

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 re-produkována 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<br>a plynném prostředí ..... | 96         |
| 10.1.4.2  | Rychlost šíření ultrazvukového vlnění v pevném<br>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 Stejnoseměrný a střídavý elektrický proud .....                 | 121        |
| 12.3 Elektrické vlastnosti organismu .....                           | 123        |
| 12.4 Pasivní elektrické vlastnosti tkání .....                       | 123        |
| 12.4.1 Stejnoseměrný 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 Stejnoseměrný 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 Stejnoseměrný 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<br>vlnění .....  | 135        |
| 12.4.5 Úrazy elektrickým proudem .....                               | 136        |
| 12.4.5.1 Zasažení bleskem .....                                      | 138        |
| 12.4.5.2 Sekundární příznaky úrazů elektrickým<br>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<br>(TEM) – v proslém světle . . . . .            | 173        |
| 14.4.2.2 Skenovací (rastrovací, řádkovací) elektronový<br>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        |
| <br>   |            |
| <b>15 Biomechanika, deformace pevného tělesa a její význam<br/>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 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 (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 „vůní“ 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,