, oko, přístroje a zařízení využívající optické metody	159
14.1 Optické záření	159
14.2 Vlnové vlastnosti optického záření	160
14.2.1 Rozklad světla	160
14.2.2 Skládání světla (interference)	160
14.2.3 Ohyb světla (difrakce)	161
14.2.4 Polarizované světlo	161
14.2.5 Odraz a lom (reflexe a refrakce)	162
14.3 Viditelné optické záření	163
14.3.1 Teorie barevného vnímání	164
14.3.2 Fyziologické a psychologické účinky barev, zrakové iluze	164
14.3.3 Zdravé oko, vady oka a korekce vad	164
14.3.3.1 Zobrazení čočkami	166
14.3.3.2 Vady oka	167
14.3.4 Sezonní deprese	170
14.4 Přístroje a zařízení využívající optické metody	171
14.4.1 Optické mikroskopy	171
14.4.2 Elektronové mikroskopy	173
14.4.2.1 Transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop (TEM) – v proslém světle	173
14.4.2.2 Skenovací (rastrovací, řádkovací) elektronový mikroskop (SEM) – v odraženém světle	174
14.4.3 Mikroskopie atomárních sil	175
14.4.4 Endoskopy	175
14.4.5 Metody optické spektroskopie	177
14.4.6 Kolorimetrie jako optická metoda chemické analýzy	177
14.4.7 Objektivní kolorimetrie	178
14.4.8 Spektrofluorimetrie	178
14.4.9 Polarimetrie	179
14.4.10 Nefelometrie a turbidimetrie	179
14.4.11 Refraktometrie	179
14.4.12 Průtoková cytometrie	180
14.5 Ultrafialové záření	181
14.5.1 Umělé zdroje UV záření a využití	183
14.5.2 UV záření a jeho účinky	184
14.5.3 Ozon a ozonová vrstva	187
14.6 Infračervené záření	187
14.6.1 Biologické účinky IR záření	188
14.6.2 Využití IR záření	189
15 Biomechanika, deformace pevného tělesa a její význam ve zdravotnictví	191
15.1 Mechanika	191
15.2 Biomechanika	191
15.3 Biomechanické funkce kostí, kloubů a šlach	192
15.4 Mechanické vlastnosti chrupavky	195

15.5	Mechanické vlastnosti kloubu	195
15.6	Šlachy a vazy	196
15.7	Mechanické vlastnosti biologických materiálů	196
15.8	Biokompatibilita	196
15.8.1	Implantologie	197
16	Ionizující záření	199
16.1	Charakteristika ionizujícího záření	199
16.2	Obecné zákonitosti přeměny atomových jader	201
16.2.1	Energie	201
16.2.2	Radioaktivní přeměna	201
16.2.3	Aktivita	202
16.2.4	Poločas přeměny	203
16.2.5	Rozpadová konstanta	203
16.2.6	Veličiny a jednotky, které charakterizují pole záření	203
16.2.6.1	Emise zdroje	203
16.2.6.2	Fluence částic	204
16.2.7	Veličiny a jednotky, které popisují interakci ionizujícího záření s hmotou	204
16.2.8	Veličiny a jednotky dozimetrie ionizujícího záření	204
16.2.8.1	Absorbovaná dávka	205
16.2.8.2	Kerma	205
16.2.9	Veličiny a jednotky, které používáme v radiační ochraně	205
16.2.9.1	Dávkový ekvivalent	205
16.2.9.2	Ekvivalentní dávka	205
16.2.9.3	Efektivní dávka	206
16.3	Druhy radioaktivní přeměny	207
16.3.1	Záření α	207
16.3.2	Záření β	208
16.3.3	Záření γ	208
16.3.4	Rentgenové záření	209
16.3.4.1	Rentgenky	210
16.3.5	Neutrony	212
16.3.6	Kosmické záření	212
16.4	Biologické účinky ionizujícího záření	212
16.4.1	Přímý a nepřímý účinek ionizujícího záření	213
16.4.2	Radiosenzitivita	214
16.4.3	Ochrana před vnějším ozářením	214
16.4.4	Stochastické a deterministické účinky ionizujícího záření	216
16.4.5	Život buňky zasažené radioaktivitou	217
16.5	Akutní nemoc z ozářením	218
16.5.1	Období počátečních příznaků	218
16.5.2	Období bez klinických příznaků	218
16.5.3	Období plného rozvoje nemoci	218
16.5.4	Období rekonvalescence	219
16.6	Přístroje pro osobní a ochrannou dozimetrii	219

