

Jozef Rosina a kolektiv

---

# Základy lékařské biofyziky

pro studenty lékařských fakult

---





Jozef Rosina a kolektiv

---

# **Základy lékařské biofyziky**

**pro studenty lékařských fakult**

---

**Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy**

*Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodikována 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.**

## **ZÁKLADY LÉKAŘSKÉ BIOFYZIKY**

**pro studenty lékařských fakult**

**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., 2022

Cover Photo © depositphoto, 2022

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 8610. publikaci

Odpovědná redaktorka Mgr. Helena Vorlová

Sazba, zlom Josef Lutka

Obrázky 3.1, 3.2, 5.1, 14.11 a 14.15 dle podkladů autorů překreslila Miloslava Krédlová; obr. 12.12 je převzatý z publikace Bulíková T. EKG pro záchranáře *nekardiology*. Grada Publishing 2015 a obr. 21.6 z publikace Kittnar O, a kol. Přehled lékařské fyziologie. Grada Publishing 2020. Ostatní obrázky dodali autoři.

Počet stran 312 + 8 stran barevné přílohy

Praha 2022

***Publikace 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).***

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod a.s.

ISBN 978-80-271-1645-4 (ePub)

ISBN 978-80-271-2812-9 (pdf)

ISBN 978-80-271-2574-6 (print)

# Obsah

Úvod .....	12
<b>1 Stavba hmoty, síly v přírodě .....</b>	<b>13</b>
1.1 Elementární částice hmoty .....	13
1.2 Atomové jádro .....	15
1.3 Elektronový obal .....	17
1.4 Interakce v přírodě .....	18
1.5 Formy hmoty .....	20
1.6 Disperzní systém .....	21
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 .....	47
3.5 Koupele .....	47
3.6 Lokálně používané tepelné procedury .....	49
3.7 Chlad .....	50
3.8 Využití kryoterapie v medicíně .....	51
3.9 Priessnitzovy obklady .....	52

<b>4 Odstředivá síla</b> .....	<b>53</b>
4.1 Využití odstředivé síly ve zdravotnictví .....	53
<b>5 Sedimentace krve</b> .....	<b>57</b>
5.1 Fyzikální podstata sedimentace krve .....	57
<b>6 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 .....	69
<b>7 Biofyzikální aspekty letecké dopravy</b> .....	<b>71</b>
7.1 Biofyzikální aspekty letecké dopravy .....	71
7.2 Biofyzikální aspekty kosmických letů .....	72
7.3 Přetížení .....	73
7.4 Beztížný stav .....	75
<b>8 Sterilizace</b> .....	<b>79</b>
8.1 Základní pojmy .....	79
8.2 Fyzikální postupy sterilizace .....	79
8.2.1 Var za normálního atmosférického tlaku .....	79
8.2.2 Var pod tlakem .....	80
8.2.3 Vypalování v plamenu .....	81
8.2.4 Sterilizace v horkovzdušném sterilizátoru .....	81
8.2.5 Ultrafialové záření .....	82
8.2.6 Ionizující záření .....	82
8.2.7 Sterilizace plazmatem .....	82
8.2.8 Ultrazvuk .....	83
8.2.9 Sterilizace v oleji .....	83
8.2.10 Sterilizace filtrací .....	83
8.3 Chemické postupy sterilizace .....	83
8.4 Destilace, termostat, inkubátor .....	85
8.4.1 Destilace .....	85
8.4.2 Termostat .....	85
8.4.3 Inkubátor .....	85
<b>9 Zvuk a audiometrie</b> .....	<b>87</b>
9.1 Základní pojmy .....	87
9.2 Veličiny objektivní .....	89
9.2.1 Intenzita zvuku .....	89
9.2.2 Hladina intenzity zvuku .....	90

