

učební texty Univerzity Karlovy

Jiří Beneš
Daniel Jirák
František Vitek

ZÁKLADY LÉKAŘSKÉ FYZIKY

Základy lékařské fyziky

Jiří Beneš
Daniel Jirák
František Vítek

Recenzovali:

Ing. Milan Hájek, DrSc., Institut klinické a experimentální medicíny, Praha
doc. RNDr. Otakar Jelinek, CSc., Univerzita Karlova, 1. lékařská fakulta,
Ústav biofyziky a informatiky

Autoři:

prof. MUDr. RNDr. Jiří Beneš, CSc., Ústav biofyziky a informatiky 1. lékařské
fakulty Univerzity Karlovy
doc. Ing. Daniel Jirák, Ph.D., Ústav biofyziky a informatiky 1. lékařské
fakulty Univerzity Karlovy; Institut klinické a experimentální medicíny
prof. RNDr. František Vítek, DrSc., Ústav biofyziky a informatiky 1. lékařské
fakulty Univerzity Karlovy

Autoři uvítají jakékoli připomínky či náměty na adrese

daniel.jirak@lf1.cuni.cz nebo

daniel.jirak@ikem.cz

Vydala Univerzita Karlova
Nakladatelství Karolinum
Redakce Jana Jindrová
Sazba a zlom Studio Lacerta (www.sazba.cz)
První dotisk čtvrtého vydání

© Univerzita Karlova, 2015

© Jiří Beneš, Daniel Jirák, František Vítek, 2015

ISBN 978-80-246-2645-1

ISBN 978-80-246-2671-0 (online : pdf)



Univerzita Karlova
Nakladatelství Karolinum 2018

www.karolinum.cz
ebooks@karolinum.cz

OBSAH

1. STAVBA HMOTY	11
1.1 Elementární částice, formy hmoty	11
1.2 Energie	15
1.3 Kvantové jevy	16
1.3.1 Kvantová čísla	18
1.4 Atom vodíku	21
1.4.1 Spektrum atomu vodíku	23
1.5 Struktura elektronového obalu těžších atomů	24
1.6 Excitace, emise a ionizace, vazebná energie elektronu	25
1.7 Vlnově mechanický model atomu	27
1.8 Jádro atomu	28
1.8.1 Vazebná energie jadra	29
1.8.2 Magnetické vlastnosti jader	31
1.9 Síly působící mezi atomy	32
1.9.1 Iontová vazba	33
1.9.2 Kovalentní vazba	33
1.10 Hmotnostní spektrometrie	35
2. MOLEKULÁRNÍ BIOFYZIKA	38
2.1 Náplň molekulární biofyziky	38
2.2 Síly působící mezi molekulami	39
2.3 Skupenské stavy hmoty	39
2.3.1 Plyny	40
2.3.2 Kapaliny	43
2.3.3 Tuhé látky	43
2.3.4 Skupenství plazmatické	44
2.3.5 Změny skupenství	45
2.4 Disperzní systémy	46
2.4.1 Gibbsův zákon fází	46
2.4.2 Klasifikace disperzních systémů	48
2.4.3 Analytické disperze	49
2.4.4 Koloidní disperze	52
2.5 Voda jako rozpouštědlo	61
2.5.1 Polární chování vody	61
2.5.2 Ostatní fyzikální vlastnosti vody	62
2.5.3 Těžká voda	63
2.5.4 Voda v organismu	63
2.6 Transportní jevy	64
2.6.1 Viskozita	64

2.6.2	Difuze	67
2.6.3	Vedení tepla	68
2.7	Koligativní vlastnosti roztoků	68
2.7.1	Snížení tenze par	69
2.7.2	Zvýšení bodu varu – ebulioskopie	70
2.7.3	Snížení bodu tuhnutí – kryoskopie	70
2.7.4	Osmotický tlak	70
2.8	Jevy na rozhraní fází	72
2.8.1	Povrchové napětí	73
2.8.2	Adsorpce	73
3.	BIOENERGETIKA A TERMODYNAMIKA V LÉKAŘSTVÍ	74
3.1	Základní pojmy a definice	74
3.1.1	Základní termodynamické pojmy	75
3.1.2	Práce a teplo	77
3.1.3	Stavové funkce	77
3.1.4	Chemický potenciál	82
3.1.5	Měrná tepelná kapacita	83
3.2	Termodynamika živých systémů	84
3.3	Transformace a akumulace energie v živých systémech	86
3.3.1	Tepelné ztráty	87
3.4	Význam termodynamiky pro transport membránami	88
3.4.1	Prostá difuze	88
3.4.2	Elektrodifuze iontů	88
3.4.3	Přestup iontovými kanály	89
3.4.4	Pasivní zprostředkovaný transport	89
3.4.5	Aktivní transport	89
3.4.6	Skupinový přenos	91
3.4.7	Endocytóza a exocytóza	91
3.5	Léčebné užití tepla	92
3.6	Měření a regulace teploty	92
3.6.1	Kapalinové teploměry	93
3.6.2	Regulace teploty	94
3.7	Tepelná zařízení	95
3.7.1	Termostaty	95
3.7.2	Sterilizátory a autoklávy	95
3.7.3	Vodní lázně	95
3.7.4	Temperované operační stoly	96
3.7.5	Chladicí zařízení	96
4.	BIOFYZIKA ELEKTRICKÝCH PROJEVŮ A ÚČINKŮ, ELEKTRICKÉ METODY	97
4.1	Základní pojmy a definice	97
4.1.1	Coulombův zákon, permitivita látek a hydratace	98
4.1.2	Elektrický potenciál, potenciály na fázovém rozhraní	99
4.2	Elektrické projevy v živém organismu	101
4.2.1	Klidový membránový potenciál buňky	102
4.2.2	Akční potenciál nervového vlákna	103
4.2.3	Potenciály na ostatních biologických membránách	106
4.3	Použití elektřiny v lékařské diagnostice	109
4.3.1	Elektrokardiografie	110
4.3.2	Ostatní metody	113
4.4	Elektrický proud	113
4.4.1	Vedení proudu v organismu	114
4.4.2	Účinky různých druhů proudu na organismus	116

