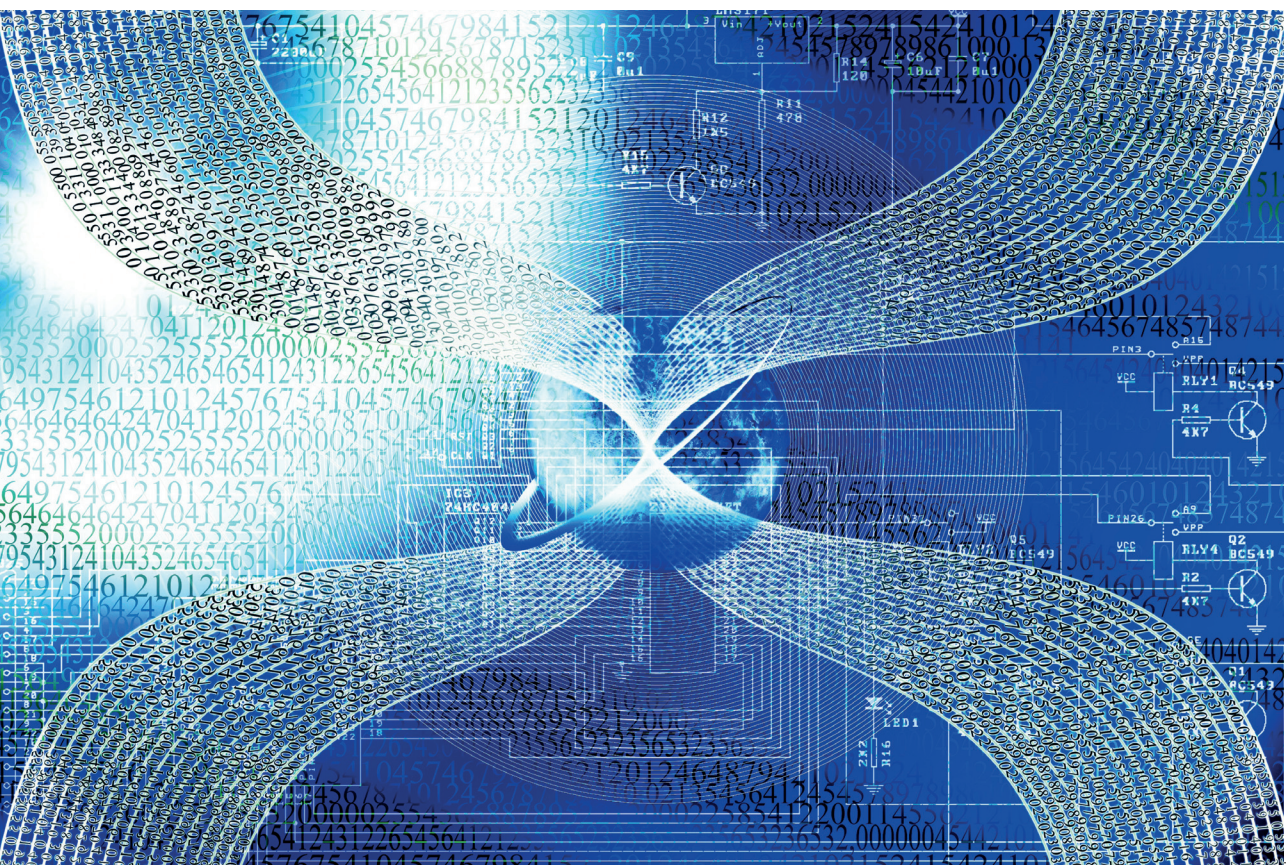


Jozef Rosina, Jana Vránová, Hana Kolářová, Jiří Stanek

Biofyzika

Pro zdravotnické a biomedicínské obory



Jozef Rosina, Jana Vránová, Hana Kolářová, Jiří Stanek

Biofyzika

Pro zdravotnické a biomedicínské obory

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., Ing. Jana Vránová, CSc.,
prof. RNDr. Hana Kolářová, CSc., MUDr. Jiří Stanek, CSc., MSc.**

BIOFYZIKA

Pro zdravotnické a biomedicínské obory

Hlavní autor/editor:

Prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D.

TIRÁŽ TIŠTĚNÉ PUBLIKACE:

Kolektiv autorů:

Prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D. – *Ústav lékařské biofyziky a lékařské informatiky,
3. lékařská fakulta Univerzity Karlovy v Praze a Fakulta biomedicínského inženýrství
Českého vysokého učení technického v Praze*

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*

MUDr. Jiří Stanek, CSc., MSc. – *Ústav lékařské biofyziky a lékařské informatiky, 3. lékařská
fakulta Univerzity Karlovy v Praze*

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

Recenzovali:

Prof. MUDr. Leoš Navrátil, CSc.

