

Jiří Beneš, Jaroslava Kymplová, František Vitek

Základy fyziky

pro lékařské a zdravotnické obory

pro studium i praxi



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Registrační číslo: CZ.1.07/2.4.00/17.0114

Tento projekt je spolufinancován z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.



Jiří Beneš, Jaroslava Kyplová, František Vitek

Základy fyziky

pro lékařské a zdravotnické obory

pro studium i praxi



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Registrační číslo: CZ.1.07/2.4.00/17.0114

Tento projekt je spolufinancován z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

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. RNDr. Jiří Beneš, CSc., MUDr. Jaroslava Kymplová, Ph.D.,
prof. RNDr. František Vítek, DrSc.**

Oddělení biofyziky, Ústav biofyziky a informatiky 1. LF UK, Praha

ZÁKLADY FYZIKY PRO LÉKAŘSKÉ A ZDRAVOTNICKÉ OBORY **pro studium i praxi**

Recenze:

Prof. Ing. Peter Kneppo, DrSc.

RNDr. Eugen Kvašňák, PhD.

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

© Grada Publishing, a.s., 2015

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2015

Obrázek na obálce „Tyndallův jev, fyzika i mystika“ MUDr. Jaroslava Kymplová, Ph.D.

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 5772. publikaci

Odpovědný redaktor Mgr. Luděk Neužil

Sazba a zlom Josef Lutka

Obrázky dodali autoři.

Počet stran 224 + 4 strany barevné přílohy

1. vydání, Praha 2015

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a.s.

Názvy produktů, firem apod. použité v této knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.

Postupy a příklady v knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění ale nevyplývají pro autory ani pro nakladatelství žádné právní důsledky.

ISBN 978-80-247-4712-5

ELEKTRONICKÁ PUBLIKACE:
ISBN 978-80-247-9550-8 (pro formát PDF)

OBSAH

Předmluva	10
1 Stavba hmoty	11
1.1 Elementární částice, formy hmoty	11
1.2 Energie	14
1.3 Kvantové jevy	15
1.3.1 Kvantová čísla	15
1.4 Emisní spektra vodíku	17
1.5 Struktura elektronového obalu těžších atomů	17
1.6 Excitace, emise a ionizace, vazebná energie elektronu	18
1.7 Vlnově mechanický model atomu	19
1.8 Jádro atomu	20
1.8.1 Vazebná energie jádra	21
1.8.2 Magnetické vlastnosti jader	21
1.9 Síly působící mezi atomy	22
1.10 Hmotnostní spektroskopie	24
1.11 Magnetická rezonanční tomografie	24
2 Molekulární biofyzika	33
2.1 Síly působící mezi molekulami	33
2.2 Skupenské stavy hmoty	33
2.2.1 Plyny	33
2.2.2 Kapaliny	34
2.2.3 Pevné látky	35
2.2.4 Skupenství plazmatické	35
2.2.5 Změny skupenství	36
2.3 Disperzní systémy	37
2.3.1 Klasifikace disperzních systémů	38
2.3.2 Analytické disperze	39
2.3.3 Koloidní disperze	40
2.4 Voda jako rozpouštědlo	44
2.4.1 Polární chování vody	44
2.4.2 Voda v organismu	45
2.5 Transportní jevy	47
2.5.1 Difuze	47
2.5.2 Viskozita	48
2.5.3 Vedení tepla	49
2.5.4 Transport látek biologickými membránami	49
2.6 Koligativní vlastnosti roztoků	51
2.6.1 Snížení tenze par	51
2.6.2 Zvýšení bodu varu – ebullioskopie	51
2.6.3 Snížení bodu tuhnutí – kryoskopie	51
2.6.4 Osmotický tlak	52
2.7 Jevy na rozhraní fází	53

2.7.1	Povrchové napětí	53
2.7.2	Adsorpce	54
3	Teplo a bioenergetika	55
3.1	Základní termodynamické pojmy	55
3.2	Práce a teplo	57
3.3	Stavové funkce	58
3.3.1	Vnitřní energie	59
3.3.2	Entalpie	59
3.3.3	Entropie	60
3.3.4	Volná energie	61
3.3.5	Volná entalpie	62
3.3.6	Chemický potenciál	62
3.3.7	Měrná tepelná kapacita	63
3.4	Tepelné ztráty	63
3.4.1	Záření (sálání tepla – radiace)	64
3.4.2	Vedení (kondukce)	64
3.4.3	Proudění (konvekce)	65
3.4.4	Vypařování vody (evaporace)	65
3.4.5	Tepelná pohoda	65
3.5	Termoterapie	66
3.5.1	Pozitivní termoterapie	66
3.5.2	Negativní termoterapie – kryoterapie	66
3.5.3	Další využití nízkých teplot v medicíně	67
3.5.4	Hypertermie v léčbě nádorů	67
3.6	Měření a regulace teploty	67
3.6.1	Teploměry	68
3.6.2	Termoregulace a měření teploty v medicíně	71
3.7	Tepelná zařízení	72
3.7.1	Termostaty	72
3.7.2	Sterilizátory, autoklávy	72
4	Elektrické projevy organismu, elektrodiagnostika a elektroléčba	73
4.1	Základní pojmy	73
4.1.1	Coulombův zákon, permitivita látek	74
4.1.2	Elektrický potenciál, potenciály na fázovém rozhraní	75
4.2	Elektrické projevy v živém organismu	77
4.2.1	Klidový membránový potenciál buňky	77
4.2.2	Akční potenciál nervového vlákna	78
4.2.3	Potenciály na ostatních biologických membránách	80
4.3	Vedení proudu v organismu	81
4.3.1	Negativní účinky elektrického proudu na organismus	82
4.4	Použití elektřiny v lékařské diagnostice	83
4.4.1	Elektrokardiografie	84
4.4.2	Další elektrodiagnostické metody	88
4.5	Elektrostimulace	91