17 Využití ionizujícího záření v medicíně	227
17.1 Ionizující záření v diagnostice	227
17.1.1 Scintilační kamera	228
17.1.1.1 Schéma vyšetření a popis činnosti scintilační kamery	228
17.1.1.2 Kolimátory	228
17.1.2 Scintigrafie	230
17.1.3 Tomografická scintigrafie	232
17.2 Rentgenové záření v diagnostice	234
17.2.1 Skiaskopie	235
17.2.2 Skiografie	236
17.2.3 Rentgenová výpočetní tomografie (CT)	237
17.3 Ionizující záření v terapii	239
17.3.1 Otevřené radionuklidy	239
17.3.2 Radioterapie	239
17.3.2.1 Teleradioterapie	240
17.3.2.1.1 Terapeutické využití rentgenového záření	240
17.3.2.1.2 Terapie pomocí záření γ	241
17.3.2.1.3 Léčba částicemi	243
17.3.2.2 Brachyradioterapie	244
17.3.2.3 Ozařovací plán	244
18 Laser a jeho uplatnění ve zdravotnictví	245
18.1 Fyzikální princip	245
18.1.1 Spontánní emise	245
18.1.2 Stimulovaná emise	245
18.1.3 Inverzní populace	246
18.2 Konstrukce laseru	247
18.3 Využití laseru	247
18.4 Lasery v medicíně	248
19 Magnetická rezonance	253
19.1 Princip magnetické rezonance	253
19.2 Tvorba a detekce MR signálu	256
19.3 MR angiografie	257
19.4 Funkční magnetická rezonance (fMR)	257
19.5 Přístrojové vybavení	258
19.6 Kontrastní látky v magnetické rezonanci	259
19.7 Využití magnetické rezonance	260
20 Nanotechnologie	261
20.1 Farmacie a nanotechnologie	261
20.2 Cílená doprava léčiv	261
20.3 Zobrazovací a diagnostické metody a zařízení	263
20.4 Tkáňové inženýrství a buněčná terapie	264

20.5 Nanotechnologie a terapie nádorů	265
21 Přístrojová technika používaná v diagnostice	267
21.1 Diagnostické přístroje	267
21.1.1 Diagnostika kardiovaskulárního systému	267
21.1.1.1 Diagnostika srdce	267
21.1.1.2 Diagnostika cév	268
21.1.1.3 Diagnostika krevního tlaku	269
21.1.2 Pletysmografie	270
21.1.3 Diagnostika mozku	271
21.1.3.1 Elektroencefalografie (EEG)	271
21.1.3.2 Evokované potenciály	271
21.1.3.3 Magnetoencefalografie	272
21.1.4 Diagnostika plic	272
21.1.5 Diagnostika oka a očnice	273
21.1.5.1 Diagnostika refrakčních vad oka	273
21.1.5.2 Diagnostika očního pozadí	274
21.1.5.3 Diagnostika nitroočního tlaku	274
21.1.5.4 Diagnostika zorného pole	274
21.1.6 Diagnostika ucha – audiometrie	274
21.2 Terapeutické přístroje	275
21.2.1 Kardiologie a kardiologie	275
21.2.1.1 Kardiostimulátory	275
21.2.1.2 Defibrilátory	276
21.2.2 Neuromuskulární stimulátory	277
21.2.3 Magnetoterapie	277
21.2.4 Ultrazvuková terapie	278
21.2.5 Diatermie	279
21.2.6 Onkologie	279
21.2.6.1 Teleradioterapie	279
21.2.6.2 Brachyterapie	281
21.2.6.3 Zdroje záření v radioterapii	281
21.2.6.4 Frakcionace	281
21.2.7 Chirurgie	281
21.2.7.1 Ventilační a anesteziologické systémy	281
21.2.7.2 Kryochirurgie	282
21.2.7.3 Elektrotomie a termokoagulace	282
21.2.7.4 Ultrazvuková chirurgie	283
21.2.7.5 Drtiče konkrementů	283
21.2.7.6 Aplikace laserů	283
Rejstřík	285
Souhrn	294
Summary	295