Prof. MUDr. Vlastimil Slouka, CSc.

© Grada Publishing, a.s., 2013

Cover Photo © allphoto, 2013

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 5159. publikaci

Odpovědná redaktorka Eva Svobodová

Sazba a zlom Josef Lutka

Obrázky převzaty z publikace J. Rosina, H. Kolářová, J. Stanek: Biofyzika pro studenty
zdravotnických oborů, překreslila MgA. Kateřina Novotná. Praha: Grada Publishing 2006;
obrázky 3, 4, 9, 55 a 56 dle podkladů autorů překreslila Miloslava Krédlová.

Počet stran 224

Vydání první, Praha 2013

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a.s.

ISBN 978-80-247-4237-3

ELEKTRONICKÉ PUBLIKACE:

ISBN 978-80-247-8498-4 (pro formát PDF)

ISBN 978-80-247-8499-1 (pro formát EPUB)

Obsah

Použité zkratky	10
Úvod	11
1 Stavba hmoty, síly v přírodě	13
1.1 Elementární částice hmoty	13
1.2 Atomové jádro	15
1.3 Elektronový obal	16
1.4 Interakce v přírodě	16
1.5 Formy hmoty	17
1.6 Disperzní systém	18
1.7 Transportní jevy	19
1.8 Jevy na rozhraní mezi dvěma fázemi	23
1.9 Pohyb látek	24
Literatura	27
2 Přeměna energie v organismu	28
2.1 Termodynamika	28
2.2 Potřeba energie	29
2.3 Energetická bilance	31
Literatura	32
3 Sedimentace krve	33
3.1 Fyzikální podstata sedimentace krve	33
Literatura	35
4 Odstředivá síla	36
4.1 Využití odstředivé síly ve zdravotnictví	36
Literatura	39
5 Biofyzikální aspekty letecké dopravy	40
5.1 Biofyzikální aspekty letecké dopravy	40
5.2 Biofyzikální aspekty kosmických letů	41
Literatura	44
6 Vnější tlak a organizmus	45
6.1 Působení vnějšího tlaku na organizmus	45
6.2 Vliv podtlaku na organizmus	46
6.3 Vliv přetlaku na organizmus	49
6.4 Otrava kyslíkem	51
Literatura	52

7 Sterilizace	53
7.1 Základní pojmy	53
7.2 Fyzikální postupy sterilizace	53
7.3 Chemické postupy sterilizace	56
7.4 Destilace, termostat, inkubátor	58
Literatura	58
8 Biofyzikální aspekty regulace teploty, využití tepla a chladu	59
8.1 Regulace teploty lidského těla	59
8.2 Měření teploty	64
8.3 Infračervené záření (IR)	67
8.4 Koupele	67
8.5 Lokálně používané tepelné procedury	69
8.6 Chlad	70
8.7 Využití kryoterapie v medicíně	71
8.8 Priessnitzovy obklady	72
Literatura	73
9 Zvuk a audiometrie	74
9.1 Základní pojmy	74
9.2 Veličiny objektivní	74
9.3 Veličiny subjektivní	75
9.4 Audiometrie	78
9.5 Poslech, poklep, pohmat	79
Literatura	80
10 Ultrazvuk (UZ)	81
10.1 Charakteristika a vlastnosti	81
10.2 Výroba ultrazvuku	82
10.3 Účinky ultrazvuku	83
10.4 Obecný princip sonografie	84
10.5 Diagnostický ultrazvuk	86
10.6 Terapeutické užití ultrazvuku	89
Literatura	90
11 Biologické membrány, klidový a akční membránový potenciál	91
11.1 Biologické membrány	91
11.2 Klidový membránový potenciál	91
11.3 Akční membránový potenciál	93
Literatura	94
12 Elektrický proud	95
12.1 Obecná charakteristika	95
12.2 Stejnosměrný a střídavý elektrický proud	97
12.3 Elektrické vlastnosti organismu	98
12.4 Pasivní elektrické vlastnosti tkání	98

