

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

<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>13</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>14</b>
<b>1 Stavba hmoty, síly v přírodě</b> .....	<b>15</b>
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
<b>2 Přeměna energie v organismu</b> .....	<b>31</b>
2.1 Termodynamika .....	31
2.2 Hlavní termodynamické zákony .....	32
2.3 Potřeba energie .....	33
2.4 Energetická bilance .....	35
<b>3 Biofyzikální aspekty regulace teploty, využití tepla a chladu</b> .....	<b>37</b>
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
<b>4</b>	<b>Odstředivá síla .....</b>	<b>53</b>
4.1	Využití odstředivé síly ve zdravotnictví .....	53
<b>5</b>	<b>Sedimentace krve .....</b>	<b>57</b>
5.1	Fyzikální podstata sedimentace krve .....	57
<b>6</b>	<b>Vnější tlak a organismus .....</b>	<b>61</b>
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
<b>7</b>	<b>Biofyzikální aspekty letecké dopravy .....</b>	<b>69</b>
7.1	Biofyzikální aspekty letecké dopravy .....	69
7.2	Biofyzikální aspekty kosmických letů .....	70
7.3	Přetížení .....	71
7.4	Beztížný stav .....	73
<b>8</b>	<b>Sterilizace .....</b>	<b>77</b>
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
<b>9</b>	<b>Zvuk a audiometrie .....</b>	<b>85</b>
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
<b>10</b>	<b>Ultrazvuk (UZ) .....</b>	<b>95</b>
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
<b>11</b>	<b>Biologické membrány, klidový a akční membránový potenciál .....</b>	<b>111</b>
11.1	Biologické membrány .....	111

11.2 Klidový membránový potenciál .....	112
11.3 Akční membránový potenciál .....	114
<b>12 Elektrický proud .....</b>	<b>117</b>
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
<b>13 Fyzikální základy dýchání, krevní oběh a krevní tlak .....</b>	<b>147</b>
13.1 Dýchání .....	147
13.2 Plíce .....	148
13.3 Krevní oběh a krevní tlak .....	151
13.3.1 Měření krevního tlaku .....	156



<b>14 Optické záření, oko, přístroje a zařízení využívající optické metody</b> . . . . .	<b>159</b>
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
<b>15 Biomechanika, deformace pevného tělesa a její význam ve zdravotnictví</b> . . . . .	<b>191</b>
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
<b>16</b>	<b>Ionizující záření</b>	<b>199</b>
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 $\alpha$	207
16.3.2	Záření $\beta$	208
16.3.3	Záření $\gamma$	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

<b>17 Využití ionizujícího záření v medicíně</b> .....	<b>227</b>
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 $\gamma$ .....	241
17.3.2.1.3 Léčba částicemi .....	243
17.3.2.2 Brachyradioterapie .....	244
17.3.2.3 Ozařovací plán .....	244
<b>18 Laser a jeho uplatnění ve zdravotnictví</b> .....	<b>245</b>
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
<b>19 Magnetická rezonance</b> .....	<b>253</b>
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
<b>20 Nanotechnologie</b> .....	<b>261</b>
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
<b>21 Přístrojová technika používaná v diagnostice .....</b>	<b>267</b>
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
<b>Rejstřík .....</b>	<b>285</b>
<b>Souhrn .....</b>	<b>294</b>
<b>Summary .....</b>	<b>295</b>

## Seznam použitých zkratk

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 rovna 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 (top (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