4.5.1	Elektrostimulace svalů	91
4.5.2	Kardiostimulace	91
4.5.3	Defibrilace a kardioverze	92
4.5.4	Další typy elektrostimulace	93
4.6	Elektroterapie	93
4.6.1	Základy elektroléčby	93
4.7	Elektrochirurgie	95
4.8	Osciloskop	95
5	Biomechanika v lidském organismu	97
5.1	Základní pojmy z biomechaniky	97
5.2	Mechanické vlastnosti tkání	100
5.2.1	Deformace kostí	100
5.2.2	Deformace měkkých tkání	102
5.3	Mechanická práce srdce	104
5.4	Biofyzika krevního oběhu	106
5.4.1	Problémy aplikace fyzikálních zákonů	108
5.4.2	Měření krevního tlaku	110
5.5	Biomechanika dýchání	113
5.5.1	Spirometrie	115
5.5.2	Bodypletysmografie a pneumotachografie	117
6	Akustika a biofyzika slyšení	119
6.1	Základní pojmy a veličiny	119
6.2	Biofyzika slyšení	125
6.2.1	Vady slyšení	127
6.2.2	Sluchové kompenzační pomůcky a implantáty	128
6.3	Akustika hlasu a řeči	129
6.4	Vyšetření sluchu	131
6.4.1	Objektivní metody audiometrie	131
6.4.2	Audiometrie subjektivní	132
6.5	Ultrazvuk	132
6.5.1	Fyzikální vlastnosti ultrazvukových vln	134
6.5.2	Účinky ultrazvuku	135
6.5.3	Terapeutické využití ultrazvuku	136
6.5.4	Využití ultrazvuku v diagnostice	136
6.5.5	Intervenční ultrasonografie	140
6.5.6	Využití akustické energie rázové vlny v terapii	140
7	Optika a biofyzika vidění	143
7.1	Základy pojmy	143
7.1.2	Zdroje světla	146
7.2	Laser a další zdroje využívané ve fototerapii	147
7.2.1	Fyzikální charakteristika laseru	147
7.2.2	Nízkovýkonné lasery	148
7.2.3	Vysokovýkonné lasery	148

7.3	Fotometrie	150
7.4	Interakce světla s prostředím	150
7.4.1	Fermatův princip	151
7.4.2	Disperze světla	152
7.4.3	Absorpce světla	153
7.4.4	Polarizace světla	153
7.5	Vlnová optika	154
7.5.1	Interference světla	154
7.5.2	Ohyb světla	155
7.6	Optické zobrazování	156
7.6.1	Zobrazení odrazem	157
7.6.2	Zobrazení lomem	157
7.7	Optické přístroje a metody	159
7.7.1	Lupa	159
7.7.2	Mikroskop	160
7.7.3	Endoskop	162
7.7.4	Optické analytické metody	163
7.8	Účinek různých druhů světla na organismus	165
7.8.1	Infračervené záření	165
7.8.2	Viditelné světlo	165
7.8.3	Ultrafialové záření	166
7.9	Optika lidského oka	168
7.9.1	Hlavní optické části oka	169
7.9.2	Refrakční vady oka	170
7.9.3	Biofyzika vidění	174
7.9.4	Přehled nejdůležitějších vyšetřovacích fyzikálních metod v oftalmologii	178
8	Rentgenové záření v medicíně	179
8.1	Rentgenové záření	179
8.1.1	Brzdné rentgenové záření	179
8.1.2	Charakteristické rentgenové záření	179
8.2	Rentgenový přístroj	180
8.2.1	Rentgenová lampa/rentgenka	181
8.2.3	Zdroje anodového a žhavicího napětí	182
8.2.4	Ovladač	182
8.2.5	Clony a další příslušenství	182
8.3	Absorpce rentgenového záření	184
8.4	Použití rentgenového záření v diagnostice	184
8.4.1	Skioskopie	185
8.4.2	Skiografie	185
8.4.3	Kontrastní látky	185
8.4.4	Rtg subtrakční radiografie	187
8.4.5	RTG mamografie	187
8.4.6	Rtg kostní denzitometrie	188
8.4.7	Počítačová tomografie	189

9 Ionizující záření v medicíně	191
9.1 Přirozená a umělá radioaktivita	191
9.2 Radioaktivní rozpad	192
9.2.1 Radioaktivní rovnováha	193
9.2.2 Radioaktivní řady	193
9.3 Druhy radioaktivního rozpadu	194
9.3.1 Rozpad α	194
9.3.2 Rozpad β	194
9.3.3 Spontánní štěpení	195
9.4 Druhy ionizujícího záření a jejich zdroje	195
9.4.1 Záporně nabité částice – elektrony	195
9.4.2 Neutrony	196
9.4.3 Elektromagnetické záření	196
9.4.4 Kosmické záření	196
9.4.5 Zdroje ionizačního záření	197
9.5 Interakce záření s hmotou	198
9.5.1 Interakce záření α	199
9.5.2 Interakce záření β	199
9.5.3 Interakce záření γ	199
9.6 Detekce ionizujícího záření	201
9.6.1 Ionizační komory	201
9.6.2 Geigerův-Müllerův počítač	201
9.6.3 Scintilační počítače	202
9.6.4 Základní dozimetrické veličiny	203
9.6.5 Osobní dozimetrie	204
9.7 Biologické účinky ionizujícího záření	205
9.7.1 Přímý a nepřímý účinek ionizujícího záření	205
9.7.2 Stochastické a deterministické účinky ionizujícího záření ...	205
9.7.3 Nemoc z ozáření	205
9.8 Zobrazovací metody	206
9.8.1 Pozitronová emisní tomografie	206
9.8.2 SPECT (Single photon emission computed tomography – jednofotonová emisní výpočetní tomografie)	207
9.9 Použití ionizujícího záření v terapii	207
9.9.1 Radioterapie	207
9.9.2 Leksellův gama nůž	209
9.9.3 Protonová radioterapie	209
Seznam použité literatury	210
Příloha	211
Mezinárodní soustava jednotek SI	211
Rejstřík	219
Souhrn	223
Summary	224