12.4.1	Stejnoseměrný proud	99
12.4.2	Nízkofrekvenční střídavý proud	99
12.4.3	Vysokofrekvenční střídavý proud	101
12.5	Účinky elektrického proudu	101
12.5.1	Stejnoseměrný proud	101
12.5.2	Nízkofrekvenční střídavý proud	101
12.5.3	Vysokofrekvenční střídavý proud	101
12.6	Využití elektrického proudu v medicíně	101
12.6.1	Stejnoseměrný proud	101
12.6.2	Nízkofrekvenční střídavý proud	105
12.6.3	Středněfrekvenční střídavý proud	108
12.6.4	Vysokofrekvenční proud a elektromagnetické vlnění	109
12.7	Úrazy elektrickým proudem	111
12.7.1	Zasažení bleskem	112
12.7.2	Sekundární příznaky úrazů elektrickým proudem	112
12.8	Aktivní elektrické vlastnosti vzrušivých tkání	113
12.9	Elektroklima	116
Literatura		116
13	Fyzikální základy dýchání, krevní oběh a krevní tlak	117
13.1	Dýchání	117
13.2	Krevní oběh a krevní tlak	119
13.3	Měření krevního tlaku	126
Literatura		127
14	Optické záření, oko, přístroje a zařízení využívající optické metody	128
14.1	Optické záření	128
14.2	Viditelné optické záření	130
14.3	Teorie barevného vnímání	131
14.4	Fyziologické a psychologické účinky barev, zrakové iluze	131
14.5	Zdravé oko, vady oka a korekce vad	132
14.6	Přístroje a zařízení využívající optické metody	137
14.7	Ultrafialové záření (UV)	143
14.8	Infračervené záření (IR)	146
Literatura		148
15	Biomechanika, deformace pevného tělesa a její význam ve zdravotnictví	149
15.1	Biomechanické funkce kostí, kloubů a šlach	150
15.2	Síla pružnosti, meze	150
15.3	Mechanické vlastnosti chrupavky	153
15.4	Mechanické vlastnosti kloubu	153
15.5	Šlachy a vazy	154
15.6	Mechanické vlastnosti biologických materiálů	154
15.7	Biokompatibilita	154

Literatura	155
16 Ionizující záření	156
16.1 Charakteristika ionizujícího záření	156
16.2 Jednotky v radioaktivitě	158
16.3 Druhy radioaktivní přeměny	158
16.4 Rentgenové záření	160
16.5 Neutrony	161
16.6 Kosmické záření	161
16.7 Biologické účinky ionizujícího záření	162
16.8 Přímý a nepřímý účinek ionizujícího záření	162
16.9 Radiosenzitivita	163
16.10 Ochrana před vnějším ozářením	164
16.11 Stochastické a deterministické účinky ionizujícího záření	165
16.12 Život buňky zasažené radioaktivitou	166
16.13 Akutní nemoc z ozářením	166
16.14 Přístroje pro osobní a ochrannou dozimetrii	167
Literatura	173
17 Využití ionizujícího záření v medicíně	174
17.1 Nukleární medicína – diagnostika pomocí záření γ a pozitronů ...	174
17.2 Radiologie – diagnostika pomocí rentgenového záření	177
17.3 Radioterapie	179
17.3.1 Terapeutické využití rentgenového záření	179
17.3.2 Terapie pomocí záření γ	180
17.3.3 Terapie částicemi	181
17.3.4 Ozařovací plán	182
Literatura	182
18 Laser a jeho uplatnění ve zdravotnictví	183
18.1 Lasery, fyzikální podstata	183
18.2 Využití laseru	185
Literatura	189
19 Nukleární magnetická rezonance	190
19.1 Princip MR	190
19.2 MR angiografie	191
19.3 Funkční magnetická rezonance (fMR)	192
19.4 Využití magnetické rezonance	192
Literatura	193
20 Nanotechnologie	194
20.1 Farmacie a nanotechnologie	194
20.2 Cílená doprava léčiv	194
20.3 Zobrazovací a diagnostické metody a zařízení	195
20.4 Tkáňové inženýrství a buněčná terapie	196

20.5 Nanotechnologie a terapie nádorů	196
Literatura	197
21 Přístrojová technika používaná v medicíně	198
21.1 Diagnostické přístroje	198
21.1.1 Diagnostika srdce	198
21.1.2 Diagnostika mozku	200
21.1.3 Diagnostika cév	201
21.1.4 Pletysmografie	202
21.1.5 Světelná reflexní reografie	202
21.1.6 Diagnostika plic	202
21.1.7 Diagnostika oka a očníce	203
21.1.8 Diagnostika ucha	204
21.1.9 Diagnostika krevního tlaku	204
21.2 Terapeutické přístroje	205
21.2.1 Kardiochirurgie a kardiologie	205
21.2.2 Neurologie, revmatologie, ortopedie, onkologie, chirurgie, dermatologie, stomatologie	207
Literatura	213
Rejstřík	214
Souhrn	223
Summary	224

Použité zkratky

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 Radiotherapy)
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	krevní tlak
UV	ultrafialové záření
V.m.	Valsalvův manévr

Úvod

Vývoj moderního zdravotnictví je úzce spjat s rozvojem 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 studenty bakalářských programů se zájmem o zdravotnickou problematiku.

