

Драгутин Т. Михаиловић  
Дарко Капор

# БИОФИЗИКА

за студенте Смера ветеринарске медицине  
Пољопривредног факултета у Новом Саду



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ

---

НОВИ САД, 2017.

## **ЕДИЦИЈА ОСНОВНИ УЏБЕНИК**

### **Оснивач и издавач едиције**

**Пољопривредни факултет, Нови Сад,**  
Трг Доситеја Обрадовића 8, 21000 Нови Сад

### **Главни и одговорни уредник едиције**

**Проф. др Недељко Тица, редовни професор**  
Декан Пољопривредног факултета у Новом Саду

### **Чланови комисије за издавачку делатност**

**Др Љиљана Нешић, ванредни професор, председник**

**Др Бранислав Влаховић, редовни професор, члан**

**Др Милица Рајић, редовни професор, члан**

**Др Нада Плавша, ванредни професор, члан**



**Аутори**

**Проф. Драгутин Т. Михаиловић**

Пољопривредни факултет у Новом Саду, Депарتمان за ратарство и повртарство

**Проф. Дарко Капор**

Природно-математички факултет у Новом Саду

**Главни и одговорни уредник**

**Проф. др Недељко Тица**

Декан Пољопривредног факултета у Новом Саду

**Техничко уређење**



**Лектор**

**Јелица Недић**

**Рецензенти**

**Проф. Агнеш Капор**

**Проф. Илија Арсенић**

**Издавач**

Универзитет у Новом Саду, Пољопривредни факултет у Новом Саду

Забрањено је прештампавање и фотокопирање. Сва права задржава издавач.

**Штампање одобрила**

Комисија за издавачку делатност, Пољопривредни факултет у Новом Саду

**Тираж**

20 књига

**Место и година штампања**

Нови Сад, 2017.

## ПРЕДГОВОР

Физика као основна природна наука је данас „уткана” у све природне и техничке науке, а преко биологије знатно и у медицину у најширем смислу. Стога постаје јасно да је физика веома потребна и студентима ветеринарске медицине. Конкретно, овај уџбеник намењен је пре свега студентима Смера ветеринарске медицине Пољопривредног факултета Универзитета у Новом Саду. Ми као аутори смо, међутим, уложили велики напор да напишемо текст који може да се користи у низу курсева сличног обима. То смо покушали да урадимо тако што је физика која се излаже потпуно универзална, а примери дати у уџбенику су везани за биофизику и то ону која је потребна студентима поменутог смера. У уџбенику смо следили план и програм датог курса, уз мања одступања. Основно одступање је чињеница да смо сматрали да курс није неопходно започети елементима системологије, већ су сви потребни појмови из ове области објашњени код термодинамике. Такође смо посебну пажњу посветили геометријској оптици која се углавном обрађује на вежбама. Оваквим приступом имали смо намеру да направимо чвршћу везу између предавања и вежби. И још нешто око назива уџбеника. Можда би прикладнији назив за овај уџбеник био „Општа физика са основама биофизике”, али смо поштовали правило да он носи име предмета ком је намењен. У том смислу морали смо да учинимо и неке уступке.

Излагање следи одређену логику, од макроскопског ка микроскопском, при чему се полази од чињенице да су студенти чули основне идеје физике на нивоу основне или средње школе, па је неке детаље могуће изоставити. Почиње се са биомехаником, и то са силом као узрочником кретања, а онда се ограничава на силе у равнотежи, тј. на статику, јер је она битна за разумевање низа појава у животињском свету, пре свега за функционисање локомоторних система. Осцилације и таласи су следећа већа целина, зато што се на примеру механичких таласа уводе појмови који ће касније бити потребни у електромагнетизму. Уз ову област је тесно везана и наука о звуку – акустика. Следи механика флуида, који су неопходни за пренос супстанције кроз организме.

Термодинамика се бави управо приступом преко система, тј. објашњава процесе претварања различитих видова енергије (понајвише топлотне) у рад и обрнуто, укључујући ту и пренос топлоте. Већ ту се постепено комбинује макроскопски и микроскопски приступ јер низ макроскопских појава објашњава микроскопски, тј. на основу понашања елемената грађе супстанције, конкретније понашањем молекула у гасовима.

Изузетно значајну улогу у функционисању ћелије имају наелектрисане честице – јони. Зато је детаљно обрађен електромагнетизам, који укључује електростатику, тј. наелектрисања у мировању а потом пренос наелектрисања, тј. струје у чврстим телима и на крају магнетизам. Посебан део је посвећен кретању наелектрисања у флуидима (електролитичкој дисцијацији и електролизи), транспортним појавама које то прате и, коначно, транспорту јона кроз ћелијску мембрану. Примећује се даље постепено спуштање на све нижу скалу у грађи материје и после овога наступа физика ХХ века, која почиње са основним идејама о атомима, па се онда иде корак даље и говори о квантној природи материје како би се припремио терен за савременија достигнућа. Почиње се са Боровом теоријом атома, па се прелази на сложеније атоме, молекуле и кристале. У овом делу се обрађују и молекулски спектри и ласери.

Онда следи проучавање електромагнетних таласа, које укључује како видљиву светлост, тако и делове спектра недоступне нашем оку, са посебним нагласком на рендгенске зраке (Х-зраке) због њихове важне примене у ветерини. Као специјалан случај апроксимативног третмана

светлости, без узимања у обзир њене таласне природе, а битан за праксу, разматра се геометријска оптика.

Силазећи још дубље у грађу материје, стиже се до језгра атома, дакле нуклеарне физике. Поред радиоактивности, прате се и нуклеарне реакције укључујући фисију и фузију. Посебна пажња је посвећена дејству јонизујућег зрачења, проблемима заштите и детекторима.

Уџбеник је писан језгровито, садржи основне информације и представља допуну, а не замену за предавања.

У жељи да проширимо опште знање читалаца, навели смо код свих великих физичара годину рођења и смрти. Нагласимо да су сви наведени научници који су деловали у XX веку нобеловци, изузев Николе Тесле. Разлози због којих је Нобелов комитет „заобишао” Теслу остају и данас предмет дискусије у научној заједници и шире.

Слике и илустрације представљају неодојиви део једног оваквог уџбеника. На неким местима је боље имати добру слику него и најбољи текст. Овде смо имали низ дилема, али смо одлучили да сами урадимо слике и илустрације, полазећи од материјала пронађеног на интернету. То смо урадили тако што смо га редизајнирали до мере која не оштећује права аутора, који су често били и анонимни. Изузетак представљају илустрације у делу уџбеника који се односи на оптику, преузете из бележака проф. Илије Арсенића. Колегиница др Ана Фирањ Сремац и колега др Гордан Мимић су креативно помогли ауторима око неких слика. Та помоћ није била мала и ми им свима на овом месту захваљујемо.

Код Регистра појмова начинили смо преседан у односу на уобичајени приступ и појам лоцирали преко главе, поглавља или потпоглавља уместо странице, сматрајући да тако одмах читаоцу дајемо основну информацију. Код навођења Коришћене и препоручене литературе, сматрали смо да је у данашње време врло сврсисходно упоредо са штампаним текстовима понудити читаоцима и сајтове на којима се налазе предавања из дате области за друге образовне установе.

Рецензентима проф. Агнеш Капор и проф. Илији Арсенићу дугујемо дубоку захвалност. Својим стрпљивим читањем текста далеко су превазишли и професионални и колегијални део посла, практично учествујући у креирању књиге, не дозвољавајући да њен концепт буде напуштен и у најмањем сегменту. За ту врсту ригорозности и стрпљења посебно смо им захвални. Делове уџбеника који се односе на главе „Радијациона биофизика” и „Јонизујуће зрачење” прочитао је проф. Миодраг Крмар дајући примедбе од суштинског значаја на којима смо му захвални. Госпође Јелица Недић и Оливера Цибула су обављајући посао лектора и коректора изузетно савесно и сигурно допринеле језичком квалитету излагања, што је данас доста занемарен аспект уџбеника. Поред тога, помогле су да се избегну грешке, а ако их још увек има, оне иду на душу искључиво ауторима. Др Драгана Стишовић и др Михаило Луковић су својом тихом подршком много допринели да овај текст буде дат на увид читаоцу.

У Новом Саду, јануара 2017. год.

Драгутин Т. Михаиловић и Дарко Капор

## САДРЖАЈ

	страна
<b>ПРЕДГОВОР</b>	5
<b>САДРЖАЈ</b>	7
<b>1. БИОМЕХАНИКА</b>	11
1.1 КРЕТАЊЕ И СИЛЕ	12
1.1.1 Материјална тачка и круто тело	12
1.1.2 Врсте кретања у биомеханици	12
1.1.3 Сила	15
1.1.4 Спрег сила	15
1.1.5 Момент силе	16
1.1.6 Врсте равнотеже	18
1.2 ПОЛУГА	21
1.2.1 Полука	21
1.2.2 Врсте простих полука	22
Питања и задаци	26
<b>2. ОСЦИЛАЦИЈЕ И ТАЛАСИ</b>	27
2.1 ОСЦИЛАЦИЈЕ	28
2.1.1 Просто хармонијско осциловање	28
2.1.2 Једначина простог хармонијског осциловања	29
2.1.3 Енергија осциловања	31
2.2 ТАЛАСИ	33
2.2.1 Таласи	33
2.2.2 Основне величине потребне за описивање таласног кретања	34
2.2.3 Једначина таласа	35
2.2.4 Суперпозиција таласа	37
Питања и задаци	42
<b>3. АКУСТИКА</b>	43
3.1 ОСНОВИ АКУСТИКЕ	44
3.1.1 Карактеристике звука	44
3.1.2 Објективне карактеристике звука	44
3.2 СУБЈЕКТИВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЗВУКА. УЛТРАЗВУК	47
3.2.1 Субјективне карактеристике звука	47
3.2.2 Ултразвук	50
Питања и задаци	52
<b>4. БИОМЕХАНИКА ФЛУИДА</b>	53
4.1 ИДЕАЛНИ ФЛУИДИ	54
4.1.1 Стационарно струјање идеалне течности	54
4.1.2 Једначина континуитета	55
4.1.3 Бернулијева једначина	56
4.2 ВИСКОЗНИ ФЛУИДИ	58
4.2.1 Протицање вискозне течности	58
4.2.2 Стоксов закон	60
4.2.3 Ламинарно и турбулентно струјање	61

4.3 ПОВРШИНСКЕ ПОЈАВЕ	63
4.3.1 Површински напон	63
4.3.2 Притисак испод површине течности	64
4.3.3 Квашење. Капиларне појаве	65
4.3.4 Гасна емболија	66
4.3.5 Мерење крвног притиска код животиња	67
Питања и задаци	69
<b>5. ТЕРМОДИНАМИКА</b>	72
5.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ПРВИ ПРИНЦИП ТЕРМОДИНАМИКЕ	72
5.1.1 Кретање молекула	72
5.1.2 Топлота и рад	73
5.1.3 Количина топлоте	74
5.1.4 Појам и дефиниција система	74
5.1.5 Први принцип термодинамике	75
5.2 ТЕРМОДИНАМИЧКИ ПРОЦЕСИ	76
5.2.1 Различити процеси у термодинамици	76
5.2.2 Интензитет базалног метаболизма	79
5.2.3 Други принцип термодинамике	79
5.3. ПРЕНОС ТОПЛОТЕ	81
5.3.1 Пренос топлоте провођењем (кондукцијом)	81
5.3.2 Пренос топлоте зрачењем (радијацијом)	82
5.3.3 Пренос топлоте струјањем (конвекцијом)	82
5.3.4 Шта се дешава у телу животиња у погледу преноса топлоте?	83
Питања и задаци	84
<b>6. ЕЛЕКТРИЦИТЕТ И МАГНЕТИЗАМ</b>	85
6.1 ЕЛЕКТРОСТАТИКА	86
6.1.1 Кулонов закон	86
6.1.2 Електростатичко поље	87
6.1.3 Електростатичко поље више наелектрисања	88
6.1.4 Потенцијал електростатичког поља	88
6.1.5 Електрични дипол	89
6.1.6 Кондензатори	90
6.2. ЈЕДНОСМЕРНА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА	93
6.2.1 Једносмерна струја	93
6.2.2 Јачина струје	94
6.2.3 Омов закон	95
6.2.4 Електрични отпор	96
6.2.5 Везивање отпорника и инструмената у струјном колу	98
6.2.6 Ослобађање топлоте у проводнику са током	101
6.3 МАГНЕТИЗАМ	102
6.3.1 Магнетна индукција	103
6.3.2 Магнетно поље праволинијског проводника	104
6.3.3 Магнетни дипол	105
6.3.4 Магнетне особине средине	105
Питања и задаци	106



<b>7. ТРАНСПОРТНЕ ПОЈАВЕ</b>	109
7.1 ЕЛЕКТРОЛИТИЧКА ДИСОЦИЈАЦИЈА И ЕЛЕКТРОЛИЗА	110
7.1.1 Електролити и електролитичка дисоцијација	110
7.1.2 Фарадејеви закони електролизе	112
7.2 ДИФУЗИЈА, ОСМОЗА И ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКЕ ПОЈАВЕ	114
7.2.1 Дифузија и осмоза	114
7.2.2 Електрокинетичке појаве	116
7.3 ТРАНСПОРТ СУПСТАНЦИЈЕ КРОЗ ЋЕЛИЈСКУ МЕМБРАНУ	119
7.3.1 Структура ћелијске мембране	119
7.3.2 Пасивни транспорт	120
7.3.3 Активни транспорт	122
7.3.4 Акциони потенцијал	123
Питања и задаци	125
<b>8. ОСНОВЕ АТОМСКЕ БИОФИЗИКЕ</b>	127
8.1 АТОМ И ЊЕГОВА СТРУКТУРА	128
8.1.1 Основне интеракције у природи	128
8.1.2 Атоми и интеракције у атомима	129
8.2 КВАНТНА ПРИРОДА МАТЕРИЈЕ	131
8.2.1 Атомски спектри и спектроскопија	131
8.2.2 Планкова квантна хипотеза. Фотоелектрични ефекат	133
8.2.3 Фотон	135
8.2.4 Таласно-честични дуализам	135
8.3. БОРОВ МОДЕЛ. ЕЛЕКТРОНСКИ ПРЕЛАЗИ У АТОМУ	136
8.3.1 Модел атома по Бору	136
8.3.2 Електронски прелази у атому	137
Питања и задаци	140
<b>9. ОСНОВЕ МОЛЕКУЛСКЕ БИОФИЗИКЕ. ЛАСЕРИ</b>	143
9.1 МОЛЕКУЛИ И ХЕМИЈСКЕ ВЕЗЕ	144
9.1.1 Вишеелектронски атоми	144
9.1.2 Типови молекула по хемијским везама	145
9.2 МОЛЕКУЛСКИ СПЕКТРИ	149
9.2.1 Молекулски спектри	149
9.3 ЛАСЕРИ	151
9.3.1 Време живота побуђеног стања. Фосфоресценција	151
9.3.2 Ласери	152
Питања и задаци	154
<b>10. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНО ЗРАЧЕЊЕ</b>	155
10.1 ЕЛЕКТРОМАГНЕТНО ЗРАЧЕЊЕ: ОСНОВНИ ПОЈМОВИ	156
10.1.1 Дефиниција електромагнетног зрачења	156
10.1.2 Спектар електромагнетног зрачења	157
10.1.3 Оптички део електромагнетног спектра	159
10.2 X-ЗРАЧЕЊЕ (РЕНДГЕНСКО ЗРАЧЕЊЕ)	161
10.2.1 Настајање и спектар X-зрачења	161
10.2.2 Спектар X-зрачења	162
10.2.3 Интеракција X-зрачења са супстанцијом	165

10.2.4 Слабљење X-зрачења	166
10.2.5 Примена X-зрачења	168
Питања и задаци	170
<b>11. ОПТИКА</b>	171
11.1 ПРЕЛАМАЊЕ СВЕТЛОСТИ	172
11.1.1 Закон преламања светлости	172
11.1.2 Примери преламања светлости	174
11.2 ТАНКА СОЧИВА	176
11.2.1 Карактеристике танког сочива	176
11.2.2 Конструкција лика код танког сочива	178
11.2.3 Једначина танког сочива	181
11.3 ОПТИЧКИ ИНСТРУМЕНТИ И ЊИХОВИ НЕДОСТАЦИ	182
11.3.1 Лупа	182
11.3.2 Микроскоп	183
11.3.3 Функционисање ока код животиња	183
11.3.4 Недостаци сочива	184
Питања и задаци	186
<b>12. РАДИЈАЦИОНА БИОФИЗИКА</b>	187
12.1 ЈЕЗГРО АТОМА: ОСНОВНИ ПОЈМОВИ	188
12.1.1 Језгро атома	188
12.1.2 Дефект масе језгра и енергија везе	189
12.1.3 Стабилност језгра атома	190
12.2 РАДИОАКТИВНОСТ	192
12.2.1 Радиоактивни распад и закон који га описује	192
12.2.2 Врсте радиоактивног распада	194
12.3 НУКЛЕАРНЕ РЕАКЦИЈЕ	199
12.3.1 Основни појмови о нуклеарним реакцијама	199
12.3.2 Вештачки радиоактивни изотопи (радиоизотопи)	200
12.3.3 Нуклеарна фисија	203
12.3.4 Нуклеарна фузија	204
Питања и задаци	206
<b>13. ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ</b>	207
13.1 ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ: ОСНОВНИ ПОЈМОВИ	208
13.1.1 Јонизујуће зрачење	208
13.1.2 Извори јонизујућег зрачења	209
13.1.3 Интеракција јонизујућег зрачења са супстанцијом и појам дозе	210
13.2 ДЕТЕКЦИЈА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА	211
13.2.1 Детектори јонизујућег зрачења	211
13.2.2 Дозиметри јонизујућег зрачења	213
13.3 ДОЗИМЕТРИЈА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА И ДЕЈСТВО ТОГ ЗРАЧЕЊА НА ЖИВА БИЋА	215
13.3.1 Дозиметрија јонизујућег зрачења	215
13.3.2 Биолошки ефекти јонизујућег зрачења	217
Питања и задаци	218
<b>РЕГИСТАР ИМЕНА И ПОЈМОВА</b>	219
<b>КОРИШЋЕНА И ПРЕПОРУЧЕНА ЛИТЕРАТУРА</b>	235

# 1. БИОМЕХАНИКА



## 1.1 КРЕТАЊЕ И СИЛЕ

Грана физике која се бави кретањем и његовим узрочником – силом назива се **механика**. Област механике која се бави кретањем без обзира на узрок је **кинематика**, а када се узме у обзир и сила онда је то **динамика**. Специјалан случај, када на тело делују силе а оно се не креће (у равнотежи је), припада **статици**. Механика је заједно са оптиком била прва област физике коју су људи почели да проучавају управо због очигледности и применљивости њених појава.

Када се жива бића третирају као механички системи, та област се назива **биомеханика** и она је предмет овог поглавља.

### 1.1.1 МАТЕРИЈАЛНА ТАЧКА И КРУТО ТЕЛО

Материјална тачка описује **тело коначне масе чије димензије и облик могу да се занемаре у односу на дужину путање којом се креће**. Веома је погодна апроксимација за многе проблеме у кинематици, рецимо када пратимо кретање неког возила на путу дугом стотину километара.

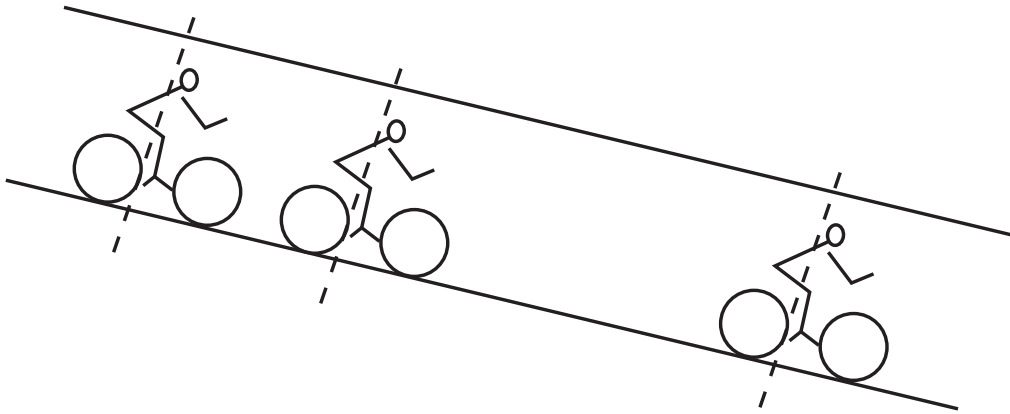
Постоје ситуације, поготову када на тело дејствује сила, када се ни његове димензије ни облик не могу занемарити. Обично тада морамо узети у обзир и еластичне особине тела. Најједноставнија, а за многе сврхе и довољна апроксимација је **круто тело**, тј. **тело које се не деформише под дејством спољашњих сила**.

### 1.1.2 ВРСТЕ КРЕТАЊА У БИОМЕХАНИЦИ

Кретања крутог тела у биомеханици се по својој природи генерално могу поделити на: 1) транслаторна, 2) ротациона и 3) сложена.

## Транслаторно кретање

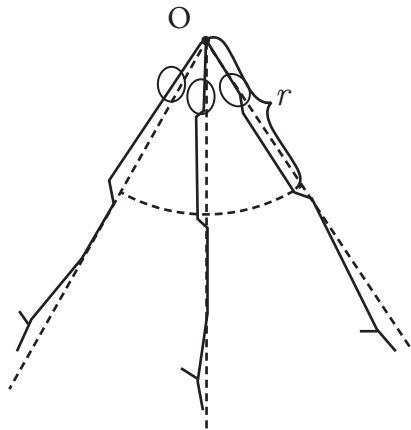
То је кретање код кога се све тачке тела крећу истом брзином по паралелним правим путањама (сл. 1.1).



Слика 1.1 Транслаторно кретање

## Ротационо кретање

**Ротационо (или кружно) кретање** је такво кретање тела при којем се свака тачка тела креће по кружници чији центар лежи на правој коју називамо оса ротације (сл. 1.2). Када се ради о телу у простору (тродимензионална тела), онда се све тачке крећу по међусобно паралелним равнима, а кретање једне тачке врши се увек у истој равни.



Слика 1.2 Ротационо кретање

Ако је у питању кретање **сложено** од translације и ротације, треба водити рачуна да се помераји а и брзине морају третирати као **вектори**.

## Математичка дијресија 1

### Скалари и вектори

У нашем ироучавању физике срећаћемо две врсте величина: **скаларе** и **векторе**. Скаларима називамо физичке величине које су одређене једним бројем који је најчешће именован – има јединицу (маса, температура, притисак итд.).

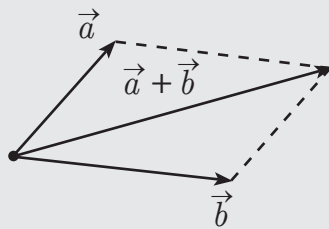
Вектори су физичке величине које су одређене својим интензитетом, правцем и смером (брзина, сила, моменти силе, итд.). Уобичајено је да се вектор приказује стрелицом. Права на којој стрелица лежи одређује правац вектора; њена дужина представља интензитет у одређеној размери, а стрелица показује смер вектора (сл. 1.3).



Слика 1.3 Геометријско приказивање вектора

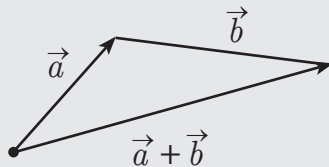
### Сабирање вектора

Постоје два иошћуно равнойравна иосћуика сабирања вектора. Један се сасћоји у консћруисању **паралелограма** чије су сћранице вектори које иреба сабраћи. Онда је њихов збир вектор који иолази из заједничкој иочетћка ова два вектора, а завршава се у насћрамном имену паралелограма (сл. 1.4а).



Слика 1.4.а Сабирање вектора по правилу паралелограма

Друга моћућност је ишв. „настављање” вектора, ијј. иочетћак једној вектора се доводи на крај другој и онда се слободни крајеви сћајају (сл. 1.4б).



Слика 1.4.б Сабирање вектора „настављањем”

### 1.1.3 СИЛА

Узрочник промене стања кретања тела је **сила** (промена стања кретања може бити полазак из мировања, промена правца или величине брзине током кретања и заустављање тела). Јасно је да се таква промена може десити само под дејством других тела, па се често каже да је **сила мера међудејства (интеракције)**.

Силу као вектор обележавамо са  $\vec{F}$ , а када се ради само о њеном интензитету пишемо  $F$  (надаље ћемо са векторима поступати на овај начин). Јединица за интензитет силе је њутн [1 N]. Када сила делује на тело коначне величине (није материјална тачка), онда је битан податак и тачка у којој сила делује на тело, тзв. **нападна тачка силе**. На тело може деловати више сила и ако их векторски саберемо добијамо њихову **резултанту**.

Једно од битних питања у механици, а поготову у биомеханици, јесте да се размотри ситуација када на тело делује више сила а оно ипак мирује. Тада се каже да је тело у **равнотежи**. Морамо раздвојити два случаја, **транслаторну и ротациону равнотежу**.

#### Услов транслаторне равнотеже

Ако на тело делује  $N$  сила ( $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots, \vec{F}_N$ ), онда је услов транслаторне равнотеже, тј. одсуства транслаторног кретања да векторски збир свих тих сила буде једнак нули тј.

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0. \quad (1.1)$$

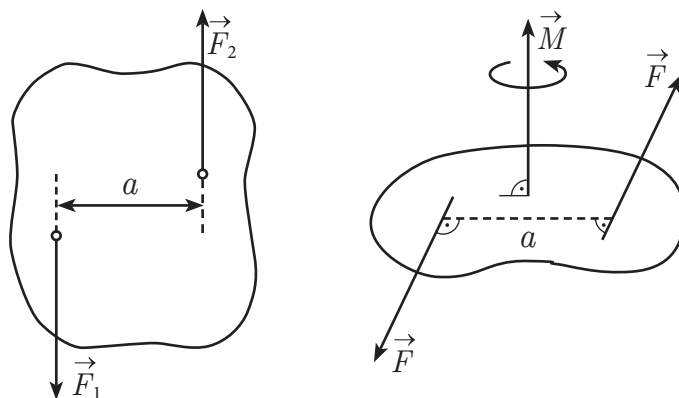
#### Математичка дирекција 2

Овде се користи математички израз  $\sum_{i=1}^N$  за означавање суме, при чему су чланови суме обележени индексом  $i$ , доњи знак обележава први члан суме а горњи последњи, иако да услов (1.1) представља скраћени облик векторског збира од  $N$  сила, иј.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 \dots + \vec{F}_N = 0. \quad (1.2)$$

### 1.1.4 СПРЕГ СИЛА

Када је овај услов (1.1) испуњен, тело се не креће транслаторно, али може да ротира. Типичан пример тога је дејство **спрега сила** на тело тј. када две паралелне силе истог интензитета а супротног смера делују на тело у различитим нападним тачкама (сл. 1.5).



Слика 1.5 Примери спрега сила

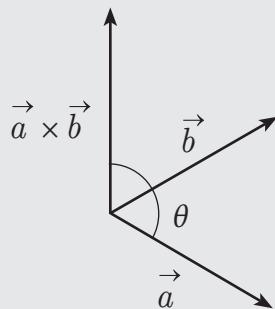
Да бисмо обезбедили да тело ни не ротира, морамо додати још један услов равнотеже који се дефинише преко тзв. **момента силе**.

### 1.1.5 МОМЕНТ СИЛЕ

То је величина која указује на способност силе да изазове ротацију тела. Веома је битно да се момент силе увек рачуна у односу на неку задату осу ротације и јасно је да он зависи од тога где је **нападна тачка** силе на телу.

#### Математичка дирекција 3

**Векторски производ два вектора**  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  се означава са  $\vec{a} \times \vec{b}$ . То је **вектор** чији је **правац** нормалан на равну коју одређују ова два вектора (у којој они леже), **смер** је онај у којем би се кретао десни завршањ када би се кретао од  $\vec{a}$  ка  $\vec{b}$  краћим путем, док му је **интензитет** једнак  $ab \sin \theta$ , где је  $\theta$  мањи угао који закључају вектори  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$  (сл. 1.6).

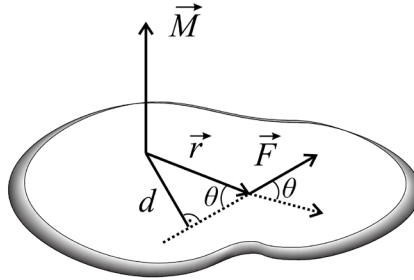


Слика 1.6 Конструкција векторског производа два вектора



Користећи горњу дефиницију векторског производа, израз за израчунавање момента силе  $\vec{M}$  (у односу на дату осу) је следећи

$$\vec{M} = \vec{a} \times \vec{b}. \quad (1.3)$$



**Слика 1.7** Момент силе као вектор

Видимо да је момент силе вектор који се добија **векторским множењем** вектора положаја нападне тачке (тј. вектора најкраћег растојања између осе и нападне тачке)  $\vec{r}$  и силе  $\vec{F}$  (сл. 1.7). Његов интензитет је дат са

$$M = Fr \sin \theta. \quad (1.4)$$

Интензитет се рачуна једноставније ако уведемо  $d = r \sin \theta$ , тзв. **крак силе** – нормално растојање осе ротације од правца силе тј.

$$M = Fd. \quad (1.5)$$

У специјалном случају спрега сила који чине две супротно усмерене силе истог интензитета  $F$ , интензитет момента спрега се рачуна као  $M = Fa$ , где је  $a$  нормално растојање између права дуж којих делују ове силе (сл. 1.5).

Када смо дефинисали појам вектора момента, можемо формулисати **услов ротационе равнотеже**.

### Услов ротационе равнотеже

$$\sum_{i=1}^N \vec{M}_i = 0. \quad (1.6)$$

## Услов равнотеже крутог тела

$$\sum_{i=1}^N \vec{F}_i = 0 \text{ и } \sum_{i=1}^N \vec{M}_i = 0, \quad (1.7)$$

тј. потребно је да векторски збир свих сила и векторски збир свих момената који делују на њега буду једнаки нули.

### 1.1.6 ВРСТЕ РАВНОТЕЖЕ

Из искуства знамо да на свако тело на Земљиној површини или у њеној близини Земља делује својом силом (**сила теже**). Начин да се каже да свуда у неком простору делује сила је да се укаже да у том простору делује **поље силе**. Када се тело налази у пољу силе Земљине теже, могуће су различите врсте равнотеже, зависно до тога да ли при извођењу тела из равнотежног положаја тежина тела ствара моменат који тело враћа у равнотежни положај или га удаљава од њега.

## Тежина и тежиште тела

**Тежина тела**  $\vec{Q}$  је резултанта тежина свих делића тела. Као вектор, усмерена је вертикално надолу, а њен интензитет износи

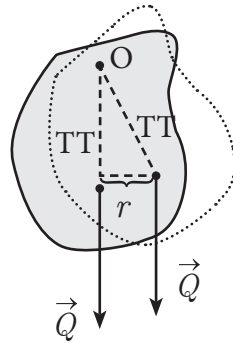
$$Q = mg, \quad (1.8)$$

где је  $Q$  интензитет тежине тела или, ако нема неспоразума, онда само тежина тела [N],  $m$  је маса тела [kg] и  $g$  убрзање Земљине теже (9,81 m/s<sup>2</sup>).

Нападна тачка тежине тела се назива **тежиште тела**. Ако је поље теже хомогено (свуда истог интензитета, правца и смера), онда се тежиште поклапа са тачком која се назива **центар масе**. Њу можемо дефинисати као тачку у којој је концентрисана сва маса тела.

## Стабилна (постојана) равнотежа

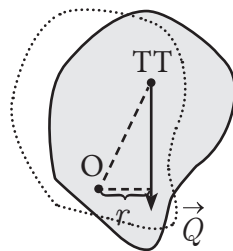
То је равнотежа код које се тело враћа у исти положај по престанку дејства силе која га је извела из равнотеже. Она се остварује ако је тежиште (тачка ТТ) испод тачке вешања (тачка О), као што је приказано на слици 1.8.



Слика 1.8 Пример стабилне равнотеже

### Нестабилна (непостојана, лабилна) равнотежа

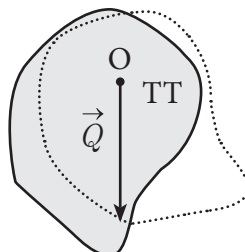
То је равнотежа код које се тело удаљава од равнотежног положаја по престанку дејства силе која га је извела из равнотеже. Она се остварује ако је тежиште (тачка TT) изнад тачке вешања (тачка O), као што је приказано на слици 1.9.



Слика 1.9 Пример нестабилне (непостојане, лабилне) равнотеже

### Индиферентна (непрекидна) равнотежа

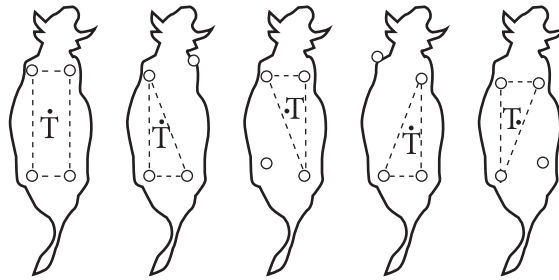
То је равнотежа код које тело остаје у новом положају по престанку дејства силе која га је извела из равнотеже. Она се остварује ако се тежиште (тачка TT) поклапа са тачком вешања (тачка O), као што је приказано на слици 1.10.



Слика 1.10 Пример индиферентне (непрекидне) равнотеже

## Равнотежа животиња са малим стопалима

Колико је **најмање** ногу потребно да остане при тлу да би животиње са малим стопалима одржале равнотежу? На ово питање можемо да одговоримо на следећи начин. Када четвороножна животиња подигне једну ногу да би одржала равнотежу, њено тежиште (тачка  $T$  на слици 1.11) мора да остане изнад троугла који образују ноге које су остале на тлу.



Слика 1.11 Кретање четвороножних животиња

## 1.2 ПОЛУГА

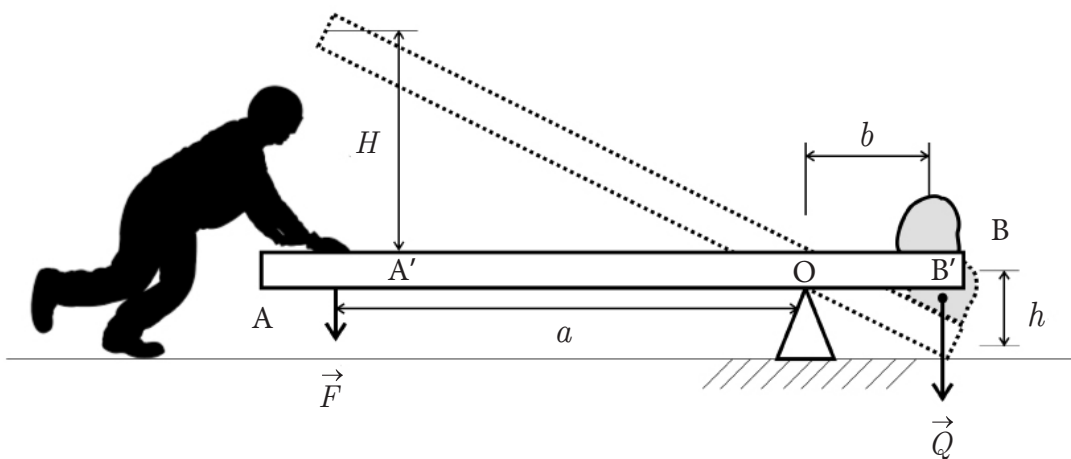
У свакодневном животу користимо бројне механизме који се сви састоје од основних делова названих **просте машине**. Њихова сврха је у основи да нам омогуће да мањом силом савладамо већу. Постоје две основне групе простих машина, а то су полуге и стрме равни. У полуге спадају просте полуге, катураче и чекрк (точак на вратилу), док у стрме равни спадају проста стрма раван, клин и завртањ. Нас овде занимају пре свега просте полуге, јер се испоставља да су оне и саставни део скелета већине кичмењака.

### 1.2.1 ПОЛУГА

**Полуга** је проста машина намењена подизању терета тј. свако чврсто тело које може да се обрће око осе кроз одређену тачку (**ослонац полуге** који се обично обележава са  $O$ , као што је приказано на слици 1.12) и она служи да преиначи дејствујућу силу на рачун степена свог померања.

#### Равнотежа полуге

Ради једноставнијег споразумевања договорено је да силу коју желимо да савладамо називамо **терет** и обележавамо је са  $\vec{Q}$  (сл. 1.12).



Слика 1.12 Полуга

Постављамо услов равнотеже на полузи и изједначавамо моменте две силе (Архимедов закон полуге), тј.

$$aF = bQ \quad (1.9)$$

где је  $F$  сила,  $a$  крак силе,  $Q$  терет и  $b$  крак терета. Из (1.9) следи **услов равнотеже полуге**

$$F = \frac{b}{a} Q. \quad (1.10)$$

#### Математичка дијресија 4

У пракси се рачуни изводе једноставно, јер ако се посматра слика 1.12 види се да су правоугли троуглови које граде силе, делови полузе и хоризонтални правац међусобно **слични**, иако да важи однос  $a : b = OA' : OB'$ . Према томе, не мора се посматрати однос кракова већ однос удаљености најадних тачака, што поједностављује рачун.

### Механичка предност полуге

**Механичка предност** (или коефицијент преноса) **полуге**  $k$  дефинише се као количник величине терета  $Q$  и дејствујуће силе  $F$  тј.

$$k = \frac{Q}{F} = \frac{bQ}{bF} = \frac{aF}{bF} = \frac{a}{b}. \quad (1.11)$$

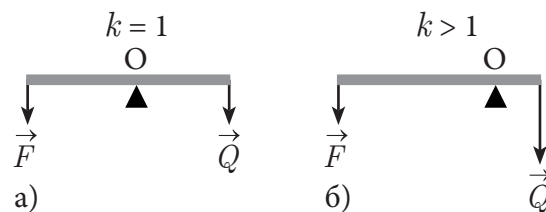
## 1.2.2 ВРСТЕ ПРОСТИХ ПОЛУГА

Просте полуге могу да се поделе:

- према узајамном положају нападних тачака сила  $\vec{F}$  и  $\vec{Q}$  у односу на ослонац – на полуге I, II и III врсте;
- према вредности коефицијента преноса – на полуге силе и полуге брзине и
- према облику – на праве и угаоне полуге.

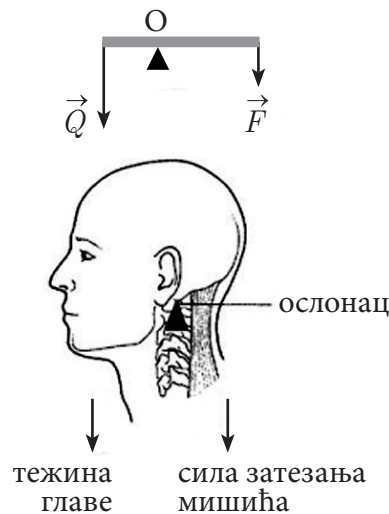
## Подела полуга према врсти

**Полуге I врсте (или двокраке полуге)** имају ослонац  $O$  између нападних тачака сила  $\vec{F}$  и  $\vec{Q}$ . Ако су, притом, краци полуге међусобно једнаки, полуга је **равнокрака**, а ако су, у општем случају, различити, она је **разнокрака**.



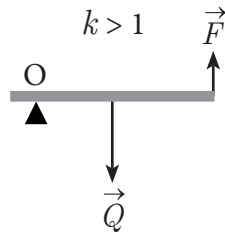
**Слика 1.13** Примери полуга I врсте: а) равнокрака и б) разнокрака полуга

Пример разнокраке полуге I врсте представља глава човека у нормалном положају (сл. 1.14). Ослонац  $O$  ове полуге је на споју лобање и првог вратног пршљена. На једном крају делује сила мишића врата  $\vec{F}$  која одржава главу у усправном положају, а на другом сила терет  $\vec{Q}$  (тежина главе) која вуче главу унапред.



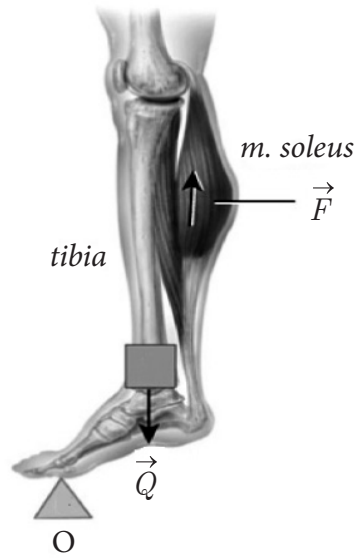
**Слика 1.14** Глава човека као пример разнокраке полуге I врсте

**Полуге II врсте (једнокраке полуге)** су оне полуге код којих су нападне тачке терета  $\vec{Q}$  и силе  $\vec{F}$  са исте стране ослонаца  $O$ , тако да се нападна тачка терета  $\vec{Q}$  налази између ослонаца и нападне тачке силе  $\vec{F}$  (сл. 1.15).



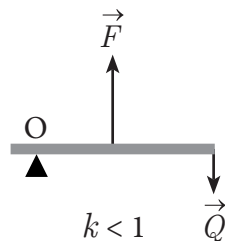
Слика 1.15 Пример полуге II врсте

Стопало човека који се издигао на прсте може да представља пример овакве полуге. Ослонац  $O$  је стопало човека које је ослоњено на прсте (сл. 1.16). На ову полуку делују сила мишића (*m. soleus*)  $\vec{F}$  и сила терета  $\vec{Q}$  чија нападна линија пролази кроз потколеничну кост (*tibia*) и скочни зглоб.



Слика 1.16 Стопало човека као пример полуге II врсте

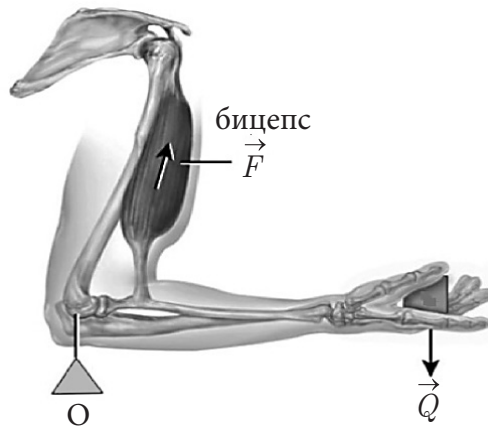
**Полуге III врсте (једнокраке полуге)** су оне полуге код којих су нападне тачке терета  $\vec{Q}$  и силе  $\vec{F}$  са исте стране ослоњца, тако да се нападна тачка силе  $\vec{F}$  налази између ослоњца  $O$  и нападне тачке терета  $\vec{Q}$  (сл. 1.17).



Слика 1.17 Пример полуге III врсте



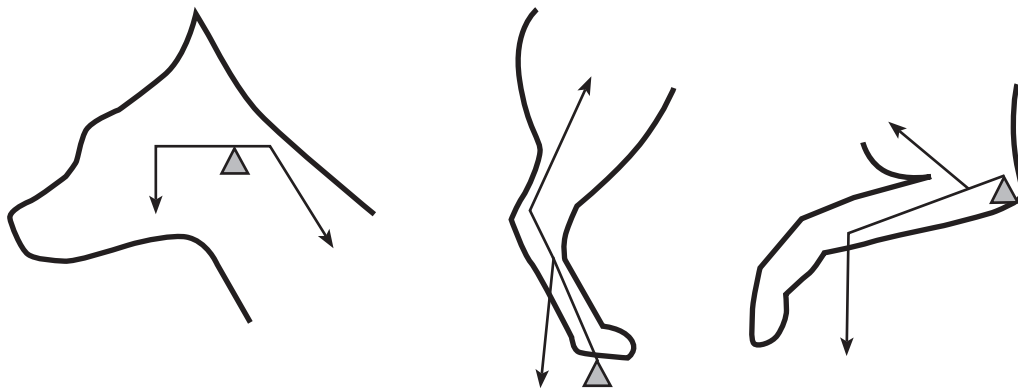
Подлактица човека може да представља пример полуге III врсте. Ослонац је у центру зглоба лакта, активна сила  $\vec{F}$  потиче услед контракције двоглавог мишића (бицепса), док терет  $\vec{Q}$  може да представља тежину предмета у шаци (сл. 1.18).



Слика 1.18 Рука (подлактица) човека као пример полуге III врсте

### Полуге код животињских скелета

Пратећи наставу анатомије, можете и сами да уочите бројне примере полуга које се појављују на најразличитијим местима код животињских скелета. На слици 1.19 на значени су само неки примери.



Слика 1.19 Примери полуга код животињских скелета

### Подела полуга према механичкој предности

Према механичкој предности  $k$  полуге могу да се поделе на: а) **полуге брзине** ( $k < 1$ ) и б) **полуге силе** ( $k > 1$ ) – видети слике 1.13, 1.15 и 1.17.

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Који је услов транслаторне равнотеже тела?
2. Дефинисати модел транслаторног кретања.
3. Дефинисати модел ротационог кретања.
4. Шта је спрег сила?
5. Шта је момент силе?
6. Дефинисати услов равнотеже ротационог кретања.
7. Шта је тежиште тела?
8. Шта је тежина тела?
9. Дефинисати центар масе.
10. Шта је стабилна равнотежа?
11. Шта је нестабилна равнотежа?
12. Шта је индиферентна равнотежа?
13. Колико је најмање ногу потребно да остане при тлу да би животиње са малим стопалима одржале равнотежу и зашто?
14. Шта је полуга?
15. Који је услов равнотеже полуге?
16. Ако са  $a$  и  $b$  означимо краке полуге, а са  $Q$  терет, написати израз за силу коју треба применити да се подигне терет.
17. Шта је механичка предност полуге?
18. Нацртати равнокраку полугу I врсте.
19. Нацртати разнокраку полугу I врсте.
20. Нацртати једнокраку полугу II врсте.
21. Нацртати једнокраку полугу III врсте.
22. Шта је полуга брзине?
23. Шта је полуга силе?
24. Нацртати пример разнокраке полуге код човекове главе.
25. Нацртати пример полуге код стопала човека.

## **2. ОСЦИЛАЦИЈЕ И ТАЛАСИ**



## 2.1 ОСЦИЛАЦИЈЕ

**Периодично кретање** је кретање које се понавља у одређеним временским интервалима, а одвија се под дејством силе која се мења или по интензитету или интензитету и правцу. Постоје разне врсте периодичног кретања, али ми ћемо се позабавити једним посебним обликом тзв. **хармонијским кретањем**. То је **осцилаторно (вибрационо)** кретање, код кога тело под дејством **реституционе силе** осцилује око равнотежног положаја (клатно зидног часовника, треперење жица музичких инструмената, вибрације атома и молекула у кристалној решетки, итд.; осим наведених механичких осцилација оне могу да буду и електричне, као што је случај код наизменичне струје где се периодично мењају напон и јачина струје). Посебно ћемо да размотримо случај **простог хармонијског осциловања**.

### 2.1.1 ПРОСТО ХАРМОНИЈСКО ОСЦИЛОВАЊЕ

#### Основни појмови

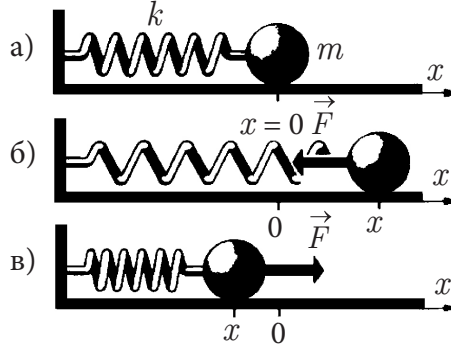
На слици 2.1 приказан је пример осцилаторног кретања опруге чија је **константа опруге**  $k$ , а маса  $m$ . То кретање се састоји у истезању и сабијању опруге, под дејством силе еластичности интензитета  $F$  која се јавља у опрузи услед деформације (истезања). Она је увек усмерена ка равнотежном положају који смо изабрали за координатни почетак ( $x = 0$ ), а сразмерна је удаљености  $x$  од њега тј.

$$F = -kx. \quad (2.1)$$

Знак минус указује да сила увек делује да врати тело у равнотежни положај. Било које растојање (удаљење)  $x$  од равнотежног положаја назива се **елонгација**, а за максимално растојање  $x_0$  кажемо да је **амплитуда**.

Пре деловања неке спољне силе (која на неки начин куглицу изводи из равнотежног положаја), куглица се налази у равнотежном положају. Тада опруга није ни сабијена ни истегнута (сл. 2.1а). На слици 2.1б куглица је померена под дејством те силе тако да се она нађе изван равнотежног положаја, на растојању  $x$ , десно од њега. Тада на њу делује сила  $F$ . По престанку дејства спољне силе (сл. 2.1в) услед деловања силе еластич-

ности  $F$  опруга се сабија. Тада се куглица налази на растојању  $x$ , лево од равнотежног положаја, затим одлази удесно итд.



Слика 2.1 Пример простог хармонијског кретања

## 2.1.2 ЈЕДНАЧИНА ПРОСТОГ ХАРМОНИЈСКОГ ОСЦИЛОВАЊА

Положај тела током осциловања је описан једначином

$$x = x_0 \sin(\omega t), \quad (2.2)$$

где је  $\omega = 2\pi/T$  **кружна фреквенција** [rad/s], а  $T$  **период осциловања** [s]. Период осциловања је време за које се изврши **једна осцилација**, а то је најкраће кретање које се стално понавља. У пракси се појављује и **линеарна фреквенција (учестаност)**  $\nu$ , која је број осцилација у јединици времена и израчунава се као

$$\nu = 1/T. \quad (2.3)$$

На пример, тело начини једну осцилацију када крене из равнотежног положаја и креће се до положаја десне амплитуде, врати се кроз равнотежни положај све до положаја леве амплитуде и онда назад до равнотежног положаја. Јединица за линеарну фреквенцију  $\nu$  је херц [Hz], који представља једну осцилацију [1/s].

Израз (2.2) задовољава једначину простог хармонијског осциловања

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (2.4)$$

тј.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0, \quad (2.5)$$

где је  $\omega^2 = k/m$ .

### Математичка дискусија 5

Израз (2.5) је пример **линеарне диференцијалне једначине**, тј. једначине у којој функција и њени изводи неознају функције. У овој једначини друга извод представља убрзање тела. Ако се искористи израз (2.2) и уврсти у једначину (2.5), добићемо идентитет  $0 = 0$ , што је доказ да је израз (2.2) решење ове једначине.

### Брзина осциловања

Из физике је познато да се брзина  $v$  добија као први извод пута (померања) по времену, дакле

$$v = \frac{dx}{dt}. \quad (2.6)$$

Када израз (2.2) уврстимо у (2.6) тј.

$$v = \frac{d}{dt} [x_0 \sin(\omega t)], \quad (2.7)$$

онда после диференцирања добијемо да је

$$v = x_0 \omega \cos(\omega t). \quad (2.8)$$

Ако знамо да косинус као математичка величина не може да пређе вредност 1, онда је јасно да израз испред косинуса представља **максималну брзину осциловања**  $v_0$ , тј.

$$v_0 = x_0 \omega. \quad (2.9)$$

### Убрзање осциловања

Из физике је такође познато да се убрзање  $a$  добија као први извод брзине по времену, дакле

$$a = \frac{dv}{dt}. \quad (2.10)$$

Када израз (2.8) уврстимо у (2.10) тј.

$$a = \frac{d}{dt}[x_0\omega\cos(\omega t)], \quad (2.11)$$

онда после диференцирања добијемо да је

$$a = -x_0\omega^2\sin(\omega t). \quad (2.12)$$

Пошто синус као математичка величина не може да пређе вредност 1, онда је јасно да израз испред синуса представља **максимално убрзање осциловања**  $a_0$  које износи  $-x_0\omega^2$ . Како убрзање има смер као и реституциона сила, онда максимално убрзање осциловања можемо да напишемо као

$$a_0 = x_0\omega^2. \quad (2.13)$$

### 2.1.3 ЕНЕРГИЈА ОСЦИЛОВАЊА

Подсетимо се да се енергија у физици уводи као појам преко способности тела да врши рад, те се стога изражава у јединицама за рад – џулима [1 J] (видети потпоглавље 4.1.3 где је то детаљније објашњено).

#### Кинетичка енергија осциловања

Кинетичку енергију осциловања  $E_k$  лако налазимо када знамо израз за брзину тела које осцилује  $v$ . Она се израчунава преко израза

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2. \quad (2.14)$$

Када брзину  $v$  у (2.14) заменимо изразом (2.8), налазимо да је

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2x_0^2\cos^2(\omega t). \quad (2.15)$$

Како је  $\omega^2 = k/m$ , следи да је  $k = m\omega^2$ , тако да израз за кинетичку енергију осциловања (2.15) можемо да напишемо као

$$E_k = \frac{1}{2}kx_0^2\cos^2(\omega t). \quad (2.16)$$

## Потенцијална енергија осциловања

Из теорије еластичности је познат израз за потенцијалну енергију  $E_p$  тела везаног еластичном силом (2.1)

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2. \quad (2.16)$$

Ако сада у (2.16) уместо  $x$  уврстимо израз (2.1), добићемо да је

$$E_p = \frac{1}{2} kx_0^2 \sin^2(\omega t). \quad (2.17)$$

## Укупна енергија осциловања

Укупну енергију  $E$  тела које осцилује добијамо као збир кинетичке  $E_k$  и потенцијалне енергије  $E_p$  у сваком тренутку. Користећи тригонометријски идентитет  $\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$ , налазимо да је

$$E = \frac{1}{2} kx_0^2. \quad (2.18)$$

Добијени резултат је специјалан случај **закона о одржању механичке енергије**: ако на систем не делују спољашње силе, енергија система остаје константна.

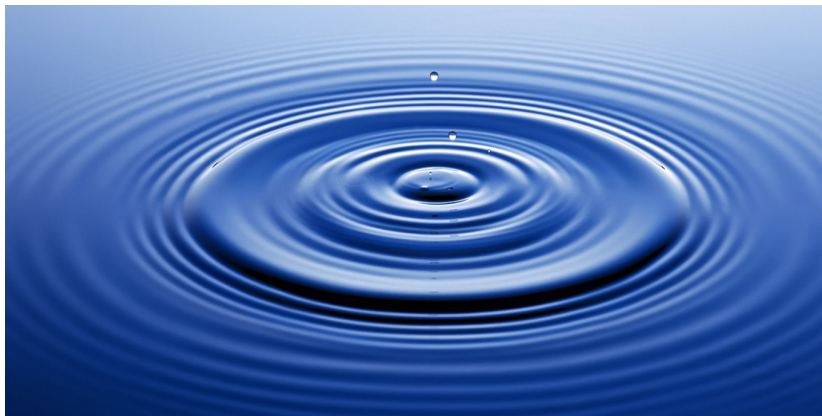


## 2.2 ТАЛАСИ

Тело које осцилује најчешће преноси енергију осциловања на средину која га окружује. Тада се осцилације простиру кроз средину производећи један потпуно нови физички феномен – **појаву таласа**. Они су и предмет проучавања у овом поглављу.