---

9.3	Veličiny subjektivní .....	90
9.3.1	Hlasitost a hladina hlasitosti zvuku .....	90
9.4	Audiometrie .....	93
9.4.1	Vyšetřovaná onemocnění sluchu .....	94
9.5	Sluchový orgán .....	95
<b>10</b>	<b>Ultrazvuk (UZ) .....</b>	<b>97</b>
10.1	Charakteristika a vlastnosti .....	97
10.1.1	Akustický tlak .....	97
10.1.2	Fázový posun .....	97
10.1.3	Vlnový odpor .....	98
10.1.4	Rychlost šíření ultrazvukového vlnění v biologické tkáni .....	98
10.1.5	Útlum .....	100
10.1.6	Dopplerův jev .....	102
10.2	Výroba ultrazvuku .....	103
10.3	Účinky ultrazvuku .....	104
10.3.1	Mechanické účinky .....	104
10.3.2	Tepelné účinky .....	105
10.3.3	Fyzikálně chemické a disperzní účinky .....	105
10.3.4	Chemické a elektrochemické účinky .....	105
10.3.5	Biologické účinky .....	105
10.4	Obecný princip sonografie .....	106
10.4.1	A-mód zobrazení .....	107
10.4.2	B-mód zobrazení .....	107
10.4.3	M-mód .....	108
10.4.4	D-mód zobrazení .....	108
10.4.5	3D zobrazení .....	109
10.5	Diagnostický ultrazvuk .....	109
10.5.1	Ultrazvuk v gynekologii .....	110
10.5.2	Ultrazvuk v kardiologii .....	110
10.5.3	Denzitometrie .....	111
10.6	Terapeutické užití ultrazvuku .....	112
10.7	Rázové vlny .....	113
<b>11</b>	<b>Biologické membrány, klidový a akční membránový potenciál .....</b>	<b>115</b>
11.1	Biologické membrány .....	115
11.2	Klidový membránový potenciál .....	116
11.3	Akční membránový potenciál .....	118
<b>12</b>	<b>Elektrický proud .....</b>	<b>121</b>
12.1	Obecná charakteristika .....	121
12.1.1	Vodiče .....	121
12.1.2	Izolanty .....	124
12.1.3	Polovodiče .....	124
12.1.4	Supravodiče .....	125

12.1.5	Dielektrika .....	125
12.2	Stejnosměrný a střídavý elektrický proud .....	125
12.3	Elektrické vlastnosti organismu .....	127
12.4	Pasivní elektrické vlastnosti tkání .....	127
12.4.1	Stejnosměrný proud .....	128
12.4.2	Střídavý proud .....	128
12.4.3	Účinky elektrického proudu .....	130
12.4.4	Využití elektrického proudu v medicíně .....	130
12.4.5	Úrazy elektrickým proudem .....	140
12.5	Aktivní elektrické vlastnosti vzrušivých tkání .....	143
12.5.1	Činnostní potenciály svalové .....	144
12.5.2	Činnostní potenciály srdeční .....	144
12.5.3	Činnostní potenciály mozkové .....	147
12.5.4	Jiné akční potenciály .....	148
12.6	Elektroklima .....	148
<b>13</b>	<b>Fyzikální základy dýchání, krevní oběh a krevní tlak .....</b>	<b>151</b>
13.1	Dýchání .....	151
13.2	Plíce .....	152
13.3	Krevní oběh a krevní tlak .....	155
13.3.1	Měření krevního tlaku .....	160
<b>14</b>	<b>Optické záření, oko, přístroje a zařízení využívající optické metody .....</b>	<b>163</b>
14.1	Optické záření .....	163
14.2	Vlnové vlastnosti optického záření .....	164
14.2.1	Rozklad světla .....	164
14.2.2	Skládání světla (interference) .....	164
14.2.3	Ohyb světla (difrakce) .....	165
14.2.4	Polarizované světlo .....	165
14.2.5	Odraz a lom (reflexe a refrakce) .....	166
14.3	Viditelné optické záření .....	167
14.3.1	Teorie barevného vnímání .....	167
14.3.2	Fyziologické a psychologické účinky barev, zrakové iluze .....	168
14.3.3	Zdravé oko, vady oka a korekce vad .....	168
14.3.4	Sezonní deprese .....	174
14.4	Přístroje a zařízení využívající optické metody .....	175
14.4.1	Optické mikroskopy .....	175
14.4.2	Metody světelné mikroskopie .....	177
14.4.3	Elektronové mikroskopy .....	181
14.4.4	Mikroskopie atomárních sil .....	183
14.4.5	Endoskopy .....	184
14.4.6	Metody optické spektroskopie .....	186
14.4.7	Kolorimetrie jako optická metoda chemické analýzy .....	187
14.4.8	Objektivní kolorimetrie .....	188
14.4.9	Spektrofluorimetrie .....	188