Jednotlivé kapitoly podávají dostatečný obecný výklad základních mechanismů působení různých fyzikálních dějů. 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, nebo 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.

autoři

1 Stavba hmoty, síly v přírodě

1.1 Elementární částice hmoty

Elementární částice (protony, neutrony, elektrony) jsou stavebními kameny všech atomů (tab. 1). **Atomy** jsou základními stavebními kameny hmoty, jsou to nejmenší částice, na které lze hmotu rozložit chemickou cestou, a 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 je řádově 10^{-15} m) nese odpovědnost za fyzikální vlastnosti látek, je složené z protonů a neutronů. 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 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:

$$A = N + Z.$$

Tab. 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

Přehled všech dosud známých elementárních částic je uveden v tabulce 2.

Podle současné fyziky elementárních částic se protony a neutrony skládají z kvarků, nejmenších dosud známých elementárních částic. Podle současné teorie existuje šest typů **kvarků** (dělíme je podle rostoucí hmotnosti). Prvními objevenými byly kvarky „u“ (up) a „d“ (down). Nesou neceločíselný elektrický náboj, kvark „u“ má náboj $-1/3$, kvark „d“ nese náboj $+2/3$. 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“ ($-1/3-1/3+2/3 = 0$).

Tab. 2 Členění elementárních částic

Částice	Charakteristika
fotony	klidová hmotnost je rovná nule a spinové číslo je rovné jedničce
leptony	(neutrina, elektrony, miony) klidová hmotnost je malá, téměř nulová v případě neutrina, 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

Vzájemné silové působení mezi kvarky je zprostředkováváno hypotetickými částicemi, zvanými **gluony**. 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 jsou fundamentální částice tvořící hadrony. Dnes existuje šest typů kvarků, které se rozlišují tzv. „**vůněmi**“ (flavors). Dle fyzikálních vlastností je lze 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)). Ke každému kvarku existuje odpovídající antikvark. Kvarky mají nanejvýš neobvyklou vlastnost – nesou „**neceločíselný**“ náboj, a to kvarky „u“, „c“ a „t“ $+2/3$ 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 „bezbarevnosti“. 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 nepodařilo 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

Počátkem 20. století existovalo několik modelů atomu, avšak žádný z nich se příliš nepřiblížil skutečnosti. Jádro atomu bylo objeveno v roce 1906 Ernstem Rutherfordem. Po mnoha experimentech své vědecké skupiny vyslovil závěr, že centrální částí atomu je malé jádro, v němž je soustředěna téměř veškerá hmotnost atomu a veškerý kladný náboj.

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 jádro schopné 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 (průměr jádra je řádově 10^{-15} m). Pro určení hmotnosti jader můžeme užít **hmotnostní spektrometrii**. 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 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

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.

Uspořádání elektronů se 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.

Charakteristika každého elektronu nacházejícího se v elektronovém obalu je jednoznačně určena **čtyřmi kvantovými čísly** (*hlavní* popisuje energetickou hladinu, na které se elektron nachází; *vedlejší* určuje tvar atomového orbitalu; *magnetické* určuje orientaci jednotlivých orbitalů v prostoru; *spinové* popisuje tzv. vnitřní moment hybnosti elektronu). Z hlediska kvantové fyziky existuje omezení pro počet elektronů v určitém stacionárním stavu, je to tzv. **Pauliho vylučovací princip**. Toto omezující pravidlo říká, že dva elektrony se nemohou nacházet ve stejném kvantovém stavu, ve kterém by měly všechna čtyři kvantová čísla stejná, tj., musí se lišit hodnotou alespoň jednoho kvantového čísla. Pauliho princip vede k tomu, že orbital může být obsazen nejvíce dvěma elektrony, a je-li obsazen dvěma, pak musí tyto elektrony 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 posléze elektron na hladinu s nižší energií, dochází k **deexcitaci** elektronu. Při tomto přechodu musí dojít k vyzáření absorbované energie ve formě fotonů elektromagnetického vlnění různých vlnových délek.

Pokud absorbuje atom tolik energie, že dojde k uvolnění elektronu z elektronového obalu, vznikne z atomu původně elektricky neutrálního kladně nabitá částice – kationt.

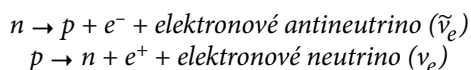
1.4 Interakce v přírodě

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

Silná interakce představuje základní interakci mezi částicemi jádra. 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**, které jsou nositeli silového působení mezi kvarky (viz níže). Dosah působení silné interakce je však velice krátký (řádově 10^{-15} m), to znamená, 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 elektron (a proton), nebo jaderného protonu v pozitron (a neutron) za účasti neutrina a antineutrina. Má také velmi malý dosah, řádově 10^{-18} m. Je druhou nejslabší interakcí. Slabá interakce je přenášena **bosony** W a Z. Přeměnu beta (β^- ; β^+) můžeme vyjádřit následujícím vztahy:



Elektromagnetická interakce působí mezi elektricky nabitými částicemi jádra a obalu. Její dosah je teoreticky nekonečně velký. 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 **foton**. Fotonům v různých procesech (tj. při různých energiích) se říká například záření gama, rentgenové záření, světlo, mikrovlny, radiové vlny apod.