4.5	Využití elektřiny v terapii	118
4.5.1	Galvanoterapie	118
4.5.2	Elektroléčba střídavými a přerušovanými proudy	118
4.5.3	Elektrostimulace	118
4.5.4	Defibrilace	119
4.5.5	Vysokofrekvenční terapie	119
4.5.6	Elektrochirurgie	120
4.6	Měření elektrických veličin	121
4.6.1	Měření elektrického napětí	121
4.6.2	Měření elektrického proudu	123
4.6.3	Měření elektrického odporu	124
4.6.4	Osciloskop	126
4.7	Elektrické fyzikálně-chemické metody, definice pH	127
4.7.1	Potenciometrie	127
4.7.2	Konduktometrie	131
5.	BIOMECHANIKA	133
5.1	Mechanické vlastnosti tkání	133
5.1.1	Deformace kostí	134
5.1.2	Deformace měkkých tkání	134
5.2	Biofyzika svalů	136
5.3	Mechanická práce srdce	137
5.4	Biofyzika krevního oběhu	138
5.5	Krevní tlak a jeho měření	145
5.6	Biofyzika dýchání	146
6.	BIOAKUSTIKA	150
6.1	Základní pojmy a veličiny	150
6.2	Dopplerův jev	156
6.3	Vztah mezi podnětem a počítkem	157
6.4	Sluchové pole	158
6.5	Spektrum zvuku	161
6.6	Biofyzika slyšení	163
6.7	Teorie slyšení	165
6.8	Bioelektrické projevy vnitřního ucha	165
6.9	Akustika hlasu a řeči	167
6.10	Výšetření sluchu	167
6.11	Ultrazvuk	169
6.11.1	Fyzikální vlastnosti ultrazvukových vln	171
6.11.2	Účinky ultrazvuku	173
6.11.3	Terapeutické využití ultrazvuku	174
6.11.4	Využití akustické energie rázové vlny v terapii	175
7.	FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY POUŽITÍ OPTIKY V LÉKAŘSTVÍ	177
7.1	Světlo	177
7.1.1	Záření látek	179
7.1.2	Zdroje světla	181
7.1.3	Fotometrie	185
7.2	Interakce světla s prostředím	187
7.2.1	Fermatův princip	187
7.2.2	Disperze světla	188
7.2.3	Rozptyl světla	190
7.2.4	Absorpce světla	192
7.2.5	Polarizace světla	193

7.3	Vlnová optika	195
7.3.1	Interference světla	195
7.3.2	Ohyb světla	196
7.4	Optické zobrazování	198
7.4.1	Zobrazení odrazem	198
7.4.2	Zobrazení lomem	199
7.5	Optické přístroje a metody	201
7.5.1	Lupa	201
7.5.2	Optický mikroskop	201
7.5.3	Elektronový mikroskop	204
7.5.4	Endoskopie a klinické využití	205
7.5.5	Absorpční fotometrie	207
7.5.6	Spektrální fotometrie	208
7.5.7	Spektrální analýza	208
7.5.8	Refraktometrie	209
7.5.9	Polarimetrie	209
7.6	Účinek různých druhů světla na organismus	210
7.6.1	Infračervené záření	210
7.6.2	Viditelné světlo	211
7.6.3	Ultrafialové záření	211
7.7	Optika lidského oka	212
7.7.1	Hlavní optické části oka	212
7.7.2	Zraková ostrost	213
7.8	Biofyzika vidění	214
7.8.1	Struktura sítnice	215
7.8.2	Citlivost a adaptace oka	217
7.8.3	Biofyzika čípků	218
7.9	Refrakční vady oka	218
7.9.1	Sférická ametropie	219
7.9.2	Astigmatismus (ametropie asférická)	220
7.9.3	Akomodace oka	221
7.10	Korekce očních vad	221
8.	FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY POUŽITÍ RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ V LÉKAŘSTVÍ	223
8.1	Charakteristika rentgenového záření	223
8.1.1	Brzdné rentgenové záření	224
8.1.2	Charakteristické rentgenové záření	226
8.1.3	Rentgenový přístroj	227
8.1.4	Absorpce rentgenového záření	230
8.2	Použití rentgenového záření v medicíně	232
8.3	Ochrana před rentgenovým zářením	235
9.	RADIOAKTIVITA A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	237
9.1	Přírozená a umělá radioaktivita	238
9.1.1	Radioaktivní rozpad	238
9.1.2	Radioaktivní rovnováha	241
9.1.3	Radioaktivní řady	244
9.1.4	Druhy radioaktivního rozpadu	244
9.2	Zdroje ionizujícího záření	252
9.2.1	Kladně nabitě částice	252
9.2.2	Záporně nabitě částice – elektrony	255
9.2.3	Neutrony	256
9.2.4	Fotony záření γ	257
9.3	Interakce záření s hmotou	257
9.3.1	Interakce záření α	258

9.3.2	Interakce záření β	259
9.3.3	Interakce záření γ	260
9.3.4	Interakce neutronů	265
9.4	Detekce ionizujícího záření	266
9.4.1	Ionizační komory	267
9.4.2	Geigerovy–Müllerovy počítače	269
9.4.3	Scintilační počítače	270
9.4.4	Měření aktivity <i>in vitro</i>	272
9.4.5	Měření aktivity <i>in vivo</i>	273
9.5	Základní dozimetrické veličiny	275
9.5.1	Osobní dozimetrie	277
10.	ZÁKLADNÍ ZOBRAZOVACÍ METODY V MEDICÍNĚ	279
10.1	Použití rentgenového záření v zobrazování	279
10.1.1	Kontrast v rentgenových snímcích	281
10.1.2	Rentgen a výpočetní tomografie	284
10.2	Ultrazvukové zobrazování	294
10.2.1	Generování mechanického vlnění	294
10.2.2	Diagnostický ultrazvuk	295
10.2.3	Ultrazvukový obraz	296
10.2.4	Části ultrazvukového přístroje	298
10.3	Zobrazování magnetickou rezonancí	299
10.3.1	Princip magnetické rezonance	299
10.3.2	Jev magnetické rezonance	301
10.3.3	Relaxační procesy	304
10.3.4	Konstrukce MR obrazu	309
10.3.5	MR zobrazovací sekvence	311
10.3.6	Části MR tomografu	312
10.4	Zobrazovací metody v nukleární medicíně	312
10.4.1	Radionuklidy	313
10.4.2	Gama-kamera	313
10.4.3	Scintigrafie	314
10.4.4	Jednofotonová emisní tomografie	314
10.4.5	Pozitronová emisní tomografie	315
	PŘÍLOHA	319
	LITERATURA	323
	SUMMARY	325