14.4.10	Polarimetrie	188
14.4.11	Nefelometrie a turbidimetrie	189
14.4.12	Refraktometrie	189
14.4.13	Průtoková cytometrie	190
14.5	Ultrafialové záření	190
14.5.1	Umělé zdroje UV záření a využití	193
14.5.2	UV záření a jeho účinky	194
14.5.3	Ozon a ozonová vrstva	196
14.6	Infračervené záření	197
14.6.1	Biologické účinky IR záření	198
14.6.2	Využití IR záření	199
<b>15</b>	<b>Biomechanika, deformace pevného tělesa a její význam ve zdravotnictví</b>	<b>201</b>
15.1	Mechanika	201
15.2	Biomechanika	201
15.3	Biomechanické funkce kostí, kloubů a šlach	202
15.4	Mechanické vlastnosti chrupavky	205
15.5	Mechanické vlastnosti kloubu	205
15.6	Šlachy a vazy	206
15.7	Mechanické vlastnosti biologických materiálů	206
15.8	Biokompatibilita	206
15.8.1	Implantologie	207
<b>16</b>	<b>Ionizující záření</b>	<b>209</b>
16.1	Charakteristika ionizujícího záření	209
16.2	Obecné zákonitosti přeměny atomových jader	211
16.2.1	Energie	211
16.2.2	Radioaktivní přeměna	211
16.2.3	Aktivita	212
16.2.4	Poločas přeměny	213
16.2.5	Rozpadová konstanta	213
16.2.6	Veličiny a jednotky, které charakterizují pole záření	213
16.2.7	Veličiny a jednotky, které popisují interakci ionizujícího záření s hmotou	214
16.2.8	Veličiny a jednotky dozimetrie ionizujícího záření	214
16.2.9	Veličiny a jednotky, které používáme v radiační ochraně	215
16.3	Druhy radioaktivní přeměny	217
16.3.1	Záření $\alpha$	217
16.3.2	Záření $\beta$	218
16.3.3	Záření $\gamma$	218
16.3.4	Rentgenové záření	219
16.3.5	Neutrony	222
16.3.6	Kosmické záření	222
16.4	Biologické účinky ionizujícího záření	222
16.4.1	Přímý a nepřímý účinek ionizujícího záření	223

16.4.2	Radiosenzitivita .....	224
16.4.3	Ochrana před vnějším ozářením .....	224
16.4.4	Stochastické a deterministické účinky ionizujícího záření .....	226
16.4.5	Život buňky zasažené radioaktivitou .....	227
16.5	Akutní nemoc z ozářením .....	228
16.5.1	Období počátečních příznaků .....	228
16.5.2	Období bez klinických příznaků .....	228
16.5.3	Období plného rozvoje nemoci .....	228
16.5.4	Období rekonvalescence .....	229
16.6	Přístroje pro osobní a ochrannou dozimetrii .....	229
<b>17</b>	<b>Využití ionizujícího záření v medicíně .....</b>	<b>237</b>
17.1	Ionizující záření v diagnostice .....	237
17.1.1	Scintilační kamera .....	238
17.1.2	Scintigrafie .....	240
17.1.3	Tomografická scintigrafie .....	242
17.2	Rentgenové záření v diagnostice .....	244
17.2.1	Skiaskopie .....	245
17.2.2	Skiagrafie .....	246
17.2.3	Rentgenová výpočetní tomografie (CT) .....	247
17.3	Ionizující záření v terapii .....	249
17.3.1	Otevřené radionuklidy .....	249
17.3.2	Radioterapie .....	249
<b>18</b>	<b>Laser a jeho uplatnění ve zdravotnictví .....</b>	<b>255</b>
18.1	Fyzikální princip .....	255
18.1.1	Spontánní emise .....	255
18.1.2	Stimulovaná emise .....	255
18.1.3	Inverzní populace .....	256
18.2	Konstrukce laseru .....	257
18.3	Využití laseru .....	257
18.4	Lasery v medicíně .....	258
<b>19</b>	<b>Magnetická rezonance .....</b>	<b>263</b>
19.1	Princip magnetické rezonance .....	263
19.2	Tvorba a detekce MR signálu .....	266
19.3	MR angiografie .....	267
19.4	Funkční magnetická rezonance (fMR) .....	267
19.5	Přístrojové vybavení .....	268
19.6	Kontrastní látky v magnetické rezonanci .....	269
19.7	Využití magnetické rezonance .....	270
<b>20</b>	<b>Nanotechnologie .....</b>	<b>271</b>
20.1	Farmacie a nanotechnologie .....	271
20.2	Cílená doprava léčiv .....	271