Seznam použitých zkratek

3D-CRT	trojrozměrná konformní radioterapie
BMD	hustota minerálů v kosti (Bone Mineral Density)
BMR	bazální metabolismus (Basal Metabolic Rate)
CT	výpočetní tomografie
DICOM	Digital Image and Communications In Medicine
DNA	deoxyribonukleová kyselina
EEG	elektroencefalografie
EKG	elektrokardiografie
ERG	elektroretinogram
ESWL	Extracorporeal Shock Wave Lithotripsy
fMR	funkční magnetická rezonance
FW	Fahraeus-Westergren
GeV	gigaelektronvolt
HLLT	vysokovýkonný laser (High Level Laser Therapy)
ICHS	ischemická choroba srdeční
IMRT	radioterapie s modulovanou intenzitou svazku (Intensity Modulated Radiation Therapy)
IR	infračervené záření
LLLT	nízkovýkonný laser (Low Level Laser Therapy)
MED	minimální erytémová dávka
MeV	megaelektronvolt
MR	magnetická rezonance
NMR	nukleární magnetická rezonance
PACS	Picture Archiving and Communications System
PEK	perkutánní extrakce konkrementů
PET	pozitronová emisní tomografie
Re	Reynoldsovo číslo
RTG	rentgenové záření
SDU	specificko-dynamický účinek
SPECT	jednofotonová emisní počítačová tomografie
SPF	faktor sluneční ochrany (Sun Protecting Factor)
TK	krvní tlak
UV	ultrafialové záření
V.m.	Valsalvův manévr

Úvod

Vývoj moderního zdravotnictví je úzce spjat s vývojem přírodních věd, především biologie, fyziky a chemie. Právě na rozhraní fyzikálních a biologických věd vznikla jedna z mezioborových vědních disciplín – biofyzika. Součástí biofyziky je i lékařská biofyzika, která studuje základní mechanismy působení různých fyzikálních faktorů na zdraví člověka, soustřeďuje svůj zájem na fyziologické a patologické projevy organismu a s tím související principy diagnostiky a terapie.

Učebnice lékařské biofyziky, kterou držíte v rukou, je napsána především pro studující bakalářských programů se zájmem o zdravotnickou problematiku.

Na základě dlouholetých zkušeností autorů byl text nové učebnice připraven tak, aby více vysvětlil témata, která jsou pro studenty obtížná, a aby podrobněji popsal principy fungování přístrojových diagnostických nebo terapeutických metod, které jsou pro studenty hůře pochopitelné.

Jednotlivé kapitoly podávají dostatečný obecný výklad základních mechanismů působení různých fyzikálních dějů na živý organismus. Jsou napsány jazykem, který umožňuje pochopit učivo studentům s různým typem středoškolského vzdělání. Každá kapitola je rozšířena o materiál potřebný pro výuku jednotlivých bakalářských specializací (např. fyzioterapie, ošetrovatelství, zdravotní vědy, biomedicínské obory apod.). Tento výukový text prohlubuje obecné formulace učiva základních kapitol či zdůrazňuje medicínské aplikace. Pro studující technických a interdisciplinárních oborů se zájmem o medicínské aplikace je součástí textu základní matematický aparát popisovaných fyzikálních dějů.

Předkládaná učebnice má za cíl pomoci studentům lépe pochopit aplikace lékařské biofyziky pro jejich budoucí povolání v obecné rovině a také na mnoha konkrétních příkladech a fyzikálních úlohách.