1. STAVBA HMOTY

Studium elementárních částic a jejich chování nám umožňuje pochopit řadu jevů, které využíváme v moderní medicíně. Díky znalostem atomové a jaderné fyziky můžeme využívat některé částice, jako jsou například pozitrony, pro diagnostické nebo terapeutické účely. Některé jevy lze dobře vysvětlit pouze pomocí kvantové fyziky, proto se v této úvodní kapitole musíme zmínit také o této tolik zajímavé části fyziky i za cenu jejího výrazného zjednodušení.

Při studiu atomů se budeme věnovat zejména atomu vodíku. Podle odhadů jádra atomů vodíku tvoří více než 90 % všech atomů ve vesmíru. Elementární vodík se na Zemi vyskytuje jen vzácně, je ale přítomen ve všech organických sloučeninách. Sloučeniny tvořené jednotlivými atomy vznikají na základě působení různých chemických vazeb. Proto se chemickými vazbami budeme zabývat v závěru této kapitoly.

1.1 ELEMENTÁRNÍ ČÁSTICE, FORMY HMOTY

Hmota tvoří náš vesmír, je to látka, ze které jsou složeny veškeré objekty. Jednotlivé objekty sestávají ze základních stavebních prvků, které nelze dále chemicky dělit. Nejmenší částicí prvku, zachovávající si všechny jeho chemické vlastnosti, je atom. Atom má vnitřní strukturu; je tvořeno jádrem (o průměru řádově 10^{-15} m) a obalem (o průměru řádově 10^{-10} m). Jádro, ve kterém je soustředěna takřka celá hmotnost atomu, je tvořeno **nukleony**, což jsou kladně nabitě **protony** a elektricky neutrální **neutrony**. Nukleony se dále skládají z **kvarků**, které nemají vnitřní strukturu a patří tak mezi nejmenší známé částice. Existují tři způsoby vzniku (generace) kvarků; rozlišujeme je podle vlastností, kterým se říká vůně. V každé generaci jsou podle této vlastnosti dva kvarky: v první generaci jsou označovány **u** (up) a **d** (down), kvarky druhé generace jsou **c** (charm) a **s** (strangeness) a ve třetí generaci jsou to kvarky **b** (bottom) a **t** (top). Proton je složen z kvarků **uud**, neutron je složen z kvarků **udd**. Obal atomu je tvořen záporně nabitými **elektrony**, které se vyskytují kolem jádra pouze po určitých dráhách, tzv. orbitalech, daných elektronovou konfigurací. Tyto jednotlivé energetické hladiny vznikají jako důsledek potenciální energie elektronů v přítomnosti atomového jádra a dalších elektronů.

Každá částice má charakteristické vlastnosti, jako je např. klidová hmotnost, elektrický náboj nebo spin. Velikost náboje protonů a elektronů je $1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Spin je vlastní moment

hybnosti elementárních částic způsobený jejich rotací a podle jeho hodnoty můžeme elementární částice dělit do dvou velkých skupin. První představují **fermiony**, které jsou charakterizovány neceločíselným spinem a jejich chování se dá popsat tzv. Fermiho–Diracovou statistikou. Mezi fermiony patří například nukleony a elektrony. Jejich základní vlastností je, že se chovají podle tzv. Pauliho vylučovacího principu, tj. nemohou existovat současně na stejném místě dva fermiony s úplně totožnou energetickou charakteristikou. To např. vysvětluje, proč se všechny elektrony v atomu nenacházejí v nejnižší energetické hladině, ale s rostoucí hodnotou náboje jádra postupně zaplňují i vyšší energetické hladiny, které jsou vzdálenější od jádra atomu. Druhá skupina, **bosony**, má spin celočíselný a jejich chování je popsáno Einsteinovou–Boseovou statistikou. Mezi bosony patří například **foton**. Pro bosony je typické, že ve stejné energetické úrovni se může vyskytovat neomezené množství těchto částic. To je např. příčinou supratekutosti helia při velmi nízkých teplotách (spin atomu helia, přesněji izotopu ${}^4\text{He}$, je nulový).

Elementární částice můžeme rozdělit také podle velikosti klidové hmotnosti. Částice s nulovou klidovou hmotností jsou **fotony**, **gluony** a teoreticky předpovězené **gravitony**. **Leptony** jsou lehké částice s malou klidovou hmotností, na které nepůsobí silná interakce. Sem patří např. *elektrony*, *pozitrony*, *neutrino*, *miony* a *tauony* a samozřejmě jejich antičástice. Pro leptony je charakteristické, že podle současných znalostí nemají vnitřní strukturu a podléhají slabé interakci, leptony obsahující náboj také elektromagnetické. Částice se střední klidovou hmotností se nazývají **mezony** (např. mezon m, mezon p). **Baryony** jsou těžké částice, kam obecně patří nukleony a jejich příslušné antičástice. Mezony a baryony se nazývají **hadrony**.

► Zajímavost 1.1

Všechny leptony včetně elektricky nenabitých neutrin interagují se slabou interakcí. Neutrino jsou stabilní částice – nepodléhají samovolnému rozpadu a interagují s hmotou velice slabě; proto je velmi obtížné je detekovat. Přesto je jich v našem okolí velké množství, jedná se např. o sluneční neutrino, reliktní neutrino, která pocházejí z období oddělení neutrin od ostatní hmoty v době 1 s po Velkém třesku, nebo atmosférická neutrino vznikající 20 km na zemi při interakci kosmického záření s atmosférou. Z umělých zdrojů stojí za zmínku jaderné elektrárny, které produkují každou sekundu běžně přes 50 000 neutrin. Odhaduje se, že u Země je tok slunečních neutrin $70 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, které naši planetou proletí bez interakce (ta je zcela výjimečná).