### 2.2.1 ТАЛАСИ

Најчешће је наша прва представа о таласном кретању везана за образовање таласа изазвано бацањем камена у воду (сл. 2.2). Том приликом се лако уочава да се поремећај, који је изазвао камен, шири радијално од места на које је пао. Пажљивијим посматрањем можемо да уочимо да се при оваквом кретању делови воде од места пада камена не померају радијално. Наиме, иако се талас који је настао на месту пада камена креће од њега радијално, он не изазива померање водене масе у смеру свог простирања.



**Слика 2.2** образовање таласа на води

У природи можемо да уочимо много процеса који се могу сврстати у таласе. Међутим, све их можемо поделити у две врсте: **механичке** и **електромагнетне**. У механичке спадају: акустични, односно звучни таласи, таласи на води, итд., код којих се приликом њиховог образовања одигравају померања делића материјалне средине (медијума) око својих равнотежних положаја. Због тога ћемо **талас** дефинисати као појаву простирања осциловања у некој средини. Међутим, код простирања електромагнетних таласа

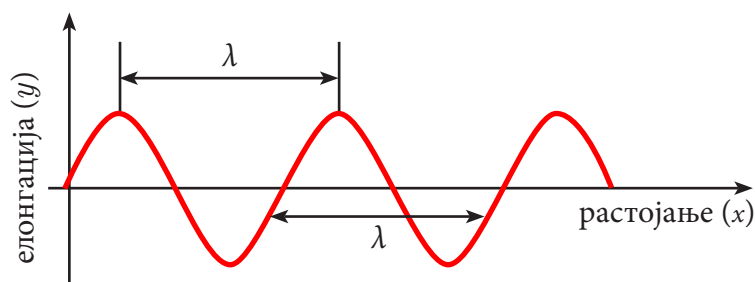
(видљива светлост, радио-таласи, X-зраци, итд.) није потребно присуство материјалне средине, односно медијума. Без детаљног удубљивања у теорију електромагнетних таласа, на овом месту рећи ћемо само да се у њиховом случају ради о осциловању електричног и магнетног поља које се преноси кроз простор.

Када говоримо о механичким таласима, као што је већ напоменуто, реч је о простирању поремећаја који је нечим изазван, односно осциловања, кроз материјалну средину. Дакле, другим речима, да би постојао механички талас, потребно је да постоје: (1) извор поремећаја, (2) средина у којој може да се изведе поремећај и (3) одређена физичка веза између честица средине којом су повезани њени суседни делови путем које утичу једни на друге. У принципу, таласи преносе енергију кроз средину.

## 2.2.2 ОСНОВНЕ ВЕЛИЧИНЕ ПОТРЕБНЕ ЗА ОПИСИВАЊЕ ТАЛАСНОГ КРЕТАЊА

### Таласна дужина

Тачка у којој је померање честице у односу на њен равнотежни положај максимално се назива **брег** таласа (сл. 2.3). У зависности од услова настанка, таласи на води имају различиту удаљеност суседних брегова. Ову чињеницу описује величина која се назива **таласна дужина**  $\lambda$  и представља удаљеност између два суседна брега таласа. Тачније речено, таласна дужина је најкраће растојање између било које два дела средине који су у идентичном стању осциловања. За таква два делића каже се да осцилују у истој фази.



**Слика 2.3** Уз објашњење таласне дужине (цртеж се односи на један тренутак)

## Период и фреквенција таласа

Ако бисмо измерили време између наиласка два суседна брега таласа на истом месту, добили бисмо величину која се назива **период таласа** и означава са  $T$ , као што смо већ рекли. Период таласа би, у ствари, било време које је потребно једном делићу средине да доспе у исто стање осциловања. Иста информација о таласу се често задаје и величином, која је инверзна периоду таласа, тј. линеарном фреквенцијом таласа  $\nu$  (видети израз 2.3).

## Брзина таласа

Таласи се простиру одређеном брзином, која зависи од особина средине у којој је настао и кроз коју се простире поремећај. На пример, звучни талас који се простире кроз ваздух на собној температури се креће брзином око 343 m/s, док се кроз чврста тела креће већом брзином. Уколико је за дати талас позната његова таласна дужина  $\lambda$ , с обзиром на то да талас пређе растојање једнако њој за време од једног периода  $T$ , **брзина таласа**  $u$  је

$$u = \frac{\lambda}{T}. \quad (2.19)$$

**Пример 2.1** Галеб је слетео на усталасано море да се одмори. Таласи га подижу горе-доле, тако да му треба 10 s да се врати у претходни положај. Уколико је растојање суседних брегова једнако 20 m, одредити брзину таласа.

**Решење.** На основу израза (2.19) брзина је

$$u = \frac{\lambda}{T} = \frac{20 \text{ m}}{10 \text{ s}} = 2 \text{ m/s}.$$

## 2.2.3 ЈЕДНАЧИНА ТАЛАСА

Већ је објашњено да положај делића средине  $y$  (елонгација), мерен од равнотежног положаја, зависи од удаљености од извора осциловања  $x$  и тренутка времена мереног од почетка осциловања  $t$ . Стога једначину за елонгацију таласа  $y$  пишемо на следећи начин

$$y(x,t) = y_0 \sin(kx - \omega t + \varphi), \quad (2.20)$$

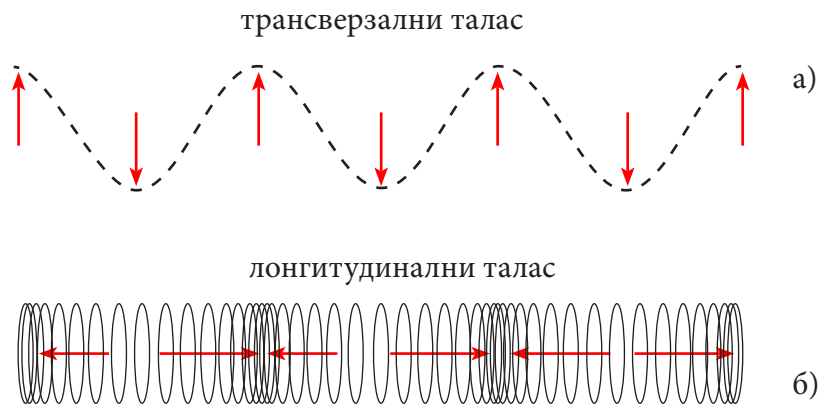
где је  $y(x,t)$  елонгација делића на месту  $x$  у тренутку  $t$ ,  $y_0$  амплитуда таласа а  $k$  је **таласни број** ( $k = 2\pi/\lambda$ ). Израз  $kx - \omega t + \varphi$  је **фаза осциловања**, док је  $\varphi$  тзв. **почетна фаза**.

### Математичка дијресија 5

Израз (2.20) је пример **йзв. функције више йроменљивих**. У овом случају **йио** су  $x$  и  $t$  **ййј**.  $y(x,t)$ . Њихово **йрафичко йриказивање** би **захйевало йриказ** у **ййри димензије** и **зайио** се у **йракси** увек **једна** од **независно йроменљивих** држи **консйанйном**, а **црйиа** се **зависносй** само од **друје** независно йроменљиве. На слици 2.3 нацрйано је  $y(x)$  за **консйанйно**  $t$ .

### Подела таласа по начину осциловања

Важно је приметити да честице средине могу осциловати на два начина. Ако честице осцилују нормално на правац простирања таласа (сви досадашњи примери су били такви), онда говоримо о **трансверзалним (попречним)** таласима (сл. 2.4а). Међутим, честице могу да осцилују око равнотежног положаја и дуж правца простирања. Тада говоримо о **лонгитудиналним (уздужним)** таласима (сл. 2.4б), као што су нпр. звучни таласи.



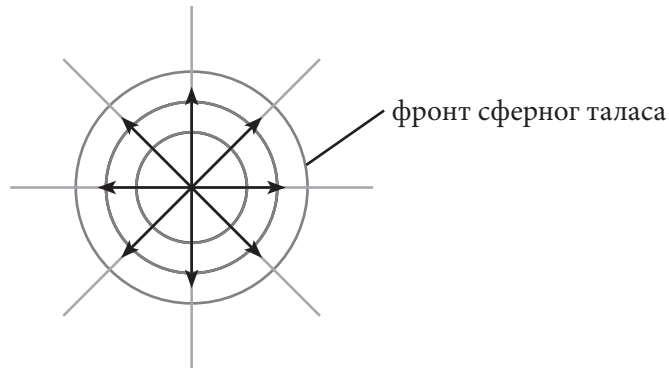
Слика 2.4 а) Трансверзални и б) лонгитудинални талас

### Таласна површина

**Таласна површина** је геометријско место тачака које осцилују у истој фази. То може да буде или линија или нека површина. Пример таквог геометријског места тачака приказан је на слици 2.5 у виду концентричних кружница.

## Таласни фронт

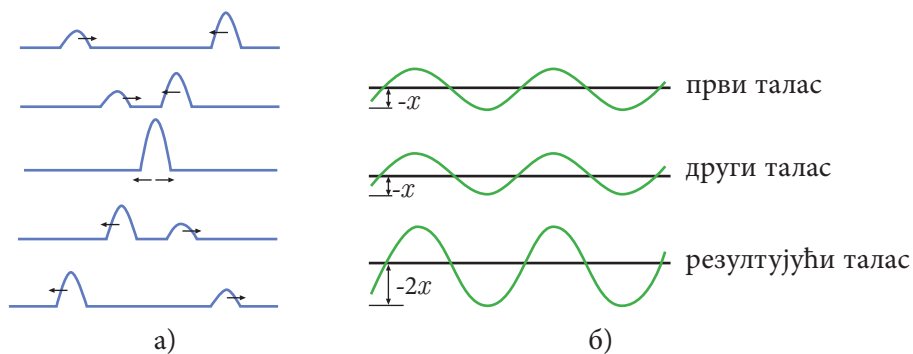
**Таласни фронт** је геометријско место тачака, до којих је у неком времену допрло осциловање. На слици 2.5 фронт је представљен најудаљенијом кружницом.



Слика 2.5 Таласне површине и фронт сферног таласа

## 2.2.4 СУПЕРПОЗИЦИЈА ТАЛАСА

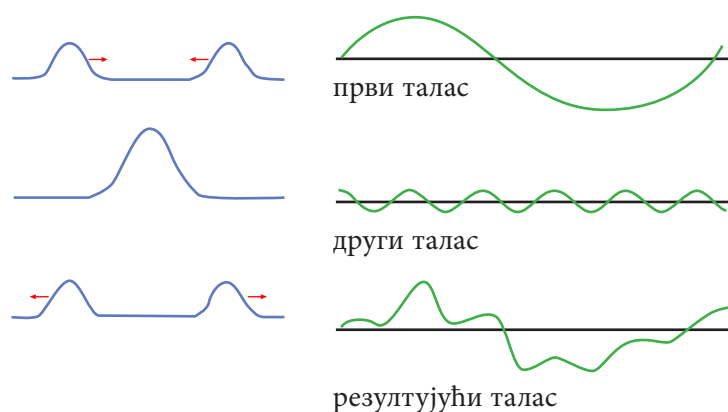
Нека се кроз средину простире више таласа који долазе из различитих извора и нека у једној тачки дође до њиховог сусрета или укрштања, као што је приказано на слици 2.6а. Ако ови таласи наставе да се крећу, њихово кретање ће бити такво као да до сусрета није ни дошло. Како? То је због појаве која је у физици позната као **принцип суперпозиције**. Он каже да када се кроз средину простире више таласа, резултујуће померање од равнотежног положаја сваке честице је збир померања у датој тачки узетих за сваки талас посебно (сл. 2.6б)



Слика 2.6 Суперпозиција таласа

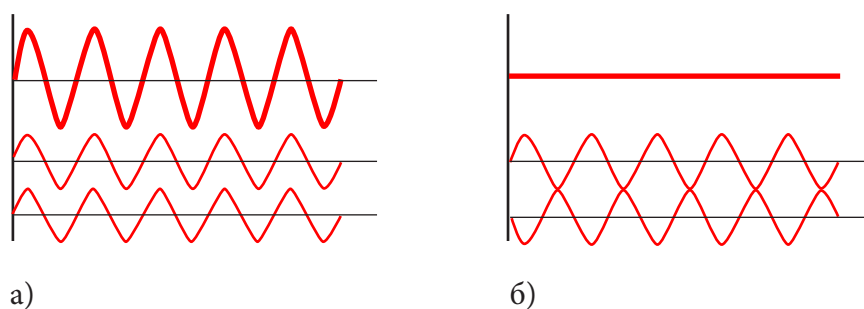
## Интерференција таласа

**Интерференција** таласа је у физици појава узајамног утицаја таласа (сл. 2.7), чији резултат може бити њихово слабљење, појачавање или поништавање. Она је веома сложен физички процес. Под интерференцијом ћемо подразумевати суперпозицију кохерентних таласа. **Кохерентни таласи** су таласи који имају исту фреквенцију и таласну дужину и сталну фазну разлику, истог су типа (трансверзални или лонгитудинални), при чему они најчешће настају тако што долазе из истог извора. Ефекти интерференције се јављају код свих врста таласа, на пример, светлосни, радио, акустични и таласи водене површине.



Слика 2.7 Примери за интерференцију таласа

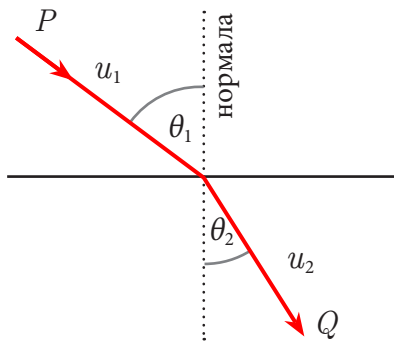
Интерференција може да буде конструктивна и деструктивна. **Конструктивна** интерференција је интерференција таласа исте амплитуде и учестаности који се простиру у истом смеру и имају исте фазе (сл. 2.8а). **Деструктивна** интерференција је интерференција таласа исте амплитуде и учестаности који се простиру у истом смеру и имају супротне фазе (сл. 2.8б).



Слика 2.8 а) Конструктивна и б) деструктивна интерференција

## Преламање и одбијање (рефлексија) таласа

**Преламање (рефракција)** таласа је скретање таласа са првобитног правца простирања услед његовог проласка кроз границу између две средине кроз које се таласи простиру различитим брзинама  $u_1$  и  $u_2$  (сл. 2.9). На слици 2.9  $\theta_1$  се назива **упадни угао**, а  $\theta_2$  **преломни угао**.



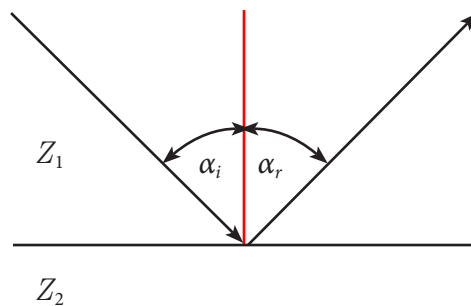
**Слика 2.9** Преламање таласа из тачке  $P$  у тачку  $Q$  ( $u_1 > u_2$ )

У акустици се акустична импеданца  $Z$  израчунава као

$$Z = \rho u, \quad (2.21)$$

где је  $\rho$  густина средине, а  $u$  брзина таласа. Акустична импеданца се изражава у јединици  $[\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})]$  која се назива рејл (1 Rayl).

**Одбијање (рефлексија)** таласа је појава која настаје када се на граници две средине (у целини или делимично) талас одбије од те границе и настави да се простира кроз средину из које је дошао, при чему је **одбојни угао**  $\alpha_r$  једнак упадном  $\alpha_i$  (сл. 2.10).



**Слика 2.10** Одбијање таласа

Ако је  $Z_1$  импеданца прве, а  $Z_2$  друге средине, онда се мера рефлексије на граници те две средине одређује преко  $R$  величине назване **рефлексивност** дефинисане као

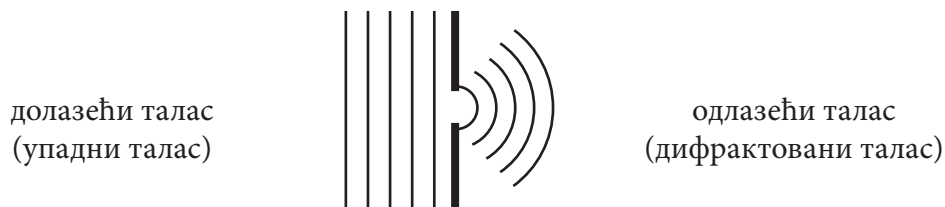
$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2. \quad (2.22)$$

## Хајгенсов принцип

Појаве одбијања и преламања таласа, као и већина других појава везаних за таласе, могу се објаснити **Хајгенсовим принципом** (назван по холандском физичару Кристијану Хајгенсу (1629–1695)), који гласи: свака тачка средине до које је талас стигао постаје извор новог таласа. Примењујући принцип суперпозиције тј. сабирајући овако настале таласе, добијамо фронтове одбијених и преломљених таласа.

## Дифракција таласа

То је појава скретања таласа са правца праволинијског простирања која не може да се објасни законима преламања и одбијања (сл. 2.11).

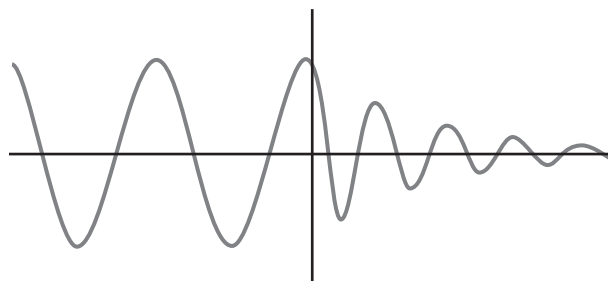


Слика 2.11 Дифракција таласа

Појава се дешава при наиласку таласа на препреке које су приближно истих димензија као његова таласна дужина. Дифракција може да се, као и горе наведене појаве, објасни Хајгенсовим принципом.

## Слабљење (атенуација) таласа

**Слабљење (атенуација)** таласа је последица утроска енергије улазног таласа при проласку кроз неку средину (сл. 2.12). Слично као енергија осцилација у једначини (2.18), енергија таласа је пропорционална квадрату амплитуде.



Слика 2.12 Слабљење таласа



Ако је  $I_0$  интензитет неког таласа (енергија коју талас пренесе у јединици времена кроз јединичну површину), а  $\mu$  коефицијент апсорпције таласа у тој средини, онда ће после пута  $x$  пређеног кроз ту средину, интензитет таласа бити

$$I = I_0 e^{-\mu x}. \quad (2.23)$$

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Шта је периодично кретање?
2. Нацртати пример и означити елементе простог хармонијског кретања за случај деловања реституционе силе.
3. Ако са  $x_0$  обележимо амплитуду, а са  $\omega$  кружну фреквенцију, написати једначину за удаљеност од равнотежног положаја у функцији од времена код осцилаторног кретања.
4. Написати израз за потенцијалну енергију хармонијског осцилатора и описати његове чланове.
5. Ако са  $k$  обележимо константу опруге, а са  $m$  њену масу, колика је кружна фреквенција осциловања те опруге?
6. Чему је једнака линијска учестаност?
7. Чему је сразмерна укупна енергија тела које осцилује?
8. Шта је потребно да постоји да би дошло до појаве таласног кретања?
9. Шта су механички таласи?
10. Шта су електромагнетни таласи?
11. Шта бива са честицама средине кроз коју се простира талас?
12. Да ли постоји транспорт супстанције кроз средину кроз коју се простира талас?
13. Шта се преноси на даљину при простирању таласа?
14. Шта су лонгитудинални таласи?
15. Шта су трансверзални таласи?
16. Графички приказати елементе таласног кретања и написати одговарајуће једначине.
17. Написати израз за енергију таласног кретања.
18. Шта је принцип суперпозиције таласа?
19. Шта је интерференција таласа?
20. Шта је конструктивна интерференција?
21. Шта је деструктивна интерференција?
22. Шта је дифракција?
23. Шта је акустична импеданца таласа?
24. Ако је  $Z_1$  импеданца прве, а  $Z_2$  друге средине, колика је рефлективност?
25. Шта је таласни фронт?
26. Како гласи закон слабљења таласа? Написати израз и дефинисати сваки члан.

### **3. АКУСТИКА**



## 3.1 ОСНОВИ АКУСТИКЕ

Област физике која проучава звук и појаве и процесе везане за звук назива се **акустика**. Под **звуком** се подразумевају механичке осцилације у материјалној средини (чврста тела, течности и гасови). То је механички талас који, простирући се кроз механичку средину, стиже до човековог уха, да би у мозгу изазивао осећај чујности. Звучни таласи у гасовима и течностима су лонгитудинални таласи, док су у чврстим телима трансверзални. Сва својства звука зависе од еластичности средине која осцилује, али и густине средине кроз коју се звук простире. Настанак звука није могућ уколико не постоји: 1) звучни извор и 2) материјална средина која преноси звучни талас. **Звучни извор** ће произвести звук само ако је побуђен дејством неке спољашње силе.

### 3.1.1 КАРАКТЕРИСТИКЕ ЗВУКА

Основне физичке карактеристике звучног таласа су: **основна фреквенција, звучни спектар и јачина (интензитет) звука**. То су **објективне** карактеристике звука.

Звук делује на човека преко органа слуха и човек га прима на субјективан начин, разликујући **висину звука/тона, боју звука/тона и ниво јачине звука**. То су **субјективне** биолошке или биофизичке карактеристике звука.

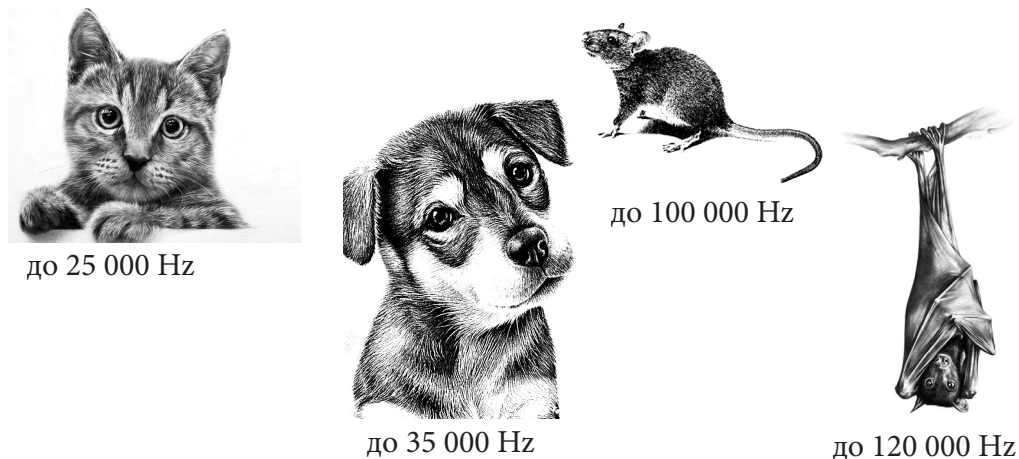
### 3.1.2 ОБЈЕКТИВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЗВУКА

#### Основна фреквенција звука

Основна фреквенција је та која одређује тоналитет, тј. висину звука. Од додатних компоненти, највише нас интересују хармоници. То су целобројни умношци основне фреквенције. Ако имамо звук чија је основна фреквенција 100 Hz, онда би се његов први хармоник налазио на  $100 \times 2 = 200$  Hz, други на 300 итд.

Нормално људско ухо може да чује звукове на фреквенцији од 20 до 20 000 Hz, при чему просечно ухо највише запажа фреквенције између 15 и 18 kHz. Звукове фреквенције испод 20 Hz називамо **инфразвуковима**. Звукове фреквенције више од 20 000 Hz називамо **ултразвуковима** и они се користе у техници и медицини.

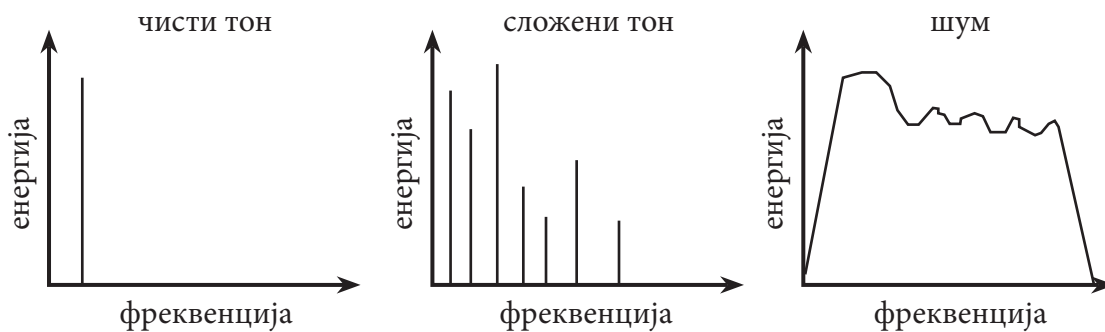
Животиње имају много шири опсег чујности звука (сл. 3.1) – слепи миш, на пример, чује звуке и до шест пута веће фреквенције од максималне коју чује људско ухо.



**Слика 3.1** Максималне фреквенције чујности код неких животиња

## Звучни спектар

Звучни спектар приказује различите фреквенције које су присутне у звуку. Прецизније речено, он је представљен преко расподеле енергије звучног таласа као функције фреквенције за појединачни звучни извор (сл. 3.2).



**Слика 3.2** Звучни спектар: а) чистог тона, б) сложеног тона и в) шума

На пример, звучни спектар флауте на којој музичар изводи тон фреквенције од  $\nu = 400$  Hz (основна фреквенција) садржи низ врхова на фреквенцијама од 800 Hz, 1 200 Hz, 1 600 Hz, 2 000 Hz, 2 400 Hz итд., што може да се напише:  $\nu, 2\nu, 3\nu, 4\nu, n\nu$  итд., где је  $n$  природан број.

## Јачина (интензитет) звука

Јачина (интензитет) звука ( $I$ ) је количина звучне енергије која у јединици времена прође кроз јединицу површине која је нормална на смер простирања таласа ( $W/m^2$ ). Овде смо искористили јединицу за снагу тј. енергију по јединици времена која се назива ват [1 W]. Из разлога који ћемо објаснити ниже прецизираћемо: **Објективна јачина звука** одређена је количином енергије коју преноси талас у јединици времена кроз јединицу површине и пропорционална је квадрату амплитуде таласа.

## 3.2 СУБЈЕКТИВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЗВУКА. УЛТРАЗВУК

Када год проучавамо чула, морамо да водимо рачуна да је наш субјективни осећај последица веома сложеног међуделовања периферног органа чула и одређених зона у мозгу. Стога је неки пут неопходно посебно обрадити овај субјективни осећај и због тога се у овом поглављу бавимо субјективним карактеристикама звука. Поред тога, додатна пажња биће посвећена и ултразвуку из два разлога: а) један део животиња чује и комуницира на фреквенцијама ултразвука и б) ултразвук је незаменљиво неинвазивно, дијагностичко и терапеутско средство у хуманој и ветеринарској медицини.

### 3.2.1 СУБЈЕКТИВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЗВУКА

Наш доживљај звука не зависи само од његових објективних карактеристика, већ у његовом образовању учествује и мозак. Стога је неопходно да дефинишемо и субјективне карактеристике везане за доживљај звука.

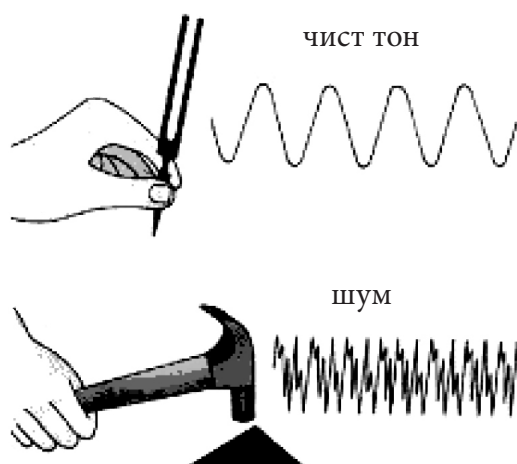
#### Висина звука/тона

Пре него што дефинишемо висину звука, размотрићемо једну поделу звукова по којој их, у основи, можемо поделити на две групе: шумове и тонове (сл. 3.3).

**Шум** је звук који настаје неправилним осциловањем звучног извора, при чему се фреквенција стално мења; стога је врло тешко јасно говорити о његовој висини.

**Тон** настаје правилним осциловањем звучног извора, фреквенције које чине његов спектар су сталне, док осећај висине тона одређује основна фреквенција.

**Диференцијални праг висине тона** је најмања разлика у фреквенцијама која се може за-



Слика 3.3 Чист тон и шум

пазити. У свакодневном животу за особу са малим диференцијалним прагом кажемо да је „музикална” или, народски, „да има слуха,,.

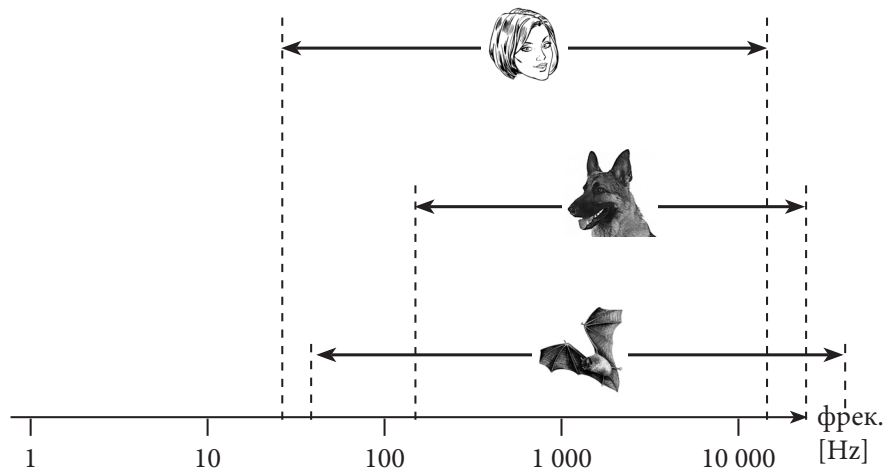
## Боја звука/тона

**Боја звука** је одређена карактером осцилација, што се види у спектру звука. Чињеница да један исти тон (основна фреквенција), изведен на различитим инструментима, звучи другачије је последица присуства хармоника и њихове релативне заступљености у спектру.

## Ниво јачине звука

Искуство је показало да субјективни осећај јачине звука знатно зависи од његове фреквенције. Он се квантификује преко следећих величина.

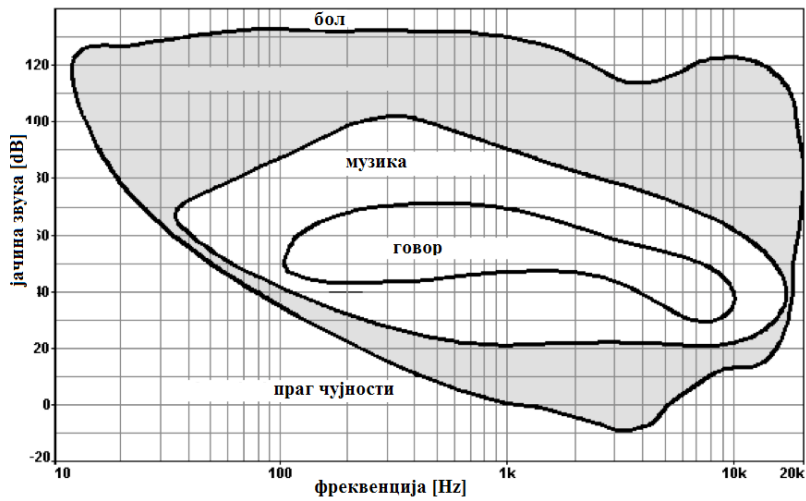
**Праг чујности и бола.** Да би звучни талас изазвао осећај звука, неопходно је да јачина звука прелази неку минималну вредност која се назива **прагом чујности**. Људско ухо је најосетљивије за осцилације чије фреквенције леже у области 1 000–3 000 Hz. Ухо је знатно мање осетљиво на фреквенције звука испод 20 Hz и преко 20 000 Hz (**праг бола**). Испод, односно изнад ових граница ухо не осећа осцилације као звук при било којој јачини.



**Слика 3.4** Фреквентни опсег прагова чујности код човека и неких животиња

**Вебер–Фехнеров закон** је општи физиолошки закон (важи за сва чула, па и чуло слуха) и он говори о томе да је осећај који изазива побуда сразмеран логаритму интензитета побуде. То значи да људска чула не реагују на надражаје линеарно, него логаритамски. Овај закон се, када је у питању звук, односи на његову јачину. Вебер–Фехнерове криве показују да и праг чујности и граница бола зависе од фреквенције (сл. 3.5).





**Слика 3.5** Вебер–Фехнерове криве

Да би се према Вебер–Фехнеровом закону изразио ниво јачине звука, уведена је логаритамска величина  $L$  која се изражава у децибелима [dB], тј.

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (3.1)$$

где је  $I$  интензитет звука у  $\text{W/m}^2$ , а  $I_0$  интензитет звука на прагу чујности на 1 000 Hz, што значи да одговара најтишем звуку који људско ухо може да чује на тој фреквенцији. Та вредност је  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . У табели 3.1 наведено је неколико примера нивоа јачине звука у децибелима.

нормалан говор	42 dB
ауто сирена	130 dB
велики оркестар	140 dB
млазни авион	170 dB

**Табела 3.1** Примери нивоа јачине звукова изражених у децибелима [dB]

**Пример 3.1** Ако је интензитет звука који производи усисивач за прашину  $10^{-5} \text{ W/m}^2$ , колики је ниво јачине његовог звука у децибелима [dB]?

**Решење.** На основу израза (3.1) ниво јачине звука је

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-5} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 10 \log 10^7 = 10 \times 7 = 70.$$

Овде смо претпоставили да је логаритам за основу 10 и искористили да је  $\log_{10} 10 = 1$ , као што следи из математичке дигресије ниже.

## Математичка дијресија 6

У дефиницији нивоа јачине звука (3.1) користи се математичка операција логаритмовање. Она нам омоућава да одредимо неизнаи степен ( $X$ ) кад су изнаи број који се степенеује ( $A$ ) и резултат степеневања ( $B$ ) изј.  $B = A^X$ , што даје

$$\log_{10} B = X \log_{10} A.$$

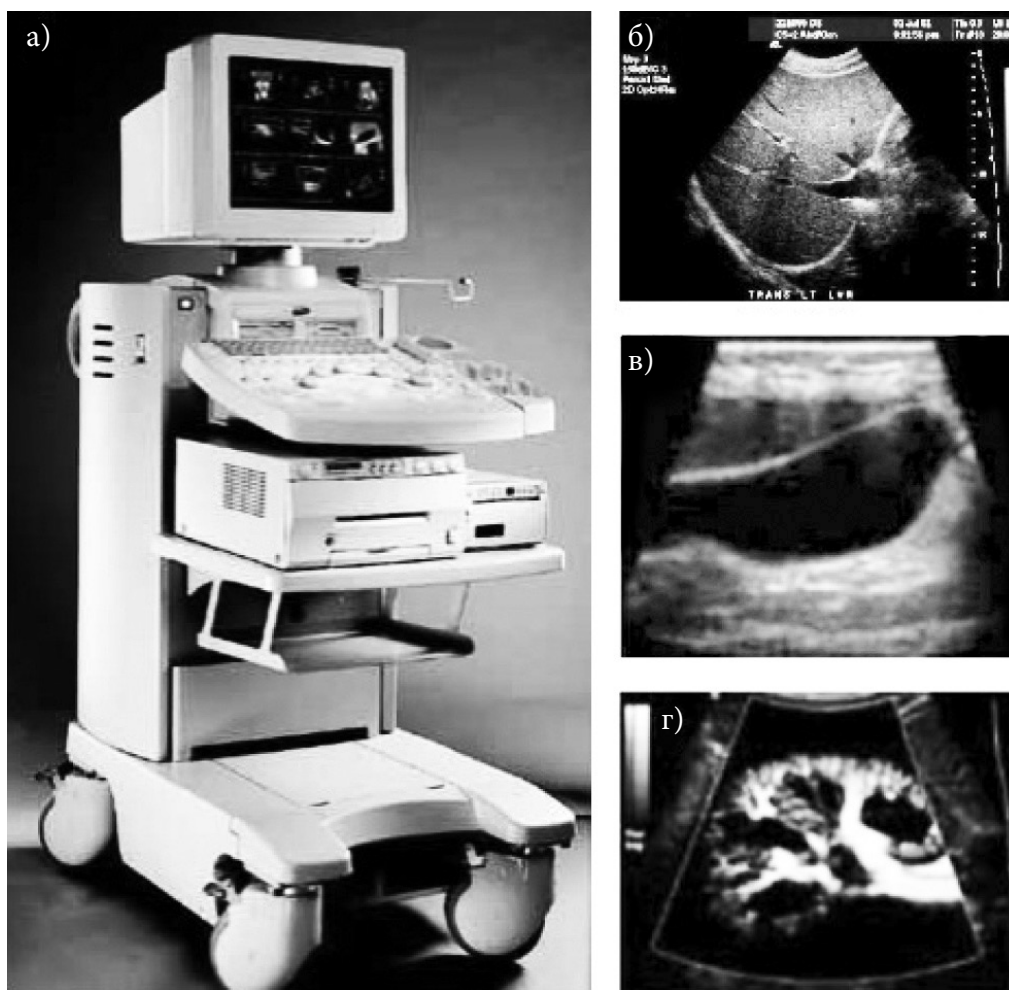
## 3.2.2 УЛТРАЗВУК

### Ултразвук и његов настанак

Ултразвук је звук чија је фреквенција изнад горње границе чујности за нормално људско ухо, а која износи 20 kHz (20 000 Hz). Неке животиње (пси, делфини, слепи мишеви, мишеви) могу чути ултразвук јер имају вишу горњу граничну фреквенцију од човека. За потребе примене, ултразвук се производи **пиезоелектричним ефектом**. Наиме, поједини кристали, када се унесу у електрично поље, трпе механичку деформацију производећи тај ефекат уз најчешћу употребу пиезокварца. Најпознатија примена ултразвука је у: 1) медицинској и ветеринарској дијагностици и 2) терапији.

### Ултразвучна дијагностика

Овај поступак укључује излагање дела тела високофреквентним звучним таласима да би се образовала слика унутрашњих органа. Ултразвук пролази кроз разна ткива (медијуме), која пружају одређени отпор. На граници два медијума који имају различите акустичне импенданце (видети израз (2.21)), део енергије ће се рефлектовати, а други део преломити у други медијум са новом брзином и новом таласном дужином. Наиме, у ултразвучном апарату (сл. 3.6а), ултразвук се шаље у кратким импулсима који се делимично рефлектују од објекта. Између ових импулса одашиљач (емитер) делује као пријемник и детектује рефлектоване таласе или ехо, шаљући електричне сигнале који се претварају у слику на флуоресцентном екрану (сл. 3.6а–3.6г). Ова метода се због тога назива **ехо-техника** или **импулс-ехо техника**. Применом ове методе може се установити постојање тумора и других врста абнормалног раста ткива, појава цепова флуида, контролисати раст фетуса и добити информација о мозгу, срцу, јетри и бубрезима. Будући да се ултразвучне слике образују у реалном времену, оне могу да прикажу покрете унутрашњих органа, као и проток крви кроз крвне судове. Ултразвучна дијагностика је неинвазивни медицински метод, који помаже лекарима и ветеринарима у дијагностици и третману.



**Слика 3.6** Ултразвучни апарат (а). Ултразвучни снимци: б) јетре, в) жучне кесе и г) бубрега

## Примена ултразвука у терапији

Терапија ултразвуком састоји се у примени ултразвучне енергије у сврху лечења. Том приликом се користе његови термички и нетермички ефекти, што зависи од начина примене тј. да ли је у питању континуирани или импулсни терапијски ултразвук. Ултразвук се често употребљава у физикалној терапији код разних дисфункција меког ткива које укључују: контрактуре зглобова, упале тетива, упале слузних врећа у зглобовима, спазам скелетних мишића и бола, дегенеративне промене на зглобовима, болна стања у кичми, уганућа, итд. Деловање ултразвука у терапијске сврхе може да буде механичко, топлотно, физичко-хемијско и биолошко. Најважније деловање ултразвука је топлотно. Механичка енергија се у ткивима кроз која пролази ултразвук претвара у топлоту и то посебно на местима где долази до рефлексије ултразвука, а то је граница између меких ткива и костију.

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Шта је звук?
2. Која је граница инфра, а која ултразвука?
3. Како се деле звучни таласи према начину осциловања средине?
4. Какве тонове даје људски глас?
5. Ако је линијска фреквенција  $\nu = 100 \text{ Hz}$ , колика је кружна фреквенција таласа?
6. Ако је амплитуда осциловања  $x_0 = 10 \text{ cm}$ , а кружна учестаност  $\omega = 29 \text{ Hz}$ , колика је брзина осциловања?
7. Које су карактеристике тона?
8. Шта је висина тона?
9. Шта је диференцијални праг висине тона?
10. Шта је боја тона?
11. Шта је интензитет звука и у којим се јединицама изражава?
12. Шта је ниво јачине звука? Написати израз и дефинисати сваки члан.
13. Колики је праг чујности у  $\text{W/m}^2$ , а колики у dB?
14. Шта представљају Вебер–Фехнерове криве?
15. Ако је интензитет звука у близини звучника на рок концерту  $1 \text{ W/m}^2$ , колики је ниво јачине његовог звука у dB?
16. Колики је диференцијални праг осетљивости за човека изражен у dB?
17. Шта је ултразвук?
18. Како настаје ултразвук?
19. У чему се састоји импулс-ехо техника у медицинској дијагностици?

# 4. БИОМЕХАНИКА ФЛУИДА



## 4.1 ИДЕАЛНИ ФЛУИДИ

**Флуид** је општи назив за средину са веома покретљивим делићима. У њих спадају течности, гасови и раствори. У овом уџбенику, ми ћемо се преваходно бавити течностима. Течности могу да се разматрају као идеалне (њутоновске) и вискозне, које су ближе реалним течностима.

### 4.1.1 СТАЦИОНАРНО СТРУЈАЊЕ ИДЕАЛНЕ ТЕЧНОСТИ

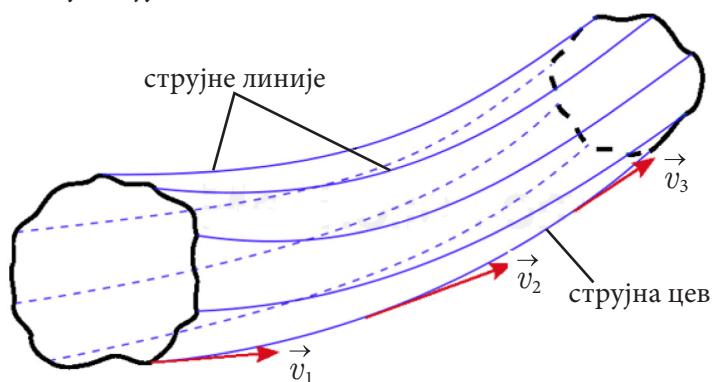
#### Идеална течност

**Идеална течност** је нестишљива течност без унутрашњег трења између својих делова (вискозност). За опис понашања течности морамо увести појам струјне линије.

#### Струјна линија и струјна цев

**Линије тока** или **струјне линије (струјнице)** су замишљене линије чије се тангенте у свакој тачки поклапају са правцем и смером вектора брзине флуида у тој тачки (сл. 4.1).

**Стационарно струјање** је такво кретање течности код којег се брзина течности дуж линија тока не мења током времена. У том случају се ни струјне линије не мењају током времена и поклапају се са путањама делића течности. Део течности ограничен струјним линијама назива се **струјна цев** и код стационарног струјања честице које су у струјној цеви је не напуштају (сл. 4.1).



**Слика 4.1** Линије тока и струјна цев код стационарног струјања

## 4.1.2 ЈЕДНАЧИНА КОНТИНУИТЕТА

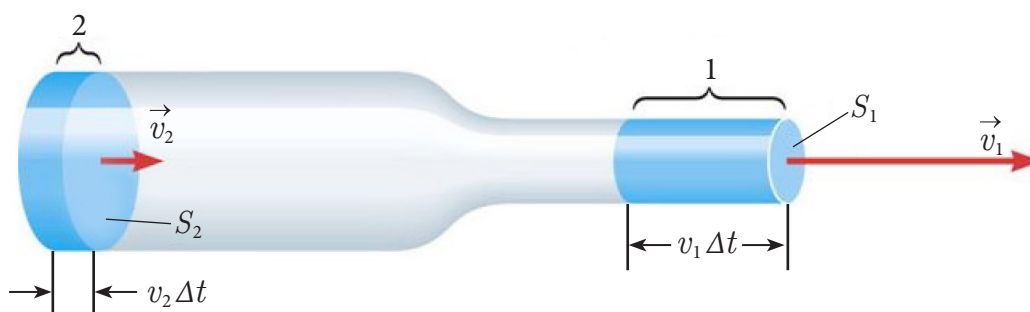
Ако посматрамо неки пресек струјне цеви, јасно је да која год количина течности прође кроз њега, иста количина мора проћи и кроз било који други пресек те цеви, што је последица њене нестишљивости (сл. 4.2). Запремински проток течности  $Q_t$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] једнак је запремини течности  $V$  која протекне у јединици времена  $t$  кроз било који пресек (сл. 4.2) тј.

$$Q_t = \frac{V}{\Delta t} = \frac{Sv\Delta t}{\Delta t} = Sv, \quad (4.1)$$

где је  $v$  брзина течности на месту пресека  $S$ . Како је запремински проток течности за сваки пресек једнак ( $Q_{t1} = Q_{t2}$ ), биће ( $S_1v_1 = S_2v_2$ ) или општије дуж струјне цеви важи релација

$$Sv = \text{const.} \quad (4.2)$$

Једначина (4.2) представља тзв. **једначину континуитета**, која је једна од најважнијих једначина за идеалне течности. Она је на други начин написан закон одржања масе примењен на кретање течности.



Слика 4.2 Илустрација уз извођење једначине континуитета

**Пример 4.1.** Ако један крај цеви има попречни пресек  $1 \text{ m}^2$  и кроз њега протиче флуид брзине  $10 \text{ m/s}$ , колика је његова брзина на другом крају ако му је попречни пресек  $0,5 \text{ m}^2$ ?

**Решење**

$$S_1 = 1 \text{ m}^2$$

$$S_2 = 0,5 \text{ m}^2$$

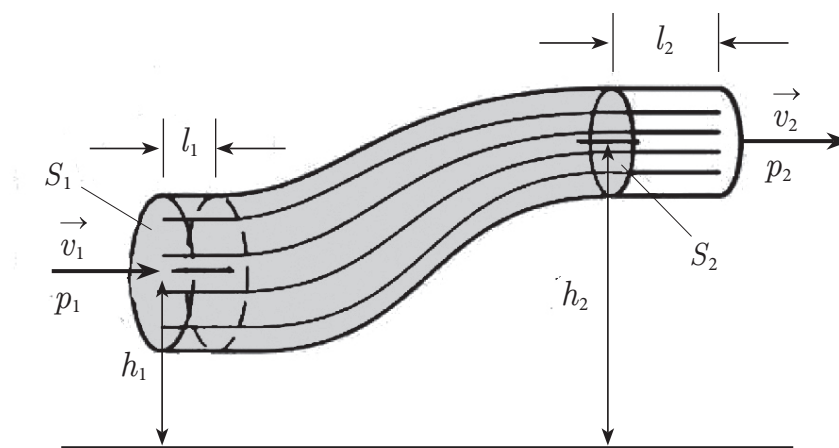
$$v_1 = 10 \text{ m/s}$$

$$v_2 = ?$$

$$S_1v_1 = S_2v_2 \quad v_2 = \frac{S_1v_1}{S_2} = \frac{1 \text{ m}^2 \times 10 \text{ m/s}}{0,5 \text{ m}^2} = 20 \text{ m/s}$$

### 4.1.3 БЕРНУЛИЈЕВА ЈЕДНАЧИНА

Једна од основних једначина која описује понашање идеалног флуида је тзв. **Бернулијева једначина**, која се обично изводи из закона одржања енергије. За праксу је једноставнија формулација са притисцима.



Слика 4.3 Илустрација уз извођење Бернулијево једначине

За извођење једначине биће нам потребан израз за рад  $A$  који врши сила  $\vec{F}$  (често називана и силом притиска, будући да се њено дејство на течност манифестује преко притиска). Напоменимо да се рад изражава у јединици [Nm] која се назива џул [J]. Са слике 4.3 видимо да је на било ком попречном пресеку  $S$  интензитет силе  $F$  дат изразом  $F = pS$ , где је са  $p$  означен **статички притисак**, који је дефинисан као интензитет силе која делује нормално на јединицу површине. У складу са овом дефиницијом, он се изражава у јединици [N/m<sup>2</sup>] која се назива паскал (1 Pa).

Ако ова сила помери део течности иза тог пресека за растојање  $l$ , по дефиницији механичког рада, рад  $A$  који она врши је

$$A = Fl = pSl. \quad (4.3)$$

Нека је  $\Delta m$  маса потиснуте течности густине  $\rho$  за време  $\Delta t$  у било ком пресеку струјне цеви. На основу једначине континуитета тј. закона одржања масе

$$\Delta m = \rho S_1 l_1 = \rho S_2 l_2 = \rho V_1 = \rho V_2 = \rho V. \quad (4.4)$$

На пресецима  $S_1$  и  $S_2$  кинетичке и потенцијалне енергије масе  $\Delta m$  су:  $\Delta m v_1^2/2$ ,  $\Delta m v_2^2/2$ ,  $\Delta m gh_1$  и  $\Delta m gh_2$ . Полазећи од чињенице да је промена укупне енергије (збир кинетичке и потенцијалне енергије) једнака уложеном раду на померање делића (једначина 4.3) и водећи рачуна о смеру силе на пресецима, добијамо да је



$$\left(\frac{\Delta m v_2^2}{2} + \Delta m gh_2\right) - \left(\frac{\Delta m v_1^2}{2} + \Delta m gh_1\right) = p_1 S_1 l_1 - p_2 S_2 l_2. \quad (4.5)$$

Сређујући ову једначину и делећи је са  $Sv\Delta t = Sl = const.$ , долазимо до израза

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (4.6)$$

Имајући на уму да се пресеци  $S_1$  и  $S_2$  могу налазити било где дуж струјне линије, горњу једначину можемо уопштити на следећи начин

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = const., \quad (4.7)$$

где је  $p$  **статички притисак** на датом пресеку,  $\rho gh$  **хидростатички притисак** који одговара притиску стуба течности висине  $h$  и  $\rho v^2/2$  **динамички притисак** ( $v$  је брзина течности на посматраном пресеку).

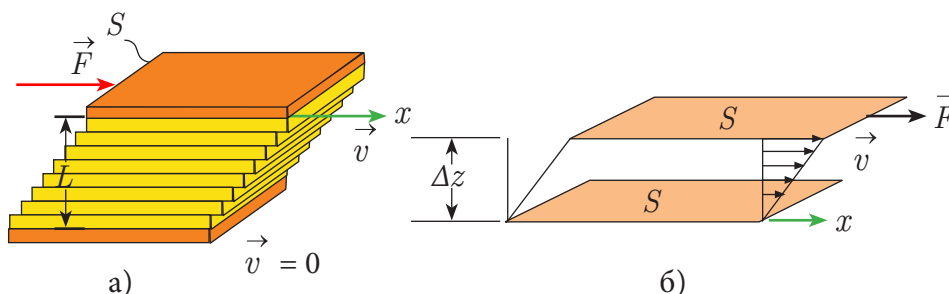
## 4.2 ВИСКОЗНИ ФЛУИДИ

У пракси се сусрећемо са реалним течностима код којих постоји сила трења између суседних слојева течности. Ова појава се назива вискозност и њу морамо узети у обзир код проучавања понашања течности у живим организмима.

### 4.2.1 ПРОТИЦАЊЕ ВИСКОЗНЕ ТЕЧНОСТИ

#### Њутонов закон вискозности

Реалне течности се карактеришу појавом силе трења између суседних слојева течности, као што је приказано на слици 4.4а. Већ смо напоменули да се ова појава **унутрашњег трења** назива **вискозност**. Њен узрок треба тражити у понашању молекула унутар течности; та анализа превазилази оквир овог уџбеника.



Слика 4.4 Илустрације уз Њутонов закон вискозности

Посматрајмо паралелно протицање различитих слојева течности кроз неки суд, као што је шематски приказано на слици 4.4б. Ако уочимо два слоја чија је додирна површина  $S$ , који су удаљени за  $\Delta z$  а услед вискозности међу њима постоји разлика у интензитетима брзина  $\Delta v$ , онда ће интензитет силе  $F$  унутрашњег трења (вискозна сила) која делује између њих да износи

$$F = \mu S \frac{\Delta v}{\Delta z}, \quad (4.8)$$

где је  $\mu$  коефицијент вискозности који се изражава у јединици [Pa s] која се назива паскал секунд,  $S$  додирна површина између слојева, а  $\Delta v/\Delta z$  интензитет вектора

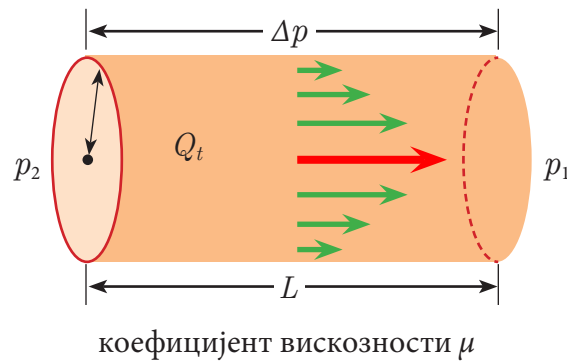
градијента брзине (промена брзине дуж правца нормалног на брзину кретања – видети математичку дигресију 7). Ова једначина представља **Њутнов закон вискозности**. Напоменимо да се уместо коефицијента вискозности често употребљава **кинематички коефицијент вискозности  $\eta$**  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ], који се добија као  $\eta = \mu/\rho$ , где је  $\rho$  густина течности.

### Математичка дигресија 7

У изразу (4.8) први пут се појављује појам градијента. За сваку скаларну величину  $\phi$  која се мења у простору дефинишемо **градијент** као вектор чији правац и смер одговарају највећој промени те величине  $\Delta\phi$  по јединици дужине  $\Delta l$ , док му је интензитет управо та промена, тј.  $\Delta\phi/\Delta l$ . Када је у питању градијент векторске величине (брзина, сила, итд.), мисли се на градијент њеног интензитета који је скаларна величина.

### Поазејов закон

Овај закон говори о протоку вискозне течности кроз цев. Ако је дужина цеви  $L$  а њен полупречник  $r$ , за време  $t$  кроз цев протекне запремина течности  $V$  сразмерна разлици притисака на њеним крајевима  $\Delta p = p_2 - p_1$ , односно



Слика 4.5 Илустрација уз Поазејов закон

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\mu L} t. \quad (4.9)$$

У потпоглављу 4.1.2 дефинисали смо запремински проток течности  $Q_t$  као  $V/t$ . Имајући то у виду, једначину (4.9) можемо да напишемо у облику

$$Q_t = \frac{V}{t} = \frac{\Delta p}{\frac{8\mu L}{\pi r^4}} = \frac{\Delta p}{R_h}, \quad (4.10)$$

где је са  $R_h = 8\mu L/\pi r^4$  означен тзв. **хидродинамички отпор**, односно, отпор протицању течности кроз цев. Хидродинамички отпор се изражава у тзв. јединицама отпора [ЈО], при чему је  $1 \text{ ЈО} = 133,3 \text{ Па s/cm}^3$ .