Praha 2020

*Prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA,
doc. Ing. Jana Vránová, CSc.
a prof. RNDr. Hana Kolářová, CSc.*

1 Stavba hmoty, síly v přírodě

1.1 Elementární částice hmoty

Elementární částice hmoty (protony, neutrony, elektrony) jsou stavebními kameny všech atomů (tab. 1.1). **Atomy** jsou základními stavebními kameny hmoty, jsou to nejmenší částice, na které lze hmotu rozložit chemickou cestou, definují vlastnosti daného **chemického prvku**. Všechny atomy (průměr atomu je řádově 10^{-10} m) se skládají z atomového jádra a elektronového obalu. **Elektronový obal** je tvořen záporně nabitými elektrony a je odpovědný za chemické a spektrální vlastnosti atomu. **Atomové jádro** (průměr atomového jádra se pohybuje řádově od hodnoty $1,6 \cdot 10^{-15}$ m u vodíku až po $15 \cdot 10^{-15}$ m u nejtěžších atomů) nese odpovědnost za fyzikální vlastnosti látek, je složené z protonů a neutronů (rozměr v rozsahu 10^{-14} až 10^{-15} m). Je v něm soustředěna téměř veškerá hmotnost atomu (to proto, že hmotnost protonu nebo neutronu je přibližně 1836krát větší než hmotnost elektronu) a nese kladný elektrický náboj. **Protonové číslo Z** (dříve atomové číslo) udává počet protonů v jádře atomu a rozhoduje o zařazení prvku v periodické soustavě prvků. Počet protonů v jádře je stejný jako počet elektronů v obalu, a proto se atom jeví navenek jako elektricky neutrální. **Neutronové číslo N** udává počet neutronů v jádře atomu. Celkový počet nukleonů (součet protonů a neutronů) v jádře udává **nukleonové číslo A** (dříve hmotnostní číslo) a je součtem čísla protonového a neutronového. Platí tedy:

$$A = N + Z \quad [1.1]$$

Tab. 1.1 Základní charakteristiky částic atomu

Částice	Symbol	Hmotnost (kg)	Relativní hmotnost	Elementární náboj
proton	p (p^+)	$1,6725 \cdot 10^{-27}$	1,0072	$+1,6 \cdot 10^{-19}$ C (coulomb)
neutron	n (n^0)	$1,6748 \cdot 10^{-27}$	1,0086	bez náboje
elektron	e (e^-)	$9,1091 \cdot 10^{-31}$	1/1836	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ C

Podle současné fyziky elementárních částic se protony, neutrony i další **hadrony** (částice hmoty, které jsou tvořeny dvěma nebo třemi kvarky) skládají z kvarků, nejmenších dosud známých elementárních částic. Podle současné teorie existuje šest typů **kvarků**, které se rozlišují tzv. „**vůněmi**“ (**flavors**). Každý z kvarků má i jinou hmotnost. Prvními objevenými byly kvarky „u“ (up – horní, také protonový) a „d“ (down – dolní, také neutronový). Nesou neceločíselný elektrický náboj, kvark „u“ má

náboj $+2/3$, kvark „d“ nese náboj $-1/3$. Elementární částice mají přitom náboj celočíselný. To je možné proto, že proton je složený ze dvou kvarků „u“ a jednoho kvarku „d“ ($+2/3+2/3-1/3 = 1$). Neutron se skládá ze dvou kvarků „d“ a jednoho kvarku „u“ ($-1/3-1/3+2/3 = 0$). Rozměr kvarku je přibližně 10^{-18} m. Vzájemné silové působení mezi kvarky je zprostředkováváno hypotetickými částicemi, zvanými **gluony**.

Přehled všech dosud známých elementárních částic je uveden v tabulce 1.2.