Neutrino poprvé předpověděl Wolfgang Pauli roku 1931, kdy vysvětlil rozpad neutronu na proton a elektron – beta rozpad, o kterém pojednává kapitola 9. Trvalo 25 let od vyslovení hypotézy o existenci neutrin k jejímu experimentálnímu ověření – roku 1956 byl v časopise Science publikován článek o detekci neutrin. Za tento výzkum Clyde Cowan a Frederick Reines obdrželi později Nobelovu cenou za fyziku.

Antičástice existuje ke každé částici, její některé základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 1.1. Například *pozitron* je antičástice elektronu, *antiproton* je antičástice protonu. Pokud částice s antičásticí interagují, dojde k jejich zániku (tzv. anihilaci) a vznikají jiné částice.

Podle fyzikální podstaty rozdělujeme částice na látkové (neboli fermiony) a polní (neboli bosony). První skupinu představují částice, jejichž klidová hmotnost je vždy nenulová. To znamená, že nemohou dosáhnout rychlosti světla. Naopak polní částice mohou mít i nulovou hmotnost a pohybovat se rychlostí světla (např. foton). Podle charakteru elementárních částic rozdělujeme také hmotu na formu látkovou a polní.

Tab. 1.1 Vybrané základní charakteristiky antičástice

- Stejná hmotnost jako částice
- Stejná hodnota spinu (celočíselný, neceločíselný), ale s opačnou točivostí (levotočivý nebo pravotočivý)
- Opačný magnetický moment (kladný nebo záporný)
- Opačný náboj (kladný nebo záporný) – není-li částice elektroneutrální, a pokud je magnetický moment poločíselný

Látková forma se vyskytuje typicky ve třech různých skupenstvích, a to pevném, kapalném a plynném. Nyní se k nim přidává i plazma (ionizovaný plyn), které je nejrozšířenější formou látky ve vesmíru. Vlastnosti fyzikálních polí můžeme popisovat pomocí fyzikálních veličin. Pro formu polní je charakteristické vzájemné silové působení zdrojů jednotlivých druhů fyzikálních polí, která jsou ve fyzice známa čtyři: gravitační, elektromagnetické a dvě pole jaderná, silné a slabé. Jestliže silové působení v silném jaderném poli budeme považovat za jednotkové, potom elektromagnetická interakce je přibližně 10^{-2} -krát slabší, relativní síla slabé jaderné interakce je 10^{-13} a nejslabší interakce, gravitační, vykazuje relativní sílu rovnou 10^{-38} . Důležitou charakteristikou silového působení je jeho dosah. Zatímco působení gravitačního a elektromagnetického pole je neomezené a kvadraticky klesá se vzdáleností, slabá a silná interakce působí pouze v bezprostředním okolí elementárních částic. V případě silné interakce je dosah přibližně 10^{-15} m, v případě interakce slabé je to 10^{-18} m.

Silná interakce působí jen na hadrony. Tato síla udržuje např. pohromadě neutrony a protony v atomovém jádře. Elektromagnetická interakce působí pouze na částice s elektrickým nábojem. Slabá interakce působí na všechny leptony a kvarky. Tato interakce např. vysvětluje beta rozpad popsaný v kapitole 9, který je principiální pro pochopení pozitronové emisní tomografie používané pro diagnostické účely (je popsána v kap. 10). Gravitační interakce působí na všechny částice. Pohyby planet nebo např. soudržnost galaxií jsou určeny právě gravitační silou.

Jednotlivé formy hmoty mohou v sebe vzájemně přecházet. Typickým příkladem přechodu formy látkové na formu pole je vznik elektromagnetického záření při anihilaci částice s antičásticí. Opačným příkladem je vznik elektron–pozitronového páru při interakcích dostatečně energetického elektromagnetického záření s látkou. Označení forma látková a forma pole se používá spíše v makrosvětě, zatímco v mikrosvětě (atomární úroveň) se pro první formu hmoty používá výraz forma částicová (korpuskulární) a pro druhou formu výraz interakce. Silové působení všech druhů polí má výměnný charakter, což znamená, že je zprostředkováno výměnou kvant těchto polí. Nejděle známým kvantem je foton, kvantum pole elektromagnetického. Kvanta silného jaderného pole se nazývají **gluony**, pro slabé pole jaderné jsou kvanta představována tzv. **intermediárními bosony** a konečně pro interakci gravitační je kvantem tzv. **graviton**. To je částice hypotetická, která zatím nebyla experimentálně prokázána. Pojem pole v tomto případě znamená oblak intermediálních částic, které zprostředkovávají interakci. Každá elektricky nabitá částice je tedy obklopena fotony, každý kvark gluony apod.

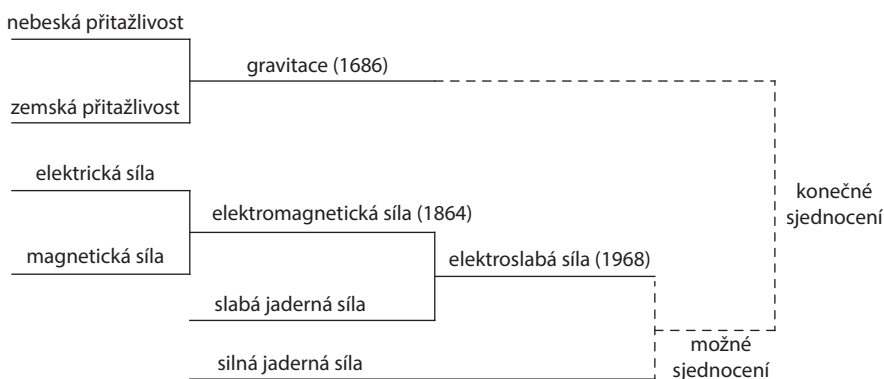
► Zajímavost 1.2

Dr. Murray Gell-Mann se svým kolegou Georgem Zweigem vyslovili v roce 1964 hypotézu, že všechny známé částice lze poskládat z pouhých tří fundamentálních částic (případně jejich antičástic). Gell-Mann dal těmto základním částicím záhadné jméno kvarky. Slovo kvark

poprvé najdeme v románu plném slovních hříček irského spisovatele Jamese Joyce Plačky za Finneganana (Finnegan's Wake) ve spojení „three quarks for Muster Mark“ (česky asi „tři kvarky pro pana Marka“).