---

20.3	Zobrazovací a diagnostické metody a zařízení .....	273
20.4	Tkáňové inženýrství a buněčná terapie .....	274
20.5	Nanotechnologie a terapie nádorů .....	275
<b>21</b>	<b>Přístrojová technika používaná v diagnostice .....</b>	<b>277</b>
21.1	Diagnostické přístroje .....	277
21.1.1	Diagnostika kardiovaskulárního systému .....	277
21.1.2	Pletysmografie .....	281
21.1.3	Diagnostika mozku .....	282
21.1.4	Diagnostika plic .....	283
21.1.5	Diagnostika oka .....	285
21.1.6	Diagnostika ucha – poruch sluchu .....	288
21.2	Terapeutické přístroje .....	290
21.2.1	Kardiochirurgie a kardiologie .....	290
21.2.2	Neuromuskulární stimulatory .....	292
21.2.3	Magnetoterapie .....	292
21.2.4	Ultrazvuková terapie .....	293
21.2.5	Diatermie .....	294
21.2.6	Onkologie .....	294
21.2.7	Chirurgie .....	296
	<b>Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>299</b>
	<b>Rejstřík .....</b>	<b>301</b>
	<b>Souhrn .....</b>	<b>309</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>311</b>

## Úvod

Vývoj současného 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.

První vydání vysokoškolské učebnice lékařské biofyziky, kterou držíte v rukou, je napsáno především pro studující magisterského programu všeobecné lékařství.

Na základě dlouholetých zkušeností všech autorů byl text nové učebnice rozšířen a připraven tak, aby lépe a detailněji vysvětlil témata, která jsou pro studenty obtížná, a aby podrobněji popsal principy fungování těch přístrojových diagnostických a 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. Rozšířený text vysokoškolské učebnice prohlubuje obecné formulace učiva základních kapitol či zdůrazňuje medicínské aplikace. Pro studující se zájmem o lepší pochopení napsaného textu je součástí každé kapitoly i základní matematický aparát popisovaných fyzikálních dějů.

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

Praha 2022

*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 „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

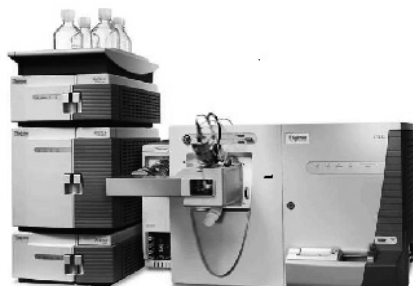
Vzorek je umístěn do přístroje, kde podstoupí odpařování, vzniká vzorek v plynné fázi. Složky vzorku jsou ionizovány, což má za následek vytvoření nabitých částic – iontů. Ionty jsou odděleny podle  $m/Q$  poměru v analyzátoru elektromagnetického pole a jsou detekovány obvykle kvantitativní metodou. 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 (obr. 1.1) 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.



Obr. 1.1 Hmotnostní spektrometr

### Využití hmotnostní spektrometrie v medicíně

Hmotnostní spektrometrii (MS) lze v současné době využívat v klinické praxi k diagnostice chorob, v biomedicínském výzkumu, ve vývoji a výrobě léčiv, v toxikologii, ale i v rámci zlepšování kvality lidského života, například ke kontrole složení a kvality životního prostředí, ale i kvality výrobků, a to především v potravinářském průmyslu, například při identifikaci alergenů v potravinách. Jednou z hlavních příčin alergií, které postihují velkou část populace, jsou alergeny obsažené v potravě. Pomocí MS lze alergeny identifikovat. Dále lze tuto metodu využít k diagnostice řady metabolických onemocnění a k identifikaci infekčních agens. Další rozsáhlou oblastí využití je analýza toxických látek (pesticidů, bakteriálních toxinů, kontaminantů atd.), léčiv a drog v biologických tekutinách, v potravinách a životním prostředí. Výhodou je možnost stanovení až několika set analytů v jednom vzorku. V různých biologických vzorcích, nejčastěji v moči a krvi, lze identifikovat abnormality v profilech metabolitů a malých



molekul, jako jsou organické kyseliny, puriny, pyrimidiny, acylkarnitiny, oligosacharidy a další.