Tab. 1.2 Členění elementárních částic

Částice	Charakteristika
fotony	klidová hmotnost je rovná nule a spinové číslo je rovné jedničce
leptony	(neutrino, elektrony, miony) klidová hmotnost je malá – téměř nulová v případě neutrino a antineutrino, spinové číslo je rovné jedné polovině
mezony	(piony, kaony) klidová hmotnost je vyšší než u mionů, ale nižší než u protonů, spinové číslo je rovné nule
baryony	(nukleony – proton a neutron, hyperony) relativně velká klidová hmotnost, spinové číslo je rovné jedné polovině, v případě hyperonu třem polovinám

Elementární částice, které mají neceločíselné spinové číslo, označujeme souborně jako **fermiony**. Tyto částice dodržují Pauliho vylučovací systém (viz níže). Částice se spinovým číslem rovným nule nebo celému číslu jsou označovány jako **bosony**. Více bosonů se může nacházet ve stejném kvantovém stavu, tj. bosony nedodržují Pauliho vylučovací systém, co může být důvodem, proč obvykle tvoří nestabilní struktury.

Kvarky

Kvarky lze dle fyzikálních vlastností uspořádat do tří párů: u/d (z anglického up/down), c/s (charm/strange, pro tento pár se používá i české pojmenování půvabný/podivný) a t/b (nebo truth)/bottom (nebo beauty) – česky horní (nebo pravdivý/spodní nebo krásný). Ke každému kvarku existuje odpovídající antikvark. Kvarky „u“, „c“ a „t“ nesou neceločíselný náboj $+2/3$ a kvarky „d“, „s“ a „b“ $-1/3$. Každý ze šesti „vůň“ kvarků může dále existovat ve třech kvantových stavech – **barvách** (red – červená, blue – modrá a green – zelená). Mezi kvarky vzniká silové pole, jehož kvantem je vyměňovaná virtuální částice – gluon. Toto silové působení je velmi složité, protože výsledný hadron musí zůstat „bezbarvý“. K tomu může dojít pouze u „bezbarvé“ kombinace tří kvarků (baryony), u páru kvark – antikvark (mezony) a také při vyšších kombinacích pěti kvarků, které také splňují podmínku „bezbarvnosti“. Kvark nemůže existovat volný, ale pouze ve vázaném stavu v hadronech („uvěznění“ kvarků).

Co je Higgsův boson?

Higgsův boson je částice, která je projevem tzv. Higgsova pole. Zkoumání existence Higgsova bosonu je jednou z priorit dnešní fyziky. Důkaz o jeho existenci je klíčovým pro doplnění našich poznatků o podstatě fyzikálních sil. Nalezení Higgsova bosonu je posledním chybějícím článkem v takzvaném základním modelu částicové fyziky. Kdyby se Higgsův boson nepoda-

řilo objevit (nebo by měl nějakou nečekanou podobu), znamenalo by to velké potíže pro dnes široce přijímané základní fyzikální teorie. Protože ze standardního modelu neplyne, jakou by měl mít hmotnost, fyzikové se snaží urychlovat proudy protonů až k rychlosti světla a nechávají je srážet. Doufají, že při takové kolizi by Higgsův boson mohl vzniknout. Jeho existence by sice byla kratičká, ale měl by být zaznamenán a na grafech se projevit špičkou, protože má mít vysokou hmotnost, po experimentech odhadovanou na 126 gigaelektronvoltů (GeV). To je 130krát více než mají protony v jádrech atomů. GeV není sice jednotka hmotnosti, ale ve fyzikální konvenci se používá jako jednotka hmotnosti u fyzikálních částic. Odpovídá zhruba hmotnosti jednoho protonu. Higgsovu bosonu se občas říká božská částice, protože bez něj by neměly mít ostatní částice hmotnost, tudíž by se pohybovaly rychlostí světla a nevznikaly by z nich atomy.

1.2 Atomové jádro

První model atomu, tzv. **pudingový model**, představil v roce 1904 objevitel elektronu J. J. Thomson. Podle jeho představy je atom kladně nabitá velmi malá koule, uvnitř které jsou rovnoměrně rozptýleny záporně nabitě elektrony podobně jako rozinky v pudingu. Počet elektronů je takový, že kladné a záporné náboje se navzájem vyruší a atom se chová navenek jako elektricky neutrální.