Revoluční na této hypotéze (oceněné Nobelovou cenou) bylo, že předpovídala pro kvarky elektrický náboj $2/3$ (kvarky u, c, t) nebo $-1/3$ (kvarky d, s, b) náboje protonu. Takové zlomkové hodnoty náboje ovšem nebyly dříve nikdy pozorovány, všechny běžné částice mají náboj celočíselný. Pozdější experimentální práce nakonec dokázaly existenci kvarků; poslední, šestý typ kvarku byl objeven v roce 1995. V přírodě dosud nikdo nepozoroval jednotlivý kvark, tyto částice se pravděpodobně mohou vyskytovat pouze ve vázaných soustavách. Stejně jako leptony, i kvarky jsou charakterizované také spinem – jeho hodnota je $\pm 1/2$. Kvarky vytvářejí složené částice nazývané hadrony, a to takovým způsobem, že součet elektrických nábojů jednotlivých kvarků v hadronu je vždy celé číslo.

Ukazuje se, že rozšiřující se poznání vlastností přírody dospělo k sjednocování jednotlivých druhů popisovaných fyzikálních polí. Nejdříve byl spojen popis pole magnetického a elektrického, později došlo k sjednocení popisu pole elektromagnetického a slabého pole jaderného. V současné době existují teorie, které zahrnují i sloučení silného pole jaderného s polem elektroslabým, a konečným cílem je najít tzv. **teorii velkého sjednocení**, kde lze všechna fyzikální pole popsat jediným způsobem, jediným systémem rovnic (obr. 1.1). Teorií nejvíce přijímanou odbornou veřejností je v současné době Standardní model částicové fyziky, protože je konzistentní jak s kvantovou mechanikou, tak i se speciální teorií relativity. Tento model popisuje silnou, slabou a elektromagnetickou interakci a elementární částice, které tvoří veškerou hmotu. Tato teorie říká, že veškerá známá hmota ve vesmíru se skládá ze šesti druhů kvarků a šesti druhů leptonů (a jejich příslušných antičástic) a všechny jevy, které ve vesmíru pozorujeme, dovedeme vysvětlit pomocí čtyř druhů interakcí.



Obr. 1.1 Sjednocování popisu fyzikálních polí

Z tohoto vývoje je pro lékařskou fyziku důležitý závěr, že rozvoj poznání vede spíše k sjednocování různých typů interakcí hmoty, nikoliv k objevu interakcí nových. Je tedy velmi nepravděpodobné, že by byly objeveny nové interakce související s životem. Existenci takovýchto biopolí předpokládají představitelé různých forem alternativní medicíny a současná věda takovéto představy nepodporuje.

1.2 ENERGIE

Energií charakterizujeme schopnost hmoty konat práci. Celková energie E částice (nebo systému částic) nacházející se v silovém poli je dána součtem klidové energie E_0 , kinetické energie E_k a potenciální energie E_p , tedy

$$E = E_0 + E_k + E_p \quad (1.1)$$

kde E_0 je energie svázaná s **klidovou hmotností** m_0 známým Einsteinovým vztahem

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (1.2)$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu. Velikost této rychlosti je $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což představuje nejvyšší rychlost, kterou se může šířit energie. Rychlost světla v látkovém prostředí je vždy menší než rychlost světla ve vakuu a je dána poměrem c/n , kde n je index lomu příslušného prostředí. Foton, který má nulovou hmotnost, má samozřejmě nulovou klidovou energii. Fotony v klidu neexistují, šíří se ve vakuu ve všech souřadnicových soustavách rychlostí c .

Hmotnost m částic s nenulovou klidovou hmotností ($m_0 > 0$), které se pohybují relativistickou rychlostí (rychlostí blízkou rychlosti světla ve vakuu), roste podle vztahu

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.3)$$

kde v je rychlost vzhledem k pozorovateli. Toto relativistické zvětšení hmotnosti můžeme pozorovat u částic urychlených v urychlovačích částic. Současně tento vztah ukazuje, že žádná částice nebo těleso nemůže být urychleno na rychlost světla ve vakuu, neboť výraz pod odmocninou ve jmenovateli ve vztahu 1.3 by byl nulový a hmotnost tedy nekonečná.

Kinetická energie E_k je definována známým vztahem

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} \quad (1.4)$$

kde $p = mv$ je hybnost, a může nabývat nulových (při $v = 0$) nebo kladných hodnot. Pokud se rychlost v blíží rychlosti světla ve vakuu, platí přesnější relativistický vztah

$$E = mc^2 = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} \quad (1.5)$$

ze kterého můžeme odvodit vztah pro kinetickou energii:

$$E_k = mc^2 - m_0 c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) m_0 c^2 \quad (1.6)$$

Z tohoto vztahu (1.6) je vidět, že kinetická energie nezávisí na směru pohybu, ale pouze na velikosti rychlosti.

Hodnota potenciální energie E_p částice nebo tělesa závisí na tom, kde je zvolena její nulová hladina. V mechanice hmotného bodu známe vztah $E_p = mgh$ pro mechanickou potenciální energii a její hodnota byla kladná či záporná podle toho, kde byla definována její nulová hladina (např. povrch Země). Pro centrální pole sil newtonovského typu, tj. takových, jejichž velikost závisí na kvadrátu vzdálenosti (např. Newtonův gravitační zákon nebo Coulombův zákon pro silovou interakci elektrických nábojů), se ukazuje výhodnější definovat nulovou hladinu potenciální energie „v nekonečnu“, tj. v takové vzdálenosti, kde síla vzájemné interakce klesá na nulovou hodnotu. Při takto definované nulové hladině potenciální energie (v nekonečnu) je její hodnota v konečné vzdálenosti záporná. Je rovna práci, kterou musíme vynaložit, abychom vzájemně se přitahující částice (nebo tělesa, elektrické náboje) vzdálili tak, aby jejich vzájemné silové působení bylo nulové (nebo zanedbatelné).