„Jak vzniká vynález? To všichni vědí, že je něco nemožné, a pak se objeví nějaký blázen, který neví, že je to nemožné, a udělá vynález“.

Albert Einstein

Předmluva

Co je to fyzika? Definice říká, že fyzika zkoumá obecné zákony neživé přírody. Mnoho lidí, a zejména těch ještě školou povinných, řekne, že fyzika je nepochopitelná nuda. Pro vědce je fyzika dobrodružstvím skrývajícím mnoho nepoznaného. Malíř, ač nepátrá po fyzikální podstatě svého obrazu, namaluje paprsky světla, fyzikálními znalostmi nepoznamenaný člověk řekne: hezké paprsky, estét řekne kýč, ale fyzik vidí Tyndallův jev. Podobně je to s hudbou, každému se líbí jiná, ale každý základní stavební kámen hudby – tón má svou fyzikální podstatu. Až budete studovat tuto knihu a vaše hlava se ocitne v prostoru temna, tak zkuste hledat kolem sebe to hezké, co kolem nás fyzika přináší a nebudete-li právě nic nacházet, podívejte se na titulní stránku a jen se chvíli dívejte, možná se vám mysl rozjasní. Tyndallův jev objevil Faraday v roce 1857, John Tyndall jej později popsal. Ať již byl, či nebyl popsán, stále je pro nás trochu mystický.

Tato kniha se na rozdíl od jiných učebnic lékařské biofyziky věnuje detailněji základům fyziky potřebným k pochopení fyzikálních procesů uplatňujících se v lidském organismu a fyzikálním jevům, které jsou podstatou diagnostických a vyšetřovacích metod. Je určena pro studenty vysokých škol lékařských a jiných medicínských oborů, tedy pro studenty oborů, jako jsou fyzioterapie, všeobecná sestra, intenzivní péče a dalších.

Závěrem bychom rádi poděkovali všem, kteří přispěli ke vzniku učebnice, ať již cennými radami, poskytnutím obrazových materiálů, či finančního příspěvku. Poděkování tedy patří Mgr. Vladimíru Vondráčkovi za nové poznatky ke kapitole zabývající se ionizujícím zářením a protonovou radioterapií. Společnosti PROTON THERAPY CENTER CZECH s. r. o. děkujeme za poskytnutí obrazové dokumentace, Ing. Zdeňku Šraierovi a Ing. Josefu Novotnému, Ph.D. za poskytnutí fotografií, za poskytnutí finanční podpory pak společnosti ICS a. s. a MT & Engineering spol. s r. o.

Poděkování za cenné rady a připomínky patří recenzentům prof. Ing. Peterovi Kneppovi, DrSc. a RNDr. Eugenovi Kvašňákovi, Ph.D.

Učebnice vznikla za finanční podpory Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky, registrační číslo: CZ.1.07/2.4.00/17.0114.

Praha říjen 2014

za autorský kolektiv Jaroslava Kyplová

1 Stavba hmoty

1.1 Elementární částice, formy hmoty

V přírodě rozlišujeme dvě formy existence hmoty: **částice** (korpuskule) a **silová pole**. Korpuskulární forma existuje podle fyzikálních podmínek (tlak, teplota) v některé ze čtyř fází (skupenství): pevné, kapalné, plynné a plazmatické. Pro jednotlivé druhy polí jsou charakteristické silové interakce. V současné době známe čtyři typy silových interakcí: gravitační a elektromagnetickou, běžně známé z našeho okolí, popisované klasickou fyzikou, a další dvě, silnou a slabou interakci, které díky rychlému poklesu s rostoucí vzdáleností existují pouze v mikrosvětě (při vzdálenostech převyšujících rozměry atomového jádra (10^{-15} m) jsou zanedbatelné). Jednotlivé formy hmoty se mohou vzájemně transformovat. Příkladem může být vznik kvanta pole, fotonu, při anihilaci elektronu s pozitronem, nebo vznik páru elektron-pozitron při absorpci fotonu záření gama.

Studium vlastností mikrosvěta (světa atomů) si vyžádalo vznik nové oblasti fyziky, tedy **kvantové fyziky**. Objekty mikrosvěta mají totiž nejen částicové, ale i vlnové vlastnosti. Tento korpuskulárně–vlnový dualismus se uplatňuje u všech objektů mikrosvěta. Hodnoty fyzikálních veličin, které jsou v makrosvětě (světě běžných rozměrů) popisované zákony klasické fyziky, se mohou měnit spojitě. V mikrosvětě se mění pouze nespojitě, ve skocích. Kromě toho bylo nutné pro popis vlastností základních částic hmoty zavést další fyzikální veličiny, se kterými se v klasické fyzice nesetkáváme, jako je např. spin, podivnost, barva nebo vůně, které s běžným významem těchto slov nemají ovšem nic společného.