Ernest Rutherford po mnoha experimentech své vědecké skupiny představil v roce 1913 **planetární model atomu**, který má těžké kladné jádro, kolem něhož obíhají záporné elektrony po kruhových drahách. Poloměr drah není v tomto modelu určen, může být libovolný. Rutherford však vycházel z klasické fyziky, podle které by kroužící elektron neustále vyzařoval energii a postupně by klesal k jádru, až by v něm zanikl.

Bohrův model (1913) je zdokonalením Rutherfordova modelu – aby Bohr odstranil hlavní nedostatky Rutherfordova modelu, musel postulovat platnost tzv. kvantovací podmínky – vychází z Planckovy kvantové teorie.

Dnes platí **kvantově-mechanický (také vlnově-mechanický) model** struktury atomu, který vychází z kvantové mechaniky, tj., elektronům i jiným částicím v atomu přisuzuje korpuskulárně-vlnové vlastnosti, tzn., že každá částice má i vlnové vlastnosti.

Současné experimenty ukazují, že atomové jádro není ostře ohraničeno, ale že se hustota jaderné hmoty mění. Jak bylo popsáno výše, jádra všech atomů se skládají z elementárních jaderných částic – protonů a neutronů, které označujeme jako **nukleony**. Aby bylo schopno jádro existence (kladně nabitě protony se navzájem odpuzují), působí v něm na elementární jaderné částice specifické přitažlivé síly – jaderné síly (tzv. silná interakce). Poloměr jádra se definuje jako poloměr oblasti, ve které působí tyto jaderné síly.

Pro určení hmotnosti jader můžeme užít **hmotnostní spektrometrii** (mass spectrometry). Tato metoda je založená na interakci iontů a polí (využívá elektrické a magnetické pole k dělení iontů podle jejich hmotnosti a náboje), pracuje s dělením podle poměru m/Q , kde m je hmotnost a Q je náboj fragmentu. Principem je, že kladně nabitě ionty (atomy s odebraným elektronem) o prakticky stejné energii vstupují jako svazek štěrbinou do homogenního magnetického pole s vektorem magnetické indukce kolmým ke směru svazku. Trajektorie iontů s menší hmotností je více zakřivená

a tyto ionty dopadnou např. na fotografické desce do jiného místa než ionty těžší. Technika hmotnostní spektrometrie má jak kvalitativní, tak i kvantitativní využití.

Postup hmotnostní spektrometrie

Vzorek je umístěn do přístroje, kde podstoupí odpařování, vzniká vzorek v plynné fázi. Složky vzorku jsou ionizovány, což má za následek vytvoření nabitých částic – iontů. Ionty jsou odděleny podle m/Q poměru v analyzátoru elektromagnetického pole a jsou detekovány obvykle kvantitativní metodou. Získaná data se počítačově zpracují.

Princip hmotnostní spektroskopie a výstup měření:

1. tvorba iontů (ionizace)
2. filtrace iontů (hmotnostní analýza)
3. měření četnosti iontů v závislosti na hodnotě m/Q
4. hmotnostní spektrum – osa x přísluší hodnotě m/Q ; osa y přísluší četnosti iontů (intenzitě signálu)

Hmotnostní spektrometry se skládají ze tří modulů:

Prvním modulem je zdroj iontů, ve kterém lze převést molekuly plynu na ionty. Druhým je hmotnostní analyzátor, který třídí ionty podle jejich hmotnosti s použitím elektromagnetických polí. Třetím je detektor, který měří hodnotu indikátoru množství, a tak poskytuje data pro výpočet množství každého iontu v reálném čase.

1.3 Elektronový obal

Přestože elektronový obal představuje jen přibližně jednu setinu hmotnosti celého atomu, má naprosto zásadní význam pro chemické vlastnosti a chování prvků. Elektrony nacházející se ve valenční sféře elektronového obalu se účastní chemických vazeb a jejich energie rozhoduje o tom, jak snadné bude vytvořit z atomu iont.

Elektronový obal určuje celkový rozměr atomu. V elektronovém obalu atomu je počet elektronů se záporným nábojem stejný jako počet protonů v jádře, proto celkový záporný náboj elektronového obalu atomu kompenzuje kladný náboj atomového jádra. Výsledkem je, že atom je celkově elektricky neutrální.