## 4.2.2 СТОКСОВ ЗАКОН

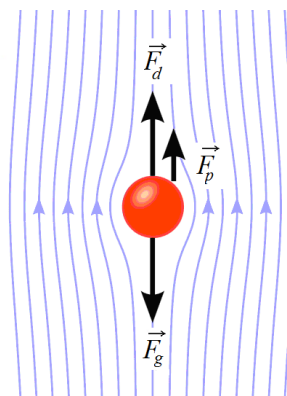
Јасно је да ће вискозност течности да ствара отпор при кретању тела кроз течност. Сила трења  $F_d$  коју течност коефицијента вискозности  $\mu$  пружа телу које се кроз њу креће сразмерна је коефицијенту вискозности и брзини  $v$  тј.

$$F_d = k\mu v, \quad (4.11)$$

где је  $k$  коефицијент који зависи од геометрије тог тела. Сила трења  $\vec{F}_d$  има правац брзине, али је супротног смера (сл. 4.6). За тело сферног облика полупречника  $r$  интензитет силе трења има облик

$$F_d = 6\pi r\mu v. \quad (4.12)$$

Израз (4.11) носи назив **Стоксов закон**, иако се у пракси под Стоксовим законом обично подразумева сила  $F_d$  дата изразом (4.12). Напоменимо да је он потврђен експериментално, али само за тела чији је пречник много мањи од растојања тела од граница течности. На слици 4.6 приказана је капљица магле која пада кроз ваздух као илустрација овог закона. На тој слици приказане су сила гравитације  $\vec{F}_g$  као и сила потиска  $\vec{F}_p$ , под чијим резултујућим дејством пада капљица.

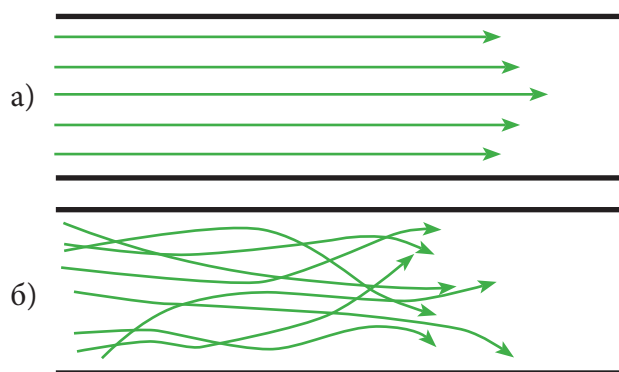


**Слика 4.6** Илустрација уз Стоксов закон

## 4.2.3 ЛАМИНАРНО И ТУРБУЛЕНТНО СТРУЈАЊЕ

### Ламинарно струјање

До сада смо протицање течности посматрали као да се оно одвија у слојевима, при чему делићи течности не прелазе из једног слоја у други и крећу се притом истом брзином у оквиру слоја. Овакво слојевито протицање течности назива се **ламинарно струјање** (сл. 4.7а).



Слика 4.7 Илустрација ламинарног (а) и турбулентног струјања (б)

### Турбулентно струјање и Рејнолдсов број

Када брзина достигне одређену вредност названу **критична брзина**  $v_k$ , протицање постаје **турбулентно** и у течности се стварају вртлози (сл. 4.7б). То наравно повећава отпор кретању тела кроз течност. Број којим се карактерише „турбулентност” или „ламинарност” кретања назива се **Рејнолдсов број**  $Re$  који се дефинише као

$$Re = \frac{vd}{\eta}, \quad (4.13)$$

где је  $d$  пречник цеви кроз коју течност протиче. Из последњег израза долазимо до израза за критичну брзину

$$v_k = \frac{\eta}{d} Re_k. \quad (4.14)$$

Када Рејнолдсов број порасте изнад 2 000 до 3 000, настаје турбулентан ток на месту гранања крвних судова, који ће нестати или прећи у ламинарни ток у правим деловима

крвног суда. Када Рејнолдсов број нарасте на вредност 2 000, турбуленција ће највероватније настати и у правим и глатким деловима крвног суда. У уским крвним судовима Рејнолдсов број практично никада није толико велики да може да настане турбуленција (код човека и топлокрвних животиња проток је практично ламинаран). Међутим, у асцендентној аорти, у моменту максималног систолног избацавања, када је критична брзина премашена, може се јавити турбуленција, али само ако је артерија сужена (критична брзина код човека је 21,6 cm/s). Турбуленција најчешће настаје код анемија, јер је вискозност крви нижа, што објашњава појаву шумава у протоку крви, доста честих код анемија.

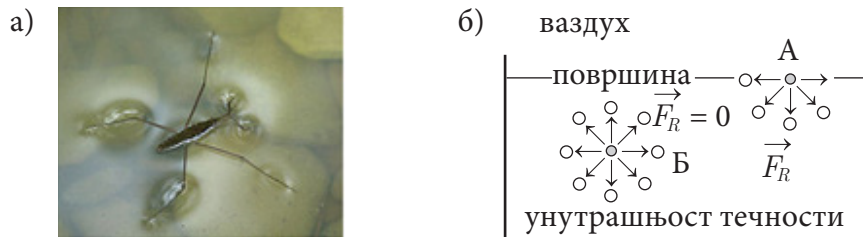
## 4.3 ПОВРШИНСКЕ ПОЈАВЕ

Површински слој течности на њеној граници са гасом (слободна површина течности) има особине које су различите од особина њеног остатка.

Ове особине су од изузетне важности у функционисању живих организама, будући да течности чине значајан део њихове грађе. Због тога ћемо тим тзв. **површинским појавама** посветити посебну пажњу.

### 4.3.1 ПОВРШИНСКИ НАПОН

Слободна површина течности карактерише се појавом **површинског напона**. Суштина је да се овај слој понаша као еластична мембрана која се опире промени облика што, на пример, омогућује неким инсектима кретање по површини течности (сл. 4.8а). То је последица чињенице да су молекули у површинском слоју (молекула А) у другачијем окружењу од молекула унутар течности (молекула Б), као што је приказано на слици 4.8б. Молекул унутар течности је са свих страна изложен дејству молекула течности, тако да се ефекат сила међудејства поништава ( $\vec{F}_R = 0$ ). На молекул у површинском слоју делује само део молекула из течности, док је међудејство између молекула ваздуха (или неког другог гаса) и молекула течности много слабије. Отуда се јавља једна резултујућа сила усмерена ка течности ( $\vec{F}_R \neq 0$ ). Стога, да би се неки молекул из унутрашњости довео на површину течности, потребно је извршити одређени рад.



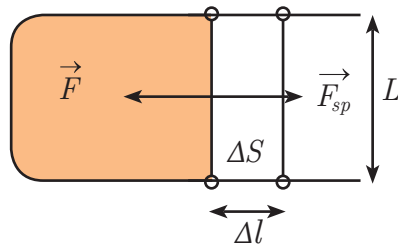
Слика 4.8 Илустрација уз површински напон

Величину која карактерише ову појаву, **коэффициент површинског напона**  $\alpha$ , управо дефинишемо као рад  $\Delta A$  који је потребан да би се слободна површина течности  $\Delta S$  повећала за јединицу.

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S} \quad (4.15)$$

Други начин дефинисања овог коефицијента је да је то интензитет силе затезања  $F$  којом опна течности делује на јединицу дужине  $L$  (сл. 4.9) тј.

$$\alpha = \frac{F}{L}. \quad (4.16)$$

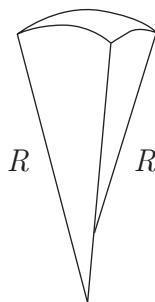


**Слика 4.9** Уз извођење израза за коефицијент површинског напона

До израза (4.16) се лако долази ако се у израз (4.15) уврсти рад који врши сила интензитета  $F_{sp}$  (једнаког интензитету силе  $F$  током равномерног кретања) док се покретни део рама помери за дужину  $\Delta l$  ( $\Delta A = F\Delta l$ ), при чему се површина опне течности унутар рама повећа за  $\Delta S = L\Delta l$ .

### 4.3.2 ПРИТИСАК ИСПОД ПОВРШИНЕ ТЕЧНОСТИ

Објаснили смо да се површински слој понаша слично еластичној мембрани. Зато овај слој када је закривљен врши на течност **допунски притисак**  $\Delta p$  у односу на ситуацију када је он раван (сл. 4.10).



**Слика 4.10** Илустрација уз објашњење Лапласове формуле



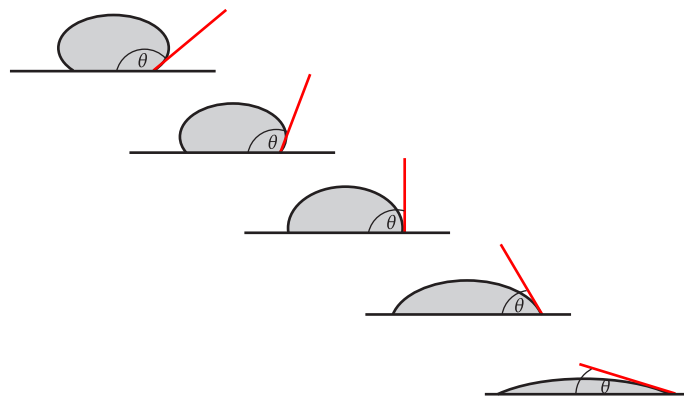
У случају када су течност и ваздух (или неки други гас) раздвојени закривљеном граничном површи полупречника  $R$ , притисак у течности на удубљеној (конкавној) страни већи је од притиска на испупченој (конвексној) страни. Разлика тих притисака (тзв. допунски притисак) одређена је **Лапласовом формулом**

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}. \quad (4.17)$$

### 4.3.3 КВАШЕЊЕ. КАПИЛАРНЕ ПОЈАВЕ

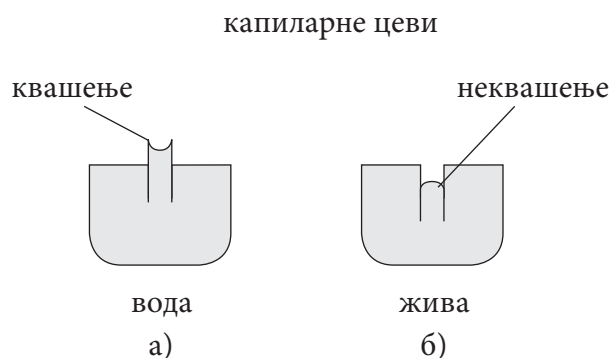
До сада смо посматрали додирну површину течности и гаса. Ситуација је сложенија на додирној површини течности и чврстог тела, зависно од односа јачина сила које делују између молекула. Ако су привлачне силе између молекула течности (**кохезионе силе**) јаче од сила којима молекули чврстог тела делују на молекуле течности (**адхезионе силе**), онда течност не кваси зидове суда. У обрнутом случају, она их **кваси**.

Најједноставније је посматрати једну кап течности на чврстој површини. Дефинишемо **угао квашења**  $\theta$  као угао између тангенте на површину течности и тангенте на површину чврстог тела (сл. 4.11). Ако је тај угао оштар, течност кваси тело, ако је туп, не кваси га.



**Слика 4.11** Понашање течности на чврстој подлози: неквашење (крајње лево) до потпуног квашења (крајње десно)

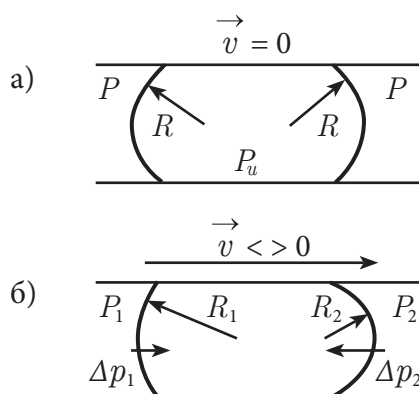
Различита способност квашења је разлог због којег је слободна површина течности (мениск): а) **издубљена** код течности које квасе зидове суда у уској стакленој цеви (капилари), док је код б) течности које не квасе капилару **испупчена** (сл. 4.12). Јасно је да ефекат квашења комбинован са површинским напоном изазива пењање течности у капилари и овај процес у ствари помаже продирању воде у порозне материјале.



**Слика 4.12** Облик мениска код капиларних појава: квашење (а) и неквашење (б)

### 4.3.4 ГАСНА ЕМБОЛИЈА

**Гасна емболија** је појава мехурића ваздуха у крвним судовима, која под одређеним условима може да доведе до зачепљења суда и прекида протока крви. Настанак емболије приказан је на сл. 4.13.



**Слика 4.13** Уз објашњење гасне емболије

Када се крв не креће ( $v = 0$ ), њен притисак ( $P$ ) је једнак са обе стране мехурића (сл. 4.13а). Површи на левој и десној страни мехурића једнако су закривљене, па су допунски притисци једнаки ( $p_u = \Delta p$ ). Допунски притисак повећава притисак у мехурићу, али нема утицаја на његово кретање. Ако се крв креће слева удесно ( $P_1 > P_2$ ), као што је приказано на слици 4.13б, онда се десна површ јаче закривљује због веће брзине у средишњем делу крвног суда, па је  $R_1 > R_2$ . По Лапласовој формули (4.17), допунски притисак  $\Delta p_2$  на десну површ већи је од допунског притиска  $\Delta p_1$  на леву површ. Резултантна сила настала из разлике притисака делује у смеру супротном од тока крви и омета њен проток.

### 4.3.5 МЕРЕЊЕ КРВНОГ ПРИТИСКА КОД ЖИВОТИЊА

Крвни притисак је један од основних показатеља исправног рада крвотока. Стога је његово мерење један од основних дијагностичких поступака при прегледу животиња, а и људи. Најстарији метод мерења је тзв. **директни метод**, код којег се крвни суд директно повезује са манометром. Он је очигледно инвазиван и стога данас није у употреби. Постоји низ **индиректних метода** за мерење крвног притиска који су данас у употреби. Ми ћемо овде да опишемо тзв. **аускултациони метод**, назван тако због коришћења стетоскопа за ослушкивање звукова унутар тела (аускултација). Један такав апарат је приказан на слици 4.14.



**Слика 4.14** Конвенционални апарат за мерење притиска аускултационим методом:

- (А) пумпица;
- (Б) манжетна (пнеуматски јастук);
- (В) манометар (уређај за мерење притиска) и
- (Г) стетоскоп

Описаћемо поступак мерења притиска код људи. Манжетном (Б) се обавије надлактица и она се затегне тако да приања уз руку, док се стетоскоп ставља на прегиб лакта у пределу кубиталне артерије (подсетити се из неког уџбеника анатомије). Помоћу пумпице (А) се повећава притисак у манжетни до момента када је крвни суд у потпуности компримован и када се више не чују откуцаји срца. Након овога, вентил се полако отпушта и у тренутку када се систолни притисак изједначи са притиском у манжетни јављају се први звукови који се прате стетоскопом (Г) (тзв. Коротковљеви тонови). О тачном разлогу њиховог појављивања постоје бројне теорије, али се верује да су изазвани приливом крви која нагло удара у зидове крвног суда, изазива турбулентни ток и производи вибрације које се преносе до стетоскопа. Са даљим смањивањем притиска мења се и карактер Коротковљевих тонова, који постају све дубљи. У тренутку

када се они у потпуности изгубе, дијастолни притисак се изједначио са притиском у манжетни и крвна струја поново тече равномерно не узрокујући даље вибрације. Очитавањем вредности на скали манометра (В) у тренутку појављивања и губитка ових тонова, добија се вредност крвног притиска која не одступа од стварних вредности за више од 10%.

У новије време у употреби су дигитални уређаји који региструју звукове у крвном суду и на екрану приказују вредност оба притиска, као и вредност пулса. Они су прилично једноставни за употребу, али остављају већу могућност за грешку. Апарат се ставља на зглоб и сам удубава и издубава ваздух из манжетне (сл. 4.15). Напоменимо да су у широкој употреби и уређаји за мерење притиска који су засновани на тзв. Доплеровом ефекту.



**Слика 4.15** Мерење притиска пса употребом дигиталног уређаја

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Шта је струјница?
2. Како гласи једначина континуитета? Написати израз и дефинисати сваки члан.
3. Написати израз за Бернулијеву једначину и дефинисати сваки члан.
4. Ако један крај цеви има попречни пресек  $1 \text{ m}^2$  и кроз њега протиче флуид брзине  $10 \text{ m/s}$ , колика је његова брзина на другом крају ако му је попречни пресек  $0,25 \text{ m}^2$ ?
5. Написати израз за Њутнов закон вискозности и дефинисати сваки члан.
6. Које су јединице за коефицијент вискозности?
7. Написати Поазејев закон и дефинисати сваки члан.
8. Шта је хидродинамички отпор?
9. Чему је једнака сила отпора по Стоксовом закону? Написати израз и дефинисати сваки члан.
10. Шта је ламинарно кретање?
11. Шта је турбулентно кретање?
12. Шта је критична брзина?
13. Како је дефинисан Рејнолдсов број?
14. Каква је природа кретања крви у крвотоку?
15. Колика је критична брзина за крв, тј. за њен прелазак у турбулентни режим?
16. Како је дефинисан коефицијент површинског напона? Написати израз и дефинисати сваки члан.
17. Како гласи Лапласова формула? Написати израз и дефинисати сваки члан.
18. Шта је гасна емболија? Нацртати и објаснити како настаје.
19. Када течност кваси чврсту површину коју додирује?
20. Када течност не кваси чврсту површину коју додирује?
21. Објаснити капиларне појаве.
22. Описати значај капиларних појава за живи свет.
23. Објаснити принцип индиректне методе мерења крвног притиска.



# 5. ТЕРМОДИНАМИКА



## 5.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ И ПРВИ ПРИНЦИП ТЕРМОДИНАМИКЕ

Топлотне појаве које се посматрају макроскопски су предмет проучавања **термодинамике**. Она то ради преко тзв. макроскопских величина: притиска, температуре, запремине, количине топлоте, итд. Други аспект се односи на **молекулску и кинетичку теорију** и тзв. **статистичку термодинамику**, која представља део **статистичке физике**.

### 5.1.1 КРЕТАЊЕ МОЛЕКУЛА

Молекули гаса се налазе у сталном хаотичном кретању, при чему се њихове брзине међусобно разликују. Ми нисмо у стању да кажемо колика је брзина кретања сваког молекула понаособ. Међутим, могуће је **са становишта статистичке физике да кажемо колики број молекула, од њиховог укупног броја, у датом тренутку има одређену брзину у интервалу између  $v$  и  $v + \Delta v$** . То нам омогућује да израчунамо средње вредности величина којима се описује кретање молекула.

#### Средња кинетичка енергија молекула идеалног гаса

Средња кинетичка енергија молекула представља аритметичку средину кинетичких енергија свих молекула и може се показати да је она, за случај идеалног гаса, повезана са температуром гаса, као макроскопском величином, преко релације:

$$E_{ks} = \frac{3}{2} k_B T \quad (5.1)$$

где је  $E_{ks}$  средња кинетичка енергија једног молекула масе  $m$ ,  $k_B$  Болцманова константа ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K) и  $T$  температура гаса као целине.  $T$  је апсолутна температура и мери се у келвинима [K]. 1 K има исту вредност као и један степен Целзијусове скале [ $1^\circ\text{C}$ ], али се скале разликују тако да је веза између њих  $T$  (K) =  $t$  ( $^\circ\text{C}$ ) + 273,15 K.



## Унутрашња енергија идеалног гаса

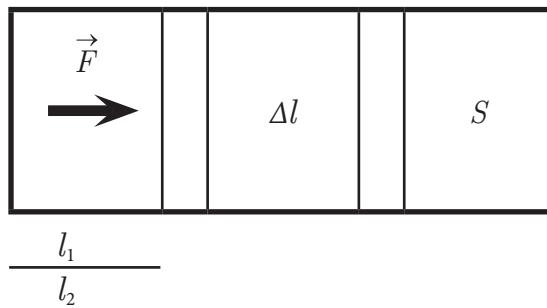
**Идеалан гас** је гас између чијих се молекула не манифестује дејство међумолекуларних сила и код којег је укупна запремина свих молекула занемарљива у односу на запремину суда у којем се гас налази. То је најједноставнији модел који може да објасни читав низ особина гасова. **Унутрашња енергија**  $U$  гаса је збир енергија свих молекула, као и енергија њихових међусобних интеракција. У случају идеалног гаса она се своди на збир средњих кинетичких енергија појединачних молекула датих изразом (5.1), тј.

$$U = NE_{ks} \quad (5.2)$$

где је  $N$  укупан број молекула у гасу.

### 5.1.2 ТОПЛОТА И РАД

Топлота и рад су процеси преношења енергије (топлота се не мери директно). **Количина топлоте и рада** даје износе пренете енергије, па се зато количина топлоте изражава у истим јединицама као рад. Топлота је облик преноса енергије који се одвија неуређеним кретањем молекула, док је обављање рада везано за уређено кретање молекула.



**Слика 5.1** Уз извођење израза за рад који изврши гас

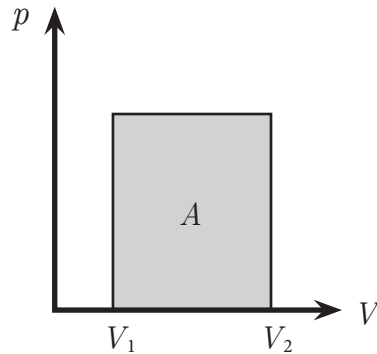
**Рад**  $A$  који изврши гас

$$A = F\Delta l = pS(l_2 - l_1) = pS\Delta l = p\Delta V, \quad (5.3)$$

где је  $F$  интензитет силе притиска,  $S$  површина покретног клипа и  $\Delta V$  промена запремине гаса, као што је приказано на слици 5.1.

У термодинамици (и поготову у њеној примени у техници) веома је корисно да се процеси приказују у тзв.  $(p, V)$  координатном систему, на ком апсцисној оси одговара

запремина  $V$ , а ординатној притисак  $p$ . Било ком гасном процесу у  $(p, V)$  координатном систему одговара једна крива (права) а, што је још битније, површина испод криве представља извршени рад у том процесу. Горе описани процес ширења при сталном притиску је приказан сликом 5.2.



**Слика 5.2** Графички приказ рада који изврши гас при константном притиску у  $(p, V)$  координатном систему

### 5.1.3 КОЛИЧИНА ТОПЛОТЕ

Количина топлоте  $Q$  коју неко тело може да ода или прими зависи од масе тела  $m$ , његове специфичне топлоте  $c$  и разлике температура  $\Delta T$  пре и после процеса. Ова количина топлоте може да се напише у облику једначине

$$Q = mc\Delta T. \quad (5.4)$$

**Специфична топлота супстанције  $c = Q/m\Delta T$  [J/(kg K)] бројно је једнака количини топлоте која телу масе од 1 kg дате супстанције повиси температуру за 1 K.**

### 5.1.4 ПОЈАМ И ДЕФИНИЦИЈА СИСТЕМА

Пре него што кренемо на разматрање такозваних принципа термодинамике, увешћемо појам система који ће у потребном степену општости бити коришћен у њиховом објашњењу.

Систем представља скуп елемената који су међусобно повезани у целину, односно делују једни на друге у циљу функционисања система као целине. Важно је нагласити да се својства система као целине знатно разликују од особина компонената које сачињавају тај систем.

## 5.1.5 ПРВИ ПРИНЦИП ТЕРМОДИНАМИКЕ

Први принцип термодинамике представља примену закона одржања енергије на термодинамичке процесе. Количина топлоте  $Q$  коју систем прими троши се на увећавање унутрашње енергије  $\Delta U$  и рад који систем врши, тј.

$$Q = \Delta U + A. \quad (5.5)$$

По договору, позитивним се сматра онај рад који врши систем, а негативним рад који се врши над системом. Обрнуто, негативна је она количина топлоте коју систем преда, а позитивна она коју прими. Напоменимо да Први принцип термодинамике не говори у ком смеру се топлота спонтано креће. О томе говори Други принцип термодинамике.

## 5.2 ТЕРМОДИНАМИЧКИ ПРОЦЕСИ

Класична термодинамика се бави трима главним врстама **термодинамичких процеса**: променама стања система, циклусима и процесима преноса топлоте. Стање система је дефинисано преко макроскопских величина (притисак, запремина, температура, итд.) и у  $(p, V)$  координатном систему оно је представљено тачком, док се процес представља правом или кривом линијом.

### 5.2.1 РАЗЛИЧИТИ ПРОЦЕСИ У ТЕРМОДИНАМИЦИ

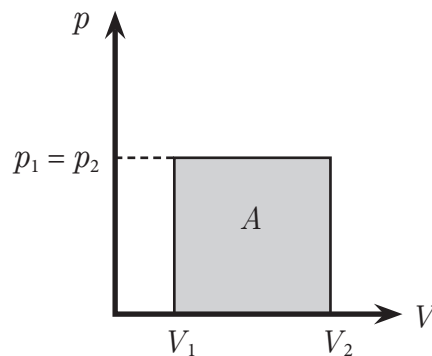
#### Изобарни процес

Изобарни процес је процес који се одвија при сталном притиску, тј.

$$p = p_1 = p_2 = \text{const.}, \quad (5.6)$$

као што је приказано на слици 5.3. Према Првом принципу термодинамике биће

$$Q = \Delta U + p(V_2 - V_1). \quad (5.7)$$



Слика 5.3 Приказ изобарног процеса

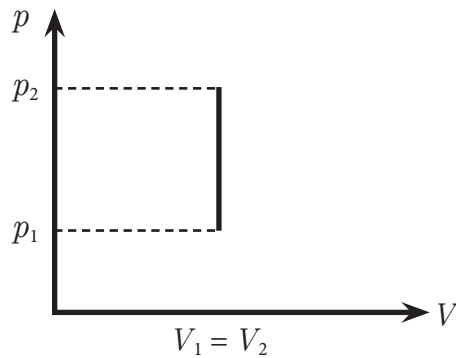
## Изохорни процес

Изохорни процес је процес који се одвија при сталној запремини, тј.

$$V = V_1 = V_2 = \text{const.}, \quad (5.8)$$

као што је приказано на слици 5.4. Пошто је  $\Delta V = 0$ , а и  $A = 0$ , онда према Првом принципу термодинамике количина топлоте доведена систему повећава његову унутрашњу енергију или, ако систем преда околни количину топлоте  $Q$ , његова се унутрашња енергија  $\Delta U$  смањује, тј.

$$Q = \Delta U. \quad (5.9)$$



Слика 5.4 Приказ изохорног процеса

## Изотермни процес

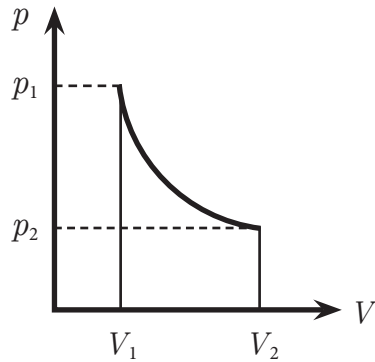
Изотермни процес је процес који се одвија на сталној температури тј.

$$T = \text{const.} \quad (5.10)$$

У складу са једначинама (5.1) и (5.2), пошто је  $\Delta T = 0$ , биће и  $\Delta U = 0$ , па из Првог принципа термодинамике следи да је

$$Q = A = p\Delta V. \quad (5.11)$$

Из израза (5.11) следи да се доведена количина топлоте  $Q$  троши на вршење рада.



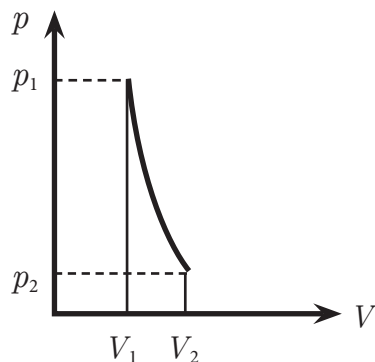
Слика 5.5 Приказ изотермног процеса

Крива на слици 5.5 назива се **изотерма**.

### Адијабатски процес

При овом процесу нема размене топлоте система са околином, јер је систем топлотно изолован ( $Q = 0$ ), па из једначине Првог принципа термодинамике следи да је

$$\Delta U = -A. \quad (5.12)$$



Слика 5.6 Приказ адијабатског процеса

Крива на слици 5.6 назива се **адијабата**.

### Математичка дирекција 8

Математички посматрано, и изотерма и адијабата су посебни случајеви **хиперболе**, која у општем случају има облик  $p \sim 1/V^r$  ( $r > 0$ ). За изотерму је  $r = 1$ , за адијабату  $r = \gamma$ , где је  $\gamma$  величина одређена својствима гаса.

## 5.2.2 ИНТЕНЗИТЕТ БАЗАЛНОГ МЕТАБОЛИЗМА

**Метаболизам** је укупност биолошких, физичких и биохемијских реакција и процеса који се у организму одвијају на нивоу ткива и ћелија у циљу одржавања живота. Метаболизам укључује унос, разградњу, апсорпцију, искоришћавање, прераду хранљивих супстанција у сврху коришћења енергије за животне процесе. Метаболизам сваке животиње је различит, па се мења у зависности од старости, висине, тежине, удела мишићног и масног ткива, утршка енергије. Када се сви ти параметри узму у обзир, долазимо до енергије за основне потребе коју називамо **базални метаболизам**. То је потреба за енергијом за одржавање основних животних функција, попут рада срца, дисања, рада мозга и др.

Сва жива бића троше унутрашњу енергију, чак и кад спавају. Интензитет те потрошње  $\Delta U/\Delta t$ , када су она у будном стању или миру, односно, када не врше никакав спољашњи рад ( $A = 0$ ) назива се **интензитет базалног метаболизма**. На основу Првог принципа термодинамике, он може да се прикаже једначином

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t}. \quad (5.13)$$

## 5.2.3 ДРУГИ ПРИНЦИП ТЕРМОДИНАМИКЕ

Једна од могућих формулација Другог принципа термодинамике гласи: **Топлота спонтано прелази са тела више на тело ниже температуре**. Иако ова формулација изгледа крајње једноставно, она у себи садржи једну битну информацију, а то је да се одузимање топлоте од система који је хладнији од свог окружења може извести само ако се уложи рад (расхладни уређаји).

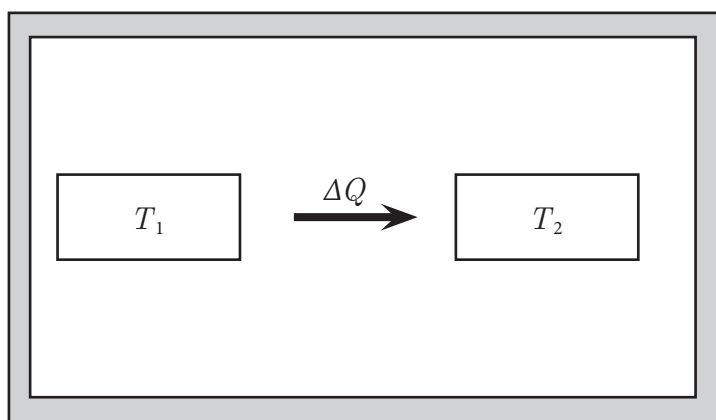
Други принцип термодинамике може да се опише преко физичке величине зване **ентропија** (мера неуређености у неком физичком систему), која се дефинише на следећи начин

$$\Delta S = \frac{Q}{\Delta T}. \quad (5.14)$$

Имајући ово у виду, Други принцип термодинамике има и следећу формулацију – **Ентропија изолованог система никада не опада, већ увек расте или остаје непромењена**.

$$\Delta S_{\text{изол. система}} \geq 0. \quad (5.15)$$

Илустрujemo формулацију (5.15) следећим примером. Посматрамо изолован термодинамички систем који се састоји из два подсистема (сл. 5.7). Нека први подсистем има температуру  $T_1$ , а други температуру  $T_2$  и нека је  $T_1 > T_2$ . Ако су подсистеми у контакту, у складу са формулацијом Другог принципа термодинамике (да топлота спонтано прелази са тела више на тело ниже температуре), топлота ће прелазити са подсистема температуре  $T_1$  у подсистем температуре  $T_2$ . Нека је размењена количина топлоте између подсистема  $\Delta Q$ . Сада, ако израчунамо укупну промену ентропије система, према (5.14), водећи рачуна о знаку количине топлоте (видети потпоглавље 5.1.4), промене ентропије првог и другог подсистема су:  $\Delta S_1 = -\Delta Q/T_1$  и  $\Delta S_2 = \Delta Q/T_2$ . Имајући у виду да је  $T_1 > T_2$ , видимо да је  $|\Delta S_1| > |\Delta S_2|$ , тј. укупна промена ентропије је  $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 > 0$ .



**Слика 5.7** Уз илустрацију Другог принципа термодинамике

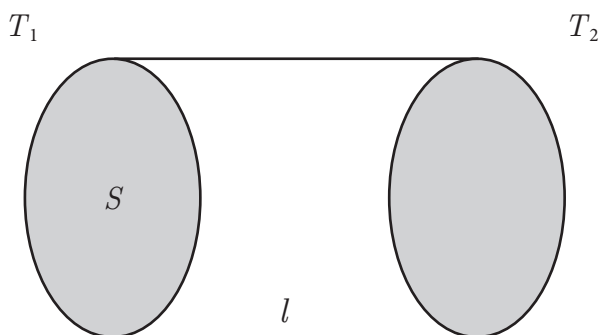


## 5.3 ПРЕНОС ТОПЛОТЕ

Топлота се са једног тела на друго може преносити помоћу три механизма, а то су: **провођење (кондукција), зрачење (радијација) и струјање (конвекција).**

### 5.3.1 ПРЕНОС ТОПЛОТЕ ПРОВОЂЕЊЕМ (КОНДУКЦИЈОМ)

**Провођење** је процес карактеристичан за чврста тела, у којем се кинетичка енергија вибрација честица тела (молекула, атома, јона) преноси сударима између најближих честица из једног у други део тела, док оне саме остају у близини својих равнотежних положаја.



**Слика 5.8** Уз илустрацију провођења топлоте

**Количина топлоте пренета у јединици времена ( $\Delta Q/\Delta t$ ) износи**

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k_p S \frac{\Delta T}{l}, \quad (5.16)$$

где је  $k_p$  [W/(m K)] коефицијент провођења топлоте карактеристичан за материјал,  $S$  површина, а  $\Delta T = T_2 - T_1$  разлика температура на растојању  $l$  (сл. 5.8).

### 5.3.2 ПРЕНОС ТОПЛОТЕ ЗРАЧЕЊЕМ (РАДИЈАЦИЈОМ)

Свако тело, у јединици времена, израчи топлоту у виду електромагнетног зрачења, која је сразмерна четвртој степену његове апсолутне температуре (**Стефан–Болцманов закон**). Ово зрачење чине електромагнетни таласи (већ поменути у поглављу 2, а детаљно ће бити разматрани у поглављу 10). Стефан–Болцманов закон има облик

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \sigma T^4 S, \quad (5.17)$$

где је  $\varepsilon$  емисивност карактеристична за материјал,  $\sigma$  Стефан–Болцманова константа која има вредност  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{K}^4\text{m}^2)$ , а  $T$  је апсолутна температура тела површине  $S$ .

Напоменимо да зрачење којим се преноси енергија апсорбује други материјал, а количина апсорбованог зрачења (у јединици времена по јединици површине) окарактерисана је величином која се назива апсорптивност.

Стефан–Болцманов закон нам говори о количини енергије коју тело емитује. Међутим, често је важно да се зна и на којој таласној дужини бива емитовано електромагнетно зрачење. О овој особини нам говори **Винов закон померања**, према којем се зрачење емитује на свим таласним дужинама, а таласна дужина  $\lambda_{\max}$  на којој тело емитује највише енергије је обрнуто пропорционална температури тела:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (5.18)$$

где је  $b$  Винова константа померања, чија бројна вредност износи  $2.8977729 \times 10^{-3} \text{ K m}$ .

### 5.3.3 ПРЕНОС ТОПЛОТЕ СТРУЈАЊЕМ (КОНВЕКЦИЈОМ)

**Конвекција** је преношење топлоте кретањем макроскопских делића флуида, где се њихови делићи крећу од хладније ка топлијој области и обрнуто. На тај начин долази до преноса топлоте кроз флуид. Количина топлоте пренета конвекцијом у јединици времена ( $\Delta Q/\Delta t$ ) износи

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k_f S \frac{\Delta T}{\Delta l}, \quad (5.19)$$

где је  $k_f$  [ $\text{W}/(\text{m K})$ ] коефицијент конвекције карактеристичан за флуид,  $S$  површина,  $\Delta l$  дужина, а  $\Delta T$  је разлика температура која проузрокује струјање.

### **5.3.4 ШТА СЕ ДЕШАВА У ТЕЛУ ЖИВОТИЊА У ПОГЛЕДУ ПРЕНОСА ТОПЛОТЕ?**

Утврђено је да се око 20% енергије садржане у храни претвара у рад, док се осталих 80% појављује као топлота. Ова топлота углавном одлази у крвоток, пошто се крв понаша као конвективни флуид који топлоту доноси до површине коже. Топлота доспела до коже се потом са њене површине и респираторним органима преноси даље конвекцијом и зрачењем.

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Написати израз за средњу кинетичку енергију молекула. Дефинисати сваки члан.
2. Шта су топлота и рад?
3. Може ли топлота директно да се измери?
4. Извести израз за рад једног термодинамичког система. Дефинисати сваки члан.
5. Како гласи Први принцип термодинамике?
6. Како се дефинише специфична топлота супстанције?
7. Шта је изобарни процес?
8. Нацртати дијаграм изобарног процеса у  $(p, V)$  координатном систему.
9. Шта је изохорни процес?
10. Нацртати дијаграм изохорног процеса у  $(p, V)$  координатном систему.
11. На шта се троши топлота при изохорном процесу?
12. Шта је изотермни процес?
13. Нацртати дијаграм изотермног процеса у  $(p, V)$  координатном систему.
14. Шта је адијабатски процес?
15. Шта је интензитет базалног метаболизма?
16. Како гласи Други принцип термодинамике?
17. Како је дефинисана ентропија?
18. Дефинисати Други принцип термодинамике преко ентропије.
19. Којим механизмима се у природи преноси енергија?
20. Написати израз за провођење (кондукцију) и дефинисати сваки члан.
21. За које агрегатно стање материје је карактеристично провођење топлоте конвекцијом?
22. Шта је зрачење (радијација)?
23. Написати израз за Стефан–Болцманов закон и дефинисати сваки члан.
24. Како гласи Винов закон померања?

## **6. ЕЛЕКТРИЦИТЕТ И МАГНЕТИЗАМ**

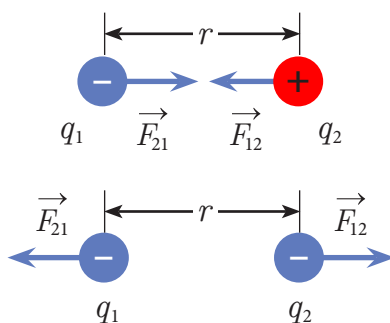


## 6.1 ЕЛЕКТРОСТАТИКА

**Електростатика** се бави наелектрисањима која мирују. У овом поглављу ћемо увести низ појмова који су битни за целу **науку о електрицитету**. Наелектрисање је једна од основних особина честица које граде супстанцију, манифестује се и у макросвету. Присуство наелектрисања се региструје појавом сила које нису механичког порекла. За разлику од других основних особина постоје две врсте наелектрисања, које условно називамо **позитивним** и **негативним**. Величину наелектрисања квантитативно изражавамо преко физичке величине назване **количина наелектрисања**  $q$ , чија је јединица [C] која се назива кулон (1 C).

### 6.1.1 КУЛОНОВ ЗАКОН

Основни закон у електростатици је назван по француском инжењеру Кулону, који га је установио експерименталним путем. Кулонов закон изражава силу  $\vec{F}_c$  која делује између два,  $q_1$  и  $q_2$ , наелектрисања чији су центри на растојању  $r$  (сл. 6.1). Интензитет ове силе износи



**Слика 6.1** Уз Кулонов закон

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1q_2}{r^2}, \quad (6.1)$$

где је  $\epsilon_0$  диелектрична константа у вакууму [ $C^2/(Nm^2)$ ], а  $\epsilon_r$  је бездимензиона величина названа релативна диелектрична константа (за вакуум, а у доброј апроксимацији и за ваздух  $\epsilon_r = 1$ ).

Знамо да је сила вектор. Правац и смер Кулонове силе која делује на једно од наелектрисања се одређује на следећи начин. Правац се поклапа са правом која спаја центре наелектрисања, а ако су наелектрисања разноимена (позитивно и негативно), сила је привлачна и усмерена од једног ка другом наелектрисању. Ако су наелектрисања истоимена (оба истог знака), онда је сила одбојна, те је усмерена од наелектрисања. На горњој слици 6.1 наелектрисања су разноимена, а на доњој истоимена.

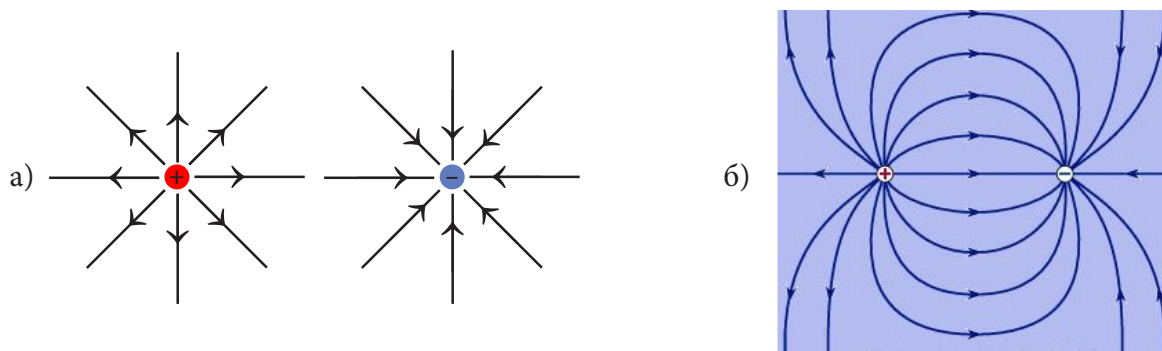
## 6.1.2 ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО ПОЉЕ

То је део простора где се осећа дејство електростатичке силе. Другим речима, то је физичко поље око наелектрисања  $q$  које га изазива.

Јачина електростатичког поља  $\vec{E}$  је вектор чији је интензитет  $E$  једнак сили која делује на јединично наелектрисање унето у то поље. Уколико посматрамо електростатичко поље тачкастог наелектрисања, тада је јачина поља дата изразом:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q}{r^2}. \quad (6.2)$$

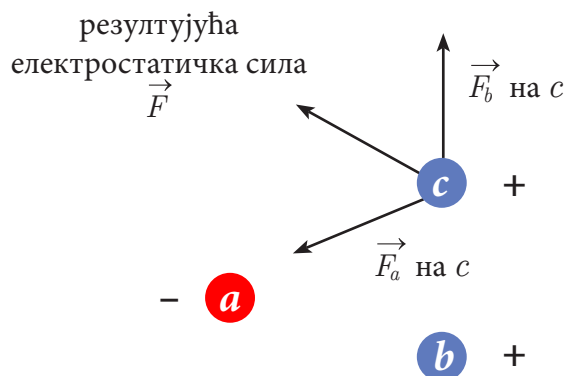
Правац и смер електростатичког поља су приказани његовим линијама силе. То су линије којима би се кретало позитивно наелектрисање унето у поље.



**Слика 6.2** Пример линија силе електростатичког поља за а) тачкасто наелектрисање и б) два разноимена тачкаста наелектрисања

### 6.1.3 ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО ПОЉЕ ВИШЕ НАЕЛЕКТРИСАЊА

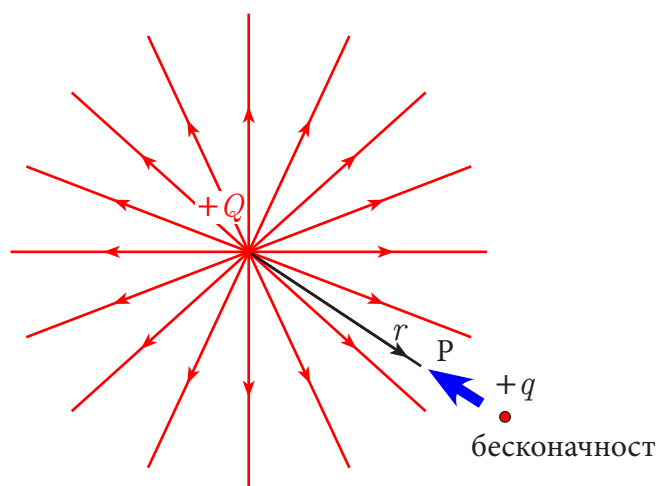
Електростатички принцип суперпозиције тврди да се јачина електростатичког поља у некој тачки, које потиче од више наелектрисања, добија векторским сабирањем јачина које она стварају, као што је приказано на слици 6.3.



Слика 6.3 Уз електростатички принцип суперпозиције

### 6.1.4 ПОТЕНЦИЈАЛ ЕЛЕКТРОСТАТИЧКОГ ПОЉА

Потенцијал електростатичког поља  $V$  у некој тачки је износ потенцијалне енергије по јединици наелектрисања у тој тачки.



Слика 6.4 Уз дефиницију електростатичког потенцијала



Позитивно наелектрисање  $q$  стиче потенцијалну енергију у односу на наелектрисање  $Q$  када га пренесемо из бесконачности, дуж дебље стрелице, у одређену тачку  $P$  у пољу која се налази на растојању  $r$  од наелектрисања  $Q$  (сл. 6.4). Та промена потенцијалне енергије једнака је извршеном раду  $A$  против силе електростатичког поља, при чему важи веза

$$V = \frac{A}{q}. \quad (6.3)$$

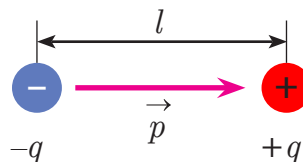
Према изразу (6.3), електростатички потенцијал се изражава у јединици [J/C] која се назива волт (1 V). Када је  $Q$  тачкасто наелектрисање које ствара поље, израз за потенцијал има облик

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r}. \quad (6.4)$$

Помоћу јединице волт се дефинише и јединица за веома мале енергије које се јављају у микросвету, а назива се **електронволт (eV)**. Један електронволт (**1 eV**) је кинетичка енергија коју стекне електрон (наелектрисања  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C) при кретању у електростатичком пољу између тачака између којих је потенцијална разлика од 1 V тј.  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ CV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Ако се подсетимо закона о одржању енергије, можемо рећи да је један електронволт промена потенцијалне енергије електрона при промени његовог положаја у електростатичком пољу између тачака између којих је потенцијална разлика 1 V.

## 6.1.5 ЕЛЕКТРИЧНИ ДИПОЛ

Два једнака тачкаста наелектрисања  $q$  супротног знака, на међусобном растојању  $l$ , чине **електрични дипол** (сл. 6.5).



**Слика 6.5** Електрични дипол

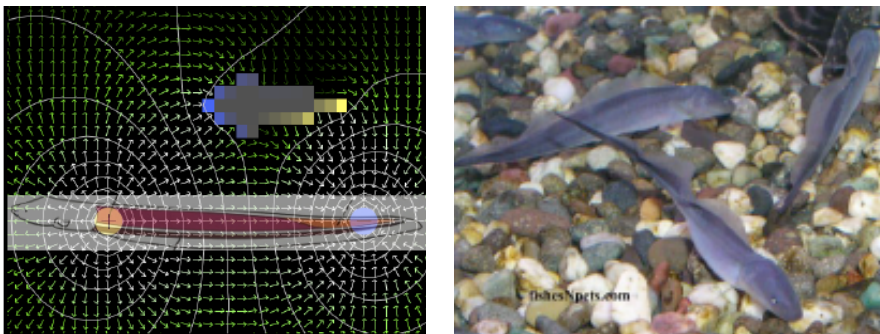
**Диполни момент**  $\vec{p}$  је векторска величина која карактерише електрични дипол. Правац му је одређен линијом која спаја наелектрисање, а смер је од негативног ка

позитивном. Интензитет тог вектора је дефинисан као производ растојања међу наелектрисањима и њихове количине, тј.

$$p = ql. \quad (6.5)$$

## Врсте дипола

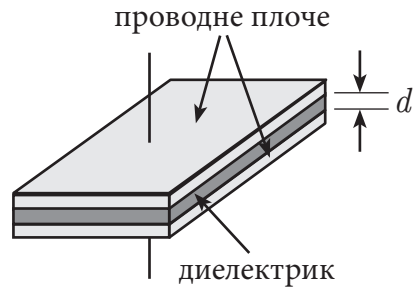
Диполи могу да буду: **стални**, када су позитивно и негативно наелектрисање стално раздвојени и **индуковани**, када се наелектрисања раздвајају тек под дејством спољашњег електростатичког поља. Пример сталног дипола приказан је на слици 6.5. Када се материјал са сталним диполима доведе у електростатичко поље, диполи се оријентишу тј. постављају дуж линија сила електростатичког поља (**оријентација дипола**). Слично томе, и индуковани диполи се постављају дуж поља. Укупан ефекат ове две појаве се назива **поларизација диелектрика** и он је разлог за смањење јачине поља унутар диелектрика, што се манифестује кроз величину релативне диелектричне константе. Илустративан пример индукованог дипола је приказан на слици 6.6 у комуникацији између риба. Наиме, велики број риба за детекцију и комуникацију користи електростатичко поље индукованог дипола.



Слика 6.6 Пример индукованих дипола у комуникацији риба

## 6.1.6 КОНДЕНЗАТОРИ

**Кондензатор** је уређај у који може да се ускладишти наелектрисање. Кондензатор обично чине два проводника, између којих се налази **изолатор (диелектрик)**. **Проводници** су материјали у којима наелектрисања могу слободно да се крећу, док су у изолаторима чврсто везана за атоме.



Слика 6.7 Раван (плочаст) кондензатор

## Капацитет кондензатора

**Капацитет кондензатора**  $C$  говори колико наелектрисања може да се ускладишти у кондензатор. Његова јединица [F] се назива фарад (1 F). Име је добила по великом самоуком енглеском научнику Мајклу Фарадеју (1791–1867). Капацитет се израчунава као

$$C = \frac{q}{U}, \quad (6.6)$$

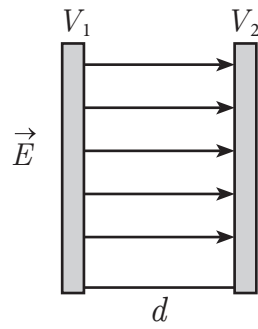
где је  $q$  количина ускладиштеног наелектрисања, а  $U$  тзв. **напон** који је једнак разлици потенцијала на изводима кондензатора. Очигледно је да је јединица за напон иста као јединица за потенцијал тј. 1 V.

Ако је  $C_0$  капацитет кондензатора код којег је простор између проводника у кондензатору испуњен ваздухом, а  $\epsilon_r$  релативна диелектрична константа материјала којим се испуњава тај простор, онда је капацитет кондензатора  $C$  једнак

$$C = \epsilon_r C_0. \quad (6.7)$$

## Електростатичко поље равног кондензатора

Електростатичко поље унутар равног кондензатора има посебну особину да су му све векторске линије међусобно паралелне и да му је интензитет у свим тачкама једнак. Такво поље назива се хомогено.



**Слика 6.8** Електростатичко поље равног кондензатора

Интензитет електростатичког поља  $E$  у том случају износи

$$E = \frac{U}{d}, \quad (6.8)$$

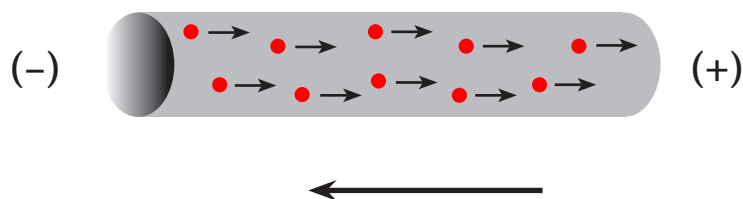
где је  $d$  растојање између плоча кондензатора, а  $U$  је разлика потенцијала тј.  $V_1 - V_2$ .

## 6.2 ЈЕДНОСМЕРНА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА

До сада смо се бавили наелектрисањима која мирују (електростатика). Међутим, када се наелектрисања крећу под дејством електричног поља, онда говоримо о **електричној струји**. Овде ћемо се бавити њеним обликом познатим као **једносмерна струја**.

### 6.2.1 ЈЕДНОСМЕРНА СТРУЈА

**Једносмерна струја** је усмерено кретање носилаца наелектрисања (најчешће електрона или јона у електролитима, видети поглавље 7.1) истог знака под дејством електричног поља, односно разлике потенцијала која га ствара.

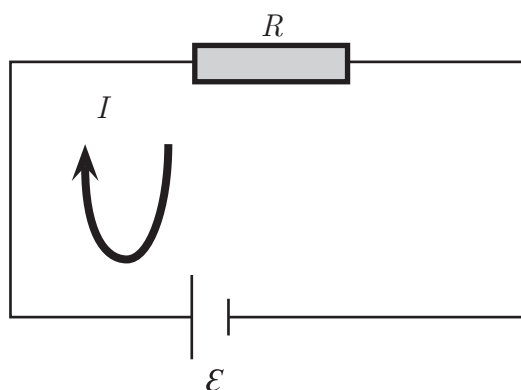


**Слика 6.9** Шематски приказ настанка једносмерне струје у металном проводнику. Испуњеним кружићима су назначени носиоци наелектрисања – електрони, док велика стрелица показује смер струје.

Важно је да већ на овом месту напоменемо да у физици и техници постоји конвенција, по којој се сматра да једносмерна струја увек тече из области вишег (+) потенцијала ка области нижег (-) потенцијала. Према томе, смер струје на слици 6.9 је супротан од смера кретања електрона.

### Електрично коло

**Електрично коло** представља сваки затворени проводни пут повезан са извором електромоторне силе (сл. 6.10). **Електромоторном силом**  $\mathcal{E}_e$  се назива разлика потенцијала која обезбеђује стално протицање струје. На слици 6.10 видимо и стандардну ознаку за извор електромоторне силе, при чему дужа црта означава крај на вишем потенцијалу.



Слика 6.10 Просто електрично коло

## 6.2.2 ЈАЧИНА СТРУЈЕ

### Дефиниција јачине струје

Јачина струје  $I$  је дефинисана на следећи начин:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (6.9)$$

где је  $q$  количина наелектрисања (C), а  $t$  је време (s). Према изразу (6.9), јачина струје се изражава у јединици [C/s] која се назива ампер (1 A).

**Пример 6.1** Кроз метални проводник протиче стална електрична струја јачине  $I = 1$  A. Колика количина наелектрисања  $q$  протекне кроз проводник за време  $t = 1$  h?