Částicová forma hmoty je vytvářena dvěma skupinami elementárních částic. Je třeba konstatovat, že označení elementární částice má více významů. Přívlastek elementární znamená doslova základní. Ovšem s vývojem poznání se několikrát ukázalo, že částice považované za základní mají vnitřní strukturu. Proton nebo neutron, základní stavební částice atomových jader, byly dlouho považované za nedělitelné, ale standardní model ukazuje, že se skládají z kvarků. Proto je nyní pojem elementární spíše chápán jako označení. První skupina těchto částic zahrnuje **leptony** a druhá **kvarky**.

V obou skupinách můžeme rozlišit tři generace částic. První generace leptonů zahrnuje elektron a elektronové neutrino, druhá mion a mionové neutrino a třetí tauon a jeho neutrino. Podobně v každé generaci kvarků jsou dvě částice lišící se hodnotou veličiny zvané **vůně**. Kvark *u* (up) a *d* (down) vytvářejí první generaci, kvark *c* (charm) a *s* (strange) druhou a kvark *t* (top) a *b* (bottom) reprezentují třetí generaci. Kromě vůně je každý kvark charakterizován elektrickým nábojem, který nemá celočíselnou hodnotu náboje elektronu nebo protonu ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), jak je tomu u všech dosud známých částic, ale pouze $-1/3$ nebo $+2/3$ této hodnoty. Další vlastností kvarků je veličina (nešťastně) nazvaná barva, která s běžným pojmem barvy nemá nic společného. Každý kvark může být červený, zelený nebo modrý, tedy může mít tři různé hodnoty této veličiny. Jednotlivé typy kvarků mají velmi rozdílnou hmotnost, nejlehčí jsou kvarky první generace, *u* a *d*.

Veličiny mikrosvěta jsou nespojitě a jsou kvantovány, jejich hodnoty jsou určeny příslušným kvantovým číslem (viz kap. 1.3.1). Pro všechny leptony a kvarky je hodnota jejich spinu, vlastního momentu hybnosti, popsána spinovým kvantovým číslem $\pm 1/2$ (viz dále).

Z teorie kvantové fyziky vyplývá, že každá částice má svou antičástici. Některé vlastnosti antičástic jsou uvedeny v [tabulce 1.1](#).

Tab. 1.1 *Některé vlastnosti antičástic*

• stejná hmotnost jako částice
• stejná hodnota spinu (celočíselný nebo neceločíselný), ale s opačnou točivostí
• opačný magnetický moment (kladný nebo záporný)
• opačný elektrický náboj (kladný nebo záporný)

Je-li částice elektricky nabitá, pak je antičástice označena opačným znaménkem náboje, v případě jiných veličin (barva, vůně) je označena předponou anti-. Tak např. anti u , anti d v případě antičástic kvarku u nebo d . Pokud částice s antičásticí interagují, dojde k jejich zániku (tzv. anihilaci) a vznikají jiné částice nebo kvanta pole. Antičásticí elektronu je pozitron, antičásticí protonu je antiproton. Setká-li se například elektron s pozitronem, pak obě částice společně zanikají anihilací a jejich klidová hmotnost se transformuje na kvanta pole, fotony.

Kvarky jsou jediné elementární částice podléhající všem základním interakcím. Podle standardního modelu částicové fyziky nemají kvarky vnitřní strukturu a jsou spolu s leptony a intermediálními bozony „nejmenšími“ částicemi, ze kterých se skládá hmota. Celkový počet kvarků je 6×3 (barvy) $\times 2$ (antičástice) = 36. Ovšem všechny složitější systémy vytvářené kvarky a leptony (jiné částice, atomy, molekuly) v přírodě sestávají pouze z kvarků u a d . Existenci ostatních druhů kvarků a jejich antičástic můžeme pozorovat pouze v experimentech na urychlovačích částic. Kvarky není možné pozorovat jednotlivě, jsou vždy vázány silami silné interakce ve větších (hmotnějších) systémech, např. v nukleonech vytvářejících atomová jádra. Jejich existence byla dokázána pouze v experimentech ve velkých urychlovačích pracujících se srážkami vstřícných svazků těžších částic, např. protonů.

Kvarky mohou vytvářet složitější systémy, částice nazývané **hadrony** ([tab. 1.2](#)). Hadrony musí splňovat dvě podmínky. Musí mít celočíselný náboj (pokud mají elektrický náboj) a musí být „bezbarvé“, tedy bílé (vzhledem k veličině zvané barva). Tato podmínka může být splněna dvěma způsoby. V první skupině jsou hadrony vytvářeny dvěma kvarky, kvarkem a antikvarkem a částice této skupiny jsou nazývané **mezony**. Mezony mají celočíselnou hodnotu spinu (přesněji řečeno spinového kvantového čísla).

Tab. 1.2 *Hadrony (částice složené z kvarků musí mít celočíselnou hodnotu náboje a musí být bezbarvé)*

Částice	Počet kvarků	Vlastnosti	
mezony	2	kvark + antikvark, celočíselný spin	
baryony	3	poločíselný spin	proton = u (červený) + u (zelený) + d (modrý)
			neutron = u (červený) + d (zelený) + d (modrý)

Druhou skupinou hadronů jsou **baryony**. Baryony jsou vytvářeny třemi kvarky různé barvy (červený, zelený, modrý). Baryony mají neceločíselný spin. Například proton je vytvářen kombinací dvou kvarků u a jednoho kvarku d , neutron dvěma kvarky d a jednoho kvarku u (tab. 1.2).

