

ELEKTRIKA, SVETLOBA IN SNOV

FIZIKA ZA 3. IN 4. LETNIK SREDNJE ŠOLE

Marjan Hribar, Slavko Kocjančič, Andrej Likar, Seta Oblak, Bojan Pajk, Vincenc Petruna, Nada Razpet, Branko Roblek, Fedor Tomažič, Miro Trampuš



ELEKTRIKA, SVETLOBA IN SNOV
FIZIKA ZA 3. IN 4. LETNIK SREDNJE ŠOLE

Avtorji

Marjan Hribar, Slavko Kocjančič, Andrej Likar, Seta Oblak, Bojan Pajk, Vincenc Petruna, Nada Razpet, Branko Roblek, Fedor Tomažič, Miro Trampuš

Strokovni pregled

prof. dr. Peter Gosar, Niko Kastelič, prof., Fedor Tomažič, prof.,
Florjana Žigon, prof.

Jezikovni pregled

Dora Mali, Bronislava Aubelj

Korekture

Nada Razpet, Lidija Babič

Ilustracije

Maša Okršlar

Slikovno gradivo

Lidija Babič

Fotografije

arhiv založbe Modrijan, Tomaž Lunder, Silvia Pugliese Iona, Janez Zrnec

Na podlagi 25. člena Zakona o organizaciji in financiranju vzgoje in izobraževanja (Uradni list RS, št. 12/96) je Strokovni svet Republike Slovenije za splošno izobraževanje na seji dne 3. 7. 1997 potrdil učbenik **ELEKTRIKA, SVETLOBA IN SNOV**, ki so ga napisali Marjan Hribar, Slavko Kocjančič, Andrej Likar, Seta Oblak, Bojan Pajk, Vincenc Petruna, Nada Razpet, Branko Roblek, Fedor Tomažič, Miro Trampuš za pouk fizike v 3. in 4. razredu srednje šole (sklep št. 612-134/97 z dne 4. 7. 1997).

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

53 (075.3)

ELEKTRIKA, svetloba in snov : fizika za 3. in 4. letnik srednje šole / Marjan Hribar . . . [et al.] ; [ilustracije Maša Okršlar ; slikovno gradivo Lidija Babič ; fotografije arhiv založbe Modrijan, Tomaž Lunder, Janez Zrnec] . - 1. izd. - Ljubljana : Modrijan, 1997

ISBN 961-6183-48-6
1. Hribar, Marjan
70016000

Po mnenju Ministrstva za šolstvo in šport št. 415-79/97-MS z dne 25. 9. 1997 sodi ta knjiga med proizvode, za katere se plačuje 5-odstotni davek od prometa proizvodov.

VSEBINA

1. ELEKTRIČNI TOK IN NABOJ	7
Uvod	7
Pretočeni naboj in merjenje naboja	8
Osnovni naboj	9
2. ELEKTRIČNE SILE IN ELEKTRIČNO POLJE	11
Uvod	11
Coulombov zakon	12
Električno polje	13
Električno polje v snovi	16
* Električni pretok	17
Električna potencialna energija	18
3. ELEKTRIČNI KROGI	22
Električno polje v prevodnikih	22
Električno delo in električna potencialna energija v električnem krogu	23
4. ZVEZA MED TOKOM IN NAPETOSTJO	26
Ohmov zakon	26
* Upor ampermetra in voltmetra	27
* Specifični upor	28
* Jakost električnega polja v vodnikih	29
* Notranji upor in gonilna napetost	30
* Merjenje upora z Wheatstonovim mostom	31
5.* GENERATORJI	32
6. KONDENZATOR	35
Kapaciteta	35
* Polnjenje in praznjenje kondenzatorja	37
* Energija kondenzatorja	38
7.* GIBANJE NABITIH DELCEV V ELEKTRIČNEM POLJU	40
Curek elektronov v vakuumu	40
Millikanov poskus	43
8. VPRAŠANJA IN NALOGE	45

9. MAGNETNO POLJE	52
Ponovitev	52
Sila na vodnik v magnetnem polju	55
* Navor na tuljavo v magnetnem polju	56
* Gibanje nabitih delcev v magnetnem polju	57
* Merjenje gostote magnetnega polja	59
Magnetno polje električnega toka	60
Magnetni pretok	63
10. VPRAŠANJA IN NALOGE	64
11. INDUKCIJA	67
Indukcija pri gibanju vodnika po magnetnem polju	67
Splošna oblika indukcijskega zakona	71
* Sunki inducirane napetosti	72
* Lastna indukcija	73
* Energija tuljave	75
12. IZMENIČNA NAPETOST IN IZMENIČNI TOK	77
Efektivni tok in efektivna napetost	77
* Izmenični tok po kondenzatorju in po tuljavi	79
Generatorji za omrežni izmenični tok	80
Transformator	81
Nevarnosti električnega toka	83
13. VPRAŠANJA IN NALOGE	84
14. NIHANJE	89
Nihala in opis nihanja	89
Hitrost in pospešek pri sinusnem nihanju	91
Sile pri nihanju	92
Energija nihanja	94
Električni nihajni krog	95
15. VSILJENO NIHANJE	98
16.* NESINUSNO NIHANJE	101
17. VPRAŠANJA IN NALOGE	104
18. VALOVANJE	110
Razširjanje valov	110
Hitrost valov	114
19. POTUJOČE SINUSNO VALOVANJE	117
Krajevna in časovna slika valovanja	117
Energijski tok in energija sinusnega valovanja	118
20. STOJEČI VALOVI	120
21. VALOVANJE NA VODNI GLADINI	123
Odboj valovanja	124
Lom valovanja	125

22. VPRAŠANJA IN NALOGE	127
23. ODBOJ IN LOM SVETLOBE	133
* Zrcala	135
Leče	137
* Napake leč	140
24. OPTIČNE NAPRAVE	142
Oko	142
* Fotografska kamera, projekcijski aparat	143
Lupa	144
* Mikroskop	145
Daljnogled	145
25. UKLON	147
26. INTERFERENCA	149
27. ZVOK	153
Vrste zvokov in njihov spekter	156
Dopplerjev pojav	157
28. VPRAŠANJA IN NALOGE	160
29. ELEKTROMAGNETNI VALOVI	164
Električno in magnetno polje v okolici nihajnega kroga	164
Razširjanje elektromagnetnega valovanja	165
Energija elektromagnetnega valovanja	167
Vrste elektromagnetnega valovanja	167
30. SVETLOBA	171
Svetlobni tok	171
Spekter svetlobe	173
* Oko in barve	175
* Polarizacija pri svetlobi	176
31. HITROST SVETLOBE	179
Merjenje hitrosti svetlobe	179
Hitrost in energija elektronov	181
Zakon o energiji in masi	184
32. VPRAŠANJA IN NALOGE	186
33. IZMENJAVA ENERGIJE MED SVETLOBO IN SNOVJO	189
Spektri svetlobe in energija atoma	189
* Fluorescenca	193
* Stimulirana emisija – laser	194
Fotoefekt	195
* Notranji fotoefekt	197
Rentgensko sevanje	198
** Zgradba atoma	200

34. ELEKTRONI V TRDNI SNOVI	202
Električne in optične lastnosti trdnih snovi	202
Energijski pasovi	203
Polprevodniki	205
Čisti polprevodniki	205
Polprevodniki s primesmi	207
** Stik pn	208
** Tranzistor	210
35. SVET MIKRODELCEV	213
36. VPRAŠANJA IN NALOGE	216
37. ATOMSKO JEDRO	220
Sestav, masa in velikost atomskega jedra	220
Vezavna energija	224
Jedrske reakcije	225
* Reakcijski presek	230
* Pospeševalniki	231
Radioaktivnost	234
Detektorji jedrskega sevanja	240
Uporaba radioaktivnih snovi	241
38. OSNOVNI DELCI IN INTERAKCIJE	244
Hadroni in leptoni	244
Osnovni delci in interakcije	248
39. VPRAŠANJA IN NALOGE	251

1. ELEKTRIČNI TOK IN NABOJ

UVOD

Z elektriko živimo že od malega. V stanovanjih imamo *električno napeljavo*, na katero lahko priključujemo različne električne naprave: luči, gospodinjske naprave, televizijske in radijske aparate, računalnike. Delovanje teh naprav povezujemo z *električnim tokom*, ki steče skozi njih, ko jih vključimo. Električna napeljava v stanovanjih nas oskrbuje z *izmeničnim* električnim tokom. *Baterije* ali *akumulatorji* nam dajejo *enosmerni* električni tok. Z *usmerniki* lahko pridelamo enosmerni tok iz izmeničnega, z različnimi *oscilatorji* pa tudi izmenični tok iz enosmernega.