Podle principu **minimální energie** anebo také **výstavbového principu** se uspořádání elektronů řídí obecnou zásadou, že libovolný systém (v daném případě elektronový obal) je stabilní, je-li jeho celková energie minimální. U atomu v základním stavu jsou tedy zaplněny energetické hladiny s nejnižší energií, hladiny se obsazují postupně tak, že každý další elektron obsadí do té doby volnou hladinu s nejmenší energií. Energie elektronu roste se vzdáleností od jádra. Elektrony se ve skutečnosti nepohybují kolem jádra po přesně daných drahách (kružnicích nebo elipsách), ale jejich umístění v atomovém obalu je možné určit pouze s určitou mírou pravděpodobnosti.

Vlastnosti každého konkrétního elektronu nacházejícího se v elektronovém obalu jsou jednoznačně určeny čtyřmi kvantovými čísly (*hlavní* popisuje energetickou hladinu, na které se elektron nachází; *vedlejší* určuje tvar a symetrii atomového orbitalu; *magnetické* určuje orientaci jednotlivých orbitalů v prostoru; *spinové* popisuje tzv. vnitřní moment hybnosti elektronu).

Z hlediska kvantové fyziky existuje omezení pro počet elektronů v určitém stacionárním stavu, je to tzv. **Pauliho vylučovací princip**. Toto omezující pravidlo říká,

že dva elektrony se nemohou nacházet ve stejném kvantovém stavu, ve kterém by měly všechna čtyři kvantová čísla stejná, tj., musí se lišit hodnotou alespoň jednoho kvantového čísla. Pauliho princip vede k tomu, že orbital může být obsazen nejvíce dvěma elektrony, které musí mít opačnou orientaci spinu.

Při absorpci energie (tepelné, světelné, energie ionizujícího záření apod.) elektronem může tento přejít na hladinu s vyšší energií, a atom se tak dostane do **excitovaného stavu**. Vzhledem k výše popsané obecné zásadě stability atomu charakterizované minimální energií přechází elektron téměř okamžitě na hladinu s nižší energií, dochází k **deexcitaci** elektronu. Při tomto přechodu musí dojít k vyzáření absorbované energie ve formě fotonů elektromagnetického vlnění různých vlnových délek.

Pokud je energie interagující s atomem dostatečně velká, může dojít po její absorpci dokonce k uvolnění elektronu z elektronového obalu. Z původně elektricky neutrálního atomu vzniká kladně nabitá částice – kationt. Tomuto procesu říkáme **ionizace**.

1.4 Interakce v přírodě

V přírodě existují čtyři základní druhy interakcí: silná interakce, slabá interakce, elektromagnetická interakce a gravitační interakce.

Silná interakce představuje základní interakci mezi částicemi jádra, tj. mezi protony a neutrony, a také mezi kvarky – drží pohromadě kvarky uvnitř nukleonů. Je to nejsilnější známá interakce, která umožňuje existenci jader. Je dostatečně silná, aby překonala vzájemné elektromagnetické odpuzování kladně nabitých protonů. Silnou interakci zprostředkovávají hypotetické částice **gluony** (glue = lepidlo), které jsou nositeli silového působení mezi kvarky (viz níže) a **piony** (piony jsou tvořeny dvěma kvarky – vznikají různými kombinacemi kvarků up a down), které drží pohromadě neutrony a protony uvnitř jader atomů. Gluony i piony jsou tzv. částice přeměny. Dosah působení silné interakce je velice krátký (řádově 10^{-14} m), tzn., že tato interakce se uplatňuje pouze v jádře.

Slabá interakce je zodpovědná za některé atomární jevy, např. podílí se na přeměně β . Typickým příkladem slabé interakce je proto přeměna jaderného neutronu v proton za vyzáření elektronu a antineutrína, nebo jaderného protonu v neutron za vyzáření pozitronu a neutrína. Má také velmi malý dosah, řádově 10^{-18} m. Je druhou nejslabší interakcí. Slabá interakce je přenášena **bosony** $^{\pm}W$. Přeměnu beta (β^- ; β^+) můžeme vyjádřit následujícím vztahy:

$$n \rightarrow p + e^- + \text{elektronové antineutrino}(\bar{\nu}_e)$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \text{elektronové neutrino}(\nu_e)$$

Ke slabým interakcím patří i dvě základní **intermolekulární**, tj. mezimolekulární interakce, a to **van der Waalovy síly** a **Londonova disperzní síla**.