Silové interakce polí všech typů mají výměnný charakter, tedy jsou realizovány výměnou kvant těchto polí. Základní Boseho částice reprezentují excitace těchto polí. Foton reprezentuje elektromagnetické pole, **gluony** (tří různých barev) silné pole, částice W^\pm a Z^0 slabé pole a zatím neprokázaný **graviton** pole gravitační. Dosah gravitačního pole (jehož zdrojem je hmotnost) a elektromagnetického pole (zdrojem je elektrický náboj) není omezen, zatímco dosah silné interakce (zdrojem je barva) je řádově 10^{-15} m a dosah slabé interakce (umožňující změnu vůně) je dokonce kolem 10^{-18} m. Ve vzdálenostech odpovídajících velikosti atomového jádra jsou relativní velikosti silné, elektromagnetické, slabé a gravitační interakce v poměru $1 : 10^{-3} : 10^{-15} : 10^{-40}$, tedy vzájemná odpudivá elektrická síla protonů je zhruba tisíckrát menší než jejich přitažlivá síla díky silné interakci. Na druhou stranu gravitační působení v jádru atomu nehraje žádnou roli, zatímco pro pohyb planet je silou určující.

Ze všech částic s nenulovou klidovou hmotností jsou stabilní pouze elektron a proton. Všechny ostatní částice jsou nestabilní. Např. volný neutron se zhruba po 15 minutách rozpadá na proton, elektron a elektronové antineutrino. Tento rozpad odpovídá přeměně kvarku d na kvark u .

Všechny částice můžeme rozdělit do dvou skupin podle hodnoty spinového kvantového čísla (viz kap. 1.3.1). Rozdíly se projevují ve statistickém chování (tím se myslí chování velkého množství částic jako souboru). Chování částic s neceločíselnou hodnotou ($\pm 1/2$, $\pm 3/2$, apod.) spinového čísla se řídí Fermiho-Diracovou statistikou, a proto se nazývají **fermiony**. Pro tyto částice je charakteristické, že v systému obsahujícím více těchto částic, žádná z nich nemůže být ve stejném kvantovém stavu. Do této skupiny patří např. leptony, kvarky nebo baryony. To 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, a Pauliho vylučovací princip. Částice s celočíselnou hodnotou spinu (0 , ± 1 , ± 2 apod.) se řídí Boseho-Einsteinovou statistikou a nazývají se **bozony**. Patří mezi ně všechny intermediální částice, které zprostředkují silové interakce

všech typů polí a také mezony. Pro tyto částice je charakteristické, že naopak mají tendenci zaujímat v systému obsahujícím více těchto částic identický stav.

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 . E_0 je energie svázaná s klidovou hmotností m_0 známým Einsteinovým vztahem:

$$E_0 = m_0 c^2, \quad [1.1]$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu. Je to nejvyšší rychlost, kterou se může šířit energie. Její velikost je přibližně $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Rychlost světla v látkovém prostředí je vždy menší než rychlost světla ve vakuu. Kinetická energie E_k je definována vztahem:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m}, \quad [1.2]$$

kde $p = mv$ je hybnost. Kinetická energie může nabývat pouze kladných hodnot, nebo může být nulová (při $v = 0$).

Hodnota potenciální energie E_p částice nebo tělesa závisí na tom, kde je zvolena její nulová hladina, tedy může být kladná, nulová nebo i záporná. 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 je potenciální energie v konečné vzdálenosti od zdroje pole 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 trajektorii 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 $1 \text{ J} = 1 \text{ C} \times 1 \text{ V}$ a náboj 1 C je roven celkovému náboji přibližně $6 \cdot 10^{18}$ elektronů, je převodní vztah $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Je tedy stejný jako převodní vztah mezi nábojem jednoho elektronu a coulombem.

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.

I.3 Kvantové jevy

Zákony klasické fyziky nepostačují pro popis jevů probíhajících v mikrosvětě atomů nebo molekul a při interakcích 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 například na vlastnostech světla. 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 Js. Podobně jako v teorii relativity je základní konstantou rychlost světla ve vakuu c , je v kvantové mechanice základní konstantou kvantum účinku $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Js, nazývané **Diracova konstanta**. Diracova konstanta je svázána s **Planckovou konstantou** $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js převodním vztahem $\hbar = h/2\pi$. Tyto konstanty vystupují v důležitých vztazích, které kvantitativně spojují částicový a vlnový charakter hmoty.

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

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad [1.3]$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu.

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 hodnotu energetické hladiny a čas jejího trvání. Tuto vlastnost popisuje tzv. **Heisenbergova relace neurčitosti**, která stanovuje, že velikost součinu chyb těchto konjugovaných veličin je větší nebo rovna Diracově konstantě. Pro současně určení hodnoty energie excitovaného stavu s chybou ΔE a doby trvání tohoto stavu s chybou Δt tedy platí

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \quad [1.4]$$

Díky malé hodnotě Diracovy konstanty nepředstavuje Heisenbergova relace neurčitosti žádné omezení pro popis těles v makrosvětě, na rozdíl od popisu systémů částic ve světě atomů. Její filozofický dopad na pojem poznatelnosti světa je však významný.