**Решење.** На основу израза (6.9), количина наелектрисања је

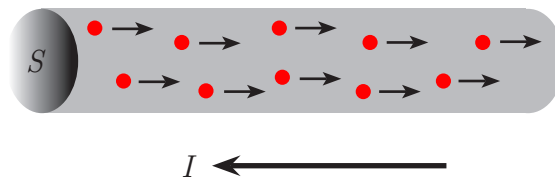
$$q = It = 1 \text{ A} \times 3600 \text{ s} = 3600 \text{ C}.$$

### Густина струје

Густина струје  $j$  је дефинисана на следећи начин:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (6.10)$$

где је  $I$  јачина струје [A], а  $S$  је површина попречног пресека проводника [ $\text{m}^2$ ].



Слика 6.11 Уз дефиницију густине струје

### 6.2.3 ОМОВ ЗАКОН

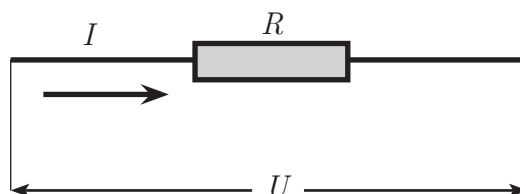
**Омов закон** даје везу основних величина које карактеришу електрично коло или један његов део и ова два случаја размотрићемо посебно.

#### Омов закон за део електричног кола

Посматрамо део електричног кола у ком нема гранања (сл. 6.12). Ако је разлика потенцијала на крајевима те гране једнака  $U$ , јачина струје  $I$  која тече кроз ту грану износи

$$I = \frac{U}{R}, \quad (6.11)$$

где је  $R$  тзв. **електрични отпор** који се изражава у јединици  $[\Omega]$  која се назива ом ( $1 \Omega$ ).



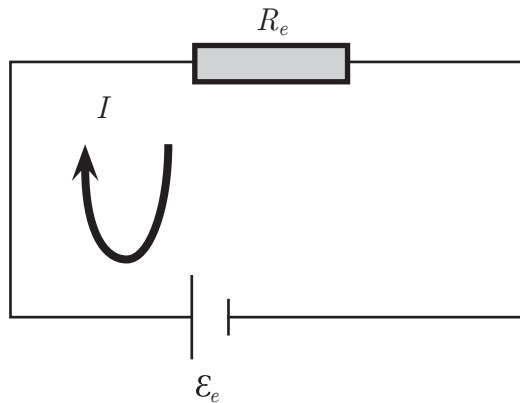
Слика 6.12 Уз Омов закон за део електричног кола

#### Омов закон за просто електрично коло

На овом месту ћемо да формулишемо Омов закон за **просто електрично коло**. То је коло у ком нема гранања (сл. 6.10). Јачина струје  $I$  у таквом колу (сл. 6.13) износи

$$I = \frac{\mathcal{E}_e}{R_e}, \quad (6.12)$$

где је  $\mathcal{E}_e$  алгебарски збир електромоторних сила, а  $R_e$  је еквивалентни отпор кола, о коме ће речи бити касније.



**Слика 6.13** Уз Омов закон за просто електрично коло

**Пример 6.2** Колика струја јачине  $I$  протиче кроз отпорник отпорности  $R = 1 \text{ k}\Omega$ , прикључен на извор електромоторне силе  $\mathcal{E} = 220 \text{ V}$  (сл. 6.13)?

**Решење.** На основу израза (6.12) јачина струје је

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = 220 \text{ V} / 1000 \Omega = 0,22 \text{ A}.$$

## 6.2.4 ЕЛЕКТРИЧНИ ОТПОР

### Отпор проводника

Сваки проводник се на одређени начин супротставља протицању струје, изазивајући губитак енергија носилаца наелектрисања који се манифестује у облику топлоте коју проводник ослобађа. Ова особина се описује **електричним отпором** уведеним код Омовог закона.

За проводник дужине  $l$  и попречног пресека  $S$  отпор  $R$  можемо да израчунамо на следећи начин



$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (6.13)$$

где је  $\rho$  тзв. **специфични отпор** који је карактеристика материјала [ $\Omega\text{m}$ ]. Полазећи од формуле (6.13), можемо га дефинисати као отпор узорка јединичне дужине и јединичног попречног пресека. Подсетимо се да се делови (елементи) струјног кола који обезбеђују потребну вредност отпора називају **отпорници**.

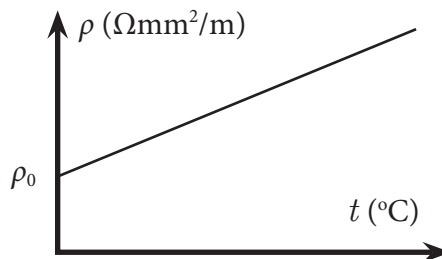
За практичне намене је веома важна величина **специфична проводност** ( $\sigma_p$ ), која је карактеристика материјала и може се дефинисати као реципрочна вредност специфичног отпора; изражава се у јединици [ $1/\Omega\text{m}$ ] која се назива сименс (1 S). Постоји и микроскопска дефиниција повезана са кретањем носилаца наелектрисања. Из кинетичке теорије гасова знамо да на свакој температури постоји хаотично кретање честица. На пример, код метала се то односи на слободне електроне. Ако сада делујемо на њих спољашњим електричним пољем, брзина електрона добија и једну компоненту усмерену дуж поља чија се средња вредност назива **брзина дрифта**  $v_d$ . Тада се специфична проводност дефинише као производ брзине дрифта, наелектрисања електрона и броја електрона по јединици запремине. Врло често се ова величина изражава преко покретљивости електрона, која је једнака односу брзине дрифта и јачине спољашњег електричног поља  $E$  које изазива усмерено кретање наелектрисања.

### Зависност специфичног отпора од температуре

Електрични отпор проводника зависи од његове температуре. У првој апроксимацији он расте линеарно са повишењем температуре, као што је приказано на слици 6.14. Та зависност се изражава преко формуле

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t), \quad (6.14)$$

где је  $\rho_0$  специфични отпор материјала проводника на  $0^\circ\text{C}$ ,  $t$  његова температура [ $^\circ\text{C}$ ], а  $\alpha$  је температурски коефицијент отпора [ $1/^\circ\text{C}$ ].



**Слика 6.14** Зависност специфичног отпора проводника од температуре

Напомињемо да јединица за специфични отпор коришћена на слици 6.14, строго гледано, не припада SI систему али је изузетно погодна за практична израчунавања, па је због тога употребљавамо у наведеној форми.

**Пример 6.3** Колики треба да буде попречни пресек бакарног проводника дужине  $l = 10 \text{ km}$  да би његова отпорност износила  $R = 17 \text{ } \Omega$ ? (Специфични отпор бакра износи  $\rho = 0,0017 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .)

**Решење.** На основу израза (6.13), попречни пресек  $S$  је

$$S = \rho \frac{l}{R} = 0,0017 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m} \times 10\,000 \text{ m}/17 \text{ } \Omega = 1 \text{ mm}^2.$$

## 6.2.5 ВЕЗИВАЊЕ ОТПОРНИКА И ИНСТРУМЕНАТА У СТРУЈНОМ КОЛУ

Елементи струјног кола се у принципу могу везивати на два начина – редно и паралелно.

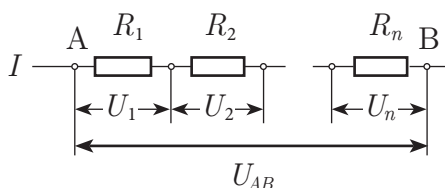
Елементи су везани **редно** када кроз њих протиче иста струја.

Елементи су везани **паралелно** ако су њихови крајеви на истој разлици потенцијала.

### Везивање отпорника

У циљу поједностављивања струјног кола, можемо у одређеним случајевима групу отпорника да заменимо једним отпорником који има **еквивалентни отпор**.

Ако је више отпорника чији је број  $N$  везано редно као што је то приказано на слици 6.15,



**Слика 6.15** Редно везани отпорници

тај скуп отпорника може да се замени једним везаним између тачака А и В, чији је еквивалентни отпор  $R_e$  једнак

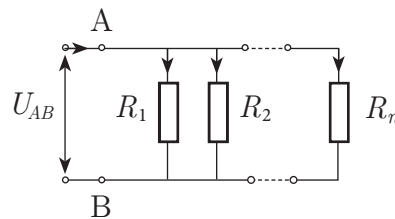
$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_N, \quad (6.15a)$$

или скраћено

$$R_e = \sum_{i=1}^N R_i. \quad (6.15b)$$

За објашњење симбола за суму  $\sum$  видети математичку дигресију 2 у потпоглављу 1.1.3.

Ако је више отпорника везано паралелно као што је то приказано на слици 6.16,



**Слика 6.16** Паралелно везани отпорници

тај скуп отпорника може да се замени једним везаним између тачака А и В, чији се еквивалентни отпор  $R_e$  израчунава као

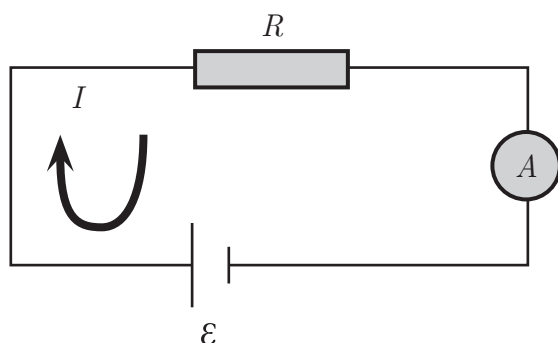
$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}, \quad (6.16a)$$

или скраћено

$$\frac{1}{R_e} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i}. \quad (6.16b)$$

## Везивање амперметра у струјном колу

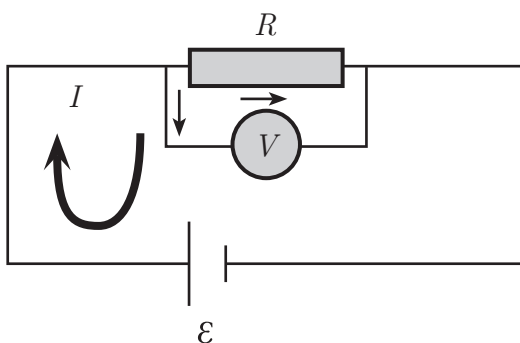
**Амперметар** је инструмент за мерење јачине струје у електричном колу. Ако желимо да измеримо јачину струје која тече кроз неки елемент кола (нпр. отпорник), онда овај инструмент вежемо редно са тим елементом (сл. 6.17).



Слика 6.17 Везивање амперметра

### Везивање волтметра у струјном колу

**Волтметар** је инструмент за мерење напона (разлике потенцијала) између две тачке у електричном колу. Ако желимо да измеримо напон на крајевима неког елемента кола (нпр. отпорника), онда овај инструмент вежемо паралелно са тим елементом (сл. 6.18).



Слика 6.18 Везивање волтметра

**Пример 6.4.** Два отпорника чије су отпорности  $R_1 = 3 \Omega$  и  $R_2 = 6 \Omega$  везани су: а) редно и б) паралелно. Колика је еквивалентна отпорност у оба случаја (сл. 6.15 и 6.16)?

**Решење.**

а) На основу израза (6.15а), еквивалентни отпор  $R_e$  је

$$R_e = R_1 + R_2 = 3 \Omega + 6 \Omega = 9 \Omega.$$

б) На основу израза (6.16а), еквивалентни отпор  $R_e$  је

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = 1/3 \Omega + 1/6 \Omega = 3/6 \Omega \text{ тј. } R_e = 2 \Omega$$

## 6.2.6 ОСЛОБАЂАЊЕ ТОПЛОТЕ У ПРОВОДНИКУ СА ТОКОМ

Као што је већ речено, губитак енергија носилаца наелектрисања у проводнику се манифестује у облику топлоте коју проводник ослобађа.

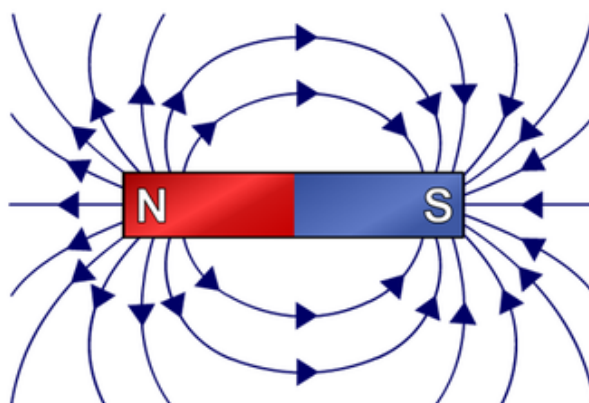
Ако кроз проводник отпора  $R$  тече струја сталне јачине  $I$ , током времена  $t$  ће да се ослободи количина топлоте  $Q$  која износи

$$Q = RI^2t, \quad (6.17)$$

што је формулација закона који се назива Џул–Ленцов закон.

## 6.3 МАГНЕТИЗАМ

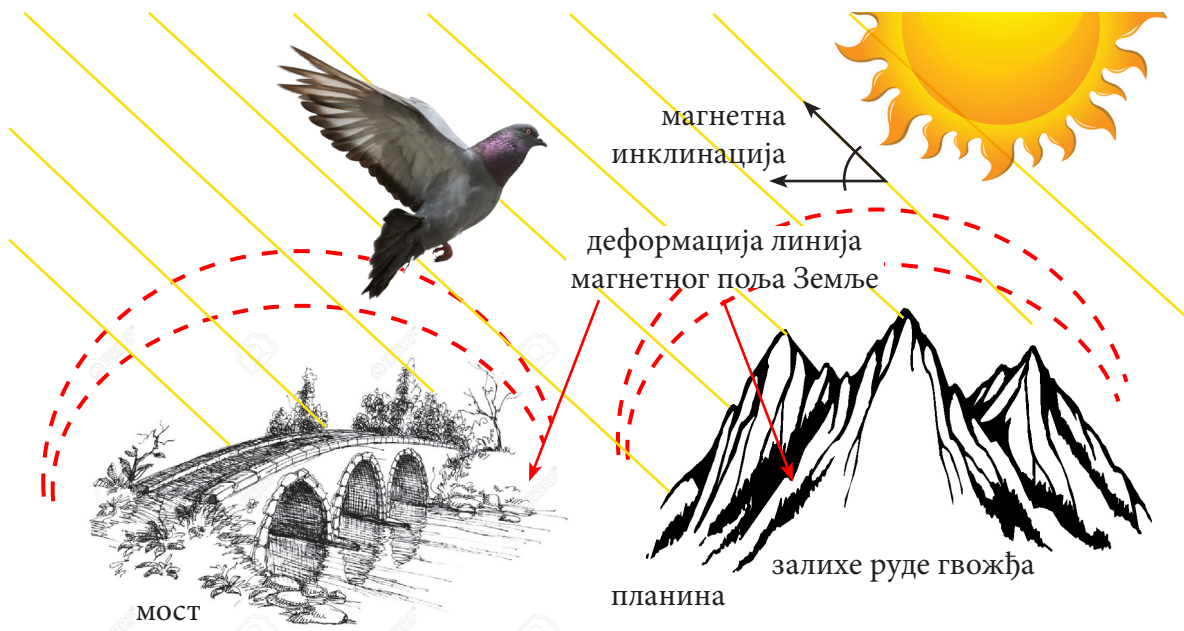
Магнетизам је појава којом описујемо привлачну или одбојну силу између материјала. Магнетна сила је „основна сила” која настаје само услед кретања наелектрисаних честица, што је чини различитом од електростатичке (Кулонове) силе (потпоглавље 6.1.1). По аналогији са електростатичким пољем, магнетно поље је **део простора где се осећа дејство магнетне силе.**



**Слика 6.19** Шематски приказ линија магнетне силе код перманентног (сталног) шипкастог магнета. Ознака „N” означава северни пол магнета, а ознака „S” његов јужни пол.

Линије сила магнетног поља перманентног магнета извиру из северног пола магнета (N) а увиру у његов јужни пол (S), као што је приказано на слици 6.19. Ови називи су се одомаћили стога што је искуство морепловаца показало да је Земљина лопта један велики перманентни магнет. Касније ћемо видети да су линије силе магнетног поља увек затворене, што је последица чињенице да у природи не постоји магнетни монопол као што је био случај код електростатичке силе. Напоменимо да су и силе магнетног поља перманентног магнета затворене, али при њиховој визуализацији не приказујемо део линије која пролази кроз магнет.

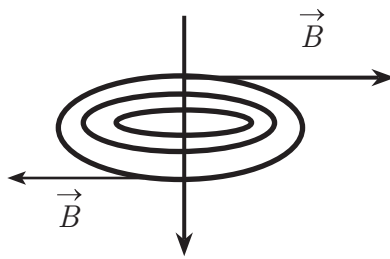
Код великог броја животиња утврђено је постојање малих перманентних магнета који се понашају као игле компаса у магнетном пољу Земље. На слици 6.20 је шематски приказано како голуб заснива своју просторну оријентацију помоћу: а) вида и б) перманентних магнета.



**Слика 6.20** Навођење лета голуба на основу линија магнетног поља Земље. Магнетна инклинација је угао које те линије заклапају са хоризонталом.

### 6.3.1 МАГНЕТНА ИНДУКЦИЈА

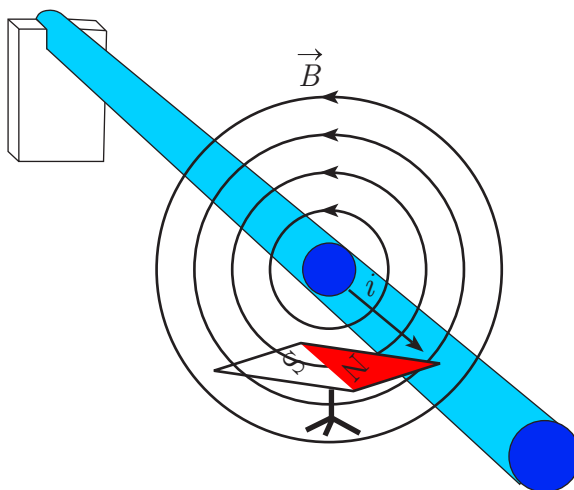
Величина магнетне силе која делује на наелектрисање које се креће у магнетном пољу зависи од количине наелектрисања, брзине његовог кретања и основне карактеристике магнетног поља, а то је вектор **магнетне индукције** ( $\vec{B}$ ). Правац овог вектора у тачки је одређен тангентом у тој тачки на линију силе магнетног поља, док његов смер одговара усмерењу линије (сл. 6.21). Интензитет вектора  $\vec{B}$  се изражава јединицом [Т], која је у част српског научника Николе Тесле (1856–1943) названа тесла (1 Т), чиме му је међународна научна јавност указала велико поштовање. Једноставан начин приказивања интензитета магнетне индукције је преко густине линија силе магнетног поља; на сл. 6.19 се јасно види да је интензитет индукције већи око полова магнета него када се одмакнемо од њих.



**Слика 6.21** Положај вектора магнетне индукције  $\vec{B}$  у односу на линије магнетног поља

## 6.3.2 МАГНЕТНО ПОЉЕ ПРАВОЛИНИЈСКОГ ПРОВОДНИКА

Физика је направила огроман корак када су научници схватили да магнетне појаве потичу од кретања наелектрисаних честица. Прво је примећено да око праволинијског проводника кроз који протиче једносмерна струја постоје **затворене линије силе магнетног поља које обавијају проводник** (сл. 6.22).



Слика 6.22 Линије магнетног поља око проводника једносмерне струје (Ерстедов оглед)

### Правило десне руке

Смер вектора магнетне индукције магнетног поља праволинијског проводника се лако памти коришћењем тзв. правила десне руке, као што је приказано на слици 6.23.

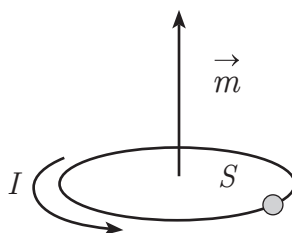


Слика 6.23 Демонстрација правила десне руке. Ако палац показује смер струје, онда прсти показују смер магнетног поља.



### 6.3.3 МАГНЕТНИ ДИПОЛ

**Магнетни дипол** чине северни и јужни пол на одређеном растојању. По аналогји са електричним диполом дефинишемо **магнетни момент дипола**. Кружна струја  $I$  представља најједноставнији магнетни дипол, чији је магнетни момент  $m$  усмерен нормално на површину контуре  $S$  кроз коју протиче струја, као што је приказано на слици 6.24. На тој слици је назначен електрон, чије орбитално кретање око језгра можемо посматрати као струјни круг који ствара магнетно поље дуж осе ротације.



**Слика 6.24** Уз дефиницију магнетног дипола и магнетног момента

Интензитет магнетног момента износи

$$m = IS. \quad (6.18)$$

### 6.3.4 МАГНЕТНЕ ОСОБИНЕ СРЕДИНЕ

Магнетне особине средине се описују величином која се назива **релативна магнетна пермеабилност**  $\mu_r$ , а дефинише се као

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}, \quad (6.19)$$

где су  $B$  и  $B_0$  интензитети магнетне индукције у средини и вакууму, редом.

Према величини релативне пермеабилности, материјале можемо поделити у три групе: (1) материјали у којима спољашње поље, које пролази кроз материјал, незнатно слаби ( $\mu_r < 1$  – **дијамагнетни материјали**); (2) материјали у којима се спољашње поље, које пролази кроз материјал, незнатно појачава ( $\mu_r > 1$  – **парамагнетни материјали**) и (3) материјали у којима се спољашње поље, које пролази кроз материјал, знатно појачава ( $\mu_r \gg 1$  – **феромагнетни материјали**).

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Написати израз за Кулонов закон и дефинисати сваки члан.
2. Ако је Кулонова сила у вакууму  $F_0$ , колика је Кулонова сила  $F_r$  у средини са релативном диелектричном константом  $\epsilon_r$ ?
3. Шта је електростатичко поље?
4. Написати израз за електростатичко поље тачкастог наелектрисања и дефинисати сваки члан.
5. Шта су линије силе електростатичког поља?
6. Шта је принцип суперпозиције јачине електростатичког поља?
7. Нацртати линије силе које потичу од два супротна наелектрисања која се налазе на неком растојању.
8. Шта је потенцијал електростатичког поља?
9. Шта је 1 eV (електрон волт)?
10. Ако је рад електростатичког поља једнак  $A = 3,2 \times 10^{-18}$  J, колика је његова вредност изражена у eV?
11. Написати израз за јачину електростатичког поља плочастог кондензатора и дефинисати сваки члан.
12. Дефинисати диполни момент.
13. Које врсте дипола постоје?
14. Шта је са електронима у диелектрику?
15. Каквим везама су везани електрони за језгро у проводнику?
16. Шта користи велики број риба за детекцију и комуникацију?
17. Шта је кондензатор?
18. Написати израз за капацитет кондензатора и дефинисати сваки члан.
19. Ако је  $C_0$  капацитет кондензатора у ваздуху, а  $\epsilon_r$  релативна диелектрична константа, колики је капацитет кондензатора испуњеног овим диелектриком?
20. Шта је електрична струја?
21. Шта је електрично коло?
22. Написати израз за везу количине наелектрисања и јачине струје и дефинисати сваки члан.

23. Чему је једнака густина струје?
24. Написати израз за Омов закон и дефинисати сваки члан.
25. Написати израз за отпор преко специфичног отпора и дефинисати преостале чланове.
26. Шта је брзина дрифта?
27. Написати израз за зависност специфичног отпора од температуре и дефинисати сваки члан.
28. Како се везује амперметар у струјном колу?
29. Како се везује волтметар у струјном колу?
30. Написати израз за топлоту ослобођену од проводника кроз који протиче струја и дефинисати сваки члан.
31. Када гром удари у громобран, тада кроз проводник који је шиљак везан са земљом протиче струја јачине  $I = 100 \text{ kA}$ . Ова струја протиче током времена  $t = 5 \text{ s}$ . Колика количина наелектрисања из облака при томе пређе у земљу?
32. Кроз отпорник  $R = 40 \text{ } \Omega$  протиче струја јачине  $I = 10 \text{ mA}$ . Колики је напон  $U$  на крајевима овог отпорника (сл. 6.12)?
33. Колика треба да је дужина бакарног проводника, површине попречног пресека  $S = 1 \text{ mm}^2$ , да би његова отпорност износила  $1 \text{ } \Omega$  (специфични отпор бакра износи  $\rho = 0,0017 \text{ mm}^2/\text{m}$ )?
34. Три отпорника чије су отпорности  $3 \text{ } \Omega$ ,  $6 \text{ } \Omega$  и  $2 \text{ } \Omega$  везани су: а) редно и б) паралелно. Колика је еквивалентна отпорност у оба случаја?
35. Шта је магнетно поље?
36. Како се понашају мали перманентни магнети код великог броја животиња?
37. Која је јединица за магнетну индукцију?
38. Како је дефинисан интензитет магнетног дипола?
39. Шта је магнетна пермеабилност?
40. Шта су дијамагнетни материјали?
41. Шта су парамагнетни материјали?
42. Шта су феромагнетни материјали?



## **7. ΤΡΑΝΣΠΟΡΤΗ ΠΟΪΑΒΕ**



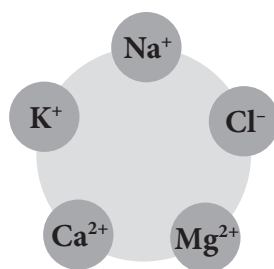
## 7.1 ЕЛЕКТРОЛИТИЧКА ДИСОЦИЈАЦИЈА И ЕЛЕКТРОЛИЗА

У физици, техници и хемији се под **транспортном појавом** подразумева размена масе, енергије, количине кретања и наелектрисања између два система или два дела система (подсистема) који се проучава.

### 7.1.1 ЕЛЕКТРОЛИТИ И ЕЛЕКТРОЛИТИЧКА ДИСОЦИЈАЦИЈА

#### Електролити

У хемији, **електролит** (сл. 7.1) је супстанција која садржи слободне **јоне** (атоми или молекули који нису неутрални) који је чине **електричним проводником**, тј. проводником II реда (проводници I реда су метали у којима су носиоци наелектрисања електрони). Усвојена је конвенција по којој се позитивни јони називају **катјони** (привлачи их негативно наелектрисана електрода – **катода**), а негативни – **анјони** (привлачи их позитивно наелектрисана електрода – **анода**). Електролит се разлаже на јоне када је **растворен у растварачу**. Са техничке стране гледишта, електролит је назив за сваку супстанцију која је способна да врши јонски пренос струје.



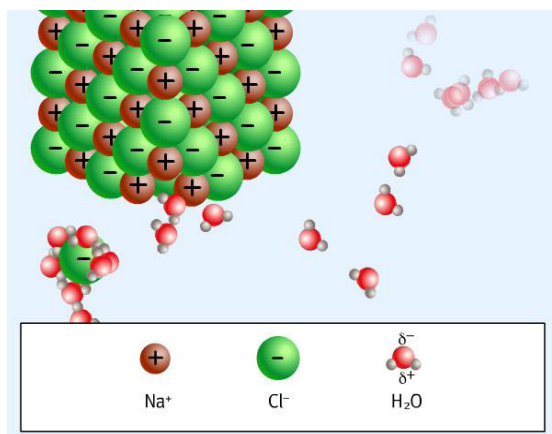
Слика 7.1 Јони главних електролита у биофизици

## Електролитичка дисоцијација

**Електролитичка дисоцијација** је разлагање молекула електролита на позитивне или негативне јоне, под утицајем молекула растварача, нпр.



Дисоцијација је последица процеса солватације код поларних растварача у којем поларни молекули растварача окружују растворак, при чему се под **солватацијом** подразумева процес окруживања честице **растворка** честицама **растварача**, као што је приказано на слици 7.2. На овој слици је шематски приказан раствор NaCl у води, која је најчешћи растварач, као што је то приказано на њеном горњем делу. Молекули воде (растварача) је дипол, што се види у уоквиреном делу слике 7.2.



**Слика 7.2** Молекули растворене супстанције ( $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ ) у кристалном облику окружени диполима воде

У том процесу долази до неутралисања електростатичке привлачне силе међу јонима растворка те се они, солватисани, удаљују једни од других, дакле постају слободни јони. Важно је уочити да поларни растварач не ствара јоне већ их само ослобађа из кристала. Због тога способност дисоцијације имају јонска или веома јака поларна ковалентна једињења.

Дисоцијација је повратна реакција – ако се уклоне молекули поларног растварача (упаравањем или разблаживањем мање поларним растварачем), долази до стварања неутралних молекула који могу бити мање или више растворни. Исто тако, додаток јачег електролита који има заједнички јон са слабијим сузбија дисоцијацију слабијег. Електролитичкој дисоцијацији у води су подложне све растворљиве соли, већина киселина и база. Но, не морају сви да дисосују у истом степену. На пример, сирћетна киселина је растворна у води, али дисосује врло слабо у односу на сумпорну киселину.

**Степен дисоцијације** је мерило дисоцијације јонског једињења и представља однос броја дисосованих  $n$  према укупном броју молекула  $N$  тј.

$$\alpha = \frac{n}{N}. \quad (7.1)$$

Степен електролитичке дисоцијације може да има вредности између 0 и 1. Из његове дефиниције следи да је  $\alpha = 0$  када нема дисоцијације ( $n = 0$ ), односно  $\alpha = 1$  када су сви молекули растворене супстанције дисосовани на јоне ( $n = N$ ). Степен дисоцијације зависи од природе растворене супстанције и растварача, концентрације раствора и температуре. Електролити чији је степен дисоцијације близак јединици називају се јаки електролити.

У одељку 6.2.4 дефинисана је специфична проводност метала. Ту карактеристику поседују и електролити и она зависи од степена дисоцијације, концентрације и температуре, као и од величине јона. Проводност електролита зависи и од брзине јона, односно њихове покретљивости. Покретљивост јона електролита  $u$  дефинише се као

$$u = \frac{v}{E}, \quad (7.2)$$

где је  $v$  брзина јона која је последица електричног поља (брзина дрифта), а  $E$  јачина електричног поља у којем се електролит налази.

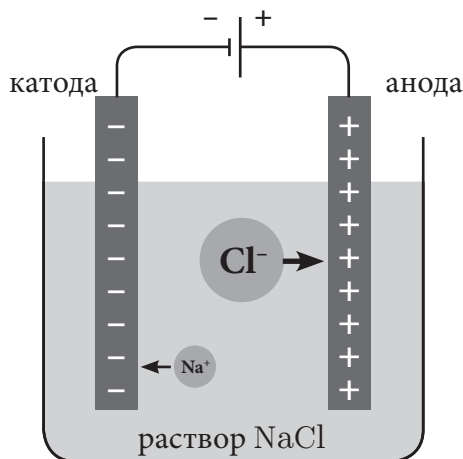
Све биолошке течности по својој природи су електролитички раствори, одакле следи да проводе електричну струју. Поређења ради, специфична проводност дестиловане воде је хиљаду пута мања од проводности најзначајнијих биолошких течности (крв, крвна плазма и цереброспиналне течности).

## 7.1.2 ФАРАДЕЈЕВИ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРОЛИЗЕ

Када се електроде потопљене у раствор електролита прикључе на извор једносмерне струје, онда под дејством електричног поља долази до усмереног кретања јона тј. појаве струје, као што је већ објашњено. Услед тог кретања долази до издвајања супстанција на електродама, што је у физици познато као **електролиза** (сл. 7.3).

Продукти електролизе могу да буду примарни и секундарни. Примарни су они који директно настају процесом дисоцијације, док секундарни настају у реакцијама примарних продуката са растварачем. Важно је да се истакне да по приспећу на електроду јон бива неутралисан, тако да се издваја у облику атома или молекула.





**Слика 7.3** Шематски приказ електролизе кухињске соли (Na + Cl)

Процес електролизе се описује двама квантитативним законима познатим под именом **Фарадејеви закони електролизе**.

### Први Фарадејев закон

Маса  $m$  супстанције издвојене на електроди управо је пропорционална количини наелектрисања  $q$ , или производу јачине струје  $I$  и времена протицања  $t$ , где је  $k$  електрохемијски еквивалент (количник атомске масе и валенције елемента).

$$m = kIt. \quad (7.3)$$

### Други Фарадејев закон

Масе супстанција  $m_1$  и  $m_2$  издвојених на електродама односе се као њихови електрохемијски еквиваленти  $k_1$  и  $k_2$  тј.

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{k_1}{k_2}, \quad (7.4)$$

при чему је електрохемијски еквивалент дефинисан као однос масеног броја  $A$  (видети потпоглавље 8.1.2) и валенце елемента  $z$  тј.

$$k_e = \frac{A}{z}. \quad (7.5)$$

Количина наелектрисања коју издвоји један мол назива се Фарадејева константа  $F$  и износи  $96\,487 \text{ C/mol}$ .

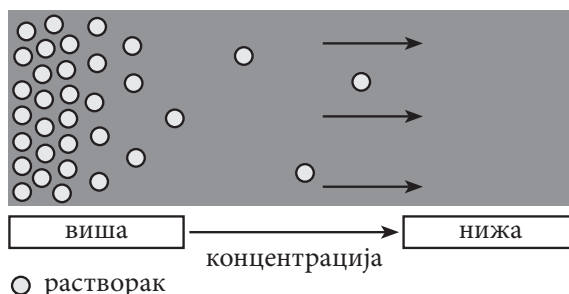
## 7.2 ДИФУЗИЈА, ОСМОЗА И ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКЕ ПОЈАВЕ

Већ смо навели да се неке физичке величине (маса, енергија, количина кретања и наелектрисање) преносе кроз материју процесима које, као што је већ речено, називамо транспортне појаве, у шта спадају дифузија, топлотна проводност (којима се преносе маса и топлота, редом), вискозност и електропроводност. Ове појаве се јављају у срединама које нису хомогене, односно онима које у свим својим тачкама немају исте особине. Том приликом се транспорт било које од наведених физичких величина догађа због постојања градијента те физичке величине (о градијенту видети математичку дигресију 7 у потпоглављу 4.2.1). У овом потпоглављу позабавићемо се дифузијом. Вискозност и топлотна проводност су разматрани у потпоглављима 4.2.1 и 5.3.1, редом, док је електропроводност детаљно обрађена у потпоглављима 6.2.4 и 7.1.1.

### 7.2.1 ДИФУЗИЈА И ОСМОЗА

#### Дифузија

**Дифузија** је пренос масе из једне у другу област простора, а због постојања градијента концентрације и води изједначавању концентрације у свим деловима посматраног система. На слици 7.4 приказан је раствор електролита у суду. Ако је на почетку концентрација јона одређене врсте у појединим деловима суда различита, јони услед хаотичног топлотног кретања прелазе из области више у област ниже концентрације док не дође до изједначавања концентрација. Слично се дешава и при мешању два иста електролитичка раствора различитих концентрација. Ова транспортна појава није карактеристична само за растворе. Она се одвија и у течностима, гасовима и у чврстим телима.



**Слика 7.4** Дифузија јона у електролиту. Из области више концентрације  $c_2$  супстанција се спонтано транспортује у област ниже концентрације  $c_1$ .

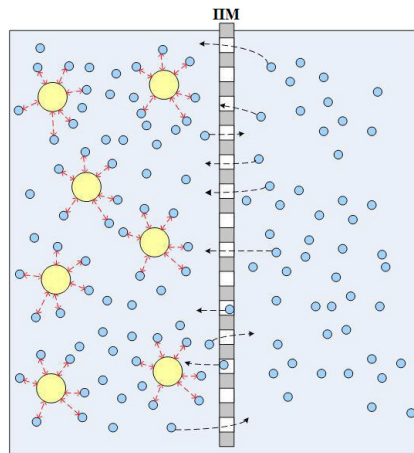
Брзина дифузије  $V_d$  се дефинише као количина супстанције која се пренесе у јединици времена  $\Delta t$  и сразмерна је градијенту концентрације  $\Delta c/\Delta x$  и површини  $S$  кроз коју честице дифундују, тј.

$$V_d = \frac{\Delta m}{\Delta t} = -D_d S \frac{\Delta c}{\Delta x}, \quad (7.6)$$

где је  $D_d$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] коефицијент дифузије који зависи од врсте супстанције која дифундује и температуре средине у којој се одвија дифузија.

## Осмоза

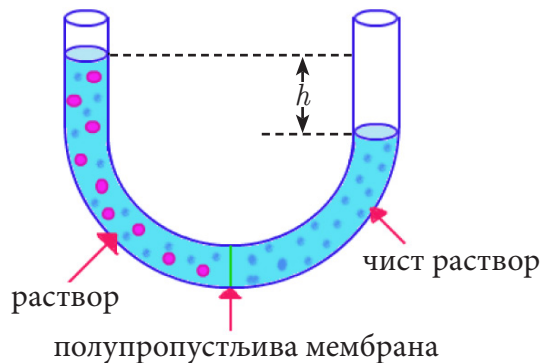
**Осмоза** представља дифузију молекула растварача кроз **полупропустљиву мембрану**, која пропушта молекуле растварача али не и молекуле раствора. Осмоза се јавља кад су концентрације раствора са две стране мембране различите. Пошто полупропустљива мембрана пропушта само молекуле растварача али не и честице раствора, долази до дифузије растварача кроз мембрану тј. молекули растварача пролазе кроз мембрану како би се изједначиле концентрације са обе стране мембране. Молекули растварача се крећу из средине са мањом концентрацијом у средину са већом концентрацијом растворених супстанци (сл. 7.5).



**Слика 7.5** Осмоза у електролиту кроз полупропустљиву мембрану. Мањи молекули се крећу ка делу у ком је концентрација великих молекула већа (лево), пошто су они спречени да прођу кроз полупропустљиву мембрану (ПМ) према делу где је концентрација нижа (десно)

При дифузији молекула растварача (мањи кругови) кроз полупропустљиву мембрану долази до пораста нивоа течности на једној страни мембране (лево) и смањења нивоа течности на другом нивоу (десно), као што је приказано на слици 7.6. Пораст

нивоа течности на једној страни ствара хидростатички притисак који се супротставља осмоси тј. осмотском притиску који делује на мембрану. Када се ова два притиска изједначе, доћи ће до успостављања равнотеже и процес дифузије ће да се оконча тј. неће више доћи до подизања нивоа течности. Притисак при коме се успоставља ова равнотежа се назива **осмотски притисак  $h$** . Осмотски притисак је већи што је концентрација раствора већа и обрнуто.



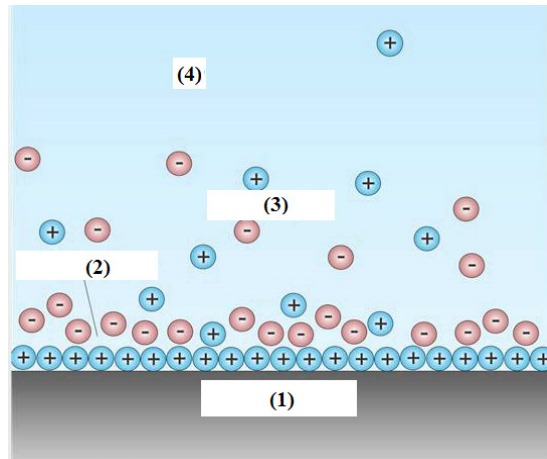
**Слика 7.6** Уз објашњење осмотског притиска

Ако се ћелије нађу у воденом раствору, вода (која у ћелији врши функцију растварача) ће тежити да прође кроз ћелијску мембрану у циљу да се изједначе концентрације са обе стране мембране. Тако, ако ћелију ставимо у хипотоничан раствор (раствор који је мање концентрације у односу на саму ћелију), доћи ће до улажења воде у ћелију, до њеног бубрења и прскања. У хипертоничном раствору (концентрованији од раствора у самој ћелији) вода ће да излази из ћелије, па ће она да се смежура. Због тога је веома важно да се одржава сталан осмотски притисак, односно количина воде у организму, што се назива **осморегулација**. Код сисара се осморегулација врши преко бубрега – вишак воде из крви прелази у мокраћу.

## 7.2.2 ЕЛЕКТРОКИНЕТИЧКЕ ПОЈАВЕ

**Електрокинетичке појаве** су скуп неколико различитих ефеката који се појављују: (1) у хетерогеним течностима, (2) у порозним телима (већих или мањих димензија) испуњеним течностима и (3) у течностима које се брзо крећу преко равне површине. Израз хетероген је употребљен у смислу да течност садржи честице, које могу да буду чврсте, течне или, пак, мехурићи гаса. Њихове димензије могу да се крећу од реда величине нанометра до микрометра. Сви ови ефекти имају заједнички извор у постојању тзв. **двоструког слоја наелектрисања** (сл. 7.7). Ако се на овај слој делује довољно јаким спољашњим електростатичким пољем, покретни део двоструког слоја наелектрисања, удаљенији од границе фаза (дифузиони слој), креће се у смеру поља или супротном,

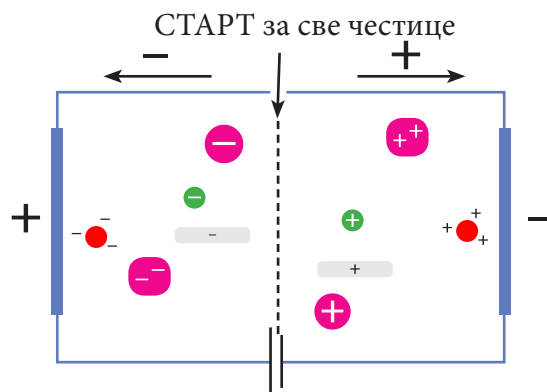
зависно од тога како је наелектрисан. Ово кретање је условљено падом потенцијала између два слоја, тзв. **електрокинетичким потенцијалом**  $\psi$ . У овом уџбенику задржаћемо се на две електрокинетичке појаве – електрофорези и електроосмози.



**Слика 7.7** Уз дефиницију електрокинетичких појава: (1) чврста површина, (2) двоструки слој наелектрисања, (3) дифузиони слој и (4) запремина течности

## Електрофореза

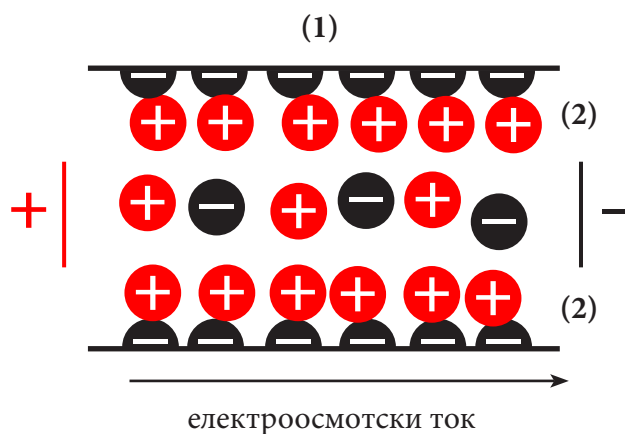
Под **електрофорезом** се подразумева кретање и раздвајање наелектрисаних честица диспергованих у течности под утицајем спољашњег електростатичког поља (сл. 7.8). Она је у потпуности условљена постојањем двоструког слоја наелектрисања између честица чврсте површине и дифузионог слоја у течности. Она има широку примену у поступку раздвајања молекула по величини или одређивању афинитета честица за везивање. На овој појави заснивају се и методе раздвајања течности и колоидних честица, као и уношење лекова кроз кожу путем јона.



**Слика 7.8** Шематски приказ електрофорезе

## Електроосмоза

**Електроосмоза** је кретање течности које се дешава под утицајем напона на порозном материјалу, капиларама, мембрани, микроканалу или неком другом проводнику течности (сл. 7.9). Хемијска равнотежа између чврсте површине капиларе (1) и раствора електролита углавном доводи до тога да се изнад површине ствара двоструки слој наелектрисања (2). Када се течност доведе у електростатичко поље, долази до кретања наелектрисаних честица из двоструког слоја због резултујуће Кулонове силе. Проток који се јавља се назива **електроосмотски ток**. Пошто су карактеристичне дужине двоструког слоја наелектрисања много мање од димензија канала који се употребљавају у пракси, произилази да је електроосмотски ток најзначајнији у малим каналима. На пример, електроосмоза, тј. електроосмотски ток, представља важну компоненту у техникама хемијског раздвајања, као што је капиларна електрофореза.



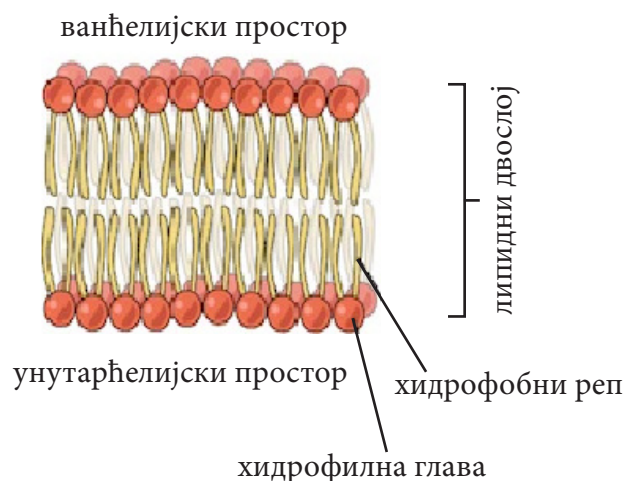
**Слика 7.9** Уз дефиницију електроосмозе: (1) стаклена капилара, (2) двоструки слој наелектрисања

## 7.3 ТРАНСПОРТ СУПСТАНЦИЈЕ КРОЗ ЋЕЛИЈСКУ МЕМБРАНУ

У овом потпоглављу пажња ће бити посвећена начинима транспорта супстанције кроз ћелијску мембрану. Они могу да буду пасивни (дифузија, олакшана дифузија, осмоза и филтрација) и активни.

### 7.3.1 СТРУКТУРА ЋЕЛИЈСКЕ МЕМБРАНЕ

**Ћелијска мембрана** је састављена углавном од масти које се називају липиди. Главне липида су хидрофилне, што значи да „воле воду” („hydro” значи вода и „philic” у значењу љубави), док су њихови репови хидрофобни, или „они који се плаше воде” („phobic” у значењу да се боји). Када су липиди уроњени у воду, они образују двослојну структуру познату као липидни двослој, дебљине око пет nm (сл. 7.10). Он се састоји од два молекулска слоја у којима су хидрофилне главе окренуте према ванћелијском, као и унутарћелијском простору. Оба, ванћелијски и унутарћелијски простор, садрже воду. Хидрофобни репови леже у унутрашњости липидног двослоја, где су заштићени од воде.



**Слика 7.10** Структура ћелијске мембране

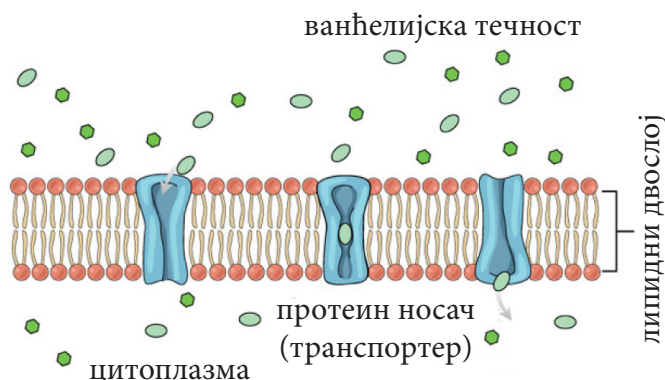
Ћелијска мембрана је у различитом степену пропустљива за различите врсте молекула. На пример, за молекуле кисеоника и угљен-диоксида липидни двослој је у потпуности пропустљив, тако да ови молекули могу неометано да дифундују кроз ћелијску мембрану. Међутим, када су у питању наелектрисане честице, липидни двослој је скоро непропустљив, тако да јони, без обзира на њихову величину и разлику концентрација са супротних страна ћелијске мембране, не могу да кроз њу слободно дифундују. Услед овога се успоставља одређена разлика потенцијала између унутарћелијске и ванћелијске средине. Та разлика потенцијала представља тзв. **потенцијал ћелијске мембране у мировању**.

### 7.3.2 ПАСИВНИ ТРАНСПОРТ

У поглављу 7.2 су описани дифузија и осмоза, тако да ћемо се на овом месту позабавити кратким описом олакшане дифузије и филтрације.

#### Олакшана дифузија

**Олакшана дифузија** је један од начина транспорта супстанција кроз ћелијску мембрану. Олакшаном дифузијом се супстанције које се не растварају у липидима транспортују у правцу концентрационог или електрохемијског градијента. Стога је кретање молекула кроз ћелијску мембрану посредовано тзв. транспортним протеинима, те отуда назив олакшана дифузија. Протеини носачи (транспортери) подлежу конформационој промени (прилагођавање облика) при везивању молекула који се преносе кроз ћелијску мембрану (сл. 7.11). Олакшаном дифузијом се на пример врши транспорт глукозе кроз ћелијску мембрану црвених крвних зрнаца или транспорт аминокиселина у ћелије.

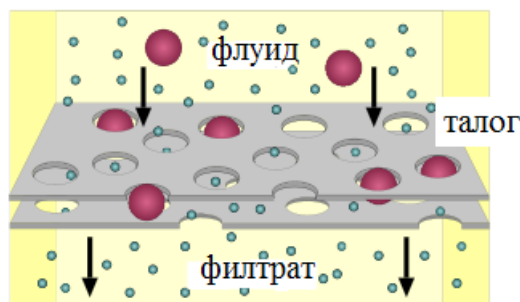


**Слика 7.11** Шематски приказ олакшане дифузије кроз ћелијску мембрану



## Филтрација

**Филтрација** је пропуштање гаса или течности кроз полупропустљиву преграду која се назива **филтрациони медијум** (нпр. филтер-папир), са циљем да се из гаса или течности одстране суспендоване чврсте честице. Гас или течност пречишћени на овај начин се називају филтрати, док се чврсте честице задржане на филтрационом медијуму називају филтрациона погача или талог. Код људи и сисара, управо овим механизмом обавља се и главна функција бубрега тј. излучивање токсичних продуката метаболизма и вишка течности из организма.



Слика 7.12 Шематски приказ филтрације

## Нернстова једначина

На граници два раствора у којима су јони различитих концентрација ( $c_1$  и  $c_2$ ) и покретљивости ( $u_1$  и  $u_2$  – видети једначину (7.2)) јавља се разлика у потенцијалима, која се назива електродни потенцијал  $\Delta E$ . Он се израчунава преко једначине

$$\Delta E = \frac{RT}{F} \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2} \ln \frac{c_1}{c_2}, \quad (7.7)$$

где је  $R$  гасна константа [ $J/(mol K)$ ],  $T$  апсолутна температура и  $F$  Фарадејева константа.

Ако се, пак, између раствора електролита налази мембрана која је селективно пропустљива само за једну врсту јона (на пример,  $u_2 = 0$ ), горња једначина постаје

$$\Delta E = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_1}{c_2}, \quad (7.8)$$

где су  $c_1$  и  $c_2$  концентрације датог јона (који може да прође кроз мембрану) са једне и друге стране, односно друге стране мембране, док остале величине имају исто значење као у једначини (7.7). Ова једначина је позната као **Нернстова једначина**.

## Донанова равнотежа

Уколико је мембрана пропустљива за две врсте јона (на пример,  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ ), онда за сваки од њих важи Нернстова једначина тј.

$$\Delta E_+ = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_1^+}{c_2^+}, \quad (7.9)$$

и

$$\Delta E_- = \frac{RT}{F} \ln \frac{c_1^-}{c_2^-}. \quad (7.10)$$

Разлике потенцијала у једначинама у (7.9) и (7.10) морају да буду једнаке, будући да се успостављају између истих тачака у простору, тј.  $\Delta E_+ = \Delta E_-$ . Из овог услова следи да је

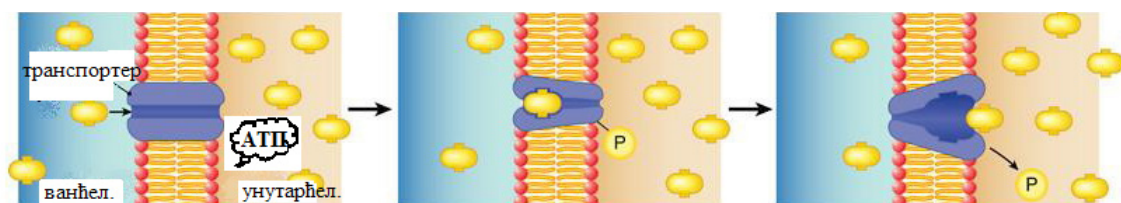
$$c_1^+ c_2^- = c_2^+ c_1^-. \quad (7.11)$$

Стање дефинисано једначином (7.11) познато је под именом **Донанова равнотежа**, тј. производи концентрација јона који могу да дифундују кроз мембрану са једне и друге стране међусобно су једнаки.

Описане законитости се односе и на ћелијску мембрану (сл. 7.10), која раздваја два раствора електролита. У овим растворима налазе се јони различитих предзнака и различите покретљивости. У ћелијској течности доминирају  $\text{K}^+$  јони и анјони, док су концентрације осталих јона ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) знатно мање. Обрнуто, у ванћелијској течности јони  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  имају знатно веће концентрације од јона  $\text{K}^+$ , док органских јона нема, пошто због своје величине не могу да савладају мембранску баријеру.

## 7.3.3 АКТИВНИ ТРАНСПОРТ

Понекад је потребно да се супстанција транспортује насупрот концентрационог градијента, пошто би се тај процес одвијао много спорије пасивним транспортом. У том случају говоримо о тзв. **активном транспорту**, који захтева утрошак енергије да би се остварио.



Слика 7.13 Шематски приказ активног транспорта кроз ћелијску мембрану

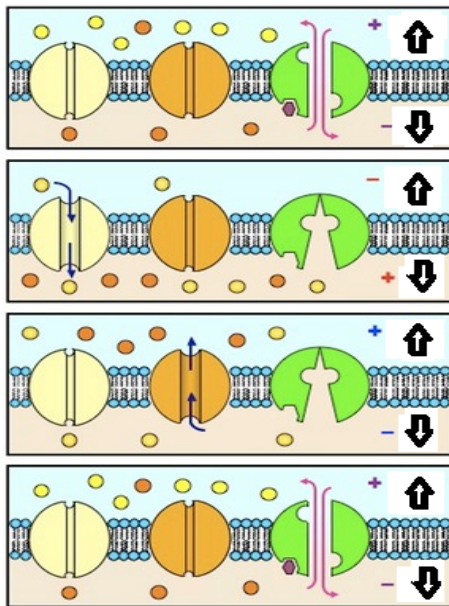
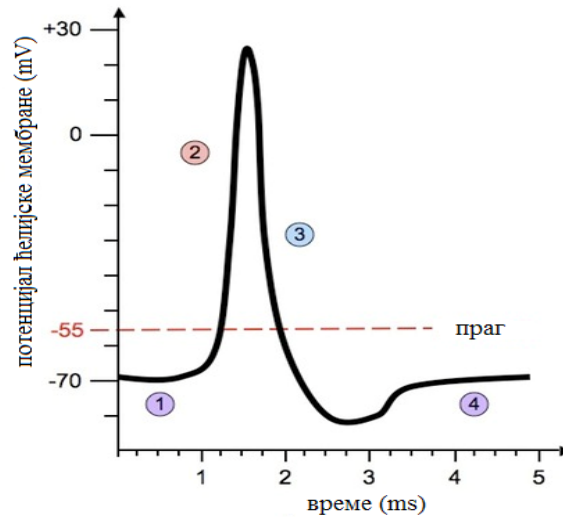
Активан транспорт супстанције кроз ћелијску мембрану одвија се помоћу протеина носача (сл. 7.13). Енергија за одвијање активног транспорта добија се хидролизом АТП-а (аденозин трифосфат) у АДП (аденозин дифосфат). Протеини носачи раде као пумпе и као ензими АТП-азе (аденозин трифосфатазе), будући да катализују разлагање АТП-а. До сада најбоље проучена пумпа је **натријум-калијумова пумпа** (Na-K пумпа). Она, насупрот хемијском градијенту, активно испумпава  $\text{Na}^+$  из ћелије, а упумпава  $\text{K}^+$  у ћелију ( $\text{Na}^+$  је ванћелијски јон где га има више него у унутарћелијском простору; код  $\text{K}^+$  је обрнуто, тако да је он познат као унутарћелијски јон). На тај начин она одржава сталну разлику концентрације јона са супротних страна ћелијске мемbrane. Код животиња у миру, више од једне трећине енергије која се добија хидролизом молекула АТП-а троши се управо на рад Na-K пумпе.