Proteomická MS analýza našla rutinní uplatnění i v mikrobiologii především v rychlé identifikaci bakteriálních kmenů. Po porovnání spekter se spektry již obsaženými v databázi je hmotnostnímu spektru přiřazena identita.

Hmotnostní spektrometrie umožňuje analyzovat bioaktivní peptidy a malé regulační molekuly, a tedy stanovovat látky s velmi nízkými plazmatickými koncentracemi, jako jsou biogenní peptidy a hormony. Z léčiv jsou těmito metodami stanovovány koncentrace antibiotik, antiepileptik, kardiovaskulárních léčiv, analgetik, protinádorových léčiv a dalších. Velký význam má MS při objasňování mechanismu účinku léčiv, při studiu etiologie onemocnění a velmi přispívají k plánování a optimalizaci cílené terapie.

V případě infekčních, kardiovaskulárních a onkologických onemocnění dochází v organismu k významným regulačním a metabolickým změnám, které jsou spojeny se změnou koncentrace vybraných molekul, tzv. biomarkerů, které jsou specifické pro dané onemocnění a jsou významné nejen v diagnostice, ale i ve stanovení prognózy, pro časnou detekci progresu onemocnění, ale rovněž pro hodnocení odpovědi na léčbu. Kvalita a interpretace výsledků hmotnostně spektrometrického měření při analýze biomarkerů je ovlivněna kvalitou odběru a zpracováním vzorku. Pro interpretaci výsledků se využívají metody bioinformatiky.

Hmotnostní spektrometrie je využívána také pro analýzu DNA, různých proteinů a metabolitů, ale i lipidů, glykoproteinů, glykolipidů a sacharidů v souvislosti s analýzou biologických vzorků pro klinickou diagnostiku.

V posledních několika letech se hmotnostní spektrometrie zapojuje do onkologického výzkumu. Zhoubné nádory představují celosvětově rozšířené onemocnění, které každoročně postihne více než 10 milionů lidí. Cílem v klinické praxi je prevence, včasná diagnostika a následně účinná terapie. Je snahou najít specifický biomarker ve vzorku za účelem potvrzení onkologického onemocnění. Nejúčinnější metodou je 2D hmotnostně-spektrometrické zobrazení (mass spectrometry imaging – MSI). Metoda je založena na porovnávání nenádorových (zdravých) a nádorových (patologicky změněných) tělních vzorků. Získané informace jsou významné v diagnostice, ale i v monitorování úspěšnosti protinádorové terapie. Novou MS metodou hmotnostní spektrometrie je DESI (desorpční elektrosprej ionizace), která umožňuje vysoce selektivní analýzu nádorových markerů ve vzorcích intaktní tkáně. Pomocí DESI-MS je možné analyzovat distribuci markerů v histopatologických nálezech a provádět analýzy bez předchozí úpravy vzorku. DESI je kombinací klasické ionizace elektrosprejem a desorpční ionizační techniky, které se v MS běžně využívají. Uplatnění hmotnostní spektrometrie v diagnostice nádorových onemocnění je však v kombinaci s metodami používanými v této oblasti (např. imunohistochemické vyšetření tkáně).

### 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 orbitálu; *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 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**.

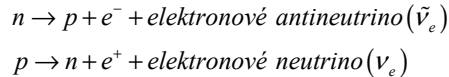
## 1.4 Interakce v přírodě

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



Ke slabým interakcím patří i dvě základní **intermolekulární**, tj. mezimolekulární interakce, a to **van der Waalsovy 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 hmotnosti  $m_1$ ,  $m_2$  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  $\kappa$  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