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, jehož tvar je závislý na celkové energii elektronu a na dalších parametrech, jako jsou orbitální moment hybnosti, magnetický moment a spin. Místo výskytu elektronu popsané rozdělením hustoty pravděpodobnosti výskytu se nazývá **orbital**. Jeho stav může být určen 4 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. Jeho existence je důsledkem řešení Schrödingerovy rovnice pro elektron v silovém poli jádra, které v nejjednodušším tvaru je dáno rovnicí (1.5). Hlavní kvantové číslo n 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 . Celková energie elektronu souvisí s jeho hlavním kvantovým číslem n vztahem:

$$E = -k \frac{1}{n^2}, \quad [1.5]$$

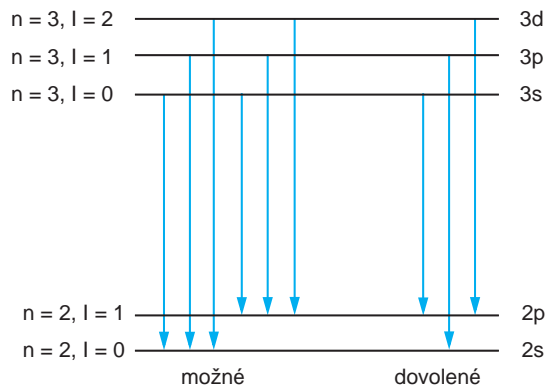
kde k je konstanta, jejíž hodnota je závislá na řadě jiných konstant (hmotnost elektronu, náboj atd.). Celková energie je tedy záporná. To znamená, že energie elektronu roste s rostoucí hodnotou hlavního kvantového čísla a je nejmenší pro $n = 1$, tedy základní stav.

- **Vedlejší (orbitální) kvantové číslo l** nabývá pro elektron ve slupce určené hodnotou hlavního kvantového čísla n hodnot $l = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$. Určuje tvar i symetrii elektronového oblaku. Je určeno kvantováním orbitálního momentu hybnosti. **Orbitální moment hybnosti** je vektorová veličina.
- **Magnetické kvantové číslo m** může nabývat hodnot $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm l$ a určuje směr vektoru orbitálního momentu hybnosti v prostoru, tedy polohu orbitálu 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. Velikost magnetického momentu je úměrná velikosti orbitálního momentu hybnosti, ale má opačnou orientaci v prostoru.

Elektron má též vlastní, vnitřní moment hybnosti, **spin**, který vyplývá z jeho rotačního pohybu a na jeho orbitálním momentu hybnosti je nezávislý. Proto má též určitý magnetický moment svázaný s tímto vnitřním momentem hybnosti. **Spinový magnetický moment** tohoto vnitřního momentu hybnosti může mít ve vnějším magnetickém poli, určeném velikostí a směrem vektoru magnetické indukce, dvě orientace. Ty jsou určeny dvěma hodnotami spinového magnetického kvantového čísla $\pm 1/2$. Složka vlastního momentu hybnosti elektronu, spinu, ve směru vnějšího magnetického pole je proto určena spinovým magnetickým číslem a její velikost je $\pm \hbar/2$.

Kvantový stav elektronu v atomu je tedy plně určen souborem 4 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 každý elektron v daném atomu musí tedy mít jiný soubor kvantových čísel.

Při přechodu elektronů z jedné energetické hladiny do jiné následkem absorpce nebo emise energie jsou možné ty přechody, při kterých se hlavní kvantové číslo může měnit libovolně, ale vedlejší kvantové číslo se může měnit jen o ± 1 . Takové přechody nazýváme „dovolené“, ostatní jsou tzv. „zakázané“ (obr. 1.1).



Obr. 1.1 Přechody elektronů z orbitalu s $n = 3$ do orbitalu s $n = 2$

1.4 Emisní spektra vodíku

Nejjednodušším systémem složeným z nukleonů a elektronů je atom vodíku. V něm se pohybuje jeden elektron v silovém poli jednoho protonu. Vzdálenost od jádra, ve které se elektron v základním energetickém stavu vyskytuje s největší pravděpodobností, se nazývá **Bohrův poloměr** a činí $5,29 \cdot 10^{-11}$ m.

Vyšší energetický stav elektronu je časově nestabilní. Elektron rychle přechází do nižšího nebo základního energetického stavu za současné emise fotonu. Přejde-li elektron ze stavu s energií E_k do stavu s energií E_n , $k > n$, pak je emitováno kvantum záření o energii rovné rozdílu energie těchto hladin.

Frekvence nebo vlnová délka tohoto záření je dána rozdílem těchto energetických hladin. Vzhledem k diskrétním hladinám energie může atom emitovat záření pouze o zcela určitých energiích (frekvencích, vlnových délkách). Proto je spektrum emitovaného záření nespojité, čárové. Soubor čar spektra odpovídajících přechodům z vyšších hladin na zcela určitou hladinu nižší se nazývá série.

Emisní čáry spektra atomů vodíku odpovídající přechodům na základní energetickou hladinu s $n = 1$ (tzv. Lymanovy série) leží v oblasti ultrafialové části spektra. Přechody elektronů na energetickou hladinu s $n = 2$ (tzv. Balmerova série) emitují záření ve viditelné části spektra. Spektrální čáry odpovídající přechodům na hladinu s $n = 3$ a vyšším pozorujeme v oblasti infračerveného světla.

1.5 Struktura elektronového obalu těžších atomů

Elektronová struktura atomu s více elektrony je určena dvěma základními pravidly:

1. Systém částic je stabilní, jestliže jeho celková energie je minimální.
2. V každém jednotlivém kvantovém stavu může v atomu existovat jen jeden elektron.