### 7.3.4 АКЦИОНИ ПОТЕНЦИЈАЛ

Натријум-калијумова пумпа има главну улогу у стварању мембранског потенцијала животињских ћелија. **Мембрански потенцијал** или **потенцијал мировања** је електрични напон мировања који постоји између унутрашње (негативно наелектрисана) и спољашње (позитивно наелектрисана) мемbrane нервне и мишићне ћелије у стању мировања, односно пре њиховог надраживања. Када се ћелије надраже, онда потенцијал мировања постаје акциони потенцијал – нервни импулс, при ком се обрће поларизованост ћелијске мемbrane тако да унутрашња страна постаје позитивно, а спољашња негативно наелектрисана.

У мировању у течности ван неурона (ванћелијска течност) има више позитивног наелектривања, тако да је ћелијска мембрана, са те стране, позитивно наелектрисана. Унутар неурона има релативно мање позитивног наелектривања и више негативног наелектривања, што унутрашњи део ћелијске мемbrane чини негативно наелектриваним. Ово стање се одржава тако што се  $\text{Na}^+$  јони задржавају у ванћелијској течности, док је  $\text{K}^+$  јонима дозвољено да се слободно крећу у унутрашњости неурона и изван њега. Ово се одиграва: (1) деловањем напонско-усмерених јонских канала ( $\text{Na}^+$  канали су обојени бледожутом бојом, док су  $\text{K}^+$  канали обојени бледобраон бојом, као што је приказано на десном делу слике 7.14) као што је затварање  $\text{Na}^+$  канала и држањем  $\text{K}^+$  канала отвореним и (2) преко Na-K пумпе (обојена зеленом бојом на наведеном делу слике 7.14), која је ензим и у једном циклусу транспортује три јона  $\text{Na}^+$  и два јона  $\text{K}^+$  насупрот процесу дифузије. Ово резултује у потенцијалу мировања који, израчунат преко израза (7.8), износи око  $-70 \text{ mV}$  (сегмент 1 на слици 7.14). Пошто се нерв стимулише (надражи), он добија подстицај када се  $\text{Na}^+$  канали отварају а  $\text{K}^+$  канали затварају, што доводи до прилива позитивног наелектривања унутар неурона и негативног наелектривања изван њега и **деполаризације** (сегмент 2). Ово је **акциони потенцијал** неурона који у просеку износи  $+30 \text{ mV}$ . Он траје мање од  $1/1000$  секунде када Na-K

пумпа поново почиње да ради, тако што се  $K^+$  канали отварају а  $Na^+$  канали затварају (сегмент 3), да би на крају поново дошло до опорављања потенцијала мировања неурона тј. **реполаризације**.



- ① потенцијал мировања  
Na-K пумпа
- ② деполаризација  
напонско-усмерени  $Na^+$  канал
- ③ реполаризација  
напонско-усмерени  $K^+$  канал
- ④ потенцијал мировања  
Na-K пумпа

**Слика 7.14** Промена потенцијала ћелијске мембране у току акционог потенцијала. Стрелица окренута на горе означава ванћелијски простор, док окренута надоле означава унутарћелијски простор.

Горе описаним механизмом, променом поларитета појединих делова неурона, акциони потенцијал се у виду импулса преноси дуж влакна. У надражљиве ћелије, поред нервних, спадају и ендокрине и мишићне ћелије. Код ендокриних ћелија надражај доводи до лучења хормона, док код мишићних он изазива њихову контракцију.

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Шта је електролит?
2. Шта је електролитичка дисоцијација?
3. Описати електролитичку дисоцијацију кухињске соли.
4. Чему је једнак степен дисоцијације?
5. Како се дефинише покретљивост јона електролита?
6. Шта је електролиза?
7. Како гласи Први Фарадејев закон електролизе?
8. Како гласи Други Фарадејев закон електролизе?
9. Шта је електрохемијски еквивалент?
10. Шта је Фарадејева константа?
11. Шта су транспортне појаве?
12. Навести бар три транспортне појаве.
13. Шта је дифузија?
14. Написати израз за брзину дифузије који укључује коефицијент дифузије и дефинисати сваки члан.
15. Шта је осмоза?
16. Шта је осмотски притисак?
17. Шта су електрокинетичке појаве?
18. Шта је двоструки слој наелектрисања?
19. Шта је електрокинетички потенцијал?
20. Шта је електрофореза?
21. Шта је електроосмоза?
22. На које начине се супстанција транспортује кроз ћелијску мембрану?
23. Навести врсте пасивних транспорта.
24. Од чега је ћелијска мембрана углавном састављена?
25. Шта су хидрофилне главе, а шта хидрофобни репови?
26. Описати олакшану дифузију.

27. Које се супстанције најчешће преносе олакшаном дифузијом у људском и животињском организму?
28. Шта је филтрација?
29. Написати израз за Нернстову једначину и дефинисати сваки члан.
30. Написати израз за Нернстову једначину уколико је ћелијска мембрана пропустљива за две врсте јона и дефинисати сваки члан.
31. Описати активан транспорт супстанције.
32. Шта је натријум-калијумова пумпа?
33. Шта је мембрански потенцијал?
34. Шта је акциони потенцијал?
35. Како се акциони потенцијал преноси дуж неуронског влакна?

# **8. ОСНОВЕ АТОМСКЕ БИОФИЗИКЕ**



## 8.1 АТОМ И ЊЕГОВА СТРУКТУРА

У претходним поглављима превасходно смо се бавили макроскопским особинама физичких објеката, не улазећи детаљније у њихову структуру. Изузетак је направљен код објашњења механизма протока струје кроз чврста тела и течности. На овај начин смо следили историјски развој физике. Крајем XIX века постало је јасно да је даљи напредак могућ ако физичари почну да се баве микроструктуром материје. У овом и неколико наредних поглавља, пажња ће бити усмерена ка томе.

### 8.1.1 ОСНОВНЕ ИНТЕРАКЦИЈЕ У ПРИРОДИ

У природи постоје четири **основне** или **фундаменталне интеракције** (или силе, како се понекад може наћи) којима елементарне честице делују међусобно. Појам **елементарне честице** се односи на честице које немају своју унутрашњу структуру, као што је, рецимо, електрон. Међутим, ради једноставности, ми ћемо под појмом елементарне честице подразумевати све делове супстанције који су једноставније грађе од атома, тако да су овим појмом обухваћени и протони и неутрони који имају сложену грађу. Помоћу наведених интеракција се описује размена енергије међу честицама и, самим тим, оне су одговорне за постојећу структуру универзума. Касније ћемо видети да се у ствари обавља размена тзв. **преносилаца интеракције**.

На овом месту навешћемо следећу напомену. Реч „сила” се не употребљава у тзв. класичним и квантним теоријама поља. Разлог овакве употребе физичарског језика лежи у самој физичкој формулацији и интерпретацији горе наведених теорија. Дакле, реч „интеракција” је много прикладнија за употребу, јер се онда не ствара забуна повезана са физичким појмом „силе” који је Њутн увео.

Четири интеракције су: гравитациона, јака, слаба, електромагнетна (табела 8.1).

**Гравитациона интеракција** делује дугодометно на све честице које поседују енергију, а које, са друге стране, могу бити масене или безмасене (нпр. фотони имају енергију, али немају масу). Дакле, ако се буде формулисала тзв. квантна гравитација, честице преносиоци гравитационе интеракције тзв. безмасени гравитони ће интераговати између себе. На све мањим растојањима, а већим енергијама јачина гравитационе интеракције споро расте.

**Електромагнетна интеракција** делује дугодометно само на наелектрисане честице и може бити одбојна или привлачна. Преносиоци ове интеракције су тзв. безмасени и електро-неутрални фотони, који се крећу брзином светлости и који не интерагују



међусобно једни са другима. На све мањим растојањима, а већим енергијама јачина електромагнетне интеракције расте. На вишим енергијама електромагнетна интеракција се уједињује са слабом нуклеарном интеракцијом у тзв. електро-слабу интеракцију.

Интеракција	Преносиоци	Релативна јачина	Домет (m)
јака нуклеарна	глуони	$10^{38}$	$10^{-15}$
електромагнетна	фотони	$10^{36}$	$\infty$ (бесконачно)
слаба нуклеарна	W и Z бозони	$10^{25}$	$10^{-18}$
гравитациона	гравитони (нису још пронађени)	1	$\infty$ (бесконачно)

**Табела 8.1** Попис основних интеракција у природи. Релативна јачина означава јачину интеракција у односу на гравитациону, чија је јачина узета за јединичну.

**Слаба нуклеарна интеракција** делује краткораметно на само одређене честице (кварк, неутрино, електрон, итд.). Честице ове интеракције су тзв. масени и наелектрисани  $W^+$  и  $W^-$  бозони, као и електро-неутралан масени  $Z_0$  бозон, који се крећу брзином мањом од брзине светлости и који међусобно интерагују. На све мањим растојањима, а већим енергијама јачина слабе нуклеарне интеракције расте.

**Јака нуклеарна интеракција** делује краткораметно на неке одговарајуће честице (кваркови). Преносиоци ове интеракције су тзв. безмасени и електро-неутрални глуони, који би требало да се крећу светлосном брзином и који међусобно интерагују. Сматра се да је краткораметност јаке нуклеарне интеракције остварена управо оваквом врстом међусобне интеракције глуона. На све мањим растојањима, а већим енергијама јачина јаке нуклеарне интеракције слаби.

На овом месту ћемо дати једну важну терминолошку напомену. У целом уџбенику под супстанцијом ћемо подразумевати „оно што је састављено само од честица”, а под материјом „супстанцију и преносиоце интеракције (физичка поља)”.

## 8.1.2 АТОМИ И ИНТЕРАКЦИЈЕ У АТОМИМА

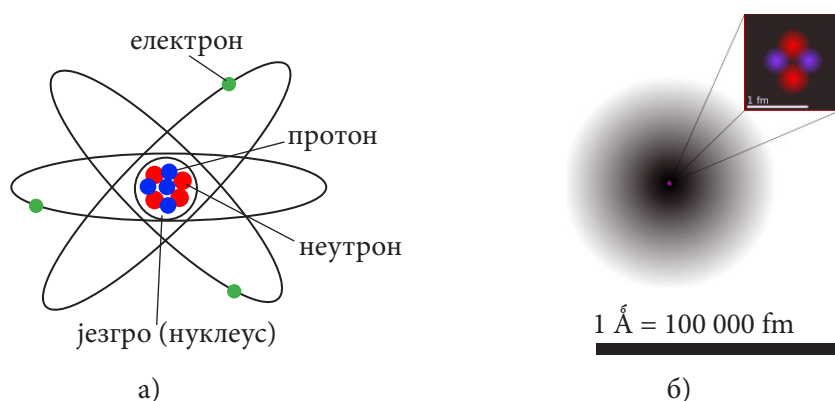
### Основни појмови о атому

**Атом** је најмања јединица супстанције која дефинише хемијске елементе. Супстанција у чврстом, течном, гасовитом стању, или, пак, у облику плазме се састоји од неутралних атома или јона. Атоми су веома мали. Њихова димензија је реда величине ангстрема ( $\text{Å}$ ,  $10^{-10}$  m) или неколико делова нанометра (nm,  $10^{-9}$  m).

Сваки атом се састоји од **језгра (нуклеуса)** и једног или више **електрона** који круже око њега. Електрони чине тзв. **електронски омотач** или **електронски облак** (сл. 8.1а).

Језгро атома се састоји од једног или више **протона** и типично приближно једнаког броја **неутрона**. Протони и неутрони се називају **нуклеонима**. Преко 99,94% атомске масе је у језгру (сл. 8.1б), будући да је маса електрона око 2000 пута мања од масе протона. Димензије нуклеона су реда величине фентометра (fm,  $10^{-15}$  m). Напоменимо да је слика 8.1 само илустративна, пошто није могла да буде нацртана у правој размери. Протони имају позитивно наелектрисање, електрони имају негативно наелектрисање, а неутрони нису наелектрисани. Ако је број протона и електрона једнак, тај атом је електрично неутралан. Ако атом има вишак или мањак електрона у односу на протоне, онда он има свеукупно позитивно или негативно наелектрисање, и назива се **јон**.

Електроне атома привлаче протони језгра атома посредством електромагнетне силе. Протони и неутрони у језгру атома се међусобно привлаче дејством различитих сила, нуклеарних сила, које су обично јаче од електромагнетне силе међусобног одбијања позитивно наелектрисаних протона.



**Слика 8.1** а) Илустрација атома. б) Језгро атома (љубичасто) и дистрибуција електронског облака (црно). Језгро атома (горе десно) у хелијуму је у реалности сферно симетрично и веома слично електронском облаку, мада код компликованијих језгара атома то није случај. Црна линија представља један ангстрем ( $\text{\AA}$ ,  $10^{-10}$  m или 100 000 fm).

Под одређеним околностима одбијајућа електромагнетна сила постаје јача од нуклеарне силе и нуклеони могу да буду избачени из језгра, остављајући иза себе различити елемент. Овај процес, тзв. нуклеарни распад, доводи до нуклеарне трансмутације, о чему ће касније бити речи. **Атомски број** (редни број)  $Z$  једног хемијског елемента показује које место он заузима у Периодном систему елемената, пошто хемијске особине елемента зависе од броја електрона у његовом омотачу. Пошто је атом електрично неутралан, овај број у исто време показује колико има протона у атомском језгру тог хемијског елемента, односно електрона у атомском омотачу. На пример, сви атоми бакра садрже 29 протона. Број неутрона дефинише **изотоп** елемента. Познати су изотопи водоника, деутеријум и трицијум, који имају један и два неутрона, редом. Атоми се могу везати за један или више других атома путем хемијских веза, чиме се формирају хемијска једињења као што су молекули. **Масени број**  $A$  представља збир протона и неутрона  $N$  у језгру атома и увек је цео број.

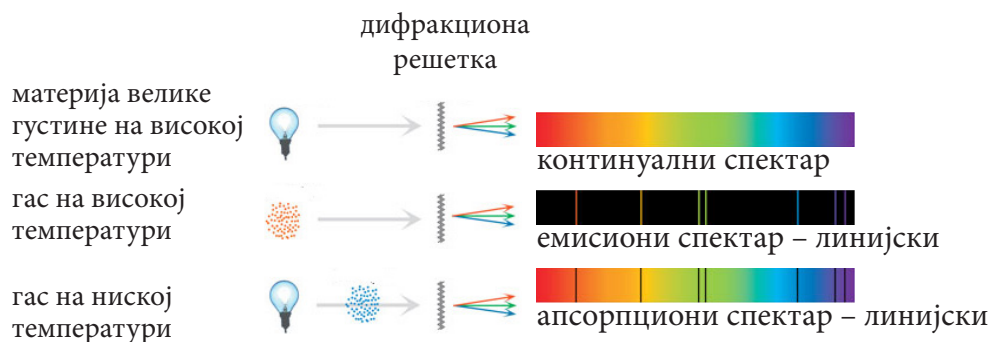
## 8.2 КВАНТНА ПРИРОДА МАТЕРИЈЕ

Велики напредак физике током XIX века довео је до тога да се појавио низ експерименталних и теоријских резултата које физика није могла да објасни. Као последица потребе објашњења ових чињеница, почетком века појавиле су се две велике теорије: квантна теорија и теорија релативности. У овом поглављу, следећи обим градива, бавићемо се само квантном теоријом. Она се заснива на претпоставци (која је доказана и експериментално) да у микросвету неке физичке величине могу да узимају само одређене (дискретне) вредности. За те величине кажемо да су **квантоване**.

### 8.2.1 АТОМСКИ СПЕКТРИ И СПЕКТРОСКОПИЈА

#### Врсте спектра

**Спектар** (лат. *spectrum*: појава, привиђење) је расподела интензитета мерене физичке величине приказана у зависности од неке друге физичке величине, нпр. енергије, фреквенције, таласне дужине, брзине, масе итд. Најчешће се појам спектар користи у значењу спектар електромагнетног зрачења, о ком ће бити речи у глави 10.



Слика 8.2 Врсте спектра

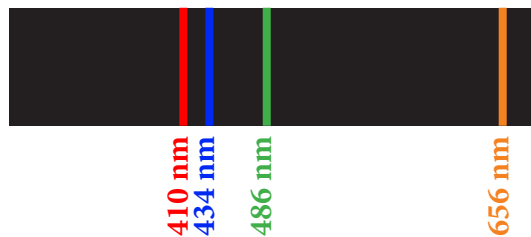
Познате су три врсте спектра: континуални, емисиони и апсорпциони (сл. 8.2). Напоменимо да у литератури емисионе спектре обично делимо на континуални, тракасти и линијски.

**Континуални спектар** садржи или се чини да садржи све таласне дужине, али не и спектралне линије, у широком делу свог домена. **Емисиони спектар** је спектар зрачења

који настаје спектралним разлагањем светлости (зрачења) коју емитује нека супстанција на високој температури. Напоменимо да емисиони спектар чврсте супстанције на високој температури, због великог броја спектралних линија, може да изгледа као да је континуалан. **Апсорпциони спектар** неке супстанције представља део упадног зрачења који је супстанција апсорбовала у одређеном опсегу фреквенција. Апсорпциони спектар је превасходно одређен атомским и молекуларним саставом супстанције.

## Балмерова серија

Једно од можда најзначајнијих открића која су претходила утемељењу модела атома и заснивању атомске физике учинио је швајцарски математичар и математички физичар Јохан Јакоб Балмер (1825–1898) дајући емпиријску формулу за видљиве спектралне линије атома водоника. Оно што је било изненађујуће је чињеница да таласна дужина спектралних линија зависи од два природна броја. Међутим, ова чињеница се касније у потпуности „уклопила“ у Боров модел атома.



**Слика 8.3** Видљиви део спектралних линија водоника представљених Балмеровом серијом

Извори светлости углавном емитују светлост која се састоји од зрачења различитих таласних дужина. Уређаји који раздвајају ове таласне дужине називају се **спектроскопи**. Касније ћемо видети да они то изводе користећи призму (поглавље 11.1). Друга могућност је да користе тзв. дифракциону решетку, инструмент који је заснован на појави дифракције (потпоглавље 2.2.4) и разлаже светлосни талас по таласним дужинама. Ако је спектроскоп снабдевен скалом која омогућује одређивање вредности таласне дужине, онда се он назива **спектрометар**.

## 8.2.2 ПЛАНКОВА КВАНТНА ХИПОТЕЗА. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ ЕФЕКАТ

### Планкова квантна хипотеза

Негде при крају XIX века као велики проблем поставило се питање зрачења топлих објеката, или тела, каква је нпр. звезда. Наиме, по прорачунима је произишло да топло тело мора да зрачи енергију у бесконачном обиму. Сагласно законима у чију се исправност веровало у то време, једно топло тело требало је да одашиље таласе (као што су радио-таласи, видљива светлост или рендгенски таласи) равномерно на свим фреквенцијама. Будући да је фреквенција таласа неограничена, то би значило да је укупна енергија зрачења бесконачна.

Да би избегао овај очигледно бесмислен исход, немачки физичар Макс Планк (1878–1947) је 1900. године изложио замисао да енергија емитована у виду светлости, рендгенских зрака и осталих таласа не бива израчена у произвољном обиму, већ само у одређеним „пакетима“ које је он назвао **квантима**. Квантна хипотеза сасвим је добро објаснила измерену количину емитованог зрачења топлих тела. Он је формулисао и следећу релацију. Ако је енергија емитована у виду светлости (или неког другог таласа) са фреквенцијом  $\nu$ , онда величина кванта те енергије  $E$  (који ће касније бити назван фотон) износи

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (8.1)$$

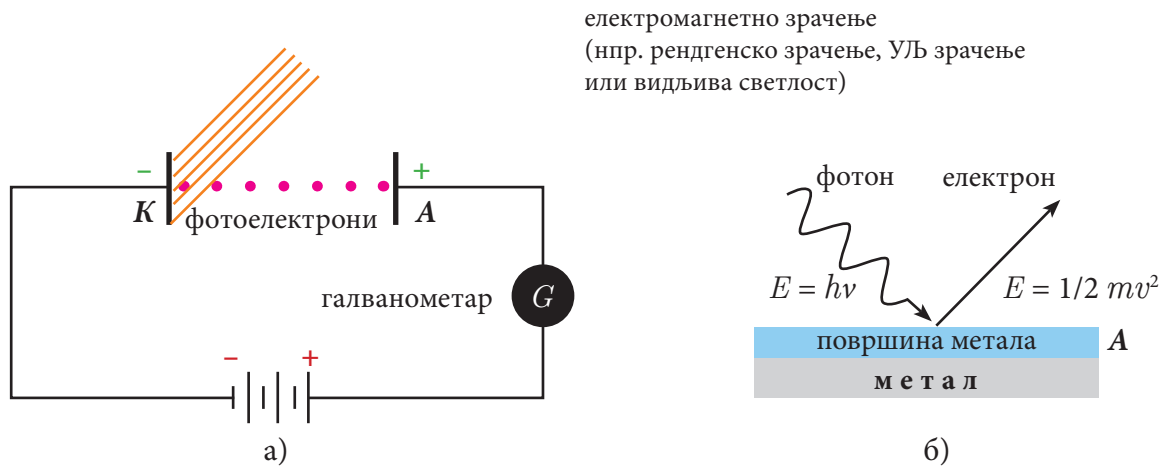
где је  $h$  Планкова константа и  $c$  брзина светлости, која у вакууму износи тачно  $299\,792\,458$  m/s (приближно  $300\,000$  km/s). Уочимо да је енергија фотона директно пропорционална фреквенцији, а обрнуто пропорционална таласној дужини фотона.

**Планкова константа** је физичка константа која се користи за описивање најмање могуће вредности енергије, тј. једног кванта за дато зрачење и она износи  $6,626176 \times 10^{-34}$  Js. Често се уместо Планкове константе користи и **редукована Планкова константа** (позната и као **Диракова константа**, која се означава са  $\hbar (= h/2\pi)$ , а чита се „хе“).

### Фотоелектрични ефекат и Ајнштајново објашњење ове појаве

Једна од експериментално регистрованих појава је појава тзв. **фотоелектричног ефекта**, која се састоји у томе да светлост (или неко друго зрачење) избија електроне са површине металне катоде (сл. 8.4а). Неколико чињеница је веома збуњивало физичаре; пре свега, што за дати метал постоји максимална таласна дужина (тј. минимална фреквенција) светлости при којој може да дође до појаве фотоелектричног ефекта, тзв.

**црвена граница.** Назив црвена граница потиче отуда што црвена светлост има највећу таласну дужину, дакле њени фотони носе најмању енергију. Са друге стране, број емитованих електрона који се крећу ка аноди (фотоструја која се региструје галванометром  $G$  – сл. 8.4а) зависи од интензитета светлости.



**Слика 8.4** Уз објашњење фотоелектричног ефекта:  
а) шематски приказ експерименталног уређаја,  
б) илустрација Ајнштајновог објашњења ове појаве

Немачки физичар Алберт Ајнштајн (1879–1955) дао је објашњење проширујући Планкову квантну хипотезу и сматрајући да се енергија светлости не само емитује већ и простира и апсорбује у облику фотона. Тада једноставно посматрамо интеракцију једног фотона и једног електрона (сл. 8.4б). Електрон може да апсорбује само цео фотон, при чему прима енергију  $E = h\nu$ . Ова енергија се троши на рад  $A$  за ослобађање електрона из метала (излазни рад  $A$  карактеристичан за дати метал – шематски је приказан дебљином небо-плавог оквира на слици 8.4б) и кинетичку енергију електрона  $mv^2/2$  тј.

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A + \frac{1}{2}mv^2. \quad (8.2)$$

Из једначине (8.2) јасно је да ако лева страна има вредност мању од  $A$  не може бити фотоелектричног ефекта, чиме се објашњава постојање црвене границе.

Уређај приказан на слици 8.4а може да послужи за мерење интензитета светлости и назива се **фотоелектрична ћелија**.

## 8.2.3 ФОТОН

**Фотон** (од грчке речи  $\phi\omega\tau\acute{o}\varsigma$ , што значи „светлост“) је преносилац електромагнетне интеракције, односно квант енергије електромагнетног зрачења (у ужем смислу – светлости), којим ћемо се бавити у глави 10. Он је честица без масе мировања, а има енергију пошто се креће брзином светлости ( $E = h\nu$ ). Наелектрисање фотона је једнако нули. Фотони се обично обележавају грчким словом  $\gamma$ , због чега их често називају гама-квантима (фотони високих енергија) при чему су ти термини практично синоними. Фотони настају у многим природним процесима, на пример, при убрзаном кретању наелектрисања, при прелазу атома или језгра из побуђеног у основно стање мање енергије и у још неким физичким процесима који нису обухваћени овим уџбеником.

## 8.2.4 ТАЛАСНО-ЧЕСТИЧНИ ДУАЛИЗАМ

Све горе наведене чињенице указују на то да светлост можемо третирати не само као талас већ и као ток (струју) фотона. Урађени су експерименти са интеракцијом зрачења и електрона или атома код којих долази до промене таласне дужине. Ово се могло објаснити само ако се интеракција схвати као судар честице и фотона који има енергију  $E = h\nu$  и импулс  $p = h\nu/c$  (правац и смер вектора ове величине су одређени правцем и смером простирања светлости). Другим речима, можемо да прихватимо да светлост има двојаку природу тј. понаша се и као талас и као честица (фотон), што је познато као **таласно-честични дуализам**. Важно је нагласити да су честичне особине (енергија и импулс) изражене преко таласних особина (фреквенција и таласна дужина).

Полазећи од ових чињеница, француски физичар Луј де Брољ (1892–1987) прави смелу претпоставку да све честице имају и таласну природу, при чему се честици импулса  $mv$  приписује таласна дужина  $\lambda$  која износи

$$\lambda = \frac{h}{mv}. \quad (8.3)$$

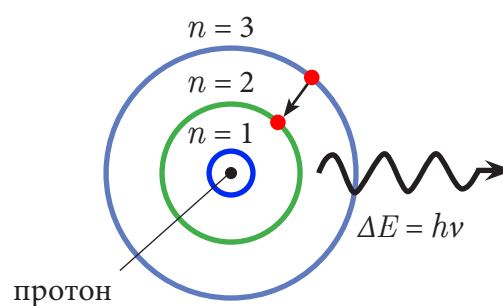
Ова релација је експериментално доказана за микрочестице, а најефектнију примену је нашла код електронског микроскопа, чија је употреба знатно проширила границе нашег сазнања о живом свету.

## 8.3 БОРОВ МОДЕЛ. ЕЛЕКТРОНСКИ ПРЕЛАЗИ У АТОМУ

Историјски посматрано, из експеримената новозеландског научника Ернеста Радерфорда (1871–1937), који је радио у Великој Британији, постало је јасно да су позитивно наелектрисање и маса атома концентрисани у центру атома око којег се налази дифузни облак електрона, носилаца негативног наелектрисања (сл. 8.1а). Из тога се природно наметнуо планетарни модел атома, у којем се електрони крећу око језгра попут планета око Сунца. Ово је у основи модела који је описан у потпоглављу 8.1.

### 8.3.1 МОДЕЛ АТОМА ПО БОРУ

**Планетарни модел** атома наилазио је на бројне потешкоће. Кулонова сила саопштава планетарном електрону центрипетално убрзање потребно за динамички стабилну кружну путању. Међутим, електрон који кружи креће се убрзано, па би морао да губи енергију зрачењем да би на крају „пао“ на језгро. Зрачење емитовано том приликом имало би континуиран спектар. Обе ове чињенице биле су у супротности са експерименталним подацима о стабилности атома и природи атомских спектра.



**Слика 8.5** Боров модел атома водоника. Атомско језгро је црно, електрони црвени, а емитовани фотон обојен је окер бојом. Електронске орбите представљене су плавом, зеленом и љубичастом линијом, редом; полупречник орбита расте као  $n^2$ , где је  $n$  главни квантни број. Из приказаног прелаза  $3 \rightarrow 2$  настаје фотон таласне дужине 656 nm.



Ове проблеме је решио дански физичар Нилс Бор (1885–1962) предложивши теорију, засновану на дејству Кулонове силе између протона и електрона, са којом су успешно објашњени спектри једноелектронских атома. Основне црте теорије могу да се изложе у облику тзв. Борових постулата, које ћемо на овом месту дати описно и сажето, уз употребу слике 8.5, при чему ћемо постулате означавати римским бројевима у загради.

(I) У атому постоје тзв. **стабилне орбите** (обојене путање на слици 8.5). Електрон који се креће по стабилној орбити не зрачи. Овај постулат одбацује проблематичну тврдњу да наелектрисање у убрзаном кретању мора да зрачи у атомским системима упркос њеној ваљаности у макроскопском свету. Стабилним орбитама се приписује тзв. главни **квантни број**  $n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ), којим се показује да је енергија електрона у атому квантована, што одговара тзв. **енергетском нивоу**  $E_n$ .

(II) Емисија или апсорпција зрачења дешава се само приликом преласка електрона из једне орбите у другу. Други постулат успоставља везу са Планковом теоријом зрачења, пошто је фреквенција фотона који се емитује или апсорбује дата енергијском разликом два стања подељеном са  $h$ .

(III) Из овог постулата следи да је поред енергије у атомским системима квантован и момент импулса. Дозвољене су само оне орбите (квантоване) код којих је момент импулса (количине кретања) електрона,  $L$ , (угаони момент  $L = mvr$ , где је:  $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  kg маса електрона,  $v$  периферна брзина електрона на орбити и  $r$  полупречник орбите) целобројни умножак  $\hbar$  тј.  $L = n\hbar$ .

### 8.3.2 ЕЛЕКТРОНСКИ ПРЕЛАЗИ У АТОМУ

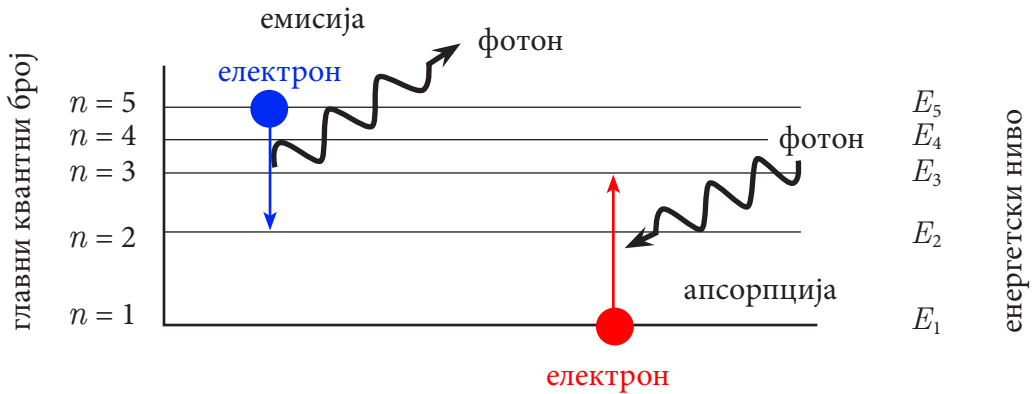
Скуп Борових постулата, уз претпоставку да између електрона и језгра делује Кулонова сила, омогућује да се израчунају битне карактеристике атома, као што су енергија електрона  $E_n$  на  $n$ -тој орбити и њен полупречник  $r_n$  ( $r_n \sim n^2$ ).

Сматра се да је енергија електрона који је изашао из атома једнака нули, те су стога енергије тзв. **везаних електрона** на различитим орбитама негативне. Рачун показује да је апсолутна вредност енергије везаних електрона сразмерна реципрочној вредности квадрата главног квантног броја тј.  $E_n \sim -1/n^2$ . На основу овога може да се закључи да стање најниже енергије одговара електрону на орбити  $n = 1$ , и оно носи назив **основно стање** атома. Стања атома која одговарају енергијама са вишим квантним бројевима се називају **побуђена стања**.

Сада смо у могућности да објаснимо **апсорпцију** и **емисију** зрачења атома. Електрон на нивоу са главним квантним бројем  $n$  може да пређе у побуђено стање са глав-

ним квантним бројем  $m$  ( $m > n$ ) само ако апсорбује онај фотон (десна страна слике 8.6) чија је фреквенција  $\nu$  дата изразом

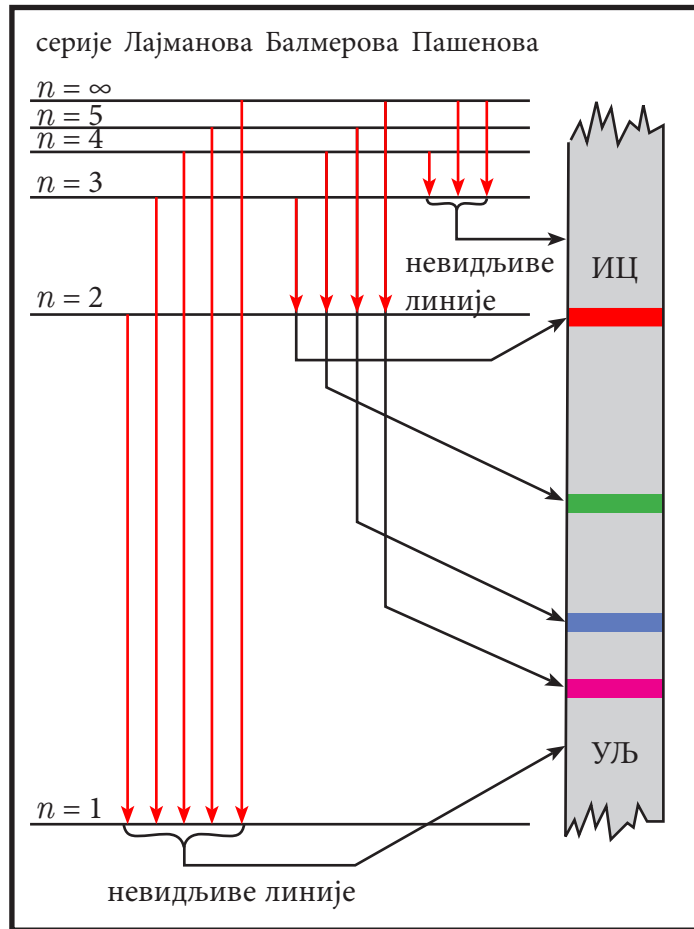
$$\nu = \frac{E_m - E_n}{h}. \quad (8.4)$$



**Слика 8.6** Апсорпција и емисија фотона као резултат промене енергетских нивоа електрона у Боровом моделу атома водоника

Са десне стране слике 8.6 се види да енергетским нивоима  $E_n$  и  $E_m$  у изразу (8.4) одговарају  $E_1$  и  $E_3$ , редом. Са друге стране, електрон на нивоу са главним квантним бројем  $m$  прелази у ниже енергетско стање  $n$  емитујући фотон (лева страна слике 8.6) чија је фреквенција  $\nu$  дата изразом (8.4). Са леве стране слике 8.6 се види да енергетским нивоима  $E_m$  и  $E_n$  у изразу (8.4) одговарају  $E_5$  и  $E_2$ , редом.

У поглављу 8.2 је речено да су се експериментално откривени линијски спектри атома водоника „уклопили“ у Боров модел атома. Конкретно, Балмерова серија одговара прелазима са виших нивоа на ниво  $n = 2$ , као што је приказано на слици 8.7. На истој слици су приказане и друге серије (Лајманова и Пашенова), које одговарају емисијама при преласку на нивое 1 и 3, редом.



**Слика 8.7** Шема енергетских прелаза у Боровом моделу атома водоника код емисионих спектра. Хоризонталним линијама су представљени енергетски нивои, док су вертикалним линијама представљени прелази између нивоа који су праћени емисијом одговарајућег фотона. ИЦ и УЉ су скраћенице за инфрацрвено и ултраљубичасто зрачење, редом. Природа ових зрачења биће објашњена у глави 10.

На крају овог потпоглавља нагласимо да, уколико електрон прими довољно енергије, он може да напусти атом. С обзиром на то да атом тада постаје јон, ова појава се назива **јонизација**, а најмања енергија која доводи до ње назива се **енергија јонизације**.

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Које су фундаменталне интеракције у природи?
2. Поређати у растућем низу релативне јачине интеракција.
3. Шта су преносиоци у фундаменталним интеракцијама?
4. Шта је атом?
5. Који је ред величине димензија атома?
6. Због чега је електронски омотач значајан за хемију?
7. Упоредити особине протона и електрона.
8. Упоредити особине протона и неутрона.
9. Шта је јон?
10. Шта је атомски број?
11. Шта је изотоп?
12. Шта је масени број?
13. Навести врсте спектра.
14. Шта је континуални спектар?
15. Шта је емисиони спектар?
16. Шта је апсорпциони спектар?
17. Шта је Балмерова серија?
18. Како гласи Планкова хипотеза кванта?
19. Написати и објаснити израз за енергију једног кванта зрачења фреквенције  $\nu$ .
20. Описати појаву фотоелектричног ефекта.
21. Шта је црвена граница фотоефекта?
22. Написати Ајнштајнову формулу за фотоефекат и дефинисати сваки члан у њој.
23. Шта је фотон?
24. Написати Де Брољеву релацију и дефинисати сваки члан у њој.

25. Који су недостаци планетарног модела?
26. Којом теоријом су објашњени спектри једноелектронских атома?
27. На чему је заснована Борова теорија једноелектронских атома?
28. Објаснити постулат постојања стабилних стања.
29. Како се у Боровој теорији приписује енергија стабилној орбити?
30. Како се у Боровој теорији квантује момент импулса електрона?
31. Дефинисати основно и побуђена стања атома.
32. Описати процес апсорпције.
33. Описати процес емисије.
34. Написати израз за фреквенцију фотона емитованог при прелазу између нивоа  $E_m$  и  $E_n$  ( $E_m$  веће од  $E_n$ ).
35. Шта је јонизација?
36. Шта је енергија јонизације?



# **9. ОСНОВЕ МОЛЕКУЛСКЕ БИОФИЗИКЕ. ЛАСЕРИ**



## 9.1 МОЛЕКУЛИ И ХЕМИЈСКЕ ВЕЗЕ

Боров модел је имао доста проблема код објашњења понашања атома са више електрона, тако да је временом настала нова квантна теорија (квантна механика) која је заснована на радовима аустријског физичара Ервина Шредингера (1887–1961), немачких физичара Вернера Хајзенберга (1901–1976) и Макса Борна (1882–1970), аустријског физичара Волфганга Паулија (1900–1958), енглеског физичара Пола Дирака (1902–1984) и других. Ова теорија, заснована на теорији вероватноће, успела је да објасни грађу електронских атома а тиме и Периодни систем елемената, а потом образовање хемијских веза, молекула и кристала. Овим темама пажња ће бити посвећена у овом поглављу.

### 9.1.1 ВИШЕЕЛЕКТРОНСКИ АТОМИ

Једна од основних идеја теорије је била да се раздвоје појмови „енергетског нивоа” и „стања”. Тако једном енергетском нивоу  $E_n$  (који за једноелектронски систем има исту вредност као и у Боровој теорији) може да одговара више различитих стања. Прецизније, електрону се приписује тзв. **функција стања**  $\psi_{n,l,m_l,m_s}$  која зависи од четири квантна броја. Конкретно,  $n$  је **главни квантни број** који узима вредности  $n = 1, 2, 3, \dots$ . **Орбитални квантни број**  $l$  описује квантовање угаоног момента и он се за дато  $n$  мења у корацима  $l = 1, 2, 3, \dots, n - 1$ . Постоји и **орбитални магнетни квантни број**  $m_l$  који може да има вредности од  $-l$  до  $l$  у корацима по 1. Он је везан за понашање електрона у магнетном пољу. Коначно, постоји и спински квантни број  $s$  који има само једну вредност за електрон а то је  $1/2$ , али зато је битнији **спински магнетни квантни број**  $m_s$  који може да има вредност  $+1/2$  и  $-1/2$ . Постојање спина као особине електрона је повезано са чињеницом да он поседује магнетни моменат. Када се све ове могућности преброје, следи да једној вредности главног квантног броја (једној енергији) одговара  $2n^2$  различитих стања, тј. стања са различитим квантним бројевима.

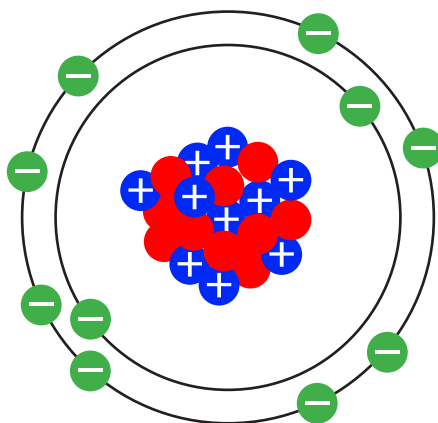
#### Паулијев принцип забране и Периодни систем елемената

Основни приступ прорачуну грађе вишеелектронских атома је у томе да се израчунају енергије за једноелектронски атом и онда на те енергетске нивое, почевши од најнижег, „распоређују” електрони следећи тзв. **Паулијев принцип забране** који тврди



да у једном атому може да постоји само један електрон са датим квантним бројевима. Сви електрони са једнаким  $n$  чине једну **љуску**, а из историјских разлога за њих постоје посебне ознаке. Тако, за љуску најближу језгру ( $n = 1$ ) каже се да је то *K*-љуска, затим за ( $n = 2$ ) говоримо о *L*-љусци итд. Унутар љуске можемо издвојити скуп електрона са истим орбиталним квантним бројем  $l$  који се назива **орбитала**. Последња љуска је тзв. **валентна љуска** и она учествује у изградњи хемијских веза.

Када се узме у обзир и Кулоновско одбијање између електрона, онда се изрази за енергије на одређени начин коригују, и са овим корекцијама квантна механика је у стању да у потпуности објасни не само структуру Периодног система елемената, већ и хемијске везе, тј. настанак молекула и кристала.



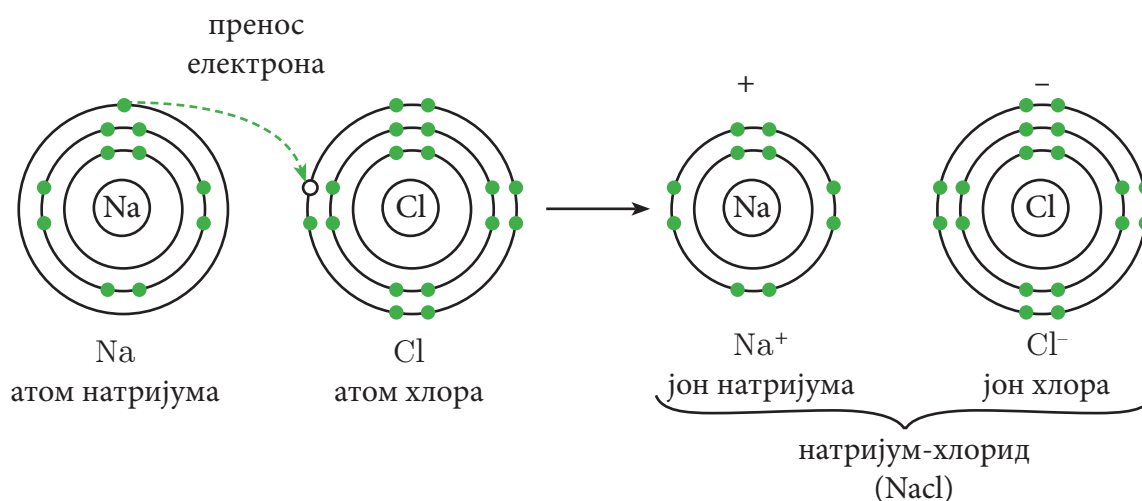
**Слика 9.1** Шематски приказ атома неона Ne ( $Z=10$ ) са попуњеном *K*- и *L*-љуском

## 9.1.2 ТИПОВИ МОЛЕКУЛА ПО ХЕМИЈСКИМ ВЕЗАМА

Квантно-механички прорачуни показују да атом као целина може да доспе у стање ниже енергије када на одређени начин попуни последњу љуску. Ово се постиже образовањем хемијских веза између атома. Основни типови веза су јонска, ковалентна и метална, а постоји низ прелазних веза.

### Јонска веза

**Јонска веза** представља потпуни пренос валентног (или валентних) електрона (сл. 9.2) између атома. То је врста хемијске везе у којој настају два супротно наелектрисана јона. У јонској вези, метал отпушта електроне постајући позитивно наелектрисан (катјон), док неметал прихвата те електроне постајући негативно наелектрисан (анјон). Настали јони се привлаче по Кулоновом закону.

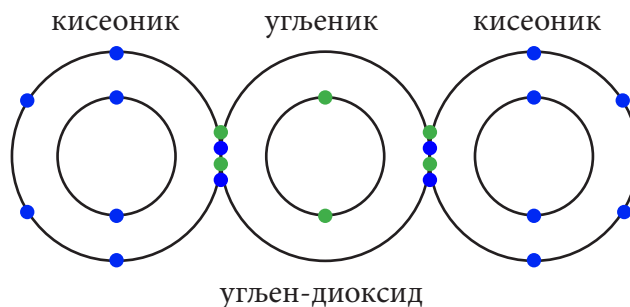


**Слика 9.2** Шематски приказ образовања јонске везе између атома натријума и хлора који дају кухињску со

На слици 9.2 је приказано образовање јонске везе између атома натријума и хлора. У складу са горе изнетим, хлору, који има седам електрона у валентној љусци, потребан је један електрон да би их имао осам, што одговара попуњеној љусци за  $n = 2$ , чему тежи сваки атом. С друге стране, натријум у валентној љусци има један електрон, тако да када га отпусти остаје попуњена валентна љуска. Важно је да се примети да оба настала јона имају попуњене љуске, као што је већ речено. Напоменимо, на крају, да се у пракси од добијених јона добија кристална решетка кухињске соли.

## Ковалентна веза

**Ковалентна веза** је хемијска веза која укључује размену електронских парова између атома, тако да пар припада и једном и другом атому. Том приликом образован пар допуњава валентне љуске и једног и другог атома, као што је приказано на слици 9.3. Са ове слике се види да по образовању ковалентне везе сва три атома имају попуњену валентну љуску (по осам електрона).



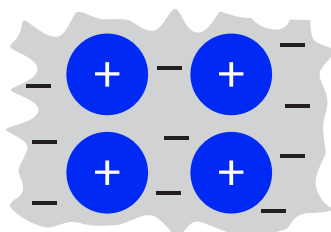
**Слика 9.3** Шематски приказ образовања ковалентне везе између атома угљеника и два атома кисеоника који образују угљен-диоксид

Управо описане јонска и ковалентна веза су идеални случајеви. У пракси већина веза има мешовити карактер, тако да и код ковалентне везе долази до делимичног преноса наелектрисања. За такве атоме кажемо да су **електропозитивни** и **електронегативни**, а не јони.

## Метална веза

Када атоми метала формирају кристал, они из валентне љуске ослобађају електроне који онда могу слободно да се крећу кроз кристалну решетку. Том приликом у правилно распоређеним чворовима решетке остају позитивно наелектрисани јони који су окружени слободним електронима (сл. 9.4). Искуство показује да овакав просторни распоред наелектрисања даје веома чврсту, тзв. **металну везу**.

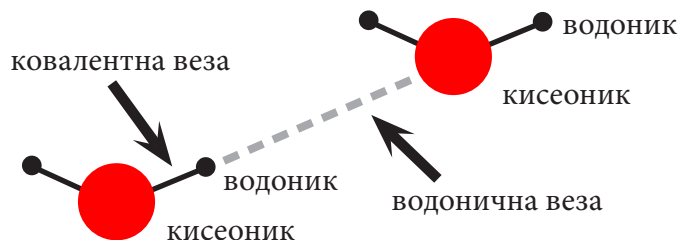
Као што је напоменуто, постојање слободних електрона је узрок добре проводности метала. Већ смо код објашњења фотоэффекта рекли да због привлачне Кулонове силе слободни електрони не могу да напусте метал док се не обезбеди енергија која је већа од излазног рада метала (потпоглавље 8.2.2).



**Слика 9.4** Шематски приказ кристалне решетке метала, са позитивним јонима у чворовима и „облаком“ електрона

## Водонична веза

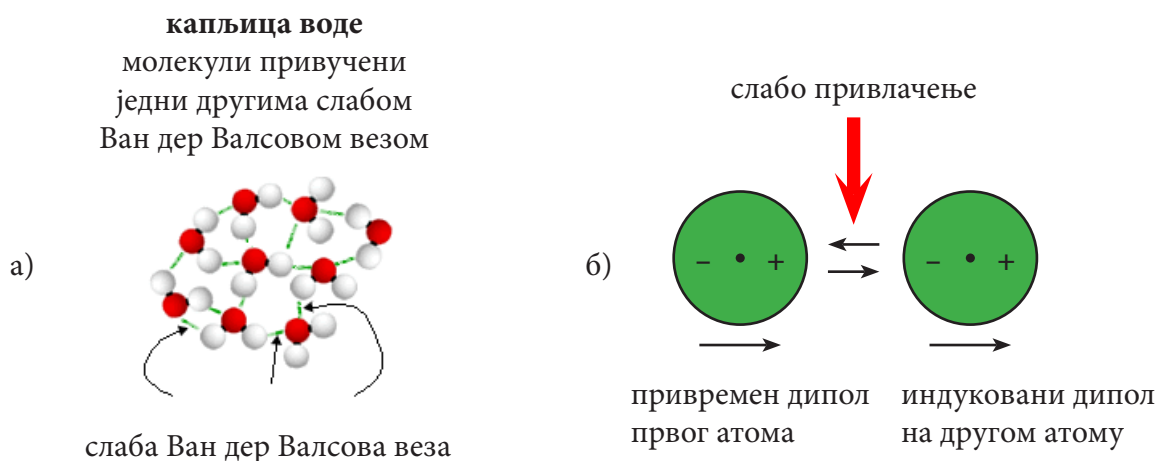
Водонична веза се остварује привлачном силом између електронегативног атома једног молекула и водоника ковалентно везаног за електронегативан атом другог молекула. Обично је то електронегативан атом кисеоника, азота или флуора, који има делимично негативно наелектрисање. Водоник је онда делимично позитивно наелектрисан. Оваква веза се, скоро по правилу, јавља у органским једињењима и у води и леду.



**Слика 9.5** Шематски приказ водоничне везе код воде

## Ван дер Валсове (молекулске) везе

**Ван дер Валсова (молекулска) веза** је слаба интеракција између момената електричних дипола атома или молекула. Најизразитији примери материјала са Ван дер Валсовим везама (име везе настало је по холандском физичару и математичару Јоханесу ван дер Валсу (1837–1923)) су течно и чврсто стање инертних гасова, водоника, кисеоника, азота и многих органских и неорганских једињења, као и слојевитих полупроводних материјала.



**Слика 9.6** Шематски приказ Ван дер Валсове везе

Постоје две врсте Ван дер Валсових веза. То су примарна и секундарна веза. Примарна је резултат електростатичког привлачења између сталних дипола (потпоглавље 6.3.1). Стални диполи се образују у тзв. асиметричним молекулама, где постоји неизмењен однос између негативно и позитивно наелектрисане области. На пример, молекул воде се састоји од једног молекула кисеоника и два молекула водоника (на слици 9.6а атом кисеоника је обојен црвеном бојом, док су атоми водоника бели). Водонику је потребан један, док су кисеонику потребна два електрона да би се направила стабилна конфигурација, о чему смо говорили код водоничне везе. Када се овако образован молекул воде приближи другом молекулу воде, долази до образовања слабе везе између делимично позитивног атома водоника једног молекула и високо електро-негативног атома кисеоника другог молекула. Ова слаба веза је Ван дер Валсова веза. Секундарна веза је мање заступљена у природи и она настаје у интеракцији атомских или молекулских дипола – привремених и сталних, као што је приказано на слици 9.6б.

## 9.2 МОЛЕКУЛСКИ СПЕКТРИ

У претходним потпоглављима доста пажње је посвећено спектроскопији атома. Како је за биофизику важно понашање органске супстанције која је изграђена од углавном великих молекула, неопходно је да се посебно позабавимо молекулским спектрима. **Молекулски спектри** настају емисијом или апсорпцијом електромагнетног зрачења између енергетских нивоа молекула. Добијена слика је веома сложена и њеним настанком ћемо се бавити у продужетку овог поглавља. Из истраживања молекулских спектра је произишло и једно од најзначајнијих открића за праксу, а то су ласери.

### 9.2.1 МОЛЕКУЛСКИ СПЕКТРИ

Када посматрамо енергију коју молекул може да прима и одаје (занемарујући енергију кретања молекула као целине), уочавамо да то може да се догоди на више начина. Пре свега, током изградње молекула мењају се енергетски нивои електрона, тако да ти новодобијени енергетски нивои практично губе везу са нивоима атома од којих је молекул настао. Оно што је битно, и енергије које електрони могу да имају у молекулима  $E_{el}$  су квантоване (прецизније треба писати  $E_{el,i}$  ( $i = 1, 2, \dots$ )). Енергија тзв. **електронских прелаза** између њих  $\Delta E_{el}$  одговара разлици енергија два електронска нивоа тј.

$$\Delta E_{el} = E_{el,2} - E_{el,1}. \quad (9.1)$$

Постоје још две могућности побуђивања молекула. Наиме, зависно од јачине веза и облика молекула, он може и да вибрира (осцилује), при чему је и енергија вибрација  $E_{vib,i}$  квантована тј. ( $i = 1, 2, \dots$ ), тако да постоје и **вибрациони прелази** којима одговара разлика енергија  $\Delta E_{vib}$  тј.

$$\Delta E_{vib} = E_{vib,2} - E_{vib,1}. \quad (9.2)$$

Коначно, молекул као целина може да ротира, тако да у обзир треба да се узме и енергија ротације  $E_{rot,i}$ . С обзиром на то да је ротација повезана са угаоним моментом молекула као целине, следи да ће и она бити квантована  $E_{rot,i}$  ( $i = 1, 2, \dots$ ), дакле постоје и **ротациони прелази** којима одговара разлика енергија  $\Delta E_{rot}$  тј.

$$\Delta E_{rot} = E_{rot,2} - E_{rot,1} \quad (9.3)$$

Суштина облика молекулских спектра је у томе што су енергетски размаци различити за ове три врсте спектра, који су по вредностима енергија прелаза поређани на следећи начин

$$\Delta E_{el} \gg E_{vib} \gg E_{rot} \quad (9.4)$$

Последица односа енергија прелаза дата релацијом (9.4) значи да ако шематски прикажемо укупну енергију молекула, изражену као збир енергија свих облика, тј.

$$E = E_{el} + E_{vib} + E_{rot} \quad (9.5)$$

добићемо следећу слику тј. шему енергетских нивоа молекула као целине (сл. 9.7).