Jednotkou energie je v soustavě jednotek SI joule (J), který se definuje jako práce, kterou vykoná síla 1 N působící po dráze 1 m. V atomové fyzice a fyzice záření se energie většinou vyjadřuje v jednotkách elektronvolt (eV). Jeden eV je energie, kterou získá elektron urychlený potenciálním rozdílem jednoho voltu. Jelikož $1 \text{ J} = 1 \text{ C} \cdot 1 \text{ V}$ a náboj 1 C je roven celkovému náboji přibližně $6 \cdot 10^{18}$ elektronů, je převodní vztah $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, tedy stejný jako převodní vztah mezi nábojem jednoho elektronu a coulombem. Ve fyzice mikrosvětla slouží eV také jako míra hmotnosti. Přesněji jednotkou hmotnosti je $1 \text{ eV} \cdot c^{-2}$, kde c je rychlost světla ve vakuu (viz rovnici 1.2), takže 1 eV odpovídá $1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$. Tak například říkáme, že hmotnost elektronu $m_e = 0,51 \text{ MeV}$, hmotnost protonu $m_p = 938,28 \text{ MeV}$ a hmotnost neutronu $m_n = 939,57 \text{ MeV}$.

V živé i neživé přírodě platí při všech interakcích zákon zachování energie, který říká, že energie může přecházet z jedné formy do druhé, nicméně v uzavřené soustavě její celkové množství zůstává stejné. Tak např. při anihilaci elektronu s pozitronem, jejichž hmotnost je rovna energetickému ekvivalentu 0,51 MeV, pozorujeme vznik dvou kvant záření (fotonů) právě o této energii. Nebo při chemické reakci $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ + fotony pozorujeme kinetickou energii molekuly CO_2 a fotonů díky tomu, že součet hmotností atomu uhlíku a molekuly kyslíku O_2 je poněkud větší než hmotnost molekuly CO_2 . Tedy pokud u výchozích složek reakce by byla všechna energie ve formě energie klidové, pak u konečných produktů je představována součtem energie klidové a kinetické. V každém případě se však celková energie zachovává, mění se jen její nositelé a forma, ve které se projevuje.

1.3 KVANTOVÉ JEVY

Zákony klasické fyziky nepostačují pro popis fyzikálních jevů probíhajících v mikrosvětě atomů nebo molekul a při interakcích subatomických částic. V této oblasti přírody se setkáváme s fyzikálními veličinami, u kterých lze stav spočítat pouze v rámci určité pravděpodobnosti, jejich hodnoty se mění nespojitě. Je to dáno tím, že systémy z nich utvářené, tj. atomy nebo molekuly, mají částicový i vlnový charakter. Tento korpuskulárně-vlnový dualismus byl experimentálně ověřen na vlastnostech světla i elektronů. Interference a difrakce světla prokazují, že světlo je vlnění. Naopak fotoefekt prokazuje, že se šíří v kvantech energie, nazývaných fotony.

V kvantové fyzice se často setkáme s fyzikální veličinou nazývanou *účinek*, jejíž fyzikální rozměr je dán součinem energie a času a jejíž jednotka je tedy J·s. Podobně jako v teorii relativity, kde je základní konstantou rychlost světla ve vakuu c , je v kvantové mechanice základní konstantou kvantum účinku $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ J·s, nazývané **Diracova konstanta**. Diracova konstanta (neboli redukováná Planckova konstanta) je svázána s **Planckovou konstantou** $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s převodním vztahem $\hbar = h/2\pi$. Tyto konstanty vystupují v důležitých vztazích, které kvantitativně spojují částicový a vlnový charakter hmoty. Planckova konstanta představuje nejmenší možnou dávku energie vyzařované tělesem.

Jedním z nejdůležitějších vztahů je vztah mezi energií E fotonu a frekvencí f světelné vlny a její vlnové délky λ

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.7)$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu. Pravá část rovnice 1.7 vyplývá z toho, že vlnová délka je vzdálenost, kterou vlnění urazí za dobu jedné periody T , která je převrácenou hodnotou frekvence, tedy $\lambda = cT = c/f$. Ze vztahu 1.7 vyplývá důležitý závěr, že s rostoucí frekvencí roste energie fotonu. Rozsah frekvencí je velký, světelná vlna se liší také způsobem generování a fyzikálními účinky. Proto její detekce je rozdílná. Vlnění s frekvencí řádu 10^5 – 10^{10} Hz se detekuje pomocí radiotechnických metod jako je např. elektromagnetická indukce. Jelikož fotony mají při těchto frekvencích poměrně malou energii, je toto záření neškodné pro biologickou tkáň. Proto se tyto frekvence v hojně míře využívají třeba pro přenos rádiových nebo televizních signálů a v lékařské diagnostice u magnetické rezonance. S frekvencemi řádu 10^{11} – 10^{14} Hz je spojeno infračervené záření, které vysílá každé těleso s teplotou vyšší než absolutní nula v závislosti na své teplotě (vyzařovaná frekvence roste s teplotou). Toto záření se registruje tepelnými metodami (člověk může toto záření vnímat jako teplo) nebo termograficky. V lékařství se využívá např. pro neinvazivní detekci zánětů. Následuje úzké frekvenční pásmo (přibližně $4 \cdot 10^{14}$ až $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz) pro viditelné světlo, které vnímá člověk. Těmto hraničním frekvencím odpovídají vlnové délky 780 nm (červená barva) a 380 nm (fialová barva). S fialovou barvou hraničí ultrafialové záření s frekvencemi 10^{15} – 10^{17} Hz, které je generováno tělesy s vysokou teplotou (např. Slunce). Od těchto frekvencí má záření ionizační účinky, protože fotony nesou již dostatečnou energii potřebnou k ionizaci. Člověk by se proto měl před tímto zářením chránit, protože takto energetické záření může poškodit např. DNA. Rentgenové záření s frekvencemi 10^{17} – 10^{20} Hz vzniká např. v rentgenkách při prudkém zabrzdění elektronů emitovaných žhavenou katodou. V lékařství se rentgenové záření využívá především v diagnostice (např. ve výpočetní tomografii – CT). Gama-záření ($> 10^{19}$ Hz) vzniká při radioaktivních a jiných jaderných a subjaderných dějích (např. anihilace). Způsobuje – podobně jako rentgenové záření – popáleniny, poškození DNA apod. V medicíně se používá např. v nukleárním lékařství (pozitronová emisní tomografie – PET) nebo pro sterilizaci lékařských nástrojů.