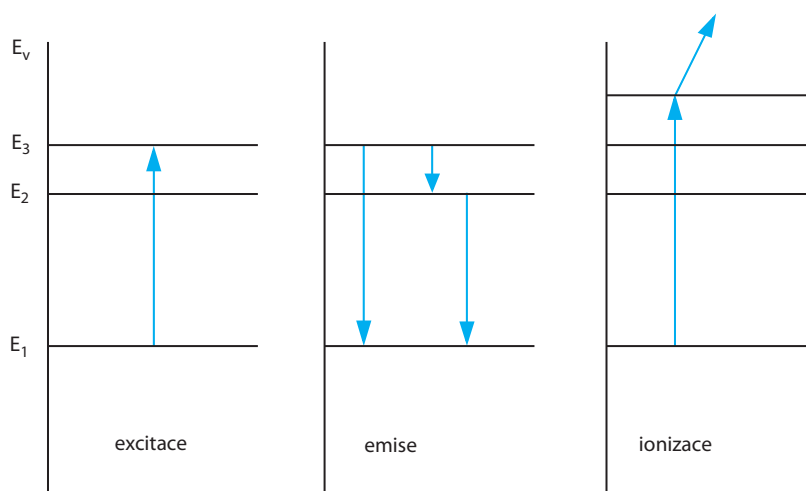
Podobně jako v atomu vodíku je stav elektronu v atomovém obalu těžších prvků určen kvantovými čísly. Všechny elektrony se stejným hlavním kvantovým číslem se

vyskytují zhruba ve stejné vzdálenosti od jádra a tudíž interagují v podstatě se stejným elektrickým polem a mají podobné energie. Říkáme, že obsazují stejnou slupku označenou písmenem K , L , M .

Kromě Pauliho vylučovacího principu se při obsazování elektronových slupek uplatňuje tzv. **Hundovo pravidlo**. To určuje, že elektrony v atomu obecně zůstávají nespárované, tj. mají rovnoběžné spiny (neboť spin je vektorovou veličinou). Důvodem je vzájemné odpuzování elektronů v atomu. Elektrony s paralelními spiny jsou tudíž v prostoru více navzájem odděleny, než kdyby byly spárované, a toto uspořádání, které má nižší energii, je proto stabilnější. Např. v atomu železa má pět ze šesti elektronů podslupky d rovnoběžné spiny (tzv. nepárové elektrony), takže atom železa má velký výsledný magnetický moment, který způsobuje jeho feromagnetické vlastnosti.

1.6 Excitace, emise a ionizace, vazebná energie elektronu

Stav atomu odpovídající jeho minimální energii se nazývá **základní**. Stavům, které mají vyšší energii říkáme **vybuzené, excitované stavy**. Do excitovaného stavu se elektron dostane absorpcí energie, pohlcením fotonu. Může absorbovat pouze takovou energii, která odpovídá rozdílu základní a některé vybuzené hladiny (obr. 1.2). To vysvětluje, proč jsou absorpční spektra plynů čárová. Atom setrvává v excitovaném stavu krátkou dobu (10^{-8} až 10^{-5} s). Při přechodu do některé z nižších energetických hladin je vyzářen rozdíl energií ve formě jednoho nebo více fotonů podle toho, uskuteční-li se přechod přímo na základní hladinu nebo po etapách. Např. při situaci odpovídající obrázku 1.2 (emise) může být při přechodu zpět na základní energetickou hladinu E_1 emitován jeden foton o energii $E_3 - E_1$, nebo dva fotony o energiích $E_3 - E_2$ a $E_2 - E_1$.



Obr. 1.2 Schéma excitace, emise záření a ionizace (popis v textu)

Při těchto přechodech se elektron může dostat do takové energetické hladiny, ze které je přechod do základního stavu tzv. „zakázán“, to znamená, že má malou pravděpodobnost. V tomto tzv. metastabilním stavu pak může setrvat podstatně delší dobu. Deexcitace je vždy provázána emisí záření. Relativní šířka spektrální čáry je vnitřní vlastností atomu, přesněji řečeno těch energetických hladin, které se na přechodu zúčastní. Přechody elektronů z vyšších na nižší energetické hladiny jsou podstatou **luminiscence**.

Energie vazby částice v systému je obecně práce, kterou musí vnější síly vynaložit, aby tuto částici vzdálily ze systému. V tomto smyslu je vazebná energie elektronu v atomu rovna energii, kterou musíme elektronu dodat, abychom jej vzdálili z dosahu působení elektrostatických sil jádra do místa nulové hladiny („nekonečna“), kde tyto síly již nepůsobí. Rovnice 1.5 ukazuje, že celková energie elektronu nacházejícího se v poli jádra je záporná a největší (nulové) hodnoty nabývá pro $n = \infty$.

Energie vazby elektronu v poli jádra je číselně rovna jeho celkové energii, ale je kladná, neboť jejich součet musí být nula. Vazebnou energii nazýváme též **výstupní prací** nebo **ionizačním potenciálem**. Je to energie, kterou je nutno dodat na odtržení elektronu z atomu. U atomu s více elektrony existují různé hodnoty ionizačních energií, neboť elektrony mají v různých energetických hladinách různé vazebné energie. Pochopitelně nejmenší vazebnou energii mají valenční elektrony, které jsou ve vnější slupce nejvíce vzdálené od jádra.