**Слика 9.7** Шема енергетских нивоа молекула као целине

Важно је напоменути да слика 9.7 није могла да буде нацртана у правој размери будући да је у реалности однос енергија прелаза много већи (релација 9.4). Видимо да постоји мноштво прелаза, тако да је сада јасно зашто су спектралне линије молекула груписане у облику трака. Молекули поседују тзв. **тракасте спектре**.

Ако посматрамо прелази између ротационих или вибрационих нивоа, који одговарају истом електронском нивоу, видимо да је реч о релативно малим енергијама кванта, што одговара инфрацрвеној области електромагнетног спектра. Ако прелаз укључује два електронска нивоа, онда је енергија кванта знатно већа и одговара видљивом или ултраљубичастом делу електромагнетног спектра. Треба још нагласити да се у овим спектрима не појављују линије које одговарају свим могућим прелазима, јер је вероватноћа неких прелаза веома мала. О томе говоре тзв. селекциона правила, о чему ће речи бити у наредном поглављу.

## 9.3 ЛАСЕРИ

У досадашњем излагању о квантним прелазима и спектрима нисмо се бавили једним битним питањем: колико времена атоми или молекули проводе у побуђеном стању. У овом поглављу се бавимо тим проблемом и последицама.

### 9.3.1 ВРЕМЕ ЖИВОТА ПОБУЂЕНОГ СТАЊА. ФОСФОРЕСЦЕНЦИЈА

Поновимо оно што смо до сада говорили о квантним прелазима у атомима или молекулима. Када је атом непобуђен, он је у стању најниже енергије, а сваки електрон је на неком од најнижих електронских нивоа (Паулијев принцип). Ако се појави фотон чија енергија одговара енергији прелаза у неко више стање, постоји могућност да га електрон апсорбује и тада је он на том вишем електронском стању. Он у том побуђеном стању проведе извесно време и онда се спонтано враћа у првобитно стање (или на неки други нижи побуђени ниво) уз емисију одговарајућег фотона (сл. 8.5).

Сада прецизирамо ову ситуацију. Електрон уопште може да буде побуђен, тј. да пређе на виши ниво, ако је велика вероватноћа преласка на тај ниво. Каже се да је прелаз **дозвољен**. Исто важи и за враћање са побуђеног нивоа. Ако је вероватноћа прелаза мала, обично се каже да је прелаз **зобрањен**. Који су прелази дозвољени, а који забрањени, говоре нам тзв. **селекциона правила** и она су тесно повезана са симетријом атома и молекула.

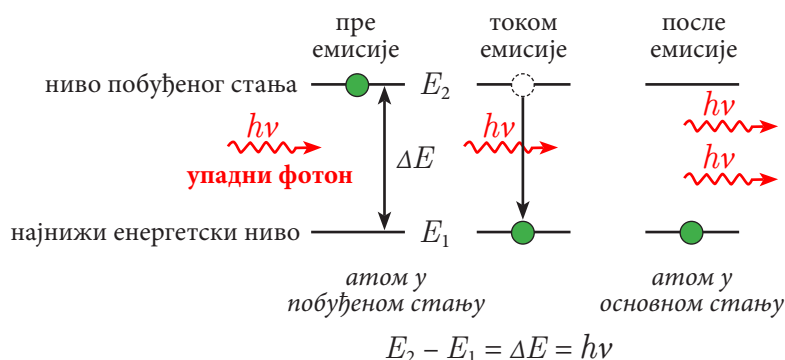
Анализирајмо и време које електрон проводи у побуђеном стању. Оно може бити различито, па се мери на следећи начин. Побуди се већи број атома на одређени ниво и онда се мери време за које се тај број смањи  $e$  пута. То време се назива **време живота нивоа**. Време живота је реда величине  $10^{-9}$  до  $10^{-8}$  секунди.

Код прелаза у молекулима ситуација је сложенија. При апсорпцији зрачења, молекул добија одређени износ енергије, тако да прелази у више енергетско стање тј. побуђено стање. Да би се вратио у основно (непобуђено) стање, тај вишак енергије молекул може околини да преда у виду топлоте сударом са молекулима околине, повећавајући им кинетичку енергију, односно температуру, а што представља *нерадијациони процес*. Молекул може да пређе у основно стање и ако емитује одговарајући квант енергије. Емисија зрачења од стране побуђеног молекула је *радијациони процес*. Ако на неки начин молекул побудимо на ниво са којег су прелази забрањени, онда он може ту остати дуже (и до минута) и тада имамо појаву **фосфоресценције**.

## 9.3.2 ЛАСЕРИ

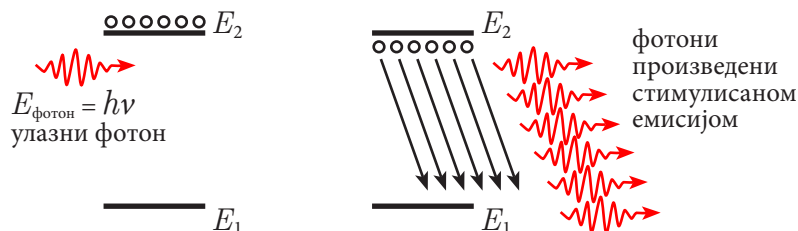
### Стимулисана емисија и инверзна насељеност

Алберт Ајнштајн је истраживао квантне прелазе и утврдио да постоји још један облик емисије, тзв. **стимулисана емисија** (сл. 9.8). Наиме, ако је електрон побуђен на одређени ниво и у том моменту поред атома (молекула) пролази фотон који одговара управо прелазу са тог нивоа, електрон се враћа на нижи ниво емитујући фотон који има све карактеристике као и фотон који је изазвао његову емисију (кохерентно зрачење, потпоглавље 2.2.4).



**Слика 9.8** Шематски приказ стимулисане емисије. Упадни фотон, који има енергију која је управо једнака разлици енергија између побуђеног и основног стања, стимулише емисију истог таквог фотона.

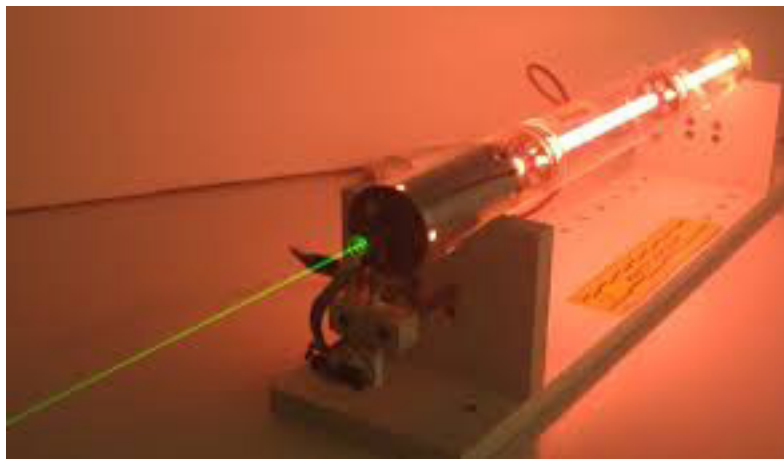
Да би се овај ефекат искористио, потребно је имати много побуђених атома који остају у побуђеном стању док не наиђе фотон који ће изазвати стимулисану емисију великог броја фотона. Другим речима, потребна нам је ситуација у којој је више атома (молекула) у побуђеном стању него у основном. Ова ситуација се назива **инверзна насељеност** (сл. 9.9).



**Слика 9.9** Шематски приказ стимулисане емисије у средини са инверзном насељеношћу



Идеја њеног постизања је у теорији једноставна, али је у пракси било потребно много времена да се реализује. Неопходно је да се посредним путем електрони доведу на побуђени ниво са којег је прелаз забрањен, тј. мало вероватан. Ово је реализовано у тзв. **ласеру** (према енглеском Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – LASER), који је приказан на слици 9.10.



**Слика 9.10** Слика хелијум-неонског (He-Ne) ласера

### Примена ласера у ветеринарској медицини

У данашње време, ласери су општеприсутни у разним видовима комуникација. Међутим, особине везане за ласерско зрачење, чија је енергија концентрисана на малој површини (мало расипање снопа), чине ласерски снап идеалним хируршким алатом. Његова најчешћа употреба је у офталмологији (лечење катаракте и миопије), стоматологији, лечењу артритиса, болова у леђима, малигних тумора итд. (сл. 9.11).



**Слика 9.11** Приказ употребе ласера од стране ветеринара

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Навести квантне бројеве који се у квантној механици придружују функцији стања електрона у атому.
2. О чему говори Паулијев принцип забране?
3. Описати настанак јонске везе на примеру натријум-хлорида.
4. Шта је ковалентна веза и каква је сврха формирања електронских парова?
5. Како се образује метална веза?
6. Описати настанак водоничне везе.
7. Шта је Ван дер Валсова (молекулска) веза?
8. Колико има типова Ван дер Валсове везе?
9. Како настају молекулски спектри?
10. Описати електронске прелазе код молекула.
11. Описати вибрационе прелазе код молекула.
12. Описати ротационе прелазе код молекула.
13. Поређати по величини енергије прелаза код молекула.
14. Којој врсти спектра припадају молекулски спектри?
15. Дефинисати време живота стања атома или молекула.
16. Објаснити разлику између дозвољених и забрањених прелаза.
17. Шта је стимулисана емисија?
18. Шта је појава инверзне насељености?
19. Објаснити принцип рада ласера.
20. Навести примере примене ласера у ветеринарској медицини.

# **10. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНО ЗРАЧЕЊЕ**

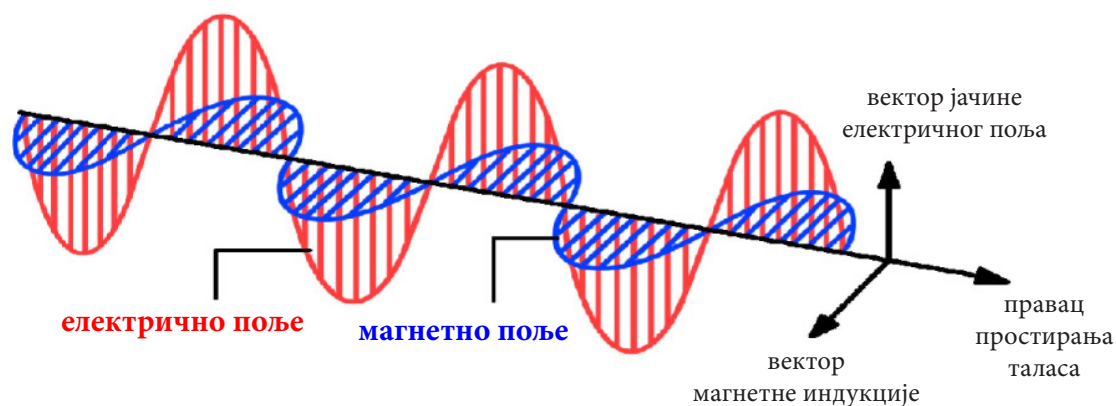


## 10.1 ЕЛЕКТРОМАГНЕТНО ЗРАЧЕЊЕ: ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

У овом поглављу пажња ће бити посвећена основним појмовима који се односе на електромагнетно зрачење, при чему ћемо се користити појмовима из главе 2 и које ћемо сматрати познатим.

### 10.1.1 ДЕФИНИЦИЈА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГ ЗРАЧЕЊА

**Електромагнетно зрачење** (ЕМ) је комбинација осцилујућег електричног и магнетног поља, који се у облику таласа простиру кроз простор. Електрично и магнетно поље описују вектори јачине електричног поља  $\vec{E}$  и магнетне индукције  $\vec{B}$  (поља), редом. Вектори електричног и магнетног поља осцилују нормално један у односу на други, а оба нормално на правац простирања таласа (сл. 10.1). Електромагнетни таласи су трансверзални.



**Слика 10.1** Осцилације електричног поља  $\vec{E}$  и магнетне индукције  $\vec{B}$  представљају електромагнетни талас. Равни у којима ови вектори осцилују су међусобно нормалне и нормалне на правац простирања.

Ово зрачење је носилац електромагнетне интеракције и може да се интерпретира као **талас** али и као **честица**, у зависности од случаја. Честице које квантификују електромагнетно зрачење су фотони (потпоглавље 8.2.3). Електромагнетне таласе је, 1863. године, теоријски предвидео шкотски физичар и математичар Џејмс Максвел (1831–1879), покушавајући да објасни ефекте индукције електричне струје у магнетним пољима и обрнуто. Касније је немачки физичар Хајнрих Рудолф Херц (1857–1894) потврдио ову теорију, произведвши радио-таласе које је детектовао са другог краја своје лабораторије једноставном осцилацијом електричне струје кроз проводник (тима начинивши један примитиван облик антене).

Електромагнетно поље поседује енергију  $E_f$  која зависи од фреквенције таласа  $\nu$ , која је дата са изразом (8.1). Енергија електромагнетног поља преноси се кроз простор брзином  $u$ , која је са таласном дужином  $\lambda$  повезана преко израза

$$u = \lambda \nu \quad (10.1)$$

Приметимо да је наведени израз за брзину таласа идентичан са изразом (2.19), али изражен преко фреквенције.

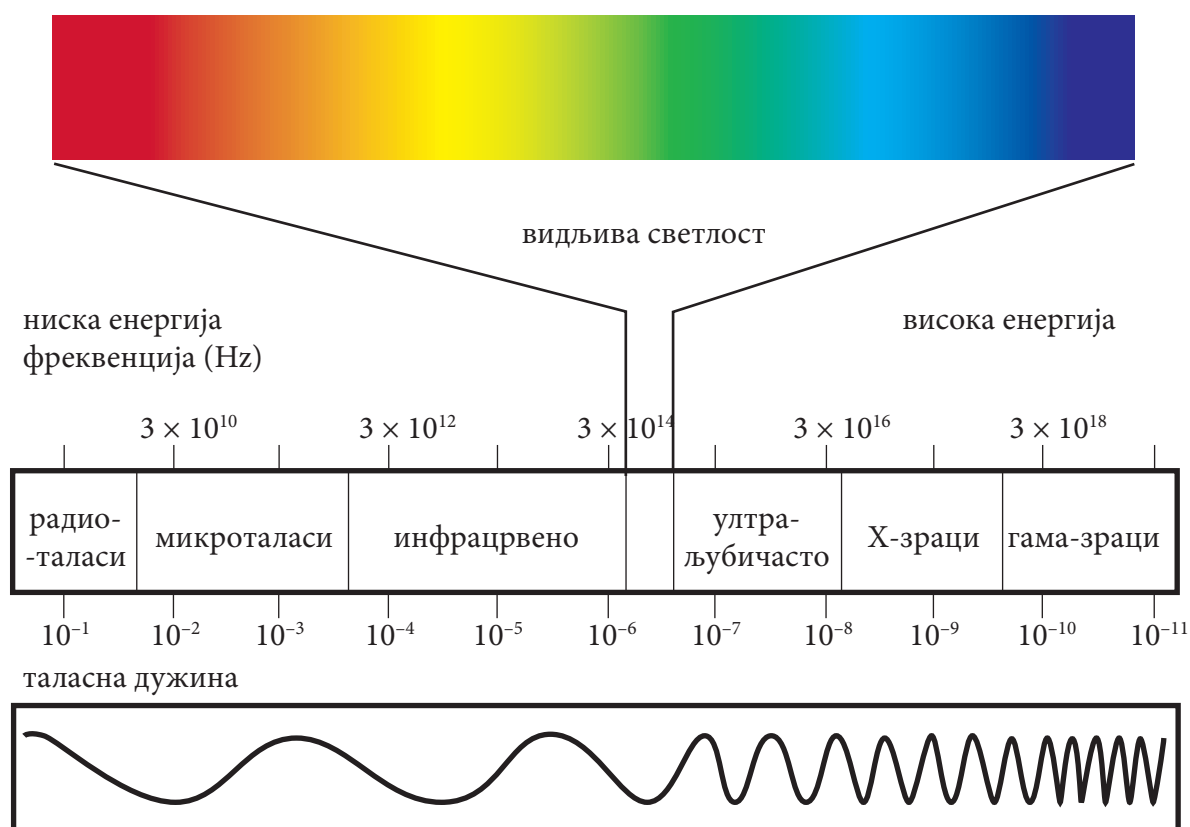
У вакууму брзина ЕМ таласа је једнака брзини светлости. У материјалној средини брзина ЕМ таласа дата је преко израза

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}, \quad (10.2)$$

где је  $c$  брзина светлости,  $\epsilon_r$  релативна диелектрична константа (потпоглавље 6.1.1), а  $\mu_r$  релативна магнетна пермеабилност (потпоглавље 6.3.4). Из последње једначине следи да је брзина ЕМ таласа у материјалној средини увек мања од брзине његовог простирања у вакууму.

## 10.1.2 СПЕКТАР ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГ ЗРАЧЕЊА

Спектар електромагнетног зрачења чине таласи различите таласне дужине или фреквенције (сл. 10.2). У ЕМ спектар спадају, од највећих до најмањих таласних дужина (односно, од најмањих до највећих фреквенција, тј. енергија фотона): радио-таласи (РТ), инфрацрвено зрачење (ИЦ), видљива светлост (или краће – светлост), ултраљубичасто зрачење (УЉ), X-зраци и  $\gamma$ -зраци.



Слика 10.2 Спектар електромагнетног зрачења

**Радио-таласи** су таласи најмањих фреквенција (најмањих енергија), односно највећих таласних дужина. Они настају при убрзавању наелектрисања у проводницима и емитују их кола наизменичне струје. Облик тих кола и елементи у њему одређују колико се енергије емитује у облику ЕМ таласа. Кола која су обликована на начин да емитују највише ЕМ енергије називају се **антене**. Радио-таласи најкраћих таласних дужина називају се **микроталаси**.

Електромагнетни таласи виших учестаности настају процесима унутар атома и молекула.

**Инфрацрвено зрачење** (ИЦ) се јавља као последица вибрације и ротације молекула на свим температурама. Међутим, ови процеси су израженији на вишим температурама. На пример, топлотно дејство Сунца које осећамо је последица овог зрачења.

**Светлост**, односно онај део ЕМ спектра који може да детектује човечје чуло вида, добија се преласком спољашњих електрона у атому са вишег на нижи енергетски ниво.

**Ултраљубичасто зрачење** (УЉ) добија се, такође, преласком спољашњих електрона са виших на ниже енергетске нивое. Знатан део овог зрачења потиче од Сунца, али оно бива апсорбовано у вишим слојевима атмосфере. Налази се у области таласних дужина од 380 nm до 10 nm, што одговара фреквенцији од  $7,9 \times 10^{14}$  Hz до  $3 \times 10^{16}$  Hz. Ово зрачење има ниску пробојну моћ, па већину Сунчевих УЉ зрака упије Земљин озонски

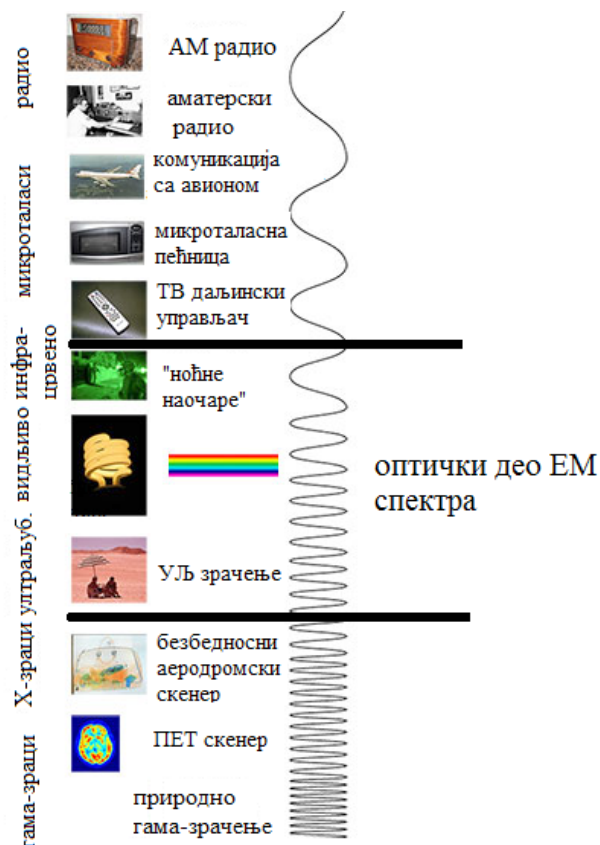
омотач. Стимулише производњу витамина Д, изазива тамњење коже, опекотине на кожи и канцерогене промене. УЛ зрачење се користи у терапеутске сврхе за стерилизацију радног простора и опреме, производњу вештачког светла, као и у спектроскопији и астрономији.

**Х-зрачење** се добија успоравањем врло брзих електрона при удару у металну metu или, пак, премештањем електрона блиских језгру са вишег на нижи упражњени енергетски ниво (више детаља о овом зрачењу биће дато у следећем поглављу).

**Гама ( $\gamma$ ) зрачење** емитују радиоактивна језгра атома у процесима распада (више детаља о овом зрачењу биће дато касније у глави 12).

### 10.1.3 ОПТИЧКИ ДЕО ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГ СПЕКТРА

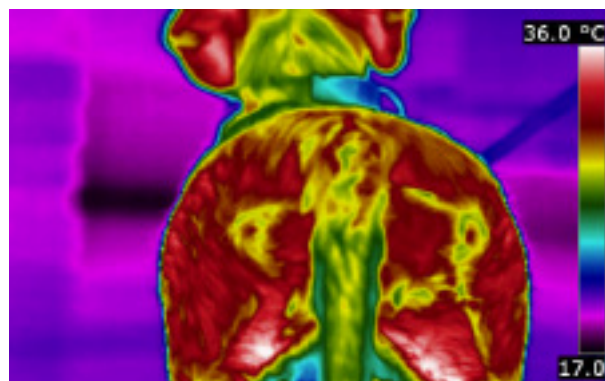
У **оптички** део електромагнетног спектра спадају ултраљубичасто, видљиво и инфрацрвено зрачење. Највећу енергију кванта у оптичком делу ЕМ зрачења има УЛ зрачење, које спада у јонизујуће зрачење будући да при вишим фреквенцијама може да изазове јонизацију атома избацујући слабо везане електроне лаких елемената.



Слика 10.3 Оптички део електромагнетног спектра

Природан извор УЉ зрачења је Сунце, чија температура на површини износи 6 000 °С. Вештачки извори УЉ зрачења су разни топлотни извори, као што су нпр. лучне и живине (кварчне) лампе. Ултраљубичасто зрачење ефикасно убија бактерије, те се користи за стерилизацију просторија, медицинске опреме и намирница. Биолошко дејство УЉ зрачења може да се подели на два ефекта које изазива – фотохемијски и фотоелектрични. Први се испољава кроз изазивање хемијских реакција на нивоу ћелије, као што је на пример претварање провитамина Д у витамин Д. Фотоелектрични ефекат условљава сложене процесе у ткивима, као што су промене колоидних својстава и денатурација беланчевина. Већ поменуто бактерицидно дејство УЉ зрачења потиче од чињенице да оно при одређеној таласној дужини (253,7 nm) доводи до промена у структури дезоксирибонуклеинске киселине.

Инфрацрвено зрачење има топлотно дејство. Мерење температуре на основу ИЦ зрачења помоћу течних кристала, који са променом температуре селективно рефлектују дневну светлост и тако мењају боју, назива се ИЦ термографија. На истом принципу ИЦ се користи као дијагностичка метода откривања поткожних тумора, поремећаја у циркулацији и других обољења код животиња.



**Слика 10.4** Снимак делова тела пса добијен ИЦ термографијом

Видљиво зрачење (осим што се налази у делу ЕМ спектра које региструје чуло вида) нашло је примену и у ласерској дијагностици и терапији (поглавље 9.3), али и у бројним оптичким методама и биоветеринарским наукама. Тако, на пример, концентрација раствора може да се одреди преко индекса преламања, који за већину раствора линеарно зависи од концентрације у широком опсегу концентрација. На овом принципу засноване су и рутинске методе за одређивање концентрације шећера, беланчевина у плазми и масти у млеку.



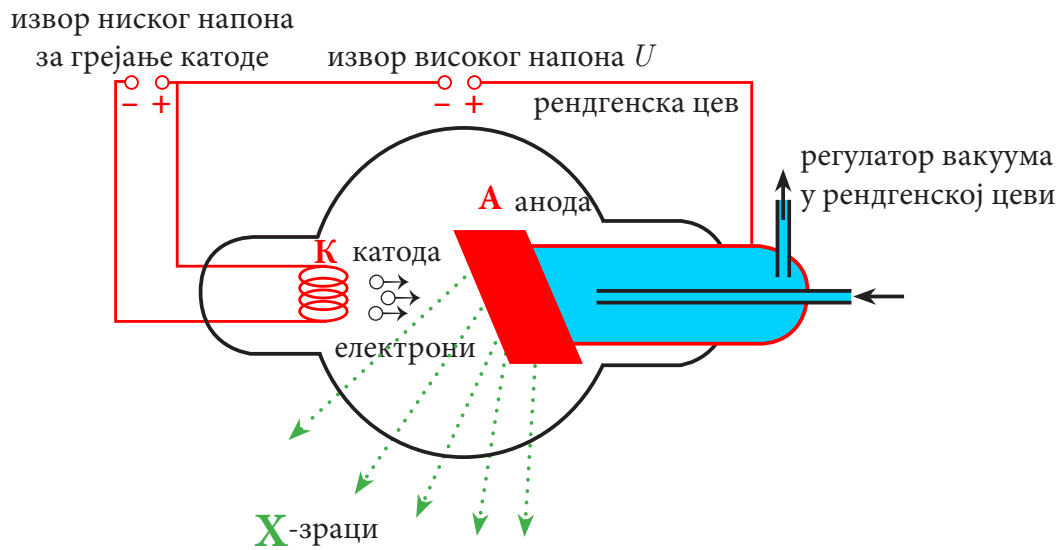
## 10.2 X-ЗРАЧЕЊЕ (РЕНДГЕНСКО ЗРАЧЕЊЕ)

X-зрачење (рендгенско зрачење) припада једном делу спектра електромагнетног зрачења. Оно је јонизујуће и због велике енергије користи се у радиологији (медицина и ветеринарска медицина) за добијање слике костију и зуба, као и у кристалографији за одређивање структуре кристала. Рендгенски зраци су добили име по свом проналазачу, немачком физичару Вилхелму Рендгену (1845–1923). Данас се често користи и назив икс-зраци (непознати зраци), како их је Рендген назвао пошто им није познавао природу. Због значаја X-зрачења, у поглављу ће му бити посвећено више пажње.

### 10.2.1 НАСТАЈАЊЕ И СПЕКТАР X-ЗРАЧЕЊА

#### Настајање X-зрачења

X-зрачење се добија у вакуумским цевима за електрично пражњење када снап високоенергетских електрона, произведених на катоди, интерагује са анодом. Електрони су убрзани напонима од 10 до 100 kV, који ударом о аноду изазивају веома продорно електромагнетно зрачење високих енергија (сл. 10.5). Ово зрачење не скреће нити у магнетном нити у електричном пољу.



**Слика 10.5** Рендгенска цев у којој се електрони ослобођени са загрејане катоде убрзавају високим напонем. Приликом удара ових електрона о аноду емитују се X-зраци.

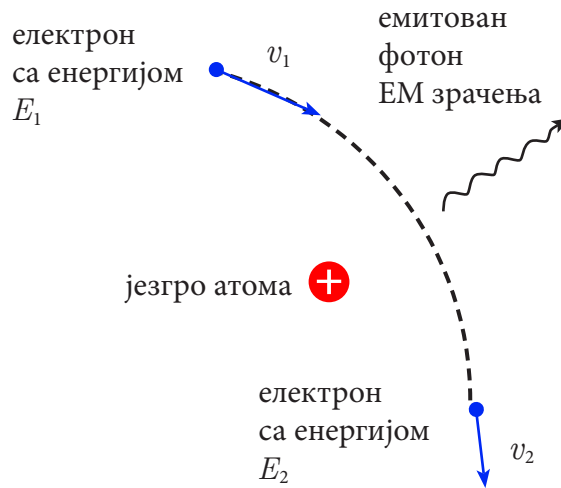
Потребан проток електрона у рендгенској цеву се обезбеђује преко катоде, грејане од извора ниског напона, која емитује електроне услед ефекта тзв. термоелектронске емисије. Електрони се из катоде преко извора високог напона  $U$  усмеравају ка аноди, ударају у њу, при чему долази до интеракције упадних електрона са електронима електронског омотача атома аноде, чији је резултат емисија електромагнетних таласа фреквенцијама од  $3 \times 10^{16}$  до  $3 \times 10^{19}$  Hz, односно таласних дужина у интервалу од 0,1 nm до 10 nm.

## 10.2.2 СПЕКТАР X-ЗРАЧЕЊА

Механизам настајања X-зрачења се може илустровати преко спектра зрачења. X-зраци имају две компоненте спектра: (1) континуални и (2) карактеристични (линијски) спектар.

## Континуални спектар X-зрачења

Континуални спектар настаје због наглог заустављања брзих електрона на аноди – **закочно рендгенско зрачење** (сл. 10.5). Наиме, електрони емитовани са катоде убрзавају се великом потенцијалном разликом и стичу енергију реда неколико десетина хиљада електронволти. Брзи електрони стижу до аноде и улазе у електрично поље језгара атома од којих је она сачињена (сл. 10.6), где се нагло успоравају. То успорено кретање електрона доводи до емисије фотона електромагнетног зрачења ( $\nu_2 < \nu_1$ ). Енергија емитованих фотона који имају фреквенцију  $\nu = (E_1 - E_2)/h$  (као што се види на слици 10.6 и из израза 8.4), зависи од степена интеракције између језгара и електрона, тј. од раздаљине коју пролазе електрони. У овом процесу могу да се створе фотони практично свих енергија између нуле и максималне, која је одређена укупном кинетичком енергијом електрона, па је према томе резултујуће зрачење континуално и садржи фотоне свих тих енергија, као што се види на слици 10.7.

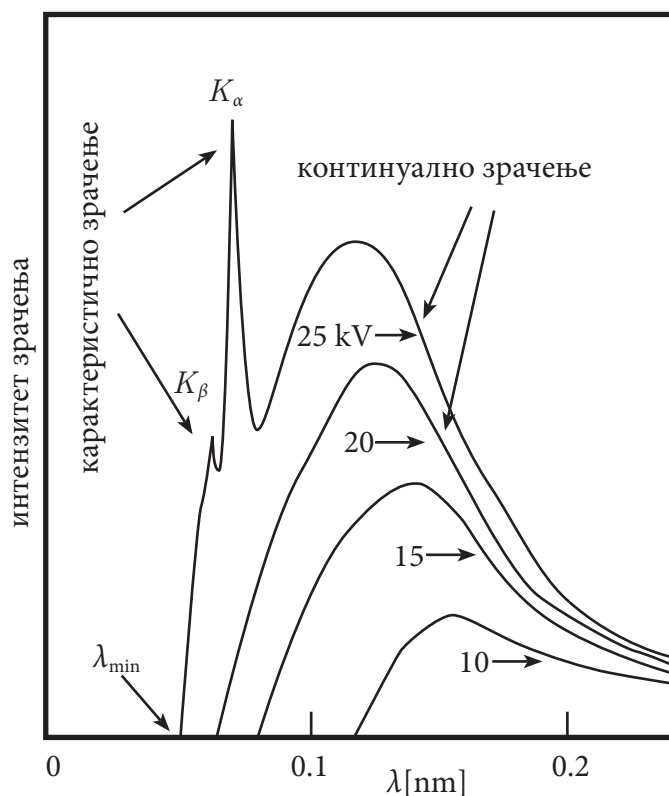


**Слика 10.6** Уз објашњење закочног зрачења

Са слике 10.7 се види да је дистрибуција интензитета зрачења, у функцији енергије (таласне дужине  $\lambda$ ) континуална и да почиње од једне карактеристичне енергије (таласна дужина  $\lambda_{\min}$ ), која је одређена вредношћу разлике потенцијала између електрода. Таласна дужина  $\lambda_{\min}$  се добија из израза

$$\lambda_{\min} = \frac{C_X}{U}, \quad (10.3)$$

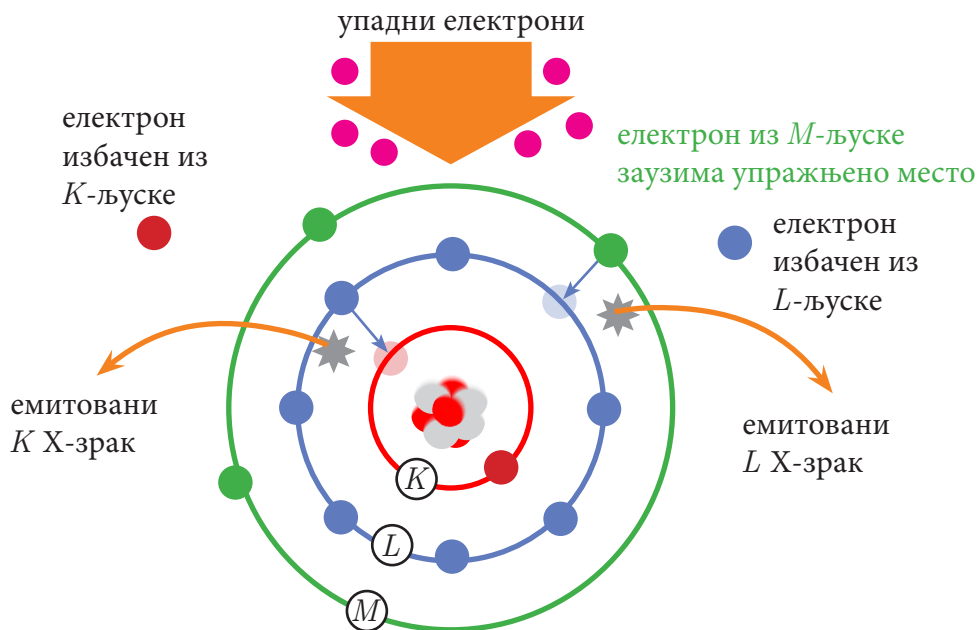
где је  $C_X = 12,398 \text{ Vm}$ , док је  $U$  напон између катоде и аноде изражен у kV.



**Слика 10.7** Спектар X-зрачења за различите енергије електрона који се крећу од катоде ка аноди

### Карактеристични (линијски) спектар X-зрачења

Ако је енергија брзог електрона већа од везивне енергије електрона у одређеној љусци атома аноде, дешава се следећи процес (сл. 10.8). У судару, упадни електрон може да избаци везани електрон (на слици је то електрон на  $K$ -љусци или  $L$ -љусци) са његовог места у електронском омотачу. Ти електрони који су избачени, на слици су приказани црвено обојеном куглицом (избачен са  $K$ -љуске), док је електрон који је избачен са  $L$ -љуске обојен љубичастом бојом. На тај начин се ствара „рупа”, тј. мањак електрона у односу на попуњено стање у атому. Та рупа се попуњава квантним прелазом електрона са неког од виших енергетских нивоа (зелено обојеног са  $M$  на  $L$  ниво или љубичасто обојеног са  $L$  на  $K$  ниво), који притом емитује фотон енергије одређене разликом енергија таквог везано-везаног прелаза, тј. емитује се квант карактеристичног X-зрачења, који је шематски приказан закривљеном стрелицом наранџасте боје. Фреквенција ових фотона је одређена изразом (8.4).



**Слика 10.8** Уз објашњење механизма карактеристичног X-зрачења

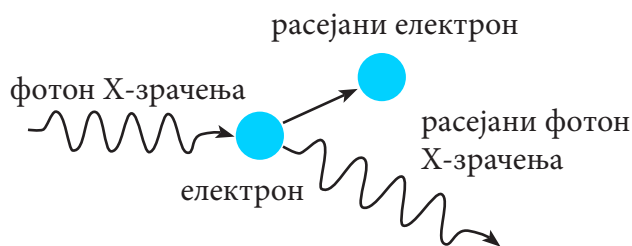
На слици 10.7, која приказује спектар X-зрачења, осим континуалног виде се и две линије тзв. карактеристичног (линијског) спектра. Линије које настају приликом прелаза електрона са виших нивоа на ниво  $K$  називају се  $K$ -линије. Ако је то прелаз са  $L$  на  $K$  ниво, онда се она означава са  $K_a$ . Или, ако је у питању прелаз са  $M$  на  $K$  линију, онда говоримо о  $K_b$  линији. Ако се, пак, прелази одигравају са виших на  $L$  ниво, онда се појављују линије  $L_a$  и  $L_b$  итд. На слици 10.8 су приказани прелази који доводе до појаве  $K_a$  и  $L_a$  линија.

### 10.2.3 ИНТЕРАКЦИЈА X-ЗРАЧЕЊА СА СУПСТАНЦИЈОМ

Пре него што пређемо на објашњење интеракције X-зрачења са супстанцијом, као и слабљења овог зрачења при проласку кроз супстанцију (наредно потпоглавље), навешћемо једну напомену. X-зрачење (X-фотон) и  $\gamma$ -зрачење ( $\gamma$ -фотон), настала на различите начине, имају исту природу, тако да ћемо их звати једним именом – фотони. Из тог разлога, све што буде речено за интеракцију X-фотона са супстанцијом важи и за  $\gamma$ -фотоне. Интеракција фотона са супстанцијом одиграва се на три начина: фотоелектричним ефектом (детаљно описан у потпоглављу 8.2.2), еластичним расејањем тј. променом правца кретања уз промену енергије фотона (Комптонов ефекат) и стварањем пара електрон–позитрон (пар ефекат). У овом потпоглављу позабавићемо се са последња два.

## Комптонов ефекат

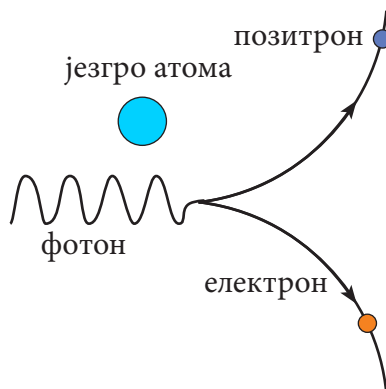
Фотони X-зрака могу да интерагују са електронима из атомског омотача средине, што доводи до расејања путем тзв. еластичног судара, при чему фотон губи део енергије расејавајући се са већом таласном дужином (сл. 10.9). Ову врсту интеракције је уочио амерички физичар Артур Комптон (1892–1962), по ком је овај ефекат и добио назив **Комптонов ефекат**. Открићем овог ефекта дефинитивно је потврђена и честицна природа фотона, која је била наговештена открићем фото-ефекта.



Слика 10.9 Шематски приказ Комптоновог ефекта

## Стварање пара електрон–позитрон (пар ефекат)

На слици 10.10 дат је шематски приказ интеракције фотона ( $\gamma$ -зраци) са супстанцијом познате под именом **стварање пара електрон–позитрон** или **пар ефекат**. До ове појаве (која право објашњење добија тек применом теорије релативности) долази када фотони имају довољно велику енергију (већу од двоструке енергије мировања електрона). Тада у пољу језгра атома, који апсорбује фотоне, може да дође до стварања електрона и његове античестице позитрона (позитивно наелектрисана честица која има исту масу и количину наелектрисања као електрон), који потом побуђују и јонизују средину кроз коју се крећу.



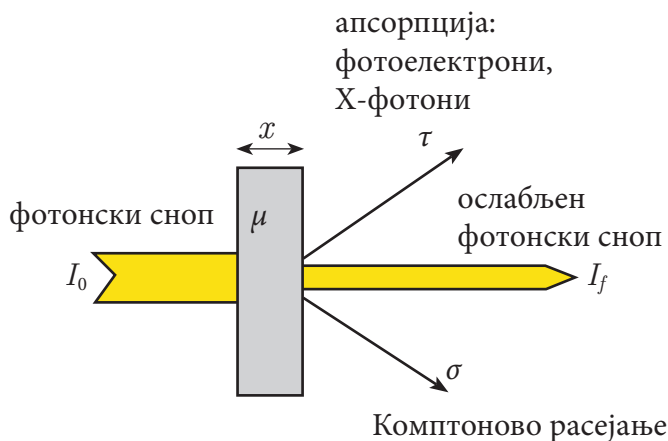
Слика 10.10 Шематски приказ стварања пара електрон–позитрон

## 10.2.4 СЛАБЉЕЊЕ X-ЗРАЧЕЊА

Интензитет снопа X-фотона који пролази кроз слој неког материјала слаби услед два механизма – апсорпције и расејања. Апсорпција X-фотона је последица њихове интеракције са супстанцијом. Расејање X-фотона је последица њиховог скретања са првобитног правца. Ако  $\mu$  представља коефицијент слабљења који карактерише материјал кроз који зрачење пролази (сл. 10.11), онда је интензитет фотонског снопа  $I_f$  при проласку кроз слој дебљине  $x$  дат изразом

$$I_f = I_0 e^{-\mu x}, \quad (10.4)$$

где је  $I_0$  интензитет упадног снопа фотона пре проласка кроз слој материјала дебљине  $x$ .



Слика 10.11 Шематски приказ слабљења X-зрачења

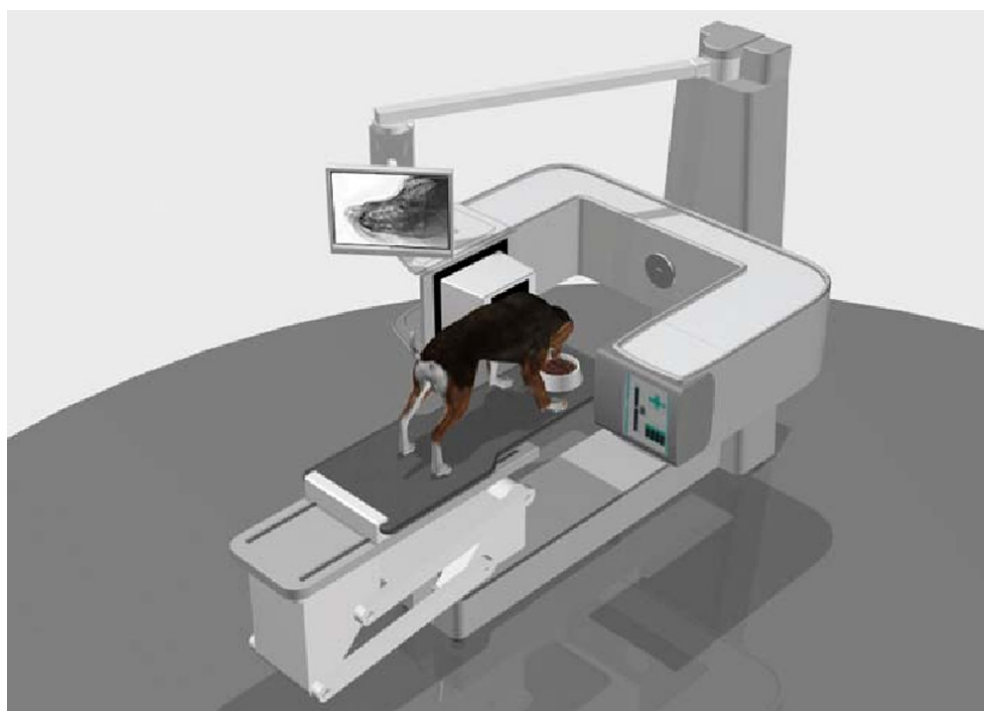
Коефицијент слабљења  $\mu$  је збир коефицијената апсорпције  $\tau$  и коефицијента расејања  $\sigma$ :

$$\mu = \sigma + \tau, \quad (10.5)$$

односно збир величина које показују допринос ефеката расејања и апсорпције у укупном ефекту слабљења снопа фотона при проласку кроз неку средину. Апсорпција и расејање фотона зависе од редног броја елемената (атомског броја)  $Z$  који чине ту средину. Зависност коефицијената  $\tau$  и  $\sigma$  од редног броја  $Z$  материјала дата је изразима  $\tau \approx Z^4 \lambda$  и  $\sigma \approx Z$ , редом.

## 10.2.5 ПРИМЕНА X-ЗРАЧЕЊА

Основа примене X-зрачења у медицини и ветеринарској медицини се састоји у чињеници да са порастом атомског броја  $Z$  расте и апсорпција овог зрачења. У конвенционалној ветеринарској медицини сноп X-зрака се из рендгенске цеви, смештене у рендгенском апарату (сл. 10.12), пропушта кроз тело животиње. Део снопа који пролази кроз тело детектује се помоћу фотографског филма или на екрану. Добијена слика је последица различите апсорпције зрачења у различитим ткивима и костима. На пример, апсорпција X-зрачења у костима (калцијум-фосфат) може да буде и до 150 пута већа



**Слика 10.12** Рендгенски апарат

него у меком ткиву (у чијој грађи је углавном заступљена вода). Наиме, што је апсорпција зрачења мања, веће је пропуштање X-зрака и део филма на који зрачење пада је осветљенији. После развијања филма, дато место се уочава као тамније. Добијена слика је, дакле, нека врста сенке ткива и органа који су, зависно од своје структуре органа (редни број елемената који улазе у њихов састав), неједнако пропустили упадни сноп зрачења. Међутим, на овако добијеној слици различите структуре (органи и ткива) се, због малих разлика у редном броју и положају унутар тела, поклапају и често је тешко да се између њих направи разлика.





**Слика 10.13** Рендгенски снимци глава пса и папагаја

Савремена верзија ове дијагностичке методе је компјутеризована томографија (СТ), код које се, симултано, сноп X-зрака пропушта из више праваца. После проласка кроз тело, сноп се детектује детекторима постављеним под различитим угловима. Интензитет зрачења пропуштеног у различитим правцима одузима се од интензитета зрачења извора и тако добија интензитет апсорбованог зрачења из различитих углова. Ови подаци се онда обрађују рачунаром, да би се потом добила слика одређеног дела тела.

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Шта је електромагнетно зрачење?
2. Којом се брзином електромагнетни таласи простиру кроз вакуум?
3. Како гласи израз за брзину простирања електромагнетних таласа у материјалној средини? Дефинисати сваки члан у том изразу.
4. Шта је спектар електромагнетног зрачења?
5. Који таласи сачињавају спектар електромагнетног зрачења?
6. Који је опсег таласних дужина радио-таласа?
7. Шта је ултраљубичасто зрачење?
8. Шта је инфрацрвено зрачење?
9. Шта је извор ултраљубичастог зрачења?
10. Какво дејство производи инфрацрвено зрачење?
11. Какво је дејство УЛ зрачења на животиње и људе?
12. Шта је ИЦ термографија?
13. Шта је X-зрачење (рендгенско зрачење)?
14. Како настаје X-зрачење?
15. Из којих се компоненти састоји X-зрачење?
16. Како настаје континуални спектар X-зрачења?
17. Како настаје карактеристични (линијски) спектар X-зрачења?
18. Који су начини интеракције X-зрачења са супстанцијом?
19. Описати Комптонов ефекат.
20. Описати стварање пара електрон–позитрон.
21. Написати формулу за слабљење интензитета фотонског снопа при проласку кроз слој супстанције.
22. Објаснити физичко значење коефицијента слабљења интензитета X-зрака.
23. Објаснити принцип рада рендгенског апарата.
24. Објаснити шта је компјутеризована томографија.

# 11. ОПТИКА



## 11.1 ПРЕЛАМАЊЕ СВЕТЛОСТИ

У тзв. **геометријској оптици**, уместо целог таласа посматрамо један **светлосни зрак** који представља нормалу на таласни фронт.

### 11.1.1 ЗАКОН ПРЕЛАМАЊА СВЕТЛОСТИ

#### Индекс преламања средине

Индекс преламања средине  $n$  се дефинише на следећи начин

$$n = \frac{c}{u}, \quad (11.1)$$

где је  $c$  брзина светлости, а  $u$  је брзина светлости у датој средини. У складу са формулом 10.2 следи да је  $n$  дато изразом

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}. \quad (11.2)$$

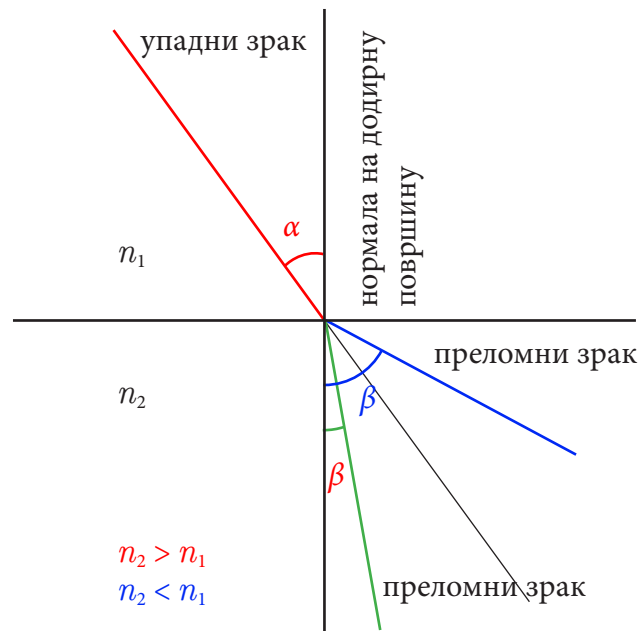
Како савремена физика сматра да је брзина светлости највећа могућа брзина у свемиру, из израза (11.1) следи да је  $n$  увек веће од 1. У пракси се узима да је индекс преламања ваздуха приближно једнак јединици. Када се пореде две средине, онда се средина са већим индексом преламања назива **оптички гушћом средином**. У супротном, говоримо о **оптички ређој средини**.

#### Снел–Декартов закон

Посматрајмо светлост која долази на границу две средине са индексима преламања  $n_1$  и  $n_2$ , редом (сл. 11.1). **Упадни угао**  $\alpha$  и **преломни угао**  $\beta$  повезани су тзв. Снел–Декартовим законом

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (11.3)$$

Са слике 11.1 се види да се, при преласку из оптички ређе у оптички гушћу средину  $n_2 > n_1$ , зрак обојен зеленом бојом прелама ка нормали, односно преломни угао  $\beta$  је мањи од упадног угла  $\alpha$ . Супротно томе, када је  $n_2 < n_1$  онда се зрак обојен плавом бојом прелама од нормале, односно преломни угао  $\beta$  је већи од упадног  $\alpha$ .



Слика 11.1 Уз Снел–Декартов закон

### Дисперзија при преламању

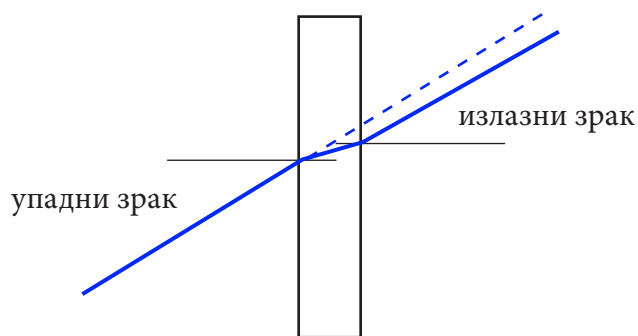
Индекс преламања светлости зависи од њене таласне дужине тј.  $n = n(\lambda)$ , што значи да се светлости различитих таласних дужина преламају под различитим угловима. Ако на граници две средине долази сложена светлост, она се после преламања разлаже. Ова појава се назива **дисперзија светлости**. Она се користи у спектроскопији за добијање спектра а, такође, проузрокује појаву вишебојних ликова код оптичких инструмената, о чему ће речи бити касније.

## 11.1.2 ПРИМЕРИ ПРЕЛАМАЊА СВЕТЛОСТИ

Сада ћемо навести неколико примера предмета од провидног материјала са индексом преламања који је већи од индекса преламања околне средине (нпр. ваздух или очна водица).

### План паралелна плоча

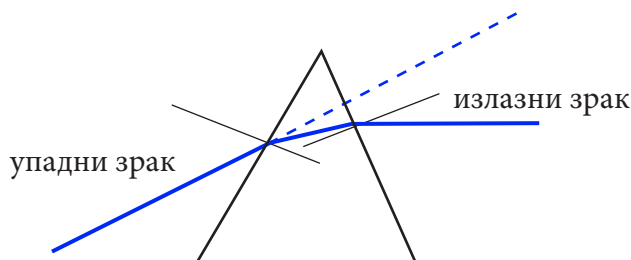
**План паралелна плоча** је плоча од провидног материјала, свуда исте дебљине. При преламању зрак иде из ређе у гушћу средину (упадни зрак) а потом из гушће у ређу (**излазни зрак**), који је после изласка из плоче у односу на упадни зрак само паралелно померен, као што је приказано на слици 11.2.



Слика 11.2 Преламање на план паралелној плочи

### Призма

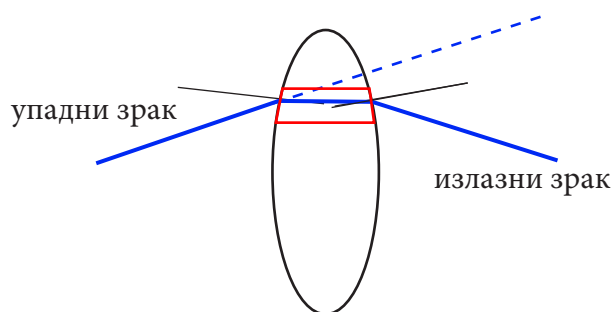
Када зрак светлости пада на **призму** (упадни), он се прелама на две граничне површине. Том приликом излазни зрак скреће ка ширем крају призме у односу на упадни зрак (сл. 11.3). Напоменимо да је призма један од основних елемената у спектроскопским апаратима, јер се по изласку из призме зраци различитих боја простиру у различитим правцима, односно они су просторно раздвојени.



Слика 11.3 Преламање на призми

## Сочиво

Сочиво је провидно тело омеђено двома сферним површима или једном сферном и једном равном. За теоријско објашњење сочива можемо га посматрати као скуп зарубљених призми (приказано црвеном бојом на слици 11.4).



**Слика 11.4** Преламање на сочиву

С обзиром на огроман значај који сочива имају у ветеринарској медицини, њима ће бити посвећено цело наредно поглавље, у којем ће бити детаљно анализирани путеви упадног и излазног зрака. Уобичајена је пракса да се у уџбеницима прво разматрају тзв. **танка сочива** (она чија је дебљина много мања од полупречника сферних површи које га ограничавају).

## 11.2 ТАНКА СОЧИВА

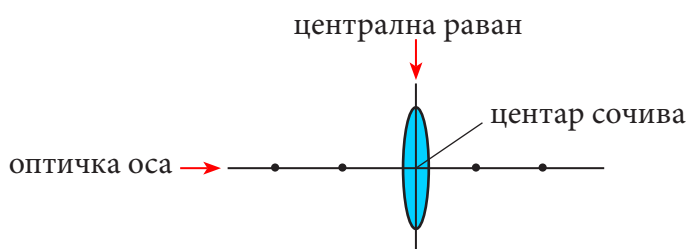
Да поновимо: танко сочиво је провидно тело ограничено двома сферним површима или једном сферном и једном равном површином, при чему је дебљина сочива много мања од полупречника тих сфера.