Korpuskulárně-vlnový dualismus je ale vlastní i látkovým částicím, tedy např. elektronům. Pohyb látkové částice o relativistické hmotnosti m , hybnosti p a kinetické energii E je spjat se šířením hmotnostních vln, jejichž vlnová délka λ je dána vztahem

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} \quad (1.8)$$

a nazývá se **de Broglieho vlnová délka**. De Broglieho hypotéza říká, že každému volnému hmotnému objektu s hybností p je přiřazena rovinná monochromatická vlna (tzv. de Broglieho vlna) o vlnové délce dané výrazem 1.8. Z tohoto vztahu vyplývá, že částice s krátkými vlnovými délkami mají větší energii než s delšími. Frekvence f této vlny je dána vztahem analogickým jako pro světelnou vlnu, viz rovnici 1.7, tedy

$$f = \frac{E}{h} \quad (1.9)$$

Korpuskulárně-vlnový charakter částic má ten důsledek, že není možné s libovolnou přesností určit současně dvě konjugované veličiny, např. polohu částice a její hybnost (rychlost) nebo energetické hladiny a čas. Tuto vlastnost popisuje tzv. **Heisenbergova relace neurčitosti**, která stanovuje jako nejmenší možnou chybu popisu částice dvěma veličinami chybu rovnou hodnotě Planckovy konstanty. Díky malé hodnotě Planckovy konstanty tato Heisenbergova relace neurčitosti nepředstavuje téměř žádné omezení pro popis těles v makrosvětě, na rozdíl od atomární úrovně. Zákony pohybu částice jsou popisovány **Schrödingerovou rovnicí**. Řešením této rovnice, která přesahuje rámec tohoto textu, je vlnová funkce, jejíž fyzikální význam je, že absolutní hodnota její druhé mocniny udává hustotu pravděpodobnosti výskytu částice. Z řešení této rovnice pro elektron v poli atomového jádra vyplývá kvantování energetických hladin i existence stacionárních stavů elektronů v atomu.

1.3.1 Kvantová čísla

Podle kvantově-mechanických představ se elektrony v silovém poli jádra atomu nepohybují v určitých trajektoriích, ale každý elektron vytváří určitý oblak pravděpodobnosti svého výskytu, jehož tvar je závislý na celkové energii elektronu a na dalších vlastnostech, jako jsou orbitální moment hybnosti, magnetický moment a spin. Místo výskytu elektronu popsané rozdělením hustoty pravděpodobnosti výskytu se nazývá **orbital**. Kdybychom mohli elektron pozorovat, vyskytoval by se v různé vzdálenosti od jádra a na různých místech, avšak v některých místech by se vyskytoval častěji a v některých vůbec ne (tam, kde vlnová funkce nabývá trvale nulových hodnot). Stav elektronu v atomu je popsán vlnovou funkcí, která obsahuje tolik bezrozměrných parametrů, kolik je stupňů volnosti elektronu. Uvážíme-li i jeho vlastní rotaci, pak má elektron čtyři stupně volnosti. Jeho stav tedy může být určen čtyřmi parametry, tzv. **kvantovými čísly**. Kvantová čísla jsou s výjimkou spinového čísla přirozená čísla a určují geometrický tvar a symetrii oblaku elektronu.

Hlavní kvantové číslo n určuje celkovou energii elektronu a jeho vzdálenost od jádra. Jeho existence je důsledkem řešení Schrödingerovy rovnice pro elektron v poli jádra. Tak např. z kvantově-mechanické teorie atomu pro vodík vyplývá, že elektron se v něm může vyskytovat jedině v energetických hladinách E daných vztahem

$$E = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0 h^2} \cdot \left(\frac{1}{n^2}\right) \quad (1.10)$$

kde $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg je klidová hmotnost elektronu, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F·m⁻¹ je permitivita vakua, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C je náboj elektronu. Hlavní kvantové číslo je přirozené číslo a může nabývat hodnot $n = 1, 2, 3, \dots$. Jeho hodnota zároveň určuje i slupku, ve které se elektron

v elektronovém obalu jádra nachází. Hodnotám $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ odpovídají slupky K, L, M, N, O, P a Q .

Vedlejší (orbitální) kvantové číslo ℓ nabývá pro elektron ve slupce, určené hodnotou hlavního kvantového čísla n , hodnot $\ell = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$. Určuje tvar i symetrii elektronového oblaku. Pro $\ell = 0$ má oblak kulový tvar. Toto kvantové číslo je určeno kvantováním **orbitálního momentu hybnosti** \vec{L} , který je definován jako vektorový součin polohového vektoru \vec{r} a vektoru hybnosti $\vec{p} = m\vec{v}$, tedy $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$. Závislost velikosti orbitálního momentu hybnosti elektronu na vedlejším kvantovém čísle je dána vztahem

$$L = \hbar \sqrt{\ell(\ell+1)} \quad (1.11)$$

Udává, kolik je uzlových ploch vlnové funkce. Hodnoty ℓ se při spektroskopickém označení odpovídajících stavů označují písmeny tak, že hodnotám $\ell = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ odpovídá značení s, p, d, f, g, h . Podle rovnice (1.11) má stav s nulový moment hybnosti, stav p má velikost momentu hybnosti $\hbar\sqrt{2}$ atd. Kombinace hlavního kvantového čísla s písmenem reprezentujícím orbitální moment hybnosti tvoří užívané značení elektronových stavů. V této notaci např. stav s $n = 2$ a $\ell = 0$ je $2s$, stav odpovídající $n = 4$ a $\ell = 2$ je $4d$ apod. Z rovnice 1.11 je též zřejmé, že přirozenou jednotkou orbitálního momentu hybnosti je $J \cdot s$, zjednodušeně \hbar .