Ionizací vzniká z elektricky neutrálního atomu kladný iont, neboť převládá kladný náboj jádra. Ionizací se též zvýší celková energie soustavy jádro–elektrony (ubyla záporná energie vyraženého elektronu). Byl-li vyražen elektron z některé z vnitřních slupek, atom se zbavuje energie postupným zaplňováním nižších energetických hladin elektrony z hladin vyšších při současně emisi energetických rozdílů ve formě elektromagnetického záření. Pokud tento energetický rozdíl odpovídá energii viditelného světla hovoříme o **fluorescenčním záření**.

Elektrony jsou v atomu udržovány přitažlivými silami kladného jádra. Toto silové pole přitahuje také volný elektron, jestliže se nachází v blízkosti atomu. Tento elektron je však současně odpuzován ostatními elektrony obalu atomu.

Změna, která nastane v obalu těžšího atomu po absorpci energie, je závislá na její velikosti. Je-li absorbovaná energie malá, řádově eV, dochází k excitaci nebo ionizaci slabě vázaných elektronů. Elektrony vnitřních slupek jsou u těžkých atomů vázány mnohem silněji, jejich vazebné energie pro slupku K jsou řádově až desítky keV a více. Jsou-li excitovány nebo ionizovány elektrony těchto vnitřních slupek těžkých atomů, jsou pak při deexcitaci emitována kvanta záření o energii (vlnové délce) odpovídající rentgenovému záření. Obecně může být excitovaným atomem emitováno záření, jehož vlnové délky přísluší oblastem infračerveného, viditelného, nebo ultrafialového světla i rentgenového záření, podle velikosti rozdílu energetických hladin při deexcitaci.

1.7 Vlnově mechanický model atomu

V kvantové mechanice, která vychází z představ o vlnových vlastnostech částic (viz část 1.3), je stav elektronu v atomu popsán vlnovou funkcí danou Schrödingerovou rovnicí. Řešení této rovnice vede k závěru, že stacionární stavy jsou pouze ty, kterým odpovídá stojaté vlnění. Elektron se podle těchto představ vyskytuje ne na dráhách,

ale v prostorových útvarech, které mohou mít různé tvary. Tyto kmity se skládají ve výsledné vlnění. Výsledné vlnění se může šířit v atomu jednak radiálně, jednak tangenciálně v uzavřených drahách kolem jádra, kdy se po obvodu střídavě vytvářejí kmity a uzly. Tvar „oblaku“ elektronu, orbitalu, pak závisí na tom, kolik z celkového počtu vlnových délek stojatého vlnění je rozloženo po obvodu a kolik radiálně.

Hlavní kvantové číslo n udává počet vlnových délek stojatého vlnění v atomu, vedlejší kvantové číslo l pak udává počet vlnových délek připadajících na obvod. Nejmenší možné vedlejší kvantové číslo je $l = 0$. V tomto případě nepřipadá na oběh kolem jádra žádná vlna, po obvodu se nestřídají kmity a uzly, hustota oblaku je po obvodu všude stejná. Stavům s ($l = 0$) tedy odpovídá kulová symetrie orbitalu, který pojme dva elektrony s magnetickými spinovými kvantovými čísly $\pm 1/2$.

1.8 Jádro atomu

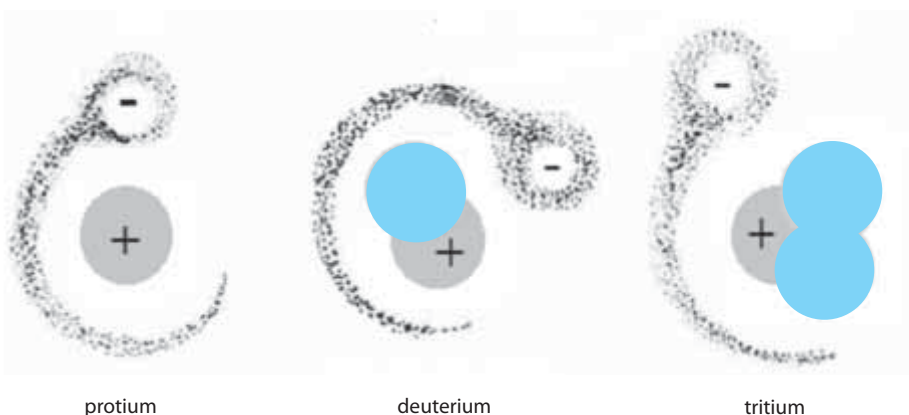
Jádra atomů jsou tvořena nukleony, tj. protony a neutrony. Mezi základní charakteristiky jádra patří: **atomové číslo Z** , které udává počet protonů v jádře, **hmotnostní číslo A** , které udává celkový počet nukleonů, a **neutronové číslo N** , udávající počet neutronů. Tedy platí $A = Z + N$.

Jelikož jsou atomy elektricky neutrální, udává atomové číslo také počet elektronů v elektronovém obalu neionizovaných atomů.

V jádře je soustředěna převážná část hmotnosti atomu, neboť hmotnost protonu je asi 1840krát větší než hmotnost elektronu. Atomová hmotnost se obvykle vyjadřuje v hmotnostních jednotkách. Jedna hmotnostní jednotka (*h.j.*) je $1/12$ hmotnosti izotopu uhlíku ^{12}C .

Izotopy nazýváme atomy se stejným nábojem, ale různou hmotností jádra (stejná Z , různá A). V přírodě se vyskytuje přibližně 280 stabilních izotopů (obr. 1.3). Spolu s uměle vyrobenými převyšuje jejich počet 1100.

Izobary jsou atomy, jejichž jádra obsahují stejný počet nukleonů, ale mají rozdílný náboj (různá Z , stejná A).



Obr. 1.3 Izotopy vodíku (modely atomů)