### 11.2.1 КАРАКТЕРИСТИКЕ ТАНКОГ СОЧИВА

#### Централна раван, центар и оса сочива

Две сферне површи које ограничавају сочива додирују се по једном кругу који представља ивицу сочива. Раван у којој лежи тај круг назива се **централна раван сочива**. Центар тог круга представља **центар сочива**. Права линија која пролази кроз центар сочива, а нормална је на централну раван, назива се **оптичка оса сочива**.

Основна апроксимација коју користимо код танких сочива састоји се у томе да не посматрамо преламање на обе граничне површи, већ сматрамо да се зрак прелама само на централној равни. Овом апроксимацијом све конструкције ликова код сочива се поједностављују.



Слика 11.5 Елементи пресека танког сочива

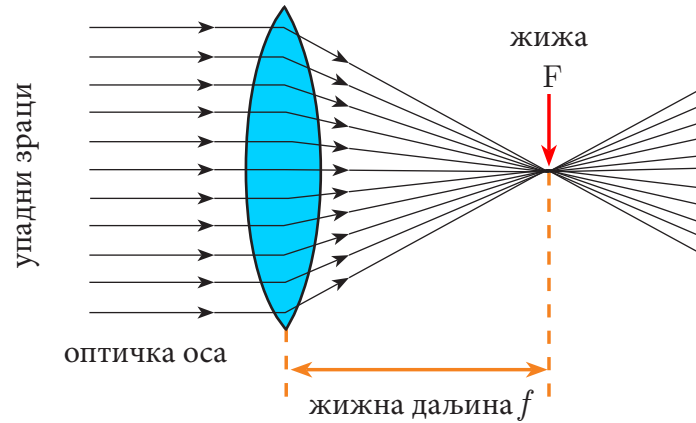
#### Жижа (фокус) и жижна даљина сочива

Једна од карактеристика сочива су његове **жиже** или **фокуси**. За објашњење овог појма морамо одвојено да разматрамо две врсте сочива.

**Сабирно сочиво** зраке који се крећу паралелно са оптичком осом (у равни која садржи оптичку осу) и падају на сочиво сабира тако да се пресеку у једној тачки на

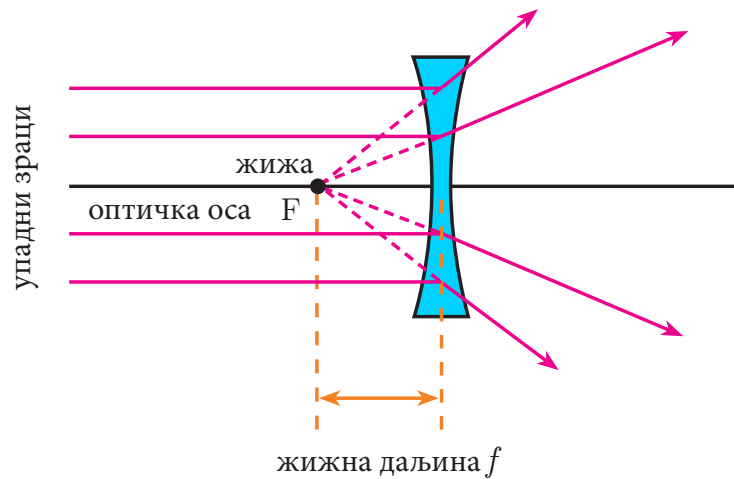


оптичкој оси и то је жижа сочива (сл. 11.6). Њена удаљеност од центра сочива назива се **жижна даљина** и обележава се са  $f$ . Јасно је да свако сочиво има две жиже (са различитих страна сочива), које су једнако удаљене од центра сочива.



**Слика 11.6** Уз дефиницију сабирног сочива

**Расипно сочиво** расипа зраке који се крећу паралелно са оптичком осом (у равни која садржи оптичку осу) и падају на сочиво (сл. 11.7). Они се не секу, али се продужеци тих зрака секу у једној тачки на оптичкој оси са супротне стране сочива. Та тачка је жижа расипног сочива, и има их такође две.



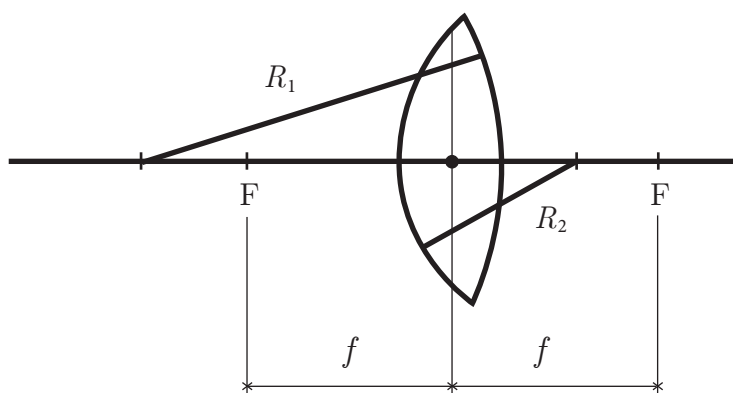
**Слика 11.7** Уз дефиницију расипног сочива

## Једначина за жижну даљину сочива

Користећи законе преламања, можемо одредити израз за жижну даљину сочива начињеног од материјала са индексом преламања  $n$ . Он гласи

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \quad (11.4)$$

где су  $R_1$  и  $R_2$  полупречници кривина сочива (сл. 11.8). Уколико је нека од површина сочива конкавна, тада се њен полупречник, у горњој једначини, узима са негативним предзнаком.



Слика 11.8 Уз једначину за жижну даљину сочива

У пракси се често користи величина која је представљена реципрочном вредношћу жижне даљине и назива се **оптичка јачина сочива**  $d$ . Ако је жижна даљина задата у метрима, онда се оптичка јачина изражава у **диоптријама**. Уобичајено је да се оптичка јачина расипног сочива прибележава негативним бројем.

## 11.2.2 КОНСТРУКЦИЈА ЛИКА КОД ТАНКОГ СОЧИВА

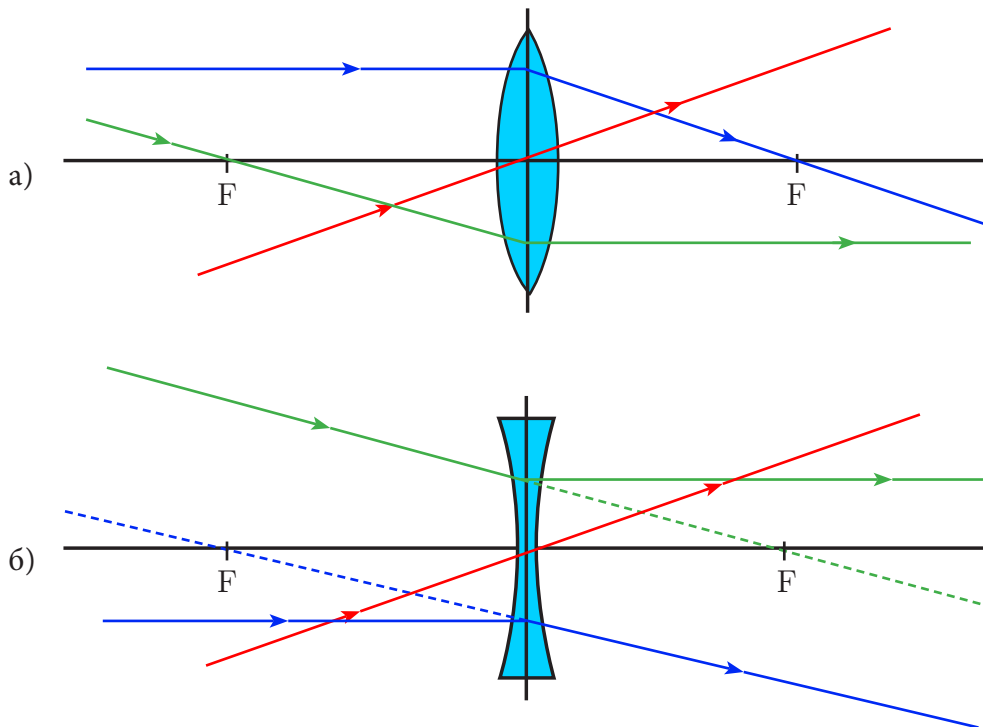
Када неки **предмет** погледамо кроз оптички инструмент (код кога је саставни део бар једно сочиво), онда тај предмет видимо као **лик** и то на два начина. Када се зраци, који полазе са неке тачке предмета, после преламања секу у једној тачки, она представља **реалан** (или **стваран**) лик који може да се види на заклону. Уколико се зраци, који полазе са неке тачке предмета, после преламања разилазе (тј. не секу), онда орган вида (код човека или неких животиња) у нашој свести формира лик у пресеку продужетка зрака који се назива **имагинаран** или **нестваран**. Ако је лик усмерен на исти начин

као предмет, каже се да је лик **усправан** (стрелица на цртежима има исти смер као код предмета). У супротном лик је **обрнут**.

За конструисање лика предмета који лежи на оптичкој оси довољно је посматрати два зрака који крећу са врха предмета (тј. дела који не лежи на оптичкој оси). За такве конструкције се користе тзв. карактеристични зраци.

## Карактеристични зраци

**Карактеристични зраци** за сабирно и расипно сочиво приказани су на слици 11.9. Језичку формулацију путања ових зрака препуштамо читаоцу, не сумњајући да ће сам успешно формулисати речима ове законе.

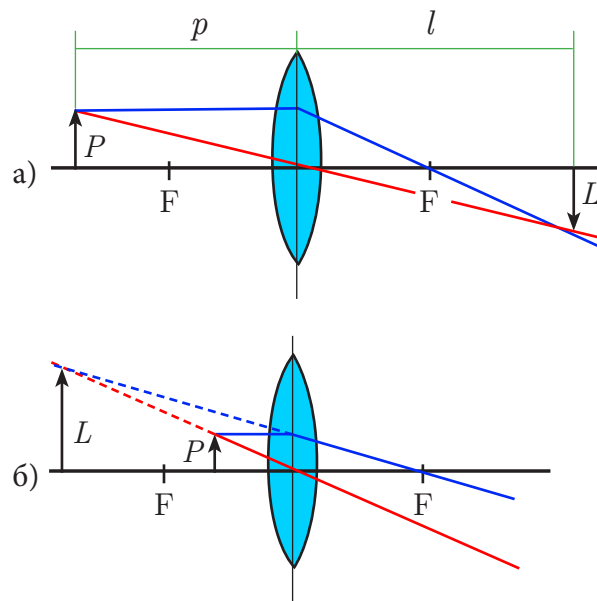


**Слика 11.9** Карактеристични зраци код сабирног (а) и расипног сочива (б)

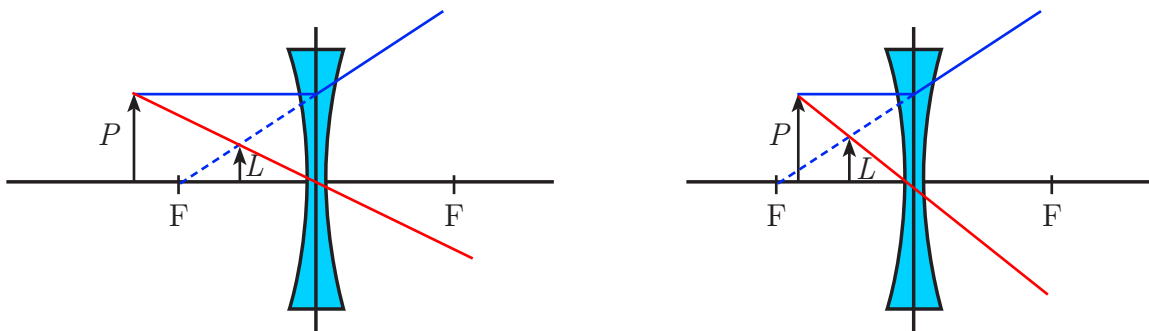
Код свих даљих конструкција ликова биће примењена конвенција коришћена на слици 11.9. (1) Зрацима који пролазе кроз центар сочива, (2) који пре преламања иду паралелно са оптичком осом и (3) зрацима који пре преламања пролазе кроз жижу или би њихов продужетак пролазио кроз жижу, придружене су боје црвена, плава и зелена, редом.

## Примери конструкције ликова код сочива

На слици 11.10 приказани су примери конструкције lika код сабирног сочива. Важно је уочити да, уколико је предмет удаљен од сочива више од жишне даљине  $p > f$ , где је  $p$  удаљеност предмета од центра сочива, лик је реалан (сл. 11.10а). У супротном, ако је предмет између жиже и сочива, он је имагинаран (сл. 11.10б). Код расипног сочива лик је увек имагинаран (сл. 11.11). На сликама 11.10 и 11.11  $L$  и  $P$  представљају дужине lika и предмета, редом.



Слика 11.10 Примери конструкције lika код сабирног сочива



Слика 11.11 Примери конструкције lika код расипног сочива

### 11.2.3 ЈЕДНАЧИНА ТАНКОГ СОЧИВА

Примењујући правила о сличности троуглова на конструкцију ликова на сликама 11.10 и 11.11, може се добити једначина танког сочива која омогућује да одредимо удаљеност лика  $l$  ако знамо жижну даљину сочива  $f$  и удаљеност предмета  $p$  од центра сочива. Она гласи

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{l}. \quad (11.5)$$

Ово је општи облик једначине танког сочива. За сабирно сочиво жижна даљина се узима са позитивним, а за расипно са негативним предзнаком. Без обзира на тип сочива, кад год је лик имагинаран,  $l$  се узима са негативним предзнаком.

#### Увећање сочива

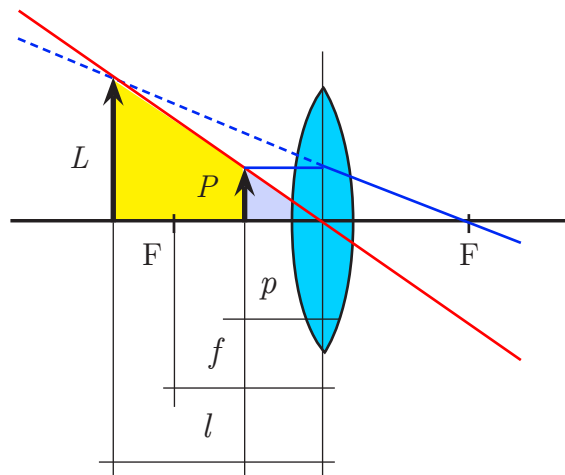
Под **линеарним увећањем сочива**  $u_{lin}$  подразумева се однос величине лика  $L$  и предмета  $P$  тј.  $u_{lin} = L/P$ . Под **угаоним увећањем сочива**  $u_{ug}$  подразумева се однос угла  $\theta$  (у радијанима) под којим се види предмет помоћу сочива и угла  $\theta_0$  под којим се на даљини јасног вида исти предмет види голим оком. **Даљина јасног вида**  $q$  је најмање растојање од ока при ком је предмет добро фокусиран и у пракси се узима да је та даљина око 25 cm.

## 11.3 ОПТИЧКИ ИНСТРУМЕНТИ И ЊИХОВИ НЕДОСТАЦИ

Познавање особина сочива нам омогућује конструкцију оптичких инструмената који су незаменљиви у ветеринарској медицини. Уобичајена је пракса да се и око (орган вида) третира као оптички инструмент. На крају потпоглавља ћемо се осврнути на недостатке сочива који отежавају употребу инструмената, при чему ћемо морати да узмемо у обзир таласне особине светлости у обиму који је покривен поглављем 2.2.

### 11.3.1 ЛУПА

Најједноставнији оптички инструмент је **увешавајуће стакло** или **лупа**. То је сабирно сочиво које постављамо тако да се предмет нађе између сочива и жиже (сл. 11.12).

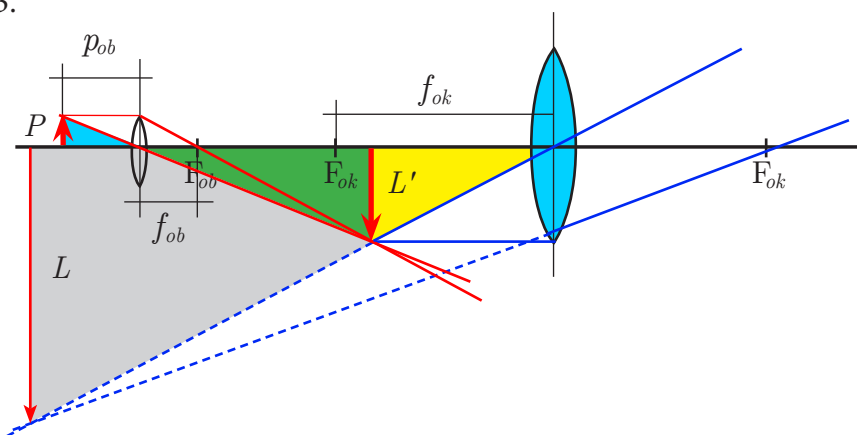


**Слика 11.12** Образовање имагинарног увешаног лика код лупе

Ако сматрамо да је лик, који се оштро види кроз лупу, приближно на даљини јасног вида  $q \approx l$  онда се, на основу слике 11.12, може добити процена линеарног увећања преко израза  $u_{in} = 0.25/f$ , где је жижна даљина дата у метрима.

### 11.3.2 МИКРОСКОП

Микроскоп је оптички инструмент који служи за постизање увећања већих него код лупе. Састоји се од два сабирна сочива са заједничком оптичком осом (и паралелним равнима сочива). Сочиво ближе предмету се назива **објектив**, а оно кроз које посматрамо увећан лик је **окулар** микроскопа. Објектив је постављен тако да формира увећан, обрнут и реалан лик предмета величине  $L'$  који се пројектује на месту између окулара и његове жиже. У том случају, окулар се понаша као лупа чији је предмет у ствари лик који је формирао објектив. На тај начин окулар даје још једном увећан, и овога пута, имагинаран лик величине  $L$ . Конструкција лика је приказана на слици 11.13.



**Слика 11.13** Образовање имагинарног увећаног лика код микроскопа. Црвеном бојом је приказана конструкција лика који даје објектив, а плавом бојом конструкција лика који даје окулар.

Јасно је да је увећање микроскопа једнако производу увећања објектива и окулара. Следећи корак ка бољем увећању и резолуцији (способност микроскопа да „раздвоји” две блиске тачке) јесте електронски микроскоп, о чему је било речи у потпоглављу 8.2.

### 11.3.3 ФУНКЦИОНИСАЊЕ ОКА КОД ЖИВОТИЊА

Око као периферни орган чула вида се током развоја животињских врста развило на различите начине, зависно од животних услова дате врсте. При овом излагању, аутори су пошли од чињенице да су на курсу анатомије студенти детаљније анализирали око, па на овом месту дајемо само резиме.

Пре свега, постоје животињске врсте које реагују не само на видљиву светлост. Тако, на пример, на златну рибицу делује и инфрацрвено зрачење, док јастози и морске

звезде детектују и рендгенско и УЉ зрачење, а лептири разликују већи опсег боја од људи.

Два основна типа ока код животиња су једнострука и вишеструка сочива. Једнострука сочива карактеришу се могућношћу фокусирања слике на мрежњачи. То се може постићи променом закривљености сочива (човек и неке птице) или померањем сочива напред-назад (код водених животиња). Вишеструка сочива функционишу тако да свако сочиво даје фрагмент слике, која се потом као целина формира у мозгу (хоботнице и инсекти).

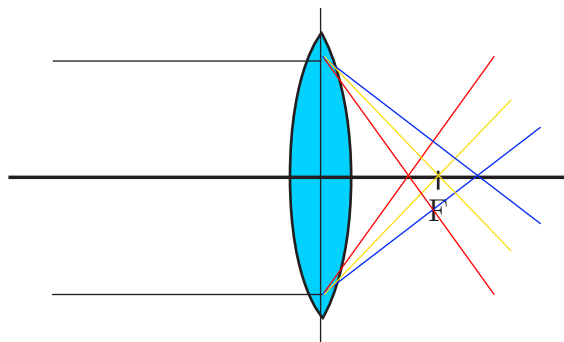
Суштина разлике функционисања између људског и животињског ока је у томе да је основна сврха људског ока да обезбеди тродимензиони вид, док је сврха животињског ока да региструје сваки, па и најмањи покрет.

### 11.3.4 НЕДОСТАЦИ СОЧИВА

Како је сочиво основни елемент оптичких инструмената и ока, морамо да се упознамо и са његовим недостацима. На овом месту ћемо да се позабавимо са два таква недостатка.

#### Хроматска аберација

Чињеница је да се светлост различитих боја (тј. неједнаких таласних дужина) различито прелама на сочиву. То доводи до тога да, када не радимо са једнобојном (монохроматском) светлошћу, добијамо ликове различитих боја на различитим местима. Стога, када предмет осветлимо белом светлошћу, лик који се формира на заклону постаје обојен. Ова врста недостатка сочива назива се **хроматска аберација** (сл. 11.14), при којој су и фокуси, за различите монохроматске боје, различито удаљени од центра сочива.



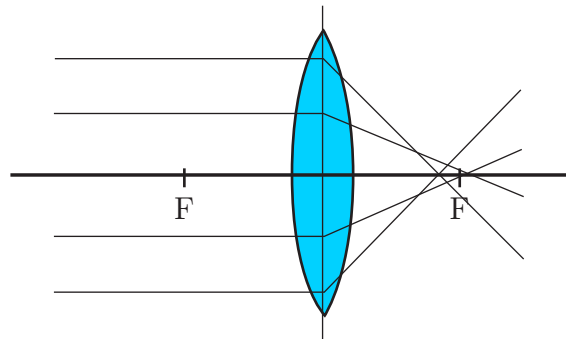
Слика 11.14 Уз објашњење појаве хроматске аберације



Хроматска аберација се отклања коришћењем сочива које је сложено од два сочива различитих индекса преламања, тако да коначно скретање зрака различитих боја буде уједначено.

## Сферна аберација

Други недостатак сочива, **сферна аберација**, последица је чињенице да оно није танко. Зато се зраци који се налазе даље од оптичке осе преламају мало испред жиже, док се они који су ближе оптичкој осе преламају мало даље од жиже. Ово доводи до формирања замућеног лика (сл. 11.15). Сферна аберација се такође отклања употребом сложеног сочива.



Слика 11.15 Уз објашњење појаве сферне аберације

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Дефинисати индекс преламања средине.
2. Формулисати Снел–Декартов закон преламања светлости.
3. Зашто се појављује дисперзија при преламању светлости?
4. Нацртати и описати преламање светлости на план паралелној плочи.
5. Нацртати и описати преламање светлости на призми.
6. Нацртати и описати преламање светлости на сочиву.
7. Дефинисати танко сочиво.
8. Шта су: централна раван, центар и оптичка оса сочива? Коментар учинити уз одговарајући цртеж.
9. Шта је сабирно сочиво? Како су дефинисане његове жиже?
10. Шта је расипно сочиво? Како су дефинисане његове жиже?
11. Написати једначину за жижну даљину сочива и објаснити сваки члан у њој.
12. Дефинисати оптичку јачину сочива.
13. Објаснити разлику између реалног и имагинарног лика.
14. Користећи слику 11.9а, формулисати путање карактеристичних зрака за сабирно сочиво.
15. Користећи слику 11.9б, формулисати путање карактеристичних зрака за расипно сочиво.
16. Написати једначину за танко сочиво и објаснити сваки члан у њој.
17. Шта је линеарно, а шта угаоно увећање сочива?
18. Објаснити функционисање лупе.
19. Користећи слику 11.13, објаснити образовање имагинарног увећаног лика код микроскопа.
20. У чему је разлика између једноструких и вишеструких сочива код животињских очију?
21. Шта је хроматска, а шта сферна аберација?

# **12. РАДИЈАЦИОНА БИОФИЗИКА**

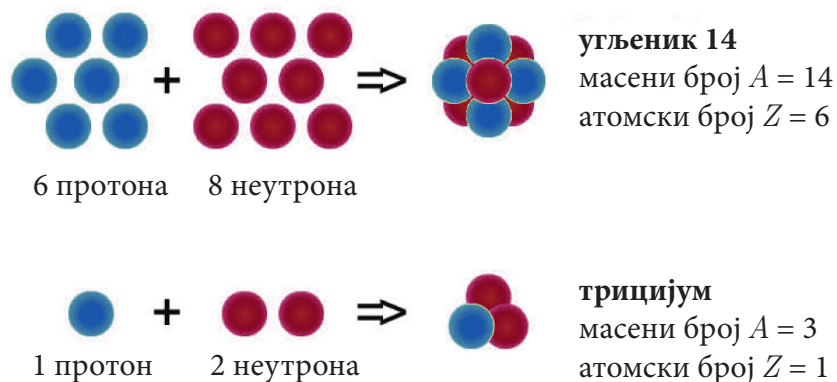


## 12.1 ЈЕЗГРО АТОМА: ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

У потпоглављу 8.1.2 укратко смо описали атом и интеракције, при чему смо дефинисали неке појмове везане за језгро атома. Међутим, за потребе ове главе која се односи на радијациону физику, у овом поглављу ћемо додати још неколико појмова.

### 12.1.1 ЈЕЗГРО АТОМА

Као што је већ истакнуто, број протона  $Z$  одређује редни број елемента у Периодном систему, а збир броја протона  $Z$  и неутрона  $N$  даје масени број  $A$  тј.  $Z + N$  (сл. 12.1). У нуклеарној физици, хемији и физичкој хемији хемијски елемент  $X$  записује се као  ${}^A_Z X$ , одакле се јасно види колики су његови масени и редни број, редом.



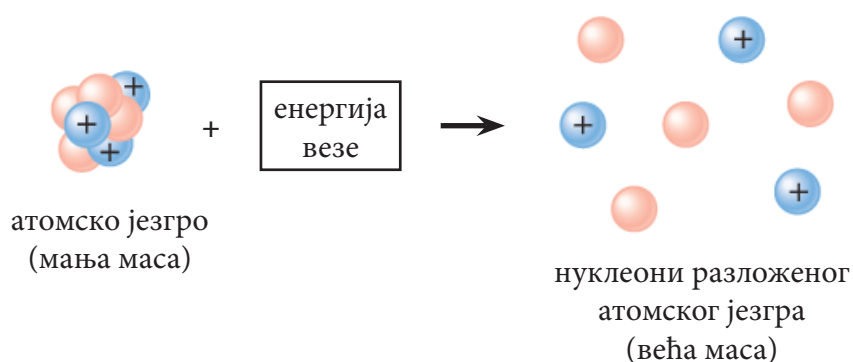
**Слика 12.1** Илустрација језгра атома

Изотопи истог хемијског елемента (потпоглавље 8.1.2) се у природи налазе у веома различитом међусобном односу, а неких чак ни нема у природи, већ се у вештачким (лабораторијским) условима појављују – као резултат нуклеарних реакција.

## 12.1.2 ДЕФЕКТ МАСЕ ЈЕЗГРА И ЕНЕРГИЈА ВЕЗЕ

Укупна маса језгра атома није једнака збиру маса протона  $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$  kg и неутрона  $m_n$  (иста као маса протона до на другу децималу) који га сачињавају, већ је увек нешто мања. Разлика у маси језгра  $m_j$  и његових саставних делова се назива **дефект масе**  $\Delta m$  и одговара енергији везе  $E_v$  нуклеона у језгру (сл. 1.2), што записано изгледа овако

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_j(A, Z). \quad (12.1)$$



**Слика 12.2** Шематски приказ дефекта масе

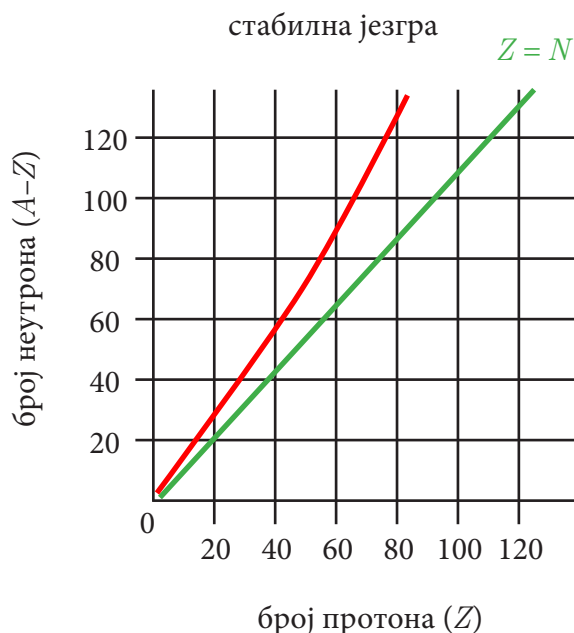
**Енергија везе**  $E_v$  је енергија коју је потребно уложити за разлагање језгра, односно енергија која се ослободи при стварању језгра. Према Ајнштајновој релацији о **еквивалентности масе и енергије**, дефекту масе  $\Delta m$  одговара енергија везе  $E_v$  изражена преко релације

$$E_v = \Delta mc^2. \quad (12.2)$$

Напоменимо да што је енергија везе већа, већа је и стабилност језгра атома.

### 12.1.3 СТАБИЛНОСТ ЈЕЗГРА АТОМА

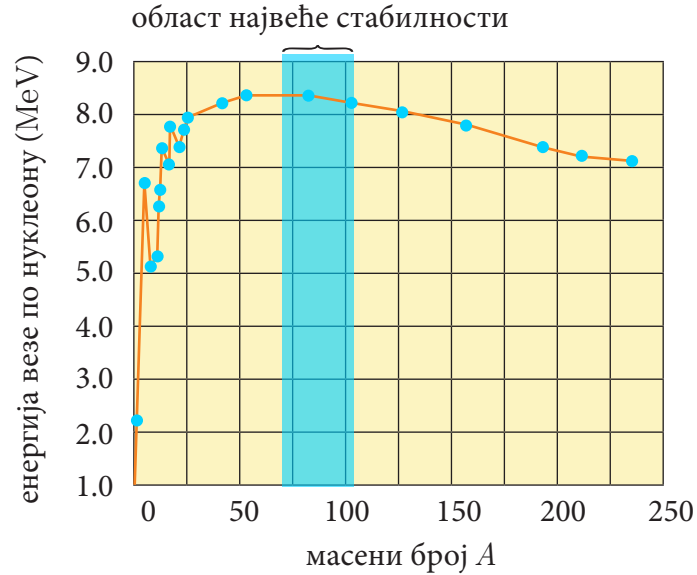
Као што је већ речено у потпоглављу 8.1.1, у језгру атома, осим одбојне електростатичке силе између протона, делује **јака нуклеарна интеракција** која држи све нуклеоне (протоне и неутроне) на окупу (гравитациона привлачна сила је занемарљива). Јака нуклеарна интеракција је одговорна за стабилност језгара хемијских елемената. Она је окарактерисана силом краткодометног типа (домет  $10^{-15}$  m) која не зависи од наелектрисања (приближно је једнака између два протона, два неутрона или протона и неутрона). Пошто протон у језгру делује одбојном електростатичком силом на све друге протоне, а привлачне јаке нуклеарне силе делују само између најближих суседа, да би језгро остало стабилно, са порастом броја протона у језгру мора да расте и број неутрона.



**Слика 12.3** Однос броја протона и неутрона у језгрима атома

Након извесног броја протона ( $Z > 83$ , са оловом као последњим стабилним језгром  $Z = 82$ ) и неутрона у језгру, даље повећање броја неутрона више не може да одржи стабилност језгра атома. Таква нестабилна језгра атома се **спонтано распадају (дезинтегришу)**. Са слике 12.3 се види повећање броја неутрона у језгрима атома са порастом броја протона ради одржања стабилности језгра атома, у складу са објашњењем у претходном пасусу. Резултати распада језгара су нова језгра – стабилна или нестабилна (која се даље дезинтегришу у нове продукте тзв. **радиоактивног распада**). Део појаве радиоактивног распада је спонтана емисија невидљивог зрачења – **радиоактивност**, коју је 1896. године уочио француски физичар Антоан Анри Бекерел (1852–1908).

Зависност енергије везе по нуклеону од атомског масеног броја  $A$  приказана је на слици 12.4. На истој слици је небо-плавом траком приказана област највеће стабилности језгара.



**Слика 12.4** Зависност енергије везе по нуклеону од масеног броја  $A$

Овај график ћемо детаљније да анализирамо код објашњења процеса фисије и фузије у потпоглављу 12.3.

## 12.2 РАДИОАКТИВНОСТ

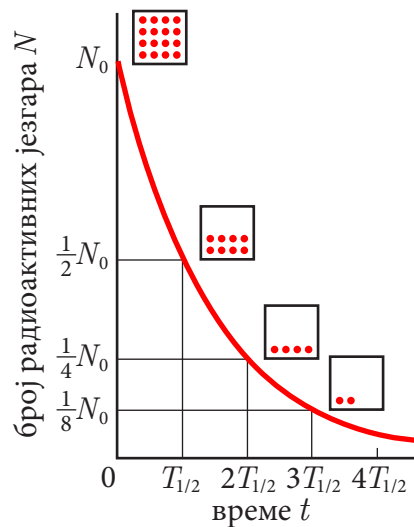
Нуклеарна физика је интересантна за ветеринарску медицину пре свега због различитих аспеката појаве радиоактивности. С једне стране, данас се радиоактивно зрачење веома много користи као медицински „инструмент”, док с друге стране морамо стално да водимо рачуна о заштити од његових штетних ефеката. Стога је ово потпоглавље посвећено радиоактивности. Оба ова аспекта су детаљно проучили пионери истраживања радиоактивности (уз Радерфорда и Бекерела), супружници Пјер Кири (1859–1906), француски физичар, и пољска научница Марија Склодовска Кири (1867–1934).

### 12.2.1 РАДИОАКТИВНИ РАСПАД И ЗАКОН КОЈИ ГА ОПИСУЈЕ

#### Радиоактивни распад

При спонтаној дезинтеграцији (распаду) нестабилних масивних атомских језгара долази до емисије извесних честица и/или високоенергетских фотона – **радиоактивног зрачења**. Радиоактивни распад је случајан, статистички процес тј. не може се тачно предвидети које језгро атома ће се у ком тренутку распасти, али се може одредити број језгара атома који ће се распасти после извесног интервала времена. На слици 12.5 је приказан временски ток распада језгара, при чему је у квадратима приказан број нераспаднутих језгара атома преосталих после времена  $T_{1/2}$ .





**Слика 12.5** Шематски приказ временског тока распада језгара, при чему је у квадратима приказан број нераспаднутих атомских језгара преосталих после времена  $T_{1/2}$ .

Ради лакшег објашњавања, у пракси се језгро које се распада назива „језгро–предак”, а настало језгро „језгро потомак”.

### Закон радиоактивног распада

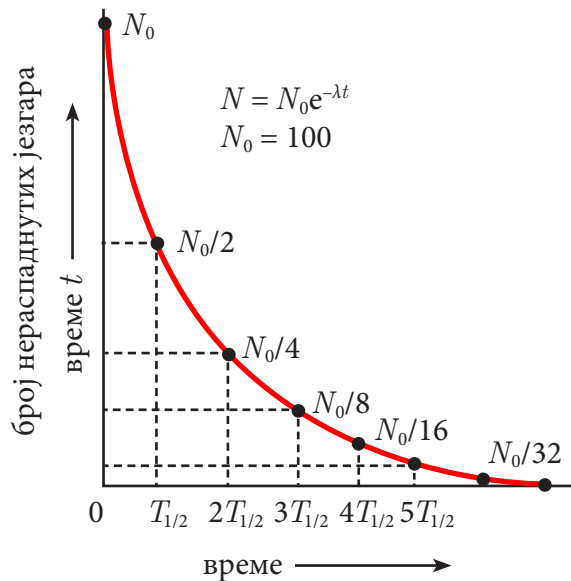
**Закон радиоактивног распада** који дефинише број  $N$  нераспаднутих језгара радиоактивног елемента након протеклог времена  $t$  има облик

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (12.3)$$

где је  $N_0$  број атомских језгара у тренутку  $t = 0$  (тренутак почетка мерења), а  $\lambda$  **константа радиоактивног распада** која описује вероватноћу распада. Величина

$$A = \lambda N \quad (12.4)$$

назива се **активност** радиоактивног материјала и она представља број радиоактивних распада у јединици времена чија се јединица назива бекерел (1 Вq).



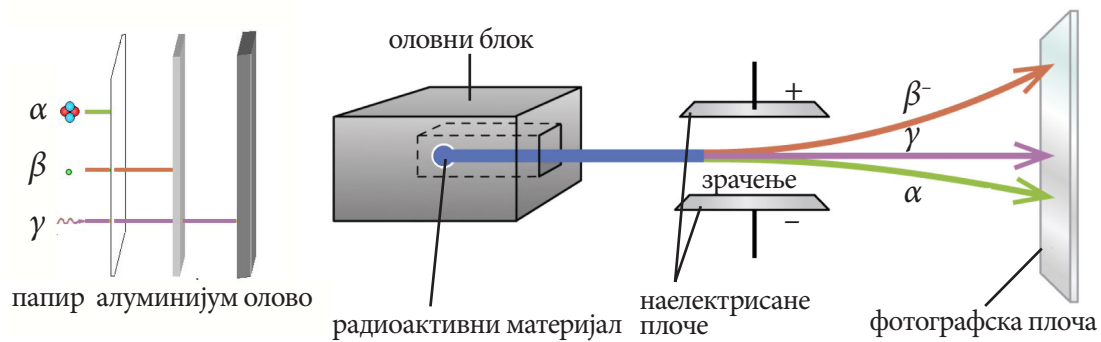
Слика 12.6 Крива распада радиоактивног елемента

**Период (време) полураспада**  $T_{1/2}$  је временски интервал након којег се број нераспаднутих језгара смањи на половину у односу на почетни (сл. 12.6). Веза између периода полураспада  $T_{1/2}$  и константе радиоактивног распада  $\lambda$  је дата изразом  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$  ( $\ln 2 = 0.693$ ).

## 12.2.2 ВРСТЕ РАДИОАКТИВНОГ РАСПАДА

Постоје три врсте радиоактивног распада, према врсти зрачења које се емитује:  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -распад и  $\gamma$ -распад. Емитовано радиоактивно зрачење различито продира кроз супстанцију – продорност расте при промени алфабетне ознаке зрачења тј.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  (лева половина слике 12.7). При проласку радиоактивног зрачења кроз супстанцију долази до губитка, тј. предаје енергије апсорбујућем материјалу.

У радиоактивним распадима језгара важе општи закони физике – **закони одржања масе/енергије, наелектрисања, количине кретања и момента количине кретања**, а њима се додаје и **закон одржања броја нуклеона у процесу дезинтеграције језгра**.



**Слика 12.7** Продорност радиоактивног зрачења при промени алфаветне ознаке зрачења (лева половина слике) и његово скретање у електростатичком пољу (десна половина слике)

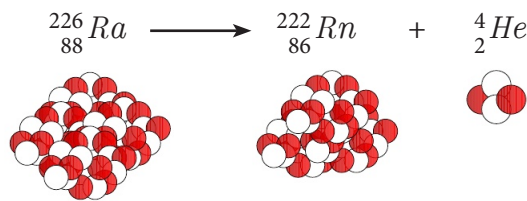
## Алфа ( $\alpha$ ) распад

У  $\alpha$ -распаду се емитије  **$\alpha$ -честица** (језгро хелијума, позитивно наелектрисана честица), при чему се дешава тзв. **трансмутација језгра**, тј. процес промене језгра једног у језгро другог елемента. Символички, овај распад може да се прикаже на следећи начин



Пошто је позитивно наелектрисана,  **$\alpha$ -честица** у електростатичком пољу скреће према негативно наелектрисаној плочи (десна половина слике 12.7).

На слици 12.8 дат је шематски приказ  $\alpha$ -распада радијума  ${}^{226}_{88} Ra$ . Из његовог језгра се емитије  $\alpha$ -честица. Том приликом се губе два протона и два неутрона, чиме се атомски број смањује за 2, а масени број за 4. Том приликом се образује језгро радона  ${}^{222}_{86} Rn$ .



**Слика 12.8** Шематски приказ  $\alpha$ -распада  ${}^{226}_{88} Ra$

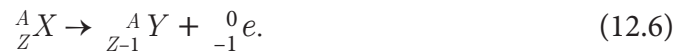
Енергија ослобођена у радиоактивном распаду се расподељује на кинетичке енергије производа који настају. За време  $\alpha$ -распада може се емитовати и **квант  $\gamma$ -зрачења**.

$\alpha$ -честице на свом путу (услед велике масе путања им је права линија) **јонизују** или **ексцитују** честице супстанције кроз коју пролазе, брзо губе енергију и имају веома мали домет. Зауоставља их слој папира (лева половина слике 12.7), слој изумрлих ћелија коже или слој ваздуха од само 10 cm. Знатно већа опасност од  $\alpha$ -честица прети ако се радиоактивни материјал који их емитује налази у живом организму, јер делује на живе ћелије.

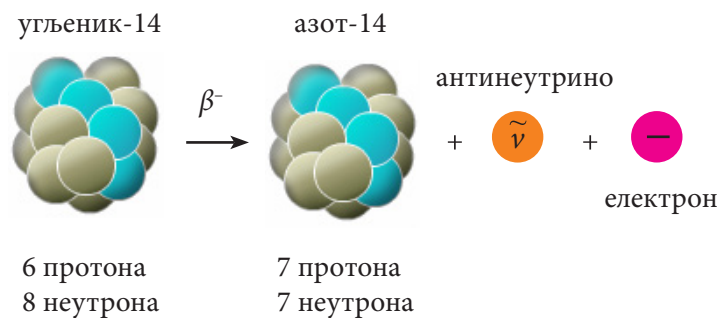
## Бета ( $\beta$ ) распад

Постоје три врсте  $\beta$ -распада:  $\beta^-$ -распад,  $\beta^+$ -распад и K-захват.

(1) У  $\beta^-$ -распаду се емитује  **$\beta^-$ -честица** (тј. електрон, негативно елементарно наелектрисање које се ствара у току распада) при чему се такође дешава трансмутација језгра. Један неутрон  $n$  у језгру се, преко деловања слабе нуклеарне интеракције, трансформише у протон  $p$ , док се уз емисију електрона  $e^-$  јавља и **антинейтрино**  $\bar{\nu}$ , што симболички може да се представи као  $p \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}$ . Антинейтрино је честица практично нулте масе (тачније, веома мале масе), без наелектрисања, и античестица од **неутрина**  $\nu$ , који је, такође, честица веома мале масе и без наелектрисања. Он дели енергију ослобођену у распаду са осталим продуктима распада и његово присуство је битно да би били испуњени закони одржања енергије и импулса. Симболички,  $\beta^-$ -распад може да се прикаже на следећи начин



Пошто је негативно наелектрисана,  $\beta^-$ -честица у електростатичком пољу скреће према позитивно наелектрисаној плочи (десна половина слике 12.7). Шематски приказ  $\beta^-$ -распада  ${}^{14}_6 C$  је на слици 12.9.

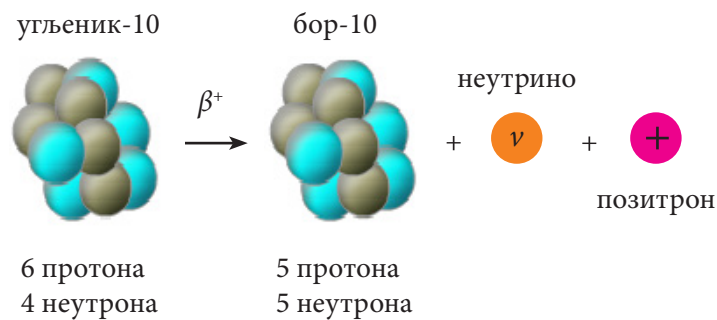


**Слика 12.9** Шематски приказ  $\beta^-$ -распада  ${}^{14}_6 C$

(2) У  $\beta^+$ -распаду се емитијују  $\beta^+$ -честица (позитрон који настаје у току распада) и неутрино. Један протон у језгру се, преко деловања тзв. слабе нуклеарне интеракције, трансформише у неутрон, што симболички може да се представи као  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ . Симболички, овај распад може да се прикаже на следећи начин



Шематски приказ  $\beta^+$ -распада  ${}^{10}_6 C$  дат је на слици 12.10.



**Слика 12.10** Шематски приказ  $\beta^+$ -распада  ${}^{10}_6 C$

(3) У К-захвату се језгро ослобађа вишка енергије (прелази у стабилније стање) захватом електрона из атомске орбитале (најчешће К-љуска), при чему се протон језгра трансформише у неутрон, а једина емитована честица је неутрино. Симболички, овај захват може да се прикаже на следећи начин  $p + e^- \rightarrow n + \nu$ .

$\beta^-$ -честица (електрони) при проласку кроз супстанцију такође врше **ексцитацију** електрона у орбитама атома супстанције и/или **јонизацију** и имају изломљену путању. Поред тога, услед **наглог успоравања** наелектрисаних  $\beta^-$ -честица (електрони или позитрони) емитије се и тзв. **закочно X-зрачење**. Домет  $\beta^-$ -честица у ваздуху не превазилази неколико метара. Зауоставља их и танак слој алуминијума (лева половина сл. 12.7). Опасност долази, међутим, од пратећег закочног X-зрачења, као и од  $\gamma$ -зрачења које прати  $\beta^-$ -радиоактивни распад и за њих треба бирати тешке материјале за заштиту.

## Гама ( $\gamma$ ) распад

Језгра атома су, слично електронима у атомским омотачима, такође окарактерисана енергетским стањима, основним и побуђеним (у која се могу довести у процесима апсорпције енергије).

$\gamma$ -распад је прелаз језгра из побуђеног у ниже енергетско или основно стање, што је праћено емисијом високоенергетског  $\gamma$ -кванта и тзв. **интерном конверзијом** (вишак енергије се предаје неком електрону у атомском омотачу).  $\gamma$ -распад обично следи након

$\alpha$ - или  $\beta$ -распада, када настала језгра нису у основном (стабилном) стању, већ у неком побуђеном стању.  $\gamma$ -распад не узрокује трансмутацију језгра, што се симболички записује као



Пошто не поседује наелектрисање,  $\gamma$ -честица не скреће у електростатичком пољу (десна половина слике 12.7).  $\gamma$ -зраци имају највећи домет (лева половина слике 12.7) и предају материји своју енергију у неколико процеса (фотоелектрични ефекат, Комптонов ефекат и стварање пара електрон–позитрон), који су описани у потпоглављу 10.2.3.

## Неутронско зрачење

Неутрон је у језгру стабилна честица, осим у случају  $\beta^-$ -распада. Изван језгра, међутим, неутрон се, са просечним животом од 13 минута, спонтано распада на протон и електрон. Њихова неутралност у погледу наелектрисања доводи до тога да при проласку кроз супстанцију они не интерагују ни са електронима из атомског омотача ни са електростатичким пољем језгра атома. Због тога је њихов домет много већи него што је то код  $\alpha$ -честица. Неутрони губе енергију при судару са језгром атома, при ком се успоравају све док их не захвате језгра атома.

У свакодневном животу није значајно, али у неким другим околностима ово зрачење постаје веома опасно за људе и животиње. Као што је већ речено, неутронско зрачење показује тенденцију да буде апсорбовано од стране језгра атома од којих је сачињен материјал мете на коју пада зрачење, чиме мета постаје радиоактивна. Таква ситуација се, на пример, јавља после експлозије нуклеарне бомбе, када већина материјала из околине постаје радиоактивна на начин који смо описали. Када су животиње и људи изложени превеликој дози неутронског зрачења, њихово ткиво може да постане радиоактивно проузрокујући њихову смрт. Овај принцип уништавања лежи у позадини тзв. **неутронске** бомбе. Она је тако дизајнирана да може да ослободи велику количину неутронског зрачења уз ослобађање релативно мале количине топлоте и светлости. Неутронска бомба је нуклеарно оружје која убија људе и животиње, а да притом инфраструктуру (грађевине, путеве итд.) оставља нетакнутом.

## Радиоактивни низ

Постоји могућност да „језгро–потомак” настало у радиоактивном распаду буде такође радиоактивно тј. подложно радиоактивном распаду. Штавише, може да се деси да се појави низ сукцесивних распада који се окончава када се добије стабилно „језгро–потомак”. У природи постоје три радиоактивна низа, који се сви завршавају стабилним изотопима олова. То су: (1) уранијумов низ ( ${}^{238}_{92}U \dots \dots {}^{206}_{82}Pb$ ), (2) актинијумов низ ( ${}^{235}_{92}U \dots \dots {}^{207}_{82}Pb$ ) и (3) торијумов низ ( ${}^{232}_{90}Th \dots \dots {}^{208}_{82}Pb$ ).

## 12.3 НУКЛЕАРНЕ РЕАКЦИЈЕ

Врло брзо по открићу радиоактивности, истраживачи су схватили да се честицама, насталим у радиоактивном распаду (пројектили), могу бомбардовати језгра атома. Стога се одомаћио израз да се бомбардована језгра атома називају „језгра мете” или кратко „мете”. У интеракцији „пројектила” и „мете” (нуклеарна реакција) настају нова језгра атома, од којих нека чак и не постоје у природи. С обзиром на то да су тиме научницима створене велике могућности, у овом потпоглављу ћемо се посебно бавити нуклеарним реакцијама.

### 12.3.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ О НУКЛЕАРНИМ РЕАКЦИЈАМА

#### Дефиниција нуклеарне реакције

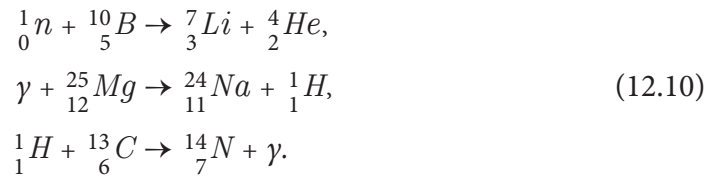
Осим спонтане дезинтеграције (трансмутације) језгара, промене у структури језгра је могуће и **вештачки изазвати**, тј. могуће је **индуковати** распад стабилних језгара у судару са другим језгрима атома, субатомским честицама или  $\gamma$ -фотонима. Сагласно томе, под **нуклеарном реакцијом** (трансмутацијом) подразумева се свака трансформација језгра у којој се на стабилно језгро делује неким другим језгром или зрачењем и као резултат се добија ново језгро, најчешће уз емисију зрачења или неке честице. Као и за радиоактивни распад, и за нуклеарне реакције важе закони одржања. Символички приказана нуклеарна реакција има следећи облик



где је  $a$  „пројектил”,  $X$  „језгро мета”,  $Y$  новонастало језгро, а  $b$  продукт реакције (ослобођено радиоактивно зрачење –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , субатомске честице, итд.).

## Примери нуклеарних реакција

Доле су наведена три примера нуклеарних реакција са различитим пројектилима (неутрони,  $\gamma$ -фотони и протони тј. језгро атома водоника)



## Енергетски биланс нуклеарне реакције

**Енергија нуклеарне реакције**  $Q_{NR}$  се може одредити из разлике маса честица које улазе у реакцију и оних које су продукти те реакције. Користећи Ајнштајнову релацију (12.2), ово можемо да запишемо као

$$Q_{NR} = [(m_X + m_a) - (m_Y + m_b)]c^2, \quad (12.11)$$

где су са  $m_{a, X, Y, b}$  обележене масе честица које учествују у реакцији. Уколико је  $Q_{NR} > 0$ , онда је реакција **егзотермна**, односно, при таквој реакцији се ослобађа енергија.

Међутим, ако је, пак,  $Q_{NR} < 0$ , онда је реакција **ендотермна**, тј. остварује се на рачун енергије честице  $a$  која изазива реакцију.

## 12.3.2 ВЕШТАЧКИ РАДИОАКТИВНИ ИЗОТОПИ (РАДИОИЗОТОПИ)

Већ смо напоменули да се као резултат нуклеарних реакција могу добити језгра атома (изотопи) којих нема у природи и зато их и називамо **вештачки изотопи**. Посебно занимљиви за примену су вештачки изотопи који имају особину да су радиоактивни и које називамо **радиоактивни изотопи** (**радиоизотопи** или **радионуклиди**). Суштина њиховог значаја је у томе што, за разлику од природних радиоизотопа, они могу да имају мали атомски број и мали период полураспада погодан за примену. У циљу добијања пројектила одређене енергије користе се посебни уређаји за убрзавање честица, тзв. **акцелератори**.



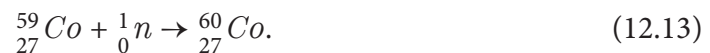


Једначином (12.12) приказан је пример реакције којом се добија радиоактивни радиоизотоп  ${}^{18}_9F$ , са периодом полураспада 109,8 мин., који је важан извор позитрона у медицинској и ветеринарској дијагностици.

## Примена радиоактивних изотопа

Радиоактивни изотопи се примењују у медицини за две намене: **у терапеутске и у дијагностичке сврхе**. Особине изотопа који се користе за ове две сврхе су знатно различите.

У терапији се радиоизотопи употребљавају као извори зрачења које у контролисаним условима може, на пример, да „убије” ћелије тумора. У ту сврху су потребни изотопи који дуго живе, како би могли да се користе што дуже и са изразито интензивним зрачењем. Један такав изотоп је кобалт-60, са периодом полураспада 5,27 година, који се производи у реакцији



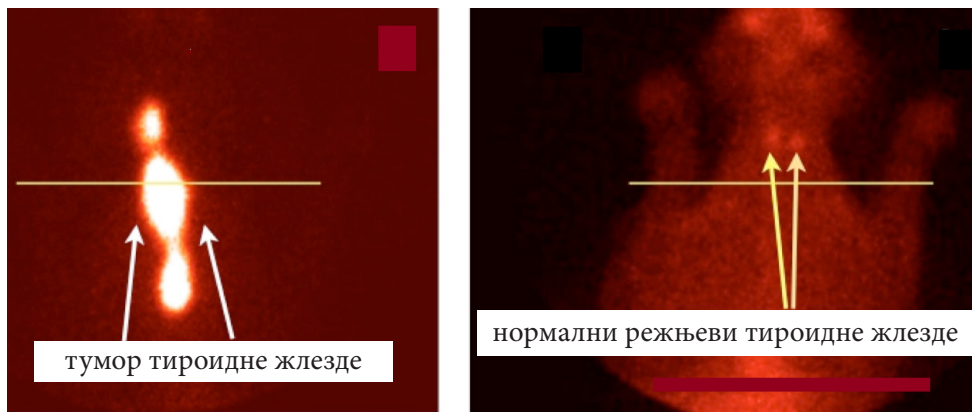
Слика 12.11 Приказ употребе кобалт-60 терапије

Код дијагностичке примене, идеја употребе радиоизотопа се састоји у следећем. Познато је да поједини органи животиња везују одређене елементе, па се праћењем тих елемената, кроз организам, може пратити и функционисање органа. Наиме, произведе се радиоактивни изотоп траженог елемента и он се убризга у организам. Захваљујући радиоактивности, може се пратити његово кретање коришћењем детектора (поглавље 13.2) и закључивати о евентуалним патогеним променама у раду органа (сл. 12.12). Овакви радиоизотопи се називају **обележивачи** или **трасери**. У овом случају, бирају се изотопи са врло кратким временом полураспада, како би се количина радиоактивног материјала у организму брзо смањила на нешкодљиву вредност.