Gravitační interakce je ze všech typů interakcí mezi částicemi nejslabší, ale působí na ohromné vzdálenosti, na všechny částice ve vesmíru. Projevuje se především u těles velké hmotnosti a její silové působení je popsáno Newtonovým gravitačním zákonem. Ze všech interakcí je nejznámější (není známa žádná částice ani jakékoliv hmotné těleso, které by nepodléhalo gravitační interakci). Nositelem gravitační síly jsou zatím pouze hypotetické **gravitony**.

Mezi silovými účinky čtyř základních interakcí je obrovský nepoměr, který je závislý na vzájemné vzdálenosti interagujících objektů. Relativní poměr silového působení silné, slabé, elektromagnetické a gravitační interakce při vzdálenosti odpovídající atomovému jádru, tj. 10^{-15} m, můžeme číselně vyjádřit následovně $1 : 10^{-3} : 10^{-15} : 10^{-40}$.

1.5 Formy hmoty

Hmota je základem všeho, co nás obklopuje. Hmota se vyskytuje ve dvou základních formách: jako látka, která je tvořena z diskretních částic s nenulovou klidovou hmotností, anebo jako pole (záření). Obě formy hmoty se mohou vzájemně proměňovat a navíc lze částice látky chápat jako projevy polí, nebo naopak pole identifikovat v podobě částic. Základní vlastností hmoty je její objektivní existence a pohyb v prostoru a čase.

Pojem záření zahrnuje běžné jevy kolem nás: např. gravitační pole Země, magnetické pole, teplo, světlo, zvuk aj. Nejlépe prozkoumané je zřejmě pole elektromagnetické (jeho elementární kvanta – fotony – mají nulovou klidovou hmotnost, spinové číslo rovné jedničce a pohybují se konstantní rychlostí rovnou rychlosti světla ve vakuu).

Mezi stavební částice **látky** řadíme fyzikální objekty malých rozměrů, např. elektrony, protony a neutrony, atomy a molekuly. Každý ví, že látka se v prostředí naší Země může vyskytovat v různých skupenstvích (pevném, kapalném, plynném a plaz-

matickém). Látka v pevném skupenství si za daného tlaku a teploty zachovává objem i tvar; kapalina si zachovává pouze objem a plyn přijímá tvar i objem své nádoby. Plazmatický stav vznikající zahříváním plynu se v určitých směrech podobá plynnému skupenství. Látky jsou charakterizovány hmotností, elektrickým nábojem, rozměrem, tvarem, složením, vzájemným působením a při kvantovém popisu též kvantovými čísly.

Látky obecně dělíme do dvou skupin:

1. **krystalické látky** (charakteristické pravidelným uspořádáním atomů, molekul nebo iontů, z nichž jsou složeny; patří sem např. NaCl, diamant, kovy...), amorfní látky (periodické uspořádání částic je omezeno na vzdálenost do zhruba 10^{-8} m, na větších vzdálenostech je pravidelnost uspořádání porušena; patří sem sklo, pryskyřice, vosk, asfalt, pasty...), kapalně krystaly – tato skupina představuje oblast fyziky kondenzovaných soustav (kapalný krystal je stav hmoty, jehož vlastnosti jsou přechodem mezi kapalným a pevným skupenstvím, mohou téci jako kapalina, ale zároveň mají uspořádané a orientované molekuly jako krystal);

2. **tekutiny** – kapaliny, plyny, plazma.

1.6 Disperzní systém

Disperzní systém je soustava látek, která obsahuje alespoň dvě složky nazývané fáze (chemická individua), přičemž jedna složka (disperzní podíl) je rozptýlena ve druhé složce (disperzním prostředí). Disperzním systémem je například krev, která obsahuje složku korpuskulární (krvinky) a složku tekutou (plazma), mlha je zase disperze vodních kapének (disperzní podíl je tekutá složka) ve vzduchu (disperzní prostředí je plyn).

Obsahuje-li systém dvě složky a existuje-li určitá hranice mezi částicemi tvořícími obě složky, nazývá se takový systém **heterogenní**. Obsahuje-li naopak dvě složky a složka tvořící disperzní podíl je rozptýlena ve složce tvořící disperzní prostředí v tak drobných částicích (atomech, molekulách), že nelze mluvit o rozhraní, nazývá se takový systém **homogenní**.

Suspenzí rozumíme hrubou disperzi tuhých látek v kapalném disperzním prostředí. Jejich koncentrovaným formám říkáme pasty. Emulze je disperzní systém sestávající ze dvou nemísitelných kapalin, z nichž jedna je ve formě kapiček rozptýlena ve druhé. Označení aerosol se používá pro hrubé (velikost rozptýlených částic $1\text{ }\mu\text{m}$ až 1 mm) nebo koloidní disperze (velikost rozptýlených částic 1 nm až $1\text{ }\mu\text{m}$) tuhých látek či kapalin v plynném disperzním prostředí (tab. 3). Ke vzniku emulzí dochází například v tenkém střevě člověka. Potravou přijaté tuky, které jsou ve vodě nerozpustné, jsou emulgovány dříve, než jsou napadány lipázami. Funkci emulgátorů vykonávají soli žlučových kyselin. Účinek emulgátorů spočívá ve tvorbě adsorpčního filmu na povrchu kapek disperzní fáze, přičemž se částice emulgátorů orientují tak, že svou hydrofobní částí míří do nepolární složky a lyofilním zbytkem do fáze polární. Suspenze, emulze a aerosoly jsou častou formou léčebných, dezinfekčních a kosmetických preparátů. Naopak, soustavné vdechování aerosolů obsahujících křemičitany způsobuje chorobu z povolání – silikózu plic. Zdravotní nebezpečí představuje též možnost vzniku aerosolů radioaktivních izotopů, které způsobí zamoření ovzduší

a případnou kontaminaci osob vdechováním a po usazení i zamoření povrchu předmětů.

Tab. 3 Rozdělení disperzních systémů

Disperzní prostředí	Disperzní podíl	Disperze hrubé velikost částic 1 μm až 1 mm	Disperze koloidní velikost částic 1 nm až 1 μm	Disperze analytické velikost částic do 1 nm
plyn	plyn	není	není	směsi plynů
	kapalina	děšť, mlha, aerosoly	aerosoly	páry kapaliny v plynu
	pevná látka	kouř, dým, aerosoly	aerosoly	páry tuhé látky v plynu
kapalina	plyn	bubliny, pěny	pěny	roztoky plynů v kapalinách
	kapalina	emulze (např. mléko)	lyosoly	směsi kapalin
	pevná látka	suspenze	lyosoly, koloidní roztoky	pravé roztoky (glukóza ve vodě)
pevná látka	plyn	bubliny plynů v pevných látkách	tuhé pěny	plyny rozpustěné v pevných látkách
	kapalina	pevné látky s uzavřenými kapičkami	tuhé pěny	krystalická voda
	pevná látka	tuhé směsi	tuhé soli	tuhé roztoky

1.7 Transportní jevy

Transportní jevy jsou děje, které probíhají v důsledku pohybu disperzí a při nichž dochází k transportu látek. Mezi tyto jevy patří:

Viskozita

Viskozitou se rozumí **vnitřní tření** (vznikající vzájemným silovým působením částic) – vznik brzdících sil bránících relativnímu pohybu vrstev proudící tekutiny. Na stykové ploše dvou vrstev tekutiny pohybujících se různou rychlostí se projevuje viskozita tečným napětím, jímž se snaží rychlejší vrstva urychlovat pomalejší a pomalejší naopak zpomalovat vrstvu rychlejší. Toto tečné napětí je úměrné přírůstku rychlosti dv tekutiny mezi dvěma přiléhajícími vrstvami a nepřímo úměrné vzdálenosti dx těchto vrstev. Pro tečné napětí platí následující vztah:

$$\tau = \eta \frac{\Delta v}{\Delta x} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}],$$

kde konstanta úměrnosti η se nazývá **dynamická viskozita**. Vyjadřuje sílu v Newtonech (N), která je zapotřebí, aby se vrstva o ploše 1 m^2 posunula oproti vrstvě se stejnou plochou vzdálenou 1 m od ní o 1 m ve vodorovné rovině. Úpravou předchozího vztahu pro dynamickou viskozitu dostáváme vztah:

$$\eta = \tau = \frac{\Delta x}{\Delta v} [\text{Pa} \cdot \text{s}].$$

Dynamická viskozita charakterizuje vnitřní tření kapaliny a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mezi částicemi mají větší viskozitu, větší viskozita zpomaluje pohyb kapaliny nebo těles v kapalině. Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Převrácená hodnota viskozity se nazývá tekutost.

Viskozita je jednou z nejdůležitějších vlastností, která ovlivňuje vlastnosti proudění látek. Kapalina s větším vnitřním třením teče pomaleji. Větší viskozita znamená totiž větší brzdění pohybu kapaliny nebo pohybu těles v kapalině. Rychlost pohybu molekul proudící kapaliny závisí na teplotě, s rostoucí teplotou viskozita klesá a kapalina se pohybuje rychleji. Praktický význam v medicíně má viskozita krve. Její hodnota je ovlivněna hlavně teplotou.

Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké). Viskozita tělesných tekutin se většinou udává v relativních jednotkách, kdy 1 = viskozita vody. Viskozita plazmy je 2 (2krát vyšší než viskozita vody), viskozita krve je vzhledem k obsahu krvinek vyšší než u plazmy a její průměrná hodnota je kolem 4 . Viskozita krve se zvyšuje při vyšším hematokritu nebo při poklesu rychlosti proudící krve. Z toho důvodu je viskozita krve v kapilárách vyšší než v arteriích (nižší rychlost proudění krve v kapilárách).

Příklad: Při teplotě 37°C se viskozita udává v rozmezí $3,0\text{--}3,6 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, pro plazmu je to $1,8\text{--}2,0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$. Hodnoty viskozity krve je třeba sledovat například při podávání většího množství erytrocytů (tzv. erymasy) nebo při patologickém zmnožení červených krvinek – polycytemia vera.

Difuze

Difuzi definujeme jako tepelný pohyb částic (disperzního podílu) jedné látky do druhé. Pohyb je vyvolaný koncentračním spádem (gradientem) a řídí se snahou o úplné vyrovnání koncentrace v celém objemu. Molekuly rozpuštěné látky putují z míst větší koncentrace do míst s nižší koncentrací a jev trvá do té doby, než se koncentrace disperzního podílu v celém objemu vyrovnají. Difuze je jedním z nejdůležitějších fyzikálních dějů, které umožňují pohyb látek uvnitř a vně buněk. Průběh difuze je výrazně ovlivněn teplotou látky. Jelikož při vyšší teplotě proces difuze probíhá rychleji, lze z toho usuzovat, že rychlost pohybu částic se zvyšuje s teplotou.

Chemickou podstatou difuze podle druhého termodynamického zákona je, že chemický systém vždy zvyšuje svou entropii neboli míru neuspořádanosti svého systému, čímž dospěje do stavu s nejnižší vnitřní energií.

Matematicky popisují difuzi **Fickovy zákony**. **1. Fickův zákon** říká, že hustota difuzního toku j je úměrná záporně vzatému gradientu koncentrace:

$$j = -D \cdot \text{grad } c.$$

Konstantou úměrnosti v této rovnici je tzv. difuzní koeficient D vyjadřující počet molů látky, které za čas 1 s projdou průřezem 1 m^2 při koncentračním gradientu 1 mol/m . Příčinou toku látky jsou rozdíly v její koncentraci. Znaménko minus vyjadřuje, že difuzní tok směřuje proti koncentračnímu gradientu. Uvedený zákon se často zjednodušeně zapisuje pro jednorozměrný případ jako:

$$j = -D \frac{\Delta c}{\Delta x},$$

kde Δc je rozdíl molárních koncentrací na dvou blízkých místech, vzdálených od sebe Δx ; jednotkou koncentračního gradientu je mol/m .

Dialýza

Dialýza je difuze malých molekul a iontů z krve přes dialyzační membránu do dialyzačního roztoku, tj. z prostředí s vyšší koncentrací do prostředí s koncentrací nižší. V medicíně se jedná o proces, který nahrazuje přirozenou funkci ledvin u pacientů s ledvinovou nedostatečností nebo ledvinovým selháním. **Dialýzou** jsou z těla odstraněny odpady metabolismu, zejména močovina a některé ionty (např. draslíku) a také přebytečná voda, které jsou u zdravého člověka odstraňovány pomocí ledvin do moči. Tento proces je život zachraňující výkon, bez něhož by člověk s nefunkčními ledvinami zemřel. Známe dvě formy dialýzy. **Hemodialýza** je proces, při němž je krev pacienta vyčištěna pomocí speciálního přístroje (tzv. umělá ledvina). Tento proces se opakuje obvykle 3krát týdně a trvá obvykle 4–6 hodin. Druhým typem dialýzy je **peritoneální dialýza**, kdy se krev čistí uvnitř těla pacienta pomocí pobřišnice (peritonea). Do těla se přitom 4–5krát denně přivádí speciální roztok, který provádí čištění krve (starý roztok se přitom vždy nahradí novým).

Jako dialyzační membrány se dnes používají hlavně umělé membrány, např. z celofánu, esterů glukózy nebo z některého moderního plastu (např. Cuprophan), které mohou stimulovat imunitní systém pacienta – proto počet dialýz může zvyšovat riziko rejekce transplantátu v budoucnu. Membrána může být v dialyzátoru uspořádána buď ve formě listů, nebo velkého množství tenkých trubiček – cílem samozřejmě je, aby účinná plocha byla co největší. Po jedné straně membrány krev protéká prouděním laminárním, při kterém se eryocyty hromadí v ose toku (v centrální části), a membrána je tak více omývána plazmou. Objemový průtok je asi 200–300 ml/min. Na opačné straně membrány protéká dialyzační roztok turbulentním prouděním v protisměru, objemový průtok je asi 500 ml/min. Tímto způsobem dosáhneme potřebného koncentračního spádu, a tím i rychlé difuze toxických odpadů metabolismu a některých iontů z krve nemocného do dialyzátu. Látky, které se při dialýze nesmí z těla odstranit, musejí být přítomny i v dialyzačním roztoku. Všechny tyto látky však do roztoku přidat nelze (například vitaminy a aminokyseliny), a tak je pacient musí nahrazovat klasickou cestou – v potravě (během dialýzy se doporučuje jíst), popřípa-

dě v tabletách. Dialyzační roztok naopak nesmí obsahovat jiné cizorodé látky, které by přešly opačně do krve. Proto se k míchání roztoku používá absolutně čistá voda.

K rychlému čištění nebo zahušťování (odstraňování rozpouštědla) lze místo dialýzy použít **ultrafiltraci**. Jde v podstatě o filtraci membránou, která nepropouští koloidy, urychlenou podtlakem pod membránou nebo přetlakem nad membránou. Použitím různých membrán o známé propustnosti lze disperzní systém rozdělit na frakce podle velikosti částic, případně i odhadnout velikost částic. Hemofiltrace na rozdíl od dialýzy využívá konvektivní transport solutů (transport založený na proudění rozpuštěných látek) během ultrafiltrace přes dialyzační membránu. Konvektivní pohyb solutů závisí na filtračním tlaku rozpuštěných látek a vody na speciální hemofiltrační membráně.

Typy dialýzy

- Akutní hemodialýza

Akutní dialýza se používá u náhlých stavů, kde tělo pacienta není samo schopno očistit se od endogenních nebo exogenních toxických látek, objemu tekutiny nebo iontů. Mezi obecně platné principy akutní dialýzy patří především zvažování, jestli není možné zvládnout některé tyto stavy (iontové rozvraty, poruchy vnitřního prostředí) konzervativní terapií, protože dialýza je metoda, která zatěžuje organismus (kardiovaskulární, imunitní systém).

- Chronická hemodialýza

Chronická hemodialýza se používá u pacientů, u kterých přes chronickou insuficienci ledvin došlo k renálnímu selhání, tudíž ke stavu, kdy ani při dodržení bazálních podmínek není jejich tělo schopno zbavit se přebytečných metabolitů, objemu tekutin a korigovat vnitřní prostředí (pH, ionty). Pacienti docházejí na dialýzu obvykle 3krát týdně, dialyzují se 4–6 hodin. Tato léčba je doživotní nebo přetrvává do transplantace ledviny. Fyzikální princip akutní i chronické dialýzy je stejný, rozdíl je v indikaci.

- Peritoneální dialýza

Tato metoda využívá velkou difuzní a filtrační plochu peritonea. Tekutina se do břicha dostává peritoneálním katétre, který je do břišní dutiny zaveden nastálo přes břišní stěnu pod úroveň pupku. Pacient může dialyzační roztok napouštět a vypouštět do břišní dutiny sám, a to i několikrát denně (až 4krát), nebo jednou denně (obvykle v noci). Tekutina je v peritoneální dutině ponechána obvykle 6 hodin. Použitý a znečištěný dialyzační roztok se vypouští ven a místo něj se napouští nový a čistý dialyzát (pokud pacient dialyzuje vícekrát denně).

Osmóza

Mezi živými tkáněmi existují polopropustné (semipermeabilní) membrány, které propouštějí pouze molekuly rozpouštědla (disperzního prostředí – nejčastěji vody), nepropouštějí však molekuly látek, které jsou ve vodě rozpuštěné (disperzní podíl). Snaha po vyrovnání koncentrací roztoku na obou stranách membrány se tak může realizovat pouze průnikem rozpouštědla z roztoku s nižší koncentrací do roztoku s vyšší koncentrací rozpuštěných látek. To vede ke zředování více koncentrovaného roztoku. Koncentrované látky si rozpouštědlo přitáhnou jakoby k sobě, a to **osmotickou silou**, která je schopná např. překonat gravitační sílu. Tomuto samovolnému zředování říkáme **osmóza**.

Roztok o nižším osmotickém tlaku se nazývá **hypotonický**, o vyšším osmotickém tlaku **hypertonický**. Rozpouštědlo proudí vždy z roztoku hypotonického do hypertotonického. Roztoky o stejném osmotickém tlaku se nazývají izotonické nebo izoosmo-