Elektromagnetická interakce se manifestuje silovým působením mezi elektrickým a magnetickým polem, která interagují spolu navzájem, ale také silově působí na elektricky nabitá i nenabitá tělesa, na magnetická tělesa atd. Jsou to síly nekonečného dosahu.

Elektromagnetická interakce působí také mezi elektricky nabitými částicemi jádra a obalu. Je druhou nejsilnější interakcí. Tato interakce fixuje velikost atomů, strukturu pevné látky. Elektromagnetická interakce tedy vytváří objem objektů. Většina sil z běžného života (třecí síly, odporové síly apod.) jsou projevem právě elektromagnetické interakce. Nositelem elektromagnetické interakce je virtuální částice – **foton**. Velikost síly interakce mezi nabitými částicemi v atomu závisí na poloze a pohybu nabitých částic.

Gravitační interakce je ze všech typů interakcí mezi částicemi nejslabší, ale působí na všechny částice ve vesmíru. Projevuje se především u těles velké hmotnosti a její silové působení je popsáno **Newtonovým gravitačním zákonem**: mezi dvěma hmotnými body působí stejně velké gravitační síly F_g a $-F_g$ navzájem opačného směru. Velikost gravitační síly F_g je přímo úměrná součinu hmotností m_1, m_2 hmotných bodů a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti r^2 .

Velikost gravitační síly je tedy dána vztahem:

$$F_g = \kappa \cdot \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad [1.2]$$

kde konstanta úměrnosti κ se nazývá gravitační konstanta, pro kterou platí $\kappa = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$.

Gravitační síla má nekonečný dosah stejně jako síla elektromagnetická a její velikost klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Gravitační síly míří ve směru přímky, která spojuje oba hmotné body ve vzájemné gravitační interakci. Je zřejmé, že gravitační pole zprostředkovává silové působení mezi tělesy, aniž by docházelo k jejich bezprostřednímu styku. Není známa žádná částice ani jakékoliv hmotné těleso, které by nepodléhalo gravitační interakci. Nositelem gravitační síly jsou zatím pouze hypotetické **gravitony**.

Gravitační působení chápe Einsteinova obecná relativita z roku 1916 za pomoci zakřivení času a prostoru. Tělesa zakřivují svět kolem sebe a v tomto zakřiveném světě se pohybují po nejrovnějších možných drahách. Gravitační interakci se zdůvodňují fenomény, jako je struktura galaxií, trajektorie planet (Země letí kolem Slunce po elipse proto, že jde o nejrovnější možnou dráhu v časoprostoru zakřiveném přítomností Slunce), padání předmětů, ale i proč nemůžeme zvednout těžké předměty.

Poté, co ve 20. století zasáhla do fyziky kvantová fyzika, byly postupně popsány ostatní tři interakce v přírodě.

V současnosti se vědci snaží o spojení teorie obecné relativity a kvantové mechaniky do teorie kvantové gravitace. Podle této teorie by měly gravitaci přenášet částice gravitony, ty ale dosud nebyly pozorovány. Jedním z úkolů experimentů prováděných ve velkém hadronovém urychlovači částic v CERNu je potvrdit existenci gravitonů.

CERN – mezinárodní evropská vědecká instituce (oficiální název Evropská organizace pro jaderný výzkum) je nejrozsáhlejší výzkumné centrum fyziky částic na světě. Za den zrodu organizace CERN lze považovat 29. září 1954. Zabývá se čistou vědou a hledá odpovědi na nejpřirozenější otázky: co je to hmota, jak hmota vznikla, jak jsou utvářeny složité hmotné objekty jako hvězdy, planety nebo lidští tvorové.