Време полураспада радиоактивног изотопа не даје нам праву информацију о броју радиоактивних језгара присутних у организму. Наиме, на смањење броја радионуклида утичу и физиолошки процеси којима се дата супстанца елиминише из организма. Стога се уводи и појам **биолошко време полураспада**  $T_b$ . То је време за које се из организма путем екскреције избаци половина присутних језгара радионуклида. Ово време је независно од времена полураспада унетог радионуклида  $T_{1/2}$ . За практичне сврхе користи се тзв. **ефективно време полураспада**  $T_{ef}$ , које се дефинише као

$$T_{ef} = \frac{T_{1/2}T_b}{T_{1/2} + T_b} \quad (12.14)$$

и које узима у обзир оба механизма смањења присуства радиоактивног нуклида у организму.

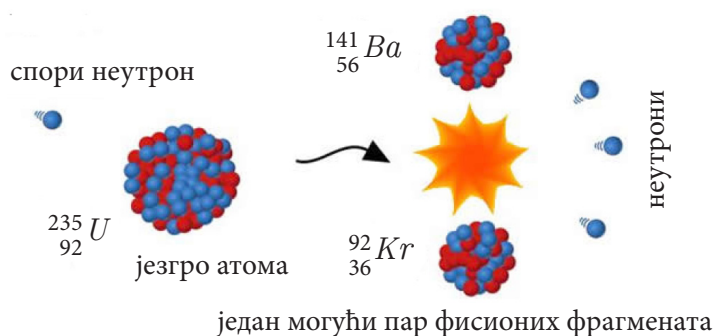


**Слика 12.12** Приказ употребе радиоизотопа јод-131 у дијагностификовању тумора тироидне жлезде код мачке

## 12.3.3 НУКЛЕАРНА ФИСИЈА

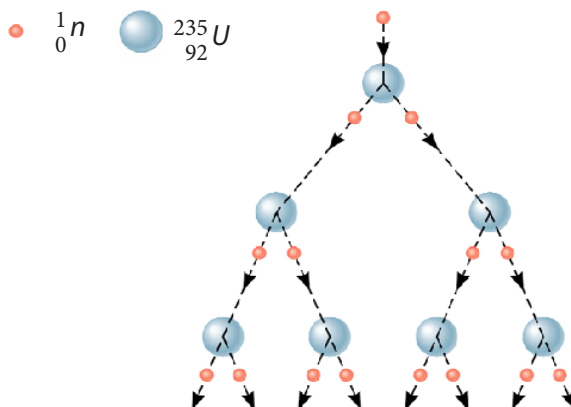
### Основни појмови

Реакција **цепања** масивног језгра на два мање масивна фрагмента је тзв. **нуклеарна фисија** (италијански физичар Енрико Ферми (1901–1954); немачки хемичар Ото Хан (1879–1968); аустријско-шведска физичарка Лиза Мајтнер (1878–1968) и аустријско-британски физичар Ото Роберт Фриш (1904–1975)).  $^{235}_{92}\text{U}$  је једини природни изотоп урана, који се у процесу фисије може цепати под утицајем спорих (тзв. термалних) неутрона. Процес фисије приказан на слици 12.13 је само **један од низа могућих**, чији су исход увек други фрагменти (друга језгра) и различит број новостворених неутрона.



Слика 12.13 Шематски приказ нуклеарне фисије

Приликом једне реакције фисије  $^{235}_{92}\text{U}$  се ослобађа енергија приближно око 200 MeV, од чега већи део отпада на кинетичку енергију продуката фисије, што је сто милиона пута више него у обичној хемијској реакцији (нпр. сагоревање фосилног горива). Приликом фисије урана, просечан број неутрона створених у реакцији је 2,5, што је више него довољно да се реакција сама одржава. Неутрони настали при фисији узрокују нове реакције и тако настаје низ везаних реакција познатих као **ланчана реакција** (сл. 12.14).



Слика 12.14 Шематски приказ ланчане реакције

За време **неконтролисане** ланчане реакције, у веома кратком времену (милионити делови секунде) изврши се на хиљаде фисионих реакција и ослободи се огромна количина енергије – пример нуклеарне (атомске) бомбе.

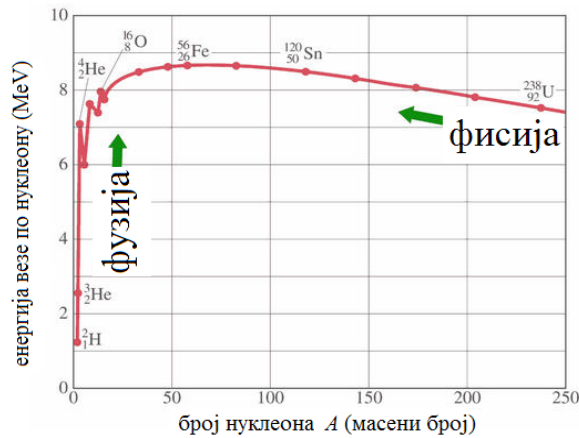
## Нуклеарна фисија и производња нуклеарне енергије

Ограничавањем (контролисањем) броја неутрона који учествују у реакцијама фисије, могуће је успоставити стање да само један новостворени неутрон изазива нову фисију. То је тзв. **контролисана фисија**, која се примењује у **нуклеарним реакторима** за производњу нуклеарне енергије.

За већину нуклеарних реактора заједничка су три елемента: нуклеарно гориво, неутронски модератор и контролне шипке. Најчешће гориво је  $^{235}_{92}\text{U}$ , чији садржај у рудним сировинама не прелази 1% (остатак је  $^{238}_{92}\text{U}$ , непогодан за реакције фисије), па се пре коришћења гориво мора обогаћивати, тј. довести у стање са највећим процентом језгара (3%) која се цепају у судару са спорим, термалним неутронима. Неутронски модератор служи за успоравање брзих, високоенергетских неутрона насталих у процесима фисије и неопходних за нове реакције. Најчешће коришћени модератори су графит, вода или тешка вода (вода обогаћена деутеријумом, изотопом водоника са једним неутроном у језгру атома). У реактору се успоравањем фисионих продуката њихова кинетичка енергија трансформише у енергију водене паре која покреће турбине и тако механички рад претвара у електричну енергију.

### 12.3.4 НУКЛЕАРНА ФУЗИЈА

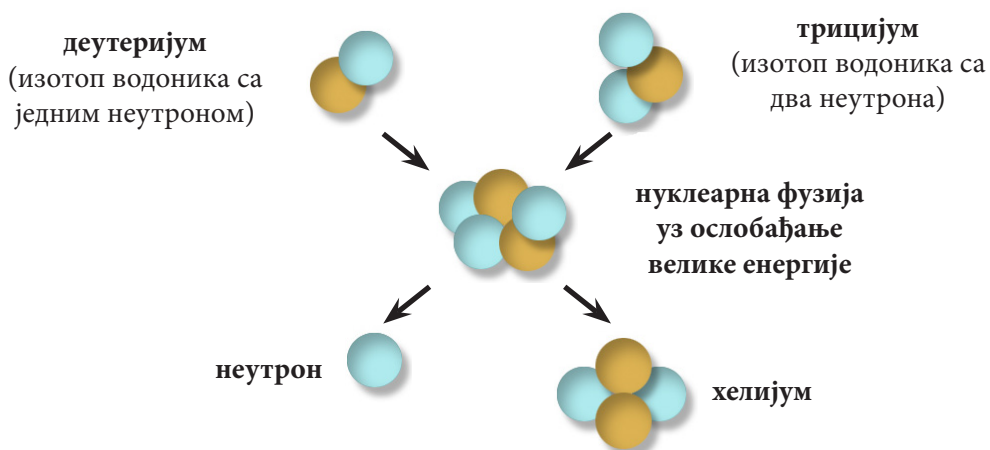
У процесима фисије (цепања), масивнија атомска језгра са енергијом везе по нуклеону од око 7,6 MeV се распадају на фрагменте са енергијом везе по нуклеону од око 8,5 MeV (стабилнија и лакша језгра – сл. 12.4). То значи да је дефект масе по једном нуклеону код лакших језгара већи, па се појављује разлика од 0,9 MeV, што је енергија која се ослободи по једном нуклеону у фисији. Такође, спајањем лакших језгара исто је могуће добити стабилнија језгра, што сугерише могућност егзотермне нуклеарне реакције (са ослобађањем енергије).



**Слика 12.15** Области енергије везе по нуклеону у којима су у принципу могуће реакције фисије или фузије

**Нуклеарна фузија** је процес спајања лаких језгара, са релативно малом енергијом везе по нуклеону, у масивније језгро веће енергије везе по нуклеону. Ослобођена енергија у том процесу је знатно већа него у процесима фисије (3,5 MeV по нуклеону), а проблем горива не постоји, јер се оно може добити из воде. За остваривање фузије неопходно је савладавање електростатичке силе одбијања између позитивних језгара која улазе у процес. На слици 12.16 је шематски приказана нуклеарна фузија деутеријума и трицијума. Том приликом настаје језгро хелијума и ослобађа се један неутрон, при чему се добија велика количина енергије. Велика кинетичка енергија већем броју језгара се може саопштити једино на температурама реда величине неколико стотина милиона степени, превођењем фузионог горива у стање плазме (смеша електрона и језгара – јонизована материја). Проблем контроле (одржавања) стања плазме још увек није решен.

Неконтролисана фузија се дешава при експлозији термонуклеарне (хидрогенске) бомбе, а у њој нуклеарна бомба служи за постизање потребне високе температуре. Уређај који би требало да омогући контролисану фузију је предмет бројних савремених истраживања и назива се **токамак**.



**Слика 12.16** Шематски приказ нуклеарне фузије деутеријума и трицијума

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Објаснити симболички запис  ${}^A_ZX$ .
2. По чему се разликују изотопи једног елемента?
3. Шта је дефект масе атомског језгра?
4. Шта је енергија везе  $E_v$  по нуклеону?
5. Шта је радиоактивни распад?
6. Шта је радиоактивност?
7. Шта бива са нестабилним језгрима атома?
8. Како гласи израз за закон радиоактивног распада?
9. Шта је период полураспада?
10. Ако је  $N_0$  број присутних радиоактивних језгара у тренутку  $t = 0$ , колико ће језгара остати нераспадно то после времена  $t$  једнако петоструком периоду полураспада  $T_{1/2}$ ?
11. Навести врсте радиоактивног распада.
12. Шта је  $\alpha$ -распад?
13. Какве промене са језгром се дешавају током  $\alpha$ -распада?
14. Шта је  $\beta$ -распад?
15. Какве промене са језгром се дешавају током  $\beta$ -распада?
16. Шта је  $\gamma$ -распад?
17. Шта је неутронско зрачење?
18. Објаснити појаву радиоактивних низова.
19. Шта су нуклеарне реакције и који закони важе за њих?
20. Навести пример једне нуклеарне реакције.
21. Шта је енергетски биланс нуклеарне реакције?
22. Шта су радиоактивни изотопи?
23. Како се добијају радиоактивни изотопи?
24. У које сврхе се радиоактивни изотопи примењују у ветеринарској медицини?
25. Шта је биолошко време полураспада?
26. Шта је ефективно време полураспада?
27. Шта је нуклеарна фисија?
28. Шта је ланчана реакција?
29. Шта је нуклеарна фузија?

# 13. ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ



## 13.1 ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ: ОСНОВНИ ПОЈМОВИ

Јонизујуће зрачење је појава за коју људска чула нису развијена, за разлику од многих других појава у природи. Директне последице деловања овог зрачења на живи свет већином су закаснеле и тешко их је повезати с узроком. Човек и животиње могу да буду изложени и смртоносној дози зрачења, а да у самом тренутку озрачивања ништа не осете. Последице озрачивања, без чулне везе с узроком, запажају се тек након неког времена, од неколико сати до неколико дана или чак година, што зависи од врсте и особина тог зрачења. Отуда је разумљив човеков страх, а познавање основних својстава јонизујућег зрачења, међуделовања зрачења са супстанцијом, а посебно деловања зрачења на жива бића, необично је важно у стручном и психолошком смислу. На слици 13.1 приказан је знак за опасност од јонизујућег зрачења. Стога ће ова глава бити посвећена основним појмовима везаним за њега.

### 13.1.1 ЈОНИЗУЈУЋЕ ЗРАЧЕЊЕ

**Јонизујуће зрачење** је свако зрачење које при пролазу кроз материјалну средину посредно или непосредно изазива њену јонизацију. Јонизујуће зрачење је последица промене стања материје у микросвету. То су промене у енергији или у саставу атома или језгра атома, при чему се емитују фотони или друге честице. У међуделовању са супстанцијом долази до измене енергије и структуре озрачене супстанције. Такве последице могу бити корисне, али и врло штетне. Напоменимо да наш закон прописује да у јонизујуће зрачење спада оно које има: енергију кванта зрачења већу од 12,4 eV или фреквенцију већу од  $3 \times 10^{15}$  Hz или таласну дужину мању од 100 nm.

Јонизујуће зрачење може да се састоји од снопа честица високих енергија ( $\beta$ -честице, протони, позитрони, неутрони,  $\alpha$ -честице и тешки јони) – честично зрачење или електромагнетног зрачења високе фреквенције ( $\gamma$ -зрачење, рендгенско зрачење и ултраљубичасто зрачење) – таласно зрачење. Оно може да има погубан учинак на молекуле супстанције, а посебно на биолошка ткива.

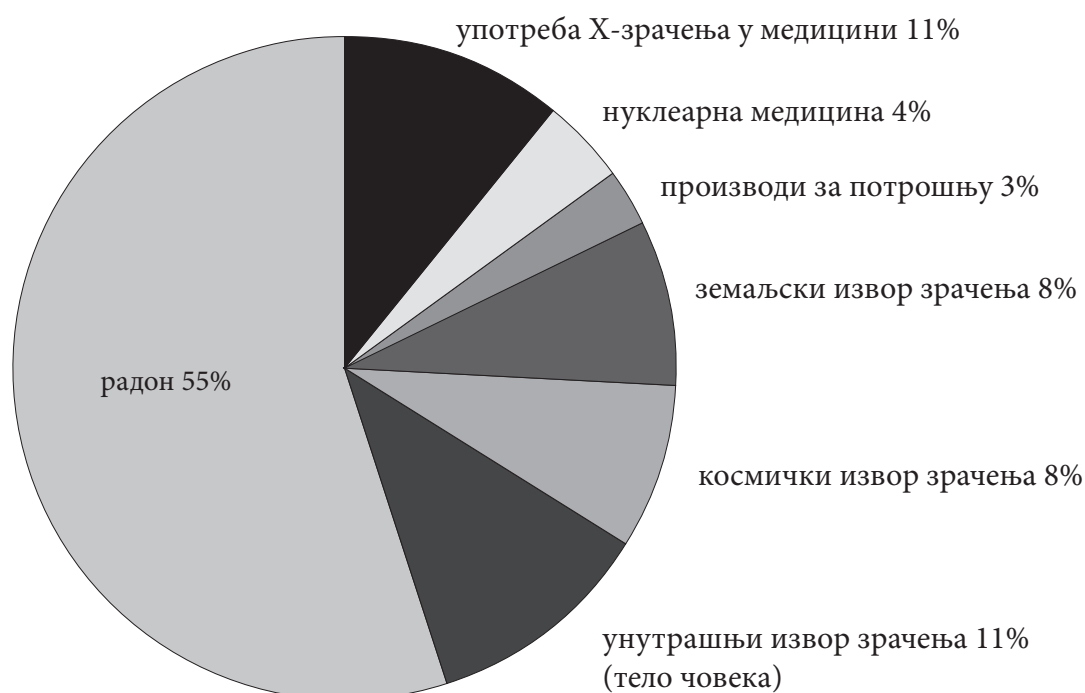


Слика 13.1 Знак за опасност од јонизујућег зрачења



### 13.1.2 ИЗВОРИ ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

Разликујемо (1) **природне изворе** јонизујућег зрачења (космичко зрачење и природно присутни радиоактивни извори у тлу, води, атмосфери и људском телу (унутрашњи извор јонизујућег зрачења)) и (2) **вештачке изворе**, који су последица човекове активности (нуклеарне електране, коришћење радиоактивног материјала, акцелератора и рендгенских апарата у медицини и ветеринарској медицини, индустрија, научна истраживања, нуклеарне несреће итд.). Јонизујуће зрачење стално присутно у околини, а које потиче из природних извора, назива се **позадинско зрачење**.



**Слика 13.2** Годишњи доприноси природних и вештачких извора јонизујућег зрачења

Пошто у годишњем износу јонизујућег зрачења радон учествује са 55% (сл. 13.2), на овом месту ћемо се нешто детаљније задржати у опису његовог доприноса.

Најзначајнији радионуклиди у ваздуху су радон-222 и радон-220. Изнад нивоа мора концентрација радона је мала, док је средња вредност изнад копна  $0,2 \text{ Bq/m}^3$ . Радон је природни радиоактиван гас без боје, мириса и укуса, који настаје у процесу радиоактивног распада урана преко радијума. Настали радон из земљишта продире као гас и разређује се у ваздуху. Он се распада и формира чврсте радиоактивне честице (језгра–потомке радона), које су разбацане у ваздуху. Ове честице се удисањем могу унети у плућа и наталожити на њиховој слузокожи. Како су наталожене честице емитери  $\alpha$ -зрачења, код такве особе је повећан ризик од појаве карцинома плућа.

Највеће концентрације радона појављују се у рударским окнима и пећинама. Пошто су му рудари професионално изложени, код њих је присутан највећи ризик од обољевања плућа. У наше домове радон улази кроз пукотине земљишта, а највише у подрумске просторије. Зато просторије у којима се јавља радон треба чешће проветравати.

### 13.1.3 ИНТЕРАКЦИЈА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА СА СУПСТАНЦИЈОМ И ПОЈАМ ДОЗЕ

Интеракције таласа и честица јонизујућег зрачења са супстанцијом детаљно су описане у поглављима 10.2 и 12.2, редом.

Ефекти дејства зрачења на живе организме се изражавају преко појма **дозе**. С обзиром на то да је величина организма значајна, онда се доза увек обрачунава по јединици масе организма. Један приступ је да се посматра енергија коју јонизујуће зрачење предаје организму. Када су у питању честице, може се посматрати количина наелектрисања предата организму. Квантификација горе наведених концепата доза дата је у поглављу 13.3.

## 13.2 ДЕТЕКЦИЈА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

За регистрацију јонизујућег зрачења и његове дозе развијени су детектори и дозиметри. Детекција овог зрачења увек представља индиректан процес. Наиме, зрачење изазива различите физичке процесе чији се ефекат мери. На основу мерења тих ефеката процењује се и интензитет зрачења. Ово поглавље ће, у сажетом опису, бити посвећено детекторима и дозиметрима којима се мери доза апсорбованог јонизујућег зрачења.

### 13.2.1 ДЕТЕКТОРИ ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

Методe детекције зрачења заснивају се углавном на његовој особини јонизације материјала кроз који продире. Од открића радиоактивности, развијене су многе технологије детекције прилагођене појединим врстама зрачења. Грубо их можемо поделити у две категорије.

Прва као резултат даје слику путање описане кретањем наелектрисане честице. Помоћу ње је могуће, уз примену спољашњег магнетног и електростатичког поља, одређивање наелектрисања, брзине (енергије) и врсте честице, њеног распада или расејања, одређивање времена живота и др. У ову категорију спадају: Вилсонова маглена комора и дифузиона комора, варнична комора, мехураста комора и Черенковљев бројач. Заједнички назив за ове детекторе је **детектори визуелног типа**, пошто они дају коначан ефекат који може да се прати голим оком. Коначан запис је фотографија трагова, који се касније анализирају посматрањем и уз коришћење неких геометријских правила.

Другу категорију бројача чине гасни, сцинтилациони и полупроводнички детектори, који бележе постојање зрачења и његов тип, а већина и енергију зрачења. Гасни детектори су они код којих у гасу детектора под високим напонем упадно зрачење ствара електроне и јоне (сигнал). Такви детектори су јонизациона комора, пропорционални бројач (препознаје врсте честица и њихове енергије) и Гајгер–Милеров бројач.

Неутронски детектори постојање и енергију неутрона одређују посредно, преко јонизујућег зрачења које настаје интеракцијом неутрона с осталим језгрима атома у материјалу. Они се називају **детектори електричног типа**, пошто као коначан резултат дају неки електрични сигнал.

У овом потпоглављу детаљније ћемо да опишемо само два детектора – јонизациону комору и Гајгер–Милеров бројач.

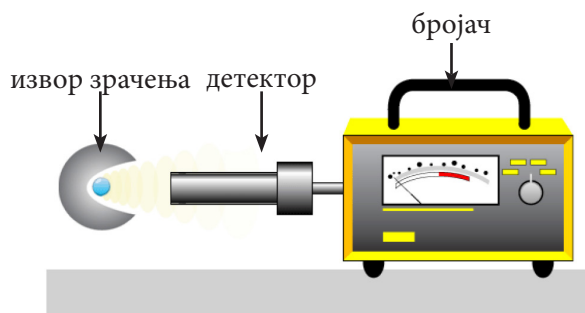
## Јонизациона комора

**Јонизациона комора** се састоји из посебног суда, у којем се налазе две електроде прикључене на висок напон. У суду се налази неки, обично племенити гас. Радиоактивно зрачење које доспева у активну запремину коморе јонизује гас, при чему се образују јони оба знака (тешки позитивни и лаки негативни јони, односно електрони). Под утицајем јаког електричног поља, јони се скупљају на електродама. То условљава појаву електричне струје кроз гасну средину, која се после појачавања региструје мерним инструментом. Помоћу јонизационе коморе могу се регистровати  $\alpha$ - и  $\beta$ -честице, док је за  $\gamma$ -зраке ово сувише прозрачан детектор.

## Гајгер–Милеров бројач

Рад **Гајгер–Милеровог бројача (Г-М)** је заснован на јонизационим ефектима. Он је веома погодан за употребу и релативно је јефтин. Стаклен, изнутра посребрен, или метални суд цилиндричног облика испуњен је неким племенитим гасом под сниженим притиском. Катода је цилиндричног облика, а анода је танка жица постављена дуж цилиндра. Електроде су прикључене на извор једносмерне струје високог напона, који образује јако електрично поље. При проласку радиоактивног зрачења, гас у бројачу се јонизује. Јони долазе до електрода (електрони на аноду, а позитивни јони на катоду). Тиме се струјно коло у бројачу затвара и појављује се напонски импулс. Уређајем за бројање импулса (бројач-скалер) се броје напонски импулси настали у одређеном интервалу времена. На основу тога добија се информација о интензитету зрачења. Помоћу Гајгер–Милеровог бројача (сл. 13.3) се детектују  $\alpha$ - и  $\beta$ -честице.

Гајгер–Милерови бројачи се разликују од јонизационих комора јер је код њих напон напајања толико висок да створени електрони, путујући према катоди, могу да стекну енергију која је виша од енергије јонизације гаса у бројачу. На тај начин се стварају нова наелектрисања у виду лавине, што коначно даје више сигнале, па за Г-М бројач није потребна скупа електроника која би појачавала сигнале. Из тог разлога ови бројачи се праве у облицима и величини погодним за брзи транспорт и теренски рад.



Слика 13.3 Пример Гајгер–Милеровог бројача

## 13.2.2 ДОЗИМЕТРИ ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

**Дозиметар** се користи у заштити људи и животиња који раде, односно, који пребивају у подручјима јаког јонизујућег зрачења. Када су у питању људи, дозиметри се, пре свега, користе у постројењима или установама где су у употреби јаки извори радиоактивности. Дозиметар има својство да региструје укупно јонизујуће зрачење, односно дозу апсорбованог зрачења коју су човек или животиња примили.

### Врсте дозиметара

Две најраспрострањеније (законски признате) методе мерења су филм-дозиметар и термолуминисцентни дозиметар (ТЛД). Код оба дозиметра пролазом зрачења долази до одређених процеса које оно изазива предавањем енергије: (1) зацрњење филма или (2) подизање електрона у више енергетско стање. Приликом читавања, развијања филма или читања у посебном читачу, види се допринос зрачења, зацрњење или одређена крива код ТЛД дозиметра. Баждарењем серије дозиметра познатим дозама и уз баждарне криве могу се одредити те примљене дозе. То је посебна технологија која подразумева посебне процесе и одређено предзнање.

### Филм-дозиметар

Код **филм-дозиметра** јонизујућа зрачења делују на комадић филма слично светлосном зрачењу и изазивају зацрњење. Степен зацрњења сразмеран је дози која одговара апсорбованом зрачењу. Обично је један део филма прекривен танким слојем олова, како би се могло разликовати зацрњење које је узроковано продорним  $\gamma$ -зрачењем од зацрњења насталог  $\beta$ -честицама. Уколико треба да се мери присуство спорих неутрона, један се део филма прекрива танким слојем кадмијума. Овај дозиметар се доста употребљава јер је најједноставнији и најјефтинији лични дозиметар, иако има и својих недостатака, а то је да за сваку врсту филма треба да се направи калибрациона крива, јер је степен зацрњења доста зависан од енергије  $\gamma$  или рендгенских зрака.

### Термолуминисцентни дозиметри

**Термолуминисцентни** дозиметри направљени су од калцијум-флуорида или литијум-флуорида, а активирани су манганом. Као носач осетљиве масе (кристала) служи метална плочица, која се при мерењу апсорбоване дозе јонизујућег зрачења загрева електричном струјом. Озрачени кристали зраче на температури од 400 °С до 1 000 °С светлост таласних дужина од 390 до 500 nm, којој се интензитет, који је сразмеран

апсорбованој дози, мери тзв. фотомултипликатором. Овим дозиметром могу се мерити веома мале дозе јонизујућег зрачења. Уређаји за читавање и бележење дозе нешто су сложенији од филм-дозиметара, али им је тачност већа. Термолуминисцентни дозиметри највише се употребљавају као **лични дозиметри** (сл. 13.4). Њиховим поновним загревањем вредност дозе се брише и потом могу изнова да се користе за мерење. Напоменимо да као лични дозиметар може да се користи и филм-дозиметар.



**Слика 13.4** Пример личног дозиметра

## 13.3 ДОЗИМЕТРИЈА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА И ДЕЈСТВО ТОГ ЗРАЧЕЊА НА ЖИВА БИЋА

У овом потпоглављу ћемо се детаљније упознати са квантитативним показатељима утицаја изложености организма јонизујућем зрачењу. Другим речима, бавићемо се прецизним дефиницијама доза, а потом и ефектима јонизујућег зрачења на живи свет.

### 13.3.1 ДОЗИМЕТРИЈА ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

Дозиметрија јонизујућег зрачења је скуп инструменталних и теоријских метода за прорачун и мерење дозе јонизујућег зрачења као мере дејства зрачења на супстанцију. Основне величине у дозиметрији јонизујућег зрачења су апсорбована, експозициона, еквивалентна и ефективна доза зрачења.

#### Предата енергија

Предата енергија  $E_D$  је укупна количина енергије коју јонизујуће зрачење предаје некој супстанцији, при чему је  $E_D \leq E_Z$ , где је  $E_Z$  енергија коју емитује извор зрачења.

#### Апсорбована доза зрачења

Апсорбована доза зрачења  $D$  је однос предате енергије  $E_D$  и масе  $m$  озрачене супстанције, односно, то је количина енергије коју апсорбује јединица масе неке супстанције. Ако извор зрачи променљиво, односно емитује различите количине енергије у јединици времена, онда је апсорбована доза зрачења

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m}. \quad (13.1)$$

Према изразу (13.1), апсорбована доза зрачења се изражава у јединици [J/kg] која се назива греј (1 Gy).

## Експозициона доза зрачења

**Експозициона доза зрачења**  $D_e$  је однос укупне количине наелектрисања јона једног знака  $q$  коју јонизујуће зрачење произведе у одређеној маси ваздуха  $m$ . За променљиви извор експозициона доза зрачења је

$$D_e = \frac{\Delta q}{\Delta m}. \quad (13.2)$$

Јединица за експозициону дозу је [C/kg] (стара јединица – рендген).

## Еквивалентна доза зрачења

Дејство различитих врста јонизујућих зрачења на биолошки систем није једнако. **Биолошка ефикасност** (или интензитет генерисања биолошких промена) неког зрачења одређује се у односу на биолошки ефекат X-зрачења енергије од 250 keV.

**Радијационо-тежински фактор**  $\omega_r$  је однос биолошке ефикасности изабраног зрачења и биолошке ефикасности X-зрачења енергије 250 keV. Увођење величине  $\omega_r$  омогућило је формулисање **еквивалентне дозе зрачења**  $H$ . Она је дефинисана као

$$H = \omega_r D_e. \quad (13.3)$$

Јединица за еквивалентну дозу је сиверт (1 Sv).

## Ефективна доза зрачења

Различити делови тела и органи имају различиту осетљивост на јонизујуће зрачење. Дејство јонизујућег зрачења на одређене органе и ткива дефинисано је **ефективном дозом зрачења**  $E_H$ . Она је дефинисана као

$$E_H = \omega_t H, \quad (13.4)$$

где је  $\omega_t$  **ткивни тежински фактор**, параметар који дефинише осетљивост ткива и органа на јонизујуће зрачење. Највећу осетљивост на јонизујуће зрачење имају гонаде (0,2), а најмању кожа и површински слој костију. Ова доза се, такође, изражава у сивертима.



### 13.3.2 БИОЛОШКИ ЕФЕКТИ ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

У претходна два поглавља смо се упознали са особинама јонизујућег зрачења и могућим ризицима када је живи организам њему изложен. Ово је позната чињеница дуго времена, па је прво малигно обољење коже изазвано јонизујућим зрачењем описано далеке 1902. год., а прва радио-леукемија код људи 1911. год. Марија Кири и њена ћерка Ирена Жолио Кири су умрле од леукемије проузроковане дуготрајним излагањем зрачењу током истраживања.

Излагање које следи биће повезано са знањима из физиологије. Ако посматрамо човека и сисаре генерално, организам може бити оштећен услед зрачења које долази из спољашње средине (када је он директно изложен извору зрачења или радијације, која се као синонимни избор често појављује у литератури) или унутрашњом контаминацијом (загађењем), тј. када се у организам унесу радиоактивне супстанције преко воде или хране или, пак, дисањем. Потенцијална опасност од радијације на тело човека, исказана кроз ризик, за поједине делове тела је: коштана срж 12%, површински слој костију 3%, штитна жлезда 3%, дојке 15%, плућа 12%, јајници и тестиси 25%, док за остала ткива она износи 30%. **Радијациона болест** се различито манифестује, зависно од јачине примљене дозе, начина пријема и извора радијације: јавља се радијациона опекотина на кожи и малигно обољење коже и слузокоже, погоршава се крвна слика (смањује се број леукоцита и тромбоцита), смањује се број матичних ћелија у коштаном сржи које производе еритроците, па се јавља леукемија и малигно обољење костију остеосарком, може се појавити замућење очног сочива (катаракта), смањује се квалитет и квантитет плућних ћелија.

Тренутни пријем великих доза код човека може да изазове акутну радијациону болест, док хронична радијациона болест настаје као последица дуготрајног излагања мањим дозама радијације. Напоменимо да радиоактивно зрачење може да изазове и генетске мутације, које су први пут постале евидентне на људима после бацања нуклеарне бомбе на Хирошиму и Нагасаки, као и на неким животињама у областима где су обављане нуклеарне пробе. Међународна агенција за атомску енергију (IAEA – International Atomic Energy Agency) је врло детаљно анализирао живи свет у области која је била највише захваћена зрачењем после акцидента у нуклеарној електрани у Чернобиљу. Она је утврдила да су главне последице штетног дејства радијације: 1) повећана смртност бескичмењака у земљишту и сисара и 2) репродуктивни губици код животиња.

## ПИТАЊА И ЗАДАЦИ

1. Шта је јонизујуће зрачење?
2. Како законски прописи у Србији дефинишу јонизујуће зрачење?
3. Како се по пореклу деле извори јонизујућег зрачења?
4. Објасни детаљније елементе графика 13.2?
5. Какав процес представља детекција јонизујућег зрачења?
6. Шта мере детектори?
7. Шта мере дозиметри?
8. На којој особини се заснивају методе детекције зрачења?
9. Побројати детекторе који дају слику путање наелектрисане честице.
10. Побројати детекторе који бележе постојање зрачења и његов тип.
11. Описати филм-дозиметар.
12. Описати термолуминисцентни дозиметар.
13. Дефинисати предату енергију и апсорбовану дозу зрачења.
14. Дефинисати експозициону дозу зрачења.
15. Дефинисати еквивалентну и ефективну дозу зрачења.
16. Укратко описати настанак и симптоме радијационе болести.

# РЕГИСТАР ИМЕНА И ПОЈМОВА



## РЕГИСТАР ПОЈМОВА

Овај Регистар имена и појмова је замишљен тако да читаоца усмерава према траженом појму преко ознаке главе, поглавља и евентуално потпоглавља, а не странице. Аутори су мишљења да се тако читаоцу од почетка пружа корисна информација.

### А

адијабата 5.2.1  
адијабатски процес 5.2.1  
адхезионе силе 4.3.3  
Ајнштајн, Алберт 8.2.2  
Ајнштајново објашњење фотоефекта 8.2.2  
активни транспорт 7.3.3  
акустика 3. глава  
акциони потенцијал 7.3.4  
ампер (јединица) 6.2.2  
амперметар 6.2.5  
амплитуда 2.1.1  
анјони 7.1.1, 9.1.2  
апсорбована доза зрачења 13.3.1  
апсорпциони спектар 8.2.1  
атом 8. глава  
атомски (редни) број 8.1.2  
аускултација 4.3.5

### Б

базални метаболизам 5.2.2  
Балмер, Јохан Јакоб 8.2.1  
Балмерова серија 8.2.1  
Бернулијева једначина 4.1.3  
биолошка ефикасност зрачења 13.3.1  
биолошки ефекти јонизујућег зрачења 13.3.2  
биолошко време полураспада 12.3.2

биомеханика, 1, 2. и 4 глава  
биомеханика флуида 4. глава  
боја звука/тона 3.1.1, 3.2.1  
Бор, Нилс 8.3.1  
Борн, Макс 9.1  
Боров модел атома 8.3.1  
Борови постулати 8.3.1  
брзина дрифта електрона 6.2.4  
брзина осциловања 2.1.2  
Брољ, Луј де 8.2.4  
Брољева релација 8.2.4

## В

валентна љуска 9.1.1  
Ван дер Валс, Јоханес 9.1.2  
Ван дер Валсове везе 9.1.2  
варнична комора 13.2.1  
Вебер–Фехнеров закон 3.2.1  
везивање отпорника 6.2.5  
вектор 1.1.2 (мат. дигр. 1)  
векторски производ два вектора 1.1.5 (мат. дигр. 3)  
вештачки извори јонизујућег зрачења 13.1.2  
вибрациони прелази у молекулу 9.2.1  
видљива светлост 10.1.2  
Вилсонова маглена комора 13.2.1  
Винов закон померања 5.3.2  
Винова константа померања 5.3.2  
висина звука/тона 3.1.1, 3.2.1  
вискозна течност 4.2.1  
вискозни флуиди 4.2  
вискозност (унутрашње трење флуида) 4.2.1  
вишеелектронски атоми 9.1.1  
волт (јединица) 6.1.4  
волтметар 6.2.5  
време живота побуђеног стања (нивоа) 9.3.1  
врсте равнотеже 1.1.6

## Г

Гајгер–Милеров бројач 13.2.1  
гама ( $\gamma$ ) зраци 10.2.1  
гасна емболија 4.3.3  
главни квантни број 8.3.1, 9.1.1  
гравитациона интеракција 8.1.1  
градијент 4.2.1 (мат. дигр. 7)  
греј (јединица) 13.3.1  
густина (електричне) струје 6.2.2

## Д

двокраке полуге 1.2.2  
детектори визуелног типа 13.2.1  
детектори електричног типа 13.2.1  
детектори јонизујућег зрачења 13.2.1  
детекција јонизујућег зрачења 13.2  
децибел 3.2.1  
диелектрик 6.1.6  
диелектрична константа 6.1.1, 10.1.1  
диелектрична константа у вакууму 6.1.1  
дијамагнетни материјали 6.3.4  
динамика 1.1  
динамички притисак 4.1.3  
диполни момент 6.1.5  
Дирак, Пол 9.1  
Диракова константа 8.2.2  
дисперзија при преламању 11.1.1  
диференцијална једначина 2.1.2 (мат. дигр. 5)  
диференцијални праг висине тона 3.2.1  
дифракциона решетка 8.2.1  
дифузија 7.2.1  
дифузиона маглена комора 13.2.1  
дозвољени прелази 9.3.1  
дозиметри јонизујућег зрачења 13.2.2  
дозиметрија јонизујућег зрачења 13.3.1  
Донанова равнотежа 7.3.2  
допунски притисак (испод површине течности) 4.3.2  
Други принцип термодинамике 5.2.3  
Други Фарадејев закон 7.1.2

## Е

- еквивалентна доза зрачења 13.3.1
- еквивалентни отпор 6.2.5
- експозициона доза зрачења 13.3.1
- електрична струја 6.2
- електрични дипол 6.1.5
- електрични отпор 6.2.4
- електрично коло 6.2.1
- електрокинетичке појаве 7.2.2
- електролити 7.1.1
- електролитичка дисоцијација 7.1.1
- електромагнетна интеракција 8.1.1
- електромагнетно (ЕМ) зрачење 10. глава
- електромоторна сила 6.2.1
- електронволт (јединица) 6.1.4
- електронски микроскоп 8.2.4
- електронски облак 8.1.2
- електронски омотач атома 8.1.2
- електронски пар (ковалентна веза) 9.1.2
- електронски прелази у атому 8.3.2
- електронски прелази у молекулу 9.2.1
- електроосмоса 7.2.2
- електростатика 6.1
- електростатички принцип суперпозиције 6.1.3
- електростатичко поље 6.1.2
- електростатичко поље равног кондензатора 6.1.6.
- електрофореза 7.2.2
- електрохемијски еквивалент 7.1.2
- елементарна честица 8.1.1
- елонгација 2.1.1
- емисивност материјала 5.3.2
- емисиони спектар 8.2.1
- енергија јонизације 8.3.2
- енергија осциловања 2.1.3
- енергетски ниво 8.3.1
- ентропија 5.2.3
- Ерстедов оглед 6.3.2
- ефективна доза зрачења 13.3.1
- ефективно време полураспада 12.3.2
- ехо-техника (ултразвук) 3.2.2

## Ж

жижа (фокус) сочива 11.2.1  
жижна даљина сочива 11.2.1

## З

зобрањени прелази 9.3.1  
зависност специфичног отпора од температуре 6.2.4  
закон преламања светлости 11.1.1  
закочно рендгенско зрачење 10.2.2  
запремински проток течности 4.1.2  
звук 3. глава  
звучни извор 3. глава  
звучни спектар 3.1.1, 3.1.2

## И

идеалан гас 5.1.1  
идеална течност 4.1.1  
идеални флуиди 4.1  
извори јонизујућег зрачења 13.1.2  
излазни рад из метала 8.2.2  
изобара 5.2.1  
изобарни процес 5.2.1  
изолатор (диелектрик) 6.1.6  
изотерма 5.2.1  
изотермни процес 5.2.1  
изотоп 8.1.2  
изохора 5.2.1  
изохорни процес 5.2.1  
икс ( $X$ ) или рендгенски зраци 10.1.2, 10.2  
имагинаран (нестваран) лик 11.2.2  
импулс-ехо техника 3.2.2  
инверзна насељеност 9.3.2  
индекс преламања светлости 11.1.1  
индиферентна (непрекидна) равнотежа 1.1.6  
индуковани електрични дипол 6.1.5  
интензитет базалног метаболизма 5.2.2



интензитет звука 3.1.1, 3.1.2  
интеракција X-зрачења са материјом 10.2.3  
интеракција јонизујућег зрачења са материјом 13.1.3  
инфразвук 3.1.2  
инфрацрвено (ИЦ) зрачење 10.1.2

## Ј

јака нуклеарна интеракција 8.1.1  
јачина електростатичког поља 6.1.2  
јачина (интензитет) звука 3.1.1, 3.1.2  
јачина (електричне) струје 6.2.2  
једначина за жижну даљину сочива 11.2.1  
једначина континуитета (флуиди) 4.1.2  
једначина простог хармонијског осциловања 2.1.2  
једначина танког сочива 11.2.3  
једнокраке полуге 1.2.2  
једносмерна електрична струја 6.2.1  
језгро атома 8.1.2  
јонизација 8.3.2  
јонизациона комора 13.2.1  
јонизујуће зрачење 13. глава  
јонска веза 9.1.2

## К

К-линије 10.2.2  
К-љуска 9.1.1, 10.2.2  
капацитет кондензатора 6.1.6  
капилара 4.3.3  
карактеристике звука 3.1.1  
карактеристике танког сочива 11.2.1  
карактеристични зраци код сочива 11.2.2  
карактеристични (линијски) спектар X-зрачења 10.2.2  
катјони 7.1.1, 9.1.2  
квант 8.2.2  
квантна механика 9.1  
квантни бројеви 8.3.2  
квантоване величине 8.2

квашење 4.3.3  
келвин (јединица) 5.1.1  
кинематика 1.1  
кинематички коефицијенат вискозности 4.2.1  
кинетичка енергија осциловања 2.1.3  
Кири, Пјер 9.2  
ковалентна веза 9.1.2  
коефицијент апсорпције X-зрака 10.2.4  
коефицијент вискозности 4.2.1  
коефицијент конвекције 5.3.2  
коефицијент површинског напона 4.3.1  
коефицијент провођења топлоте 5.3.1  
коефицијент расејања X-зрака 10.2.4  
коефицијент слабљења X-зрака 10.2.4  
количина наелектрисања 6.1  
количина топлоте 5.1.3  
компјутеризована томографија (СТ) 10.2.5  
Комптон, Артур 10.2.3  
Комптонов ефекат 10.2.3  
конвекција 5.3.2  
кондензатор 6.1.6  
кондукција 5.3.1  
константа опруге 2.1.1  
континуални спектар 8.2.1  
континуални спектар X-зрачења 10.2.2  
кохезионе силе 4.3.3  
крак силе 1.1.5, (код полуге) 1.2  
крак терета (код полуге) 1.2  
крвни притисак 4.3.5  
критична брзина струјања 4.2.3  
кружна фреквенција 2.1.2  
кружно (ротационо) кретање 1.1.2  
круто тело 1.1.1  
кулон (јединица) 6.1  
Кулонов закон 6.1.1

## Л

L-љуска 9.1.1, 10.2.2  
Лајманова серија 8.3.2  
ламинарно струјање 4.2.1

Лапласова формула 4.3.2  
ласер 9.3.2  
лик код сочива 11.2.2  
линеарна фреквенција 2.1.2  
линеарно увећање сочива 11.2.3  
линија тока (струјна линија, струјница) 4.1.1  
линије силе електростатичког поља 6.1.2  
линијски (карактеристични) спектар X-зрачења 10.2.2  
лични дозиметар 13.2.2  
луца 11.3.1

## Љ

љуска 9.1.1

## М

магнетизам 6.3  
магнетна индукција 6.3.1  
магнетна пермеабилност 6.3.4, 10.1.1  
магнетна сила 6.3  
магнетни дипол 6.3.3  
магнетни момент дипола 6.3.3.  
магнетно поље 6.3  
магнетно поље праволинијског проводника 6.3.2  
Мајтнер, Лиза 12.3.3  
Максвел, Џејмс 10.1.1  
масени број 8.1.2  
материјална тачка 1.1.1  
мембрански потенцијал 7.3.4  
мениск 4.3  
мерење крвног притиска код животиња 4.3.5  
мерење крвног притиска код животиња директним методом 4.3.5  
мерење крвног притиска код животиња индиректним методима 4.3.5  
метаболизам 5.2.2  
метална веза 9.1.2  
механичка предност полуге 1.2.1  
мехураста комора 13.2.1  
микроскоп 11.3.2  
микроталаси 10.2.1

молекул 9.1.2  
молекулски спектри 9.2.1  
момент импулса (момент количине кретања, угаони момент) електрона 8.3.1  
момент количине кретања електрона 8.3.1  
момент силе 1.1.5

## Н

наелектрисање 6.1  
нападна тачка силе 1.1.3  
натријум-калијумова (Na-K) пумпа 7.3.3  
негативно наелектрисање 6.1  
недостаци сочива 11.3.4  
нееластично расејање фотона (Комптонов ефекат) 10.2.3  
Нернстова једначина 7.3.2  
нестабилна (непостојана, лабилна) равнотежа 1.1.6  
неутрон 8.1.2  
ниво јачине звука 3.1.1, 3.2.1  
нуклеон 8.1.2  
нуклеус 8.1.2

## Њ

Њутнов закон вискозности 4.2.1

## О

објектив микроскопа 11.3.2  
објективна јачина звука 3.1.2  
објективне карактеристике звука 3.1.2  
обрнут лик 11.2.2  
окулар микроскопа 11.3.2  
олакшана дифузија 7.3.2  
Омов закон 6.2.3  
Омов закон за део електричног кола 6.2.4  
Омов закон за просто електрично коло 6.2.4  
опсег чујности звука 3.1.2  
оптичка јачина сочива 11.2.1  
оптички део спектра ЕМ зрака 10.1.3

орбитални квантни број 9.1.1  
орбитални магнетни квантни број 9.1.1  
оријентација дипола 6.1.5  
оса сочива 11.2.1  
ослонац полуге 1.2.1  
осмоза 7.2.1  
основна фреквенција звука 3.1.1, 3.1.2  
основне (фундаменталне) интеракције у природи 8.1.1  
основно стање атома 8.3.2  
осцилаторно (вибрационо) кретање 2.1.  
осцилације и таласи 2. и 3. глава  
отпорник 6.2.2

## П

пар ефекат 10.2.3  
паралелна веза елемената кола 6.2.5  
парамагнетни материјали 6.3.4  
пасивни транспорт 7.3.2  
Паули, Волфганг 9.1  
Паулијев принцип забране 9.1.1  
Пашенова серија 8.3.2  
( $p, V$ ) „ $p$ - $v$ “ координатни систем 5.1.2  
период осциловања 2.1.2  
периодично кретање 2.1  
Периодни систем елемената 8.1.2, 9.1.1  
перманентни (стални) магнет 6.3  
пиезоелектрични ефекат 3.2.2  
план паралелна плоча (преламање) 11.1.2  
планетарни модел атома 8.1.2, 8.3.2  
Планк, Макс 8.2.2  
Планкова квантна хипотеза 8.2.2  
Планкова константа 8.2.2  
Поазејев закон 4.2.1  
побуђено стање атома 8.3.2  
површинска појава 4.3  
површински напон 4.3.1  
позадинско зрачење 13.1.2  
позитивно наелектрисање 6.1  
покретљивост јона електролита 7.1.1  
поларизација диелектрика 6.1.5

полови магнета 6.3  
полуга 1.2  
полуга I врсте 1.1.2  
полуга II врсте 1.1.2  
полуга III врсте 1.1.2  
потенцијал електростатичког поља 6.1.4  
потенцијал ћелијске мембране у мировању 7.3.1, 7.3.4  
потенцијална енергија осциловања 2.1.3  
правило десне руке (магнетно поље) 6.3.2  
праг бола 3.2.1  
праг чујности 3.2.1  
Први принцип термодинамике 5.1.5  
Први Фарадејев закон 7.1.2  
предата енергија 13.3.1  
предмет код сочива 11.2.2  
преламање светлости 11.1  
пренос топлоте 5.3  
пренос топлоте зрачењем (радијацијом) 5.3.2  
пренос топлоте провођењем (кондукцијом) 5.3.1  
пренос топлоте струјањем (конвекцијом) 5.3.3  
призма 8.2.1, 11.1.2  
примена ласера у ветеринарској медицини 9.3.2  
примена X-зрачења у ветеринарској медицини 10.2.5  
природни извори јонизујућег зрачења 13.1.2  
проводник 6.1.6  
провођење топлоте 5.3.1  
просте машине 1.2  
просто хармонијско осциловање 2.1.1  
протеини носачи 7.3.2  
протон 8.1.2

## Р

раван кондензатор 6.1.6  
равнотежа животиња са малим стопалима 1.1.6  
равнотежа полуге (Архимедово правило) 1.2.1  
Радерфорд, Ернест 8.3  
радијација (зрачење) 5.3.2  
радијационо-тежински фактор 13.3.1  
радио-таласи 10.1.2.  
расипно сочиво 11.2.1

реалан (стваран) лик 11.2.2  
редна веза елемената кола 6.2.5  
редни број елемента 8.1.2  
редукована Планкова константа 8.2.2  
резултанта сила 1.1.3  
Рејнолдсов број 4.2.3  
релативна диелектрична константа 6.1.1  
релативна магнетна пермеабилност 6.3.4  
Рендген, Вилхелм 10.2  
рендгенска цев 10.2  
рендгенско зрачење 10.2  
реституциона сила 2.1  
ротациона равнотежа (услов) 1.1.5  
ротациони прелази у молекулу 9.2.1  
ротационо (кружно) кретање 1.1.2.

## С

сабирање вектора 1.1.2 (мат. дигр. 1)  
сабирно сочиво 11.2.1  
селекциона правила 9.2.1, 9.3.1  
сиверт (јединица) 13.3.1  
сила 1.1.3  
сименс (јединица) 6.2.4  
систем – појам и дефиниција 5.1.4  
скалар 1.1.2 (мат. дигр. 1)  
Склодовска Кири, Марија 9.2  
слаба нуклеарна интеракција 8.1.1  
слободна површина течности (мениск) 4.3.3  
смер једносмерне струје 6.2.1  
Снел–Декартов закон 11.1.1  
сочиво (преламање) 11.1.2  
спектар 8.2.1  
спектар електромагнетног зрачења 10.1.2  
спектар X-зрачења 10.2.2  
спектрометри 8.2.1  
спектроскопи 8.2.1  
специфична проводност 6.2.4  
специфични отпор 6.2.2  
спински квантни број 9.1.1  
спински магнетни квантни број 9.1.1

спонтана емисија 9.3.1  
спрег сила 1.1.4  
средња кинетичка енергија молекула идеалног гаса 5.1.1  
стабилна (постојана) равнотежа 1.1.6  
стабилне орбите 8.3.1  
стални електрични дипол 6.1.5  
стални магнет 6.3  
стање атома 9.1.1  
статика 1.1  
статистичка термодинамика 5.1  
статистичка физика 5.1  
статички притисак 4.1.3  
стационарно струјање флуида 4.1.1  
стварање пара електрон–позитрон (пар ефекат) 10.2.3  
степен дисоцијације 7.1.1  
Стефан–Болцманов закон 5.3.2  
Стефан–Болцманова константа 5.3.2  
стимулисана емисија 9.3.2  
Стоксов закон 4.2.2  
струјна линија 4.1.1  
струјна цев 4.1.1  
струјница 4.1.1  
структура ћелијске мембране 7.3.1  
субјективне карактеристике звука 3.1.1, 3.2  
сферна аберација 11.3.5  
сцинтилациони бројач 13.2.1

## Т

таласно-честични дуализам 8.2.4  
танка сочива 11.2  
тежина тела 1.1.6  
тежиште тела 1.1.6  
терапија ултразвуком 3.2.2  
терет (код полуге) 1.2  
термодинамика 5. глава  
термодинамички процеси 5.2  
термолуминисцентни дозиметри (ТЛД) 13.2.2  
тесла (јединица) 6.3.1  
Тесла, Никола 6.3.1  
ткивни тежински фактор 13.3.1



тон 3.2.1  
тракасти спектри 9.2.1  
транслаторна равнотежа (услов) 1.1.3  
транслаторно кретање 1.1.2  
транспорт супстанције кроз ћелијску мембрану 7.3  
транспортери (протеини носачи) 7.3.2  
турбулентно струјање 4.2.3

## У

убрзање осциловања 2.1.2  
угао квашења 4.3.3  
угаони момент електрона 8.3.1  
угаоно увећање сочива 11.2.3  
укупна енергија осциловања 2.1.3  
ултразвук 3.1.2, 3.2.2  
ултразвучна дијагностика 3.2.2  
ултраљубичасто (УЉ) зрачење 10.1.2  
унутрашња енергија молекула идеалног гаса 5.1.1  
унутрашње трење флуида 4.2.1  
усправан лик 11.2.2

## Ф

фарад (јединица) 6.1.6  
Фарадеј, Мајкл 6.16, 7.1.2  
Фарадејева константа 7.1.2  
Фарадејеви закони електролизе 7.1.2  
Ферми, Енрико 12.3.3  
феромагнетни материјали 6.3.4  
филм-дозиметар 13.2.2  
филтрација 7.3.2  
филтрациони медијум 7.3.2  
флуид 4. глава  
фокус сочива 11.2.1  
фосфоресценција 9.3.1  
фотоелектрична ћелија (фотоћелија) 8.2.2  
фотоелектрични ефекат (фотоэффект) 8.2.2  
фотон 8.2.3  
фотоструја 8.2.2

Фриш, Ото Роберт 12.3.3  
фундаменталне интеракције у природи 8.1.1  
функција стања 9.1.1  
функционисање ока код животиња 11.3.3

## Х

Хајзенберг, Вернер 9.1  
Хан, Ото 12.3.3  
хармоници (звук) 3.1.2  
Херц, Хајнрих Рудолф 10.1.1  
херц (јединица) 2.1.2  
хидродинамички отпор 4.2.1  
хидростатички притисак 4.1.3  
хидрофилно 7.3.1  
хидрофобно 7.3.1  
хроматска аберација 11.3.4

## Ц

центар сочива 11.2.1  
централна раван сочива 11.2.1  
црвена граница фотоефекта 8.2.  
СТ (компјутеризована томографија) 10.2.5

## Ч

Черенковљев бројач 13.2.1

## Џ

Џул–Ленцов закон 6.2.6

## Ш

Шредингер, Ервин 9.1  
шум 3.2.1

## КОРИШЋЕНА И ПРЕПОРУЧЕНА ЛИТЕРАТУРА

Овај списак литературе је замишљен тако да читаоца усмерава, углавном, ка књигама у којима може да нађе и дубља и сликовитија тумачења која, због сажетости програма из предмета Биофизика за студенте Ветеринарске медицине, нису могла да буду обухваћена уџбеником. Читаоцу се препоручују и предавања из биофизике која могу слободно да се преузму са интернета.

- Ajtić, J., Popović, D., 2014: *Biofizika*, CID, Beograd.
- Cotterill, R., 2006: *Biophysics. An Introduction*, Wiley, London.
- Damjanovich, S., Fidy, J., Szöllösi, J., 2009: *Medical Biophysics*, Medicina, Budapest.
- Krmar, M., 2013: *Uvod u nuklearnu fiziku*, Prirodno-matematički fakultet Novi Sad, Novi Sad.
- Nolting N., 2004: *Methods in Modern Biophysics*, Springer, Berlin.
- Popović, D., Stefančić, V., 2006: *Fizika sa osnovama biofizike*, FVM, Beograd.
- Samek, S., 2002: *Opća fizika s osnovama biofizike*, Interliber, Sarajevo.

### Предавања која могу да се преузму са интернета

Miller, D. J., *Biological and Environmental Physics*,  
<http://www.physics.gla.ac.uk/~dmiller>

Urbanc, B., *Biophysics Lecture Notes*,  
<http://www.freebookcentre.net/physics-books-download/Biophysics-Lecture-Notes.html>