Magnetické kvantové číslo m může nabývat hodnot $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \ell$ a určuje směr vektoru orbitálního momentu hybnosti v prostoru, tedy polohu orbitalu v prostoru. Elektron je elektricky nabitá částice. Proto, má-li orbitální moment hybnosti, musí existovat i magnetický moment, neboť pohyb elektrického náboje dává vznik magnetickému poli.

Magnetický orbitální moment elektronu $\vec{\mu}$ souvisí s jeho orbitálním momentem hybnosti \vec{L} vztahem

$$\vec{\mu} = - \left(\frac{e}{2m_e} \right) \vec{L} \quad (1.12)$$

kde m_e je hmotnost elektronu. Veličina $e/2m_e$ se nazývá **gyromagnetický poměr**. Z rovnice 1.12 je zřejmé, že magnetický moment elektronu má opačný směr než orbitální moment hybnosti. Velikost orbitálního momentu elektronu je kvantována dle rovnice 1.11. Je však kvantován též jeho směr vzhledem k vnějšímu magnetickému poli. Fyzikální význam magnetického kvantového čísla je ten, že určuje směr vektoru \vec{L} ; určuje jeho složku ve směru vnějšího magnetického pole. Je-li tedy vnější magnetické pole dáno vektorem magnetické indukce \vec{B} , pak magnetické číslo m určuje velikost průmětu \vec{L}_B vektoru \vec{L} do směru vektoru \vec{B} , a velikost tohoto průmětu je pak $m \cdot \hbar$. Vektor orbitálního momentu hybnosti nemůže být nikdy paralelní nebo antiparalelní k vektoru vnějšího magnetického pole, protože jeho složka do tohoto směru je vždy menší než jeho velikost určená rovnicí 1.11, tedy $|\vec{L}_B| < L$. Je-li jeho směr kolmý na směr vektoru vnějšího magnetického pole, tak samozřejmě jeho složka do tohoto směru je nulová a $m = 0$. Vektor orbitálního momentu hybnosti (a tedy také vektor magnetického momentu) nemůže nikdy zaujímat trvale určitý směr v prostoru, nýbrž sleduje povrch kužele tak, že jeho projekce do směru vnějšího magnetického pole má hodnotu $m \cdot \hbar$.

V souvislosti s tím, že přirozenou jednotkou orbitálního momentu hybnosti je \hbar , je vzhledem k rovnici 1.12 jednotkou magnetického orbitálního momentu hybnosti elektronu v atomové fyzice tzv. **Bohrův magneton** $\mu_B = e\hbar/2m_e = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ A} \cdot \text{m}^2$.

Elektron má vlastní, vnitřní moment hybnosti, spin, který vyplývá z jeho rotačního pohybu a je nezávislý na jeho orbitálním momentu hybnosti. Má však též určitý magnetický moment svázaný s tímto vnitřním momentem hybnosti. **Spinový moment hybnosti** \vec{S} elektronu má jedinou velikost danou vztahem

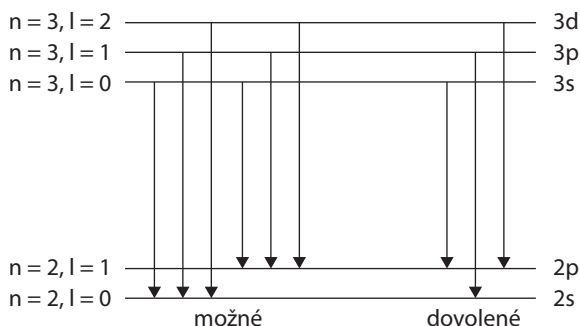
$$S = \hbar\sqrt{s(s+1)} \quad (1.13)$$

kde $s = 1/2$ je **spinové kvantové číslo**. Po jeho dosazení dostáváme pro velikost spinového momentu $S = \sqrt{3}/2 \hbar = 0,866 \hbar$. Vektor spinového momentu hybnosti tedy může mít ve vnějším magnetickém poli dvě orientace, popsané dvěma hodnotami spinového magnetického kvantového čísla $\pm 1/2$. Složka vlastního momentu hybnosti elektronu ve směru vnějšího magnetického pole je určena spinovým magnetickým číslem, její velikost je $\pm \hbar/2$.

Kvantový stav elektronu v atomu je tedy plně určen souborem čtyř kvantových čísel: n , ℓ , m a s . Elektronové konfigurace atomů s více elektrony se podřizují Pauliho vylučovacímu principu. To znamená, že žádné dva elektrony v atomu nemohou existovat ve stejném kvantovém stavu a tedy každý elektron v daném atomu musí mít jiný soubor kvantových čísel. V každé slupce určené hlavním kvantovým číslem n je počet elektronů určen vztahem

$$2\sum_{\ell=0}^{n-1} (2\ell + 1) = 2n^2 \quad (1.14)$$

Při přechodu elektronů z jedné energetické hladiny do jiné následkem absorpce nebo emise energie jsou nejpravděpodobnější ty přechody, při kterých se hlavní kvantové číslo může měnit libovolně, ale vedlejší kvantové číslo se může měnit jen o ± 1 . Takovéto přechody nazýváme „dovolené“, ostatní jsou „zakázané“ (obr. 1.2).



Obr. 1.2 Přechody elektronů z orbitu $n = 3$ do orbitu $n = 2$

To znamená, že z $3 \times 2 = 6$ možných přechodů ze slupky M ($n = 3$, $\ell = 0, 1, 2$) na slupku L jsou dovolené jen přechody z $3d$ na $2p$, z $3p$ na $2s$ a konečně z $3s$ na $2p$. Existence zakázaných přechodů umožňuje získání stavu tzv. inverze v kvantových zesilovačích světla, laserech (viz kap. 7.1.2 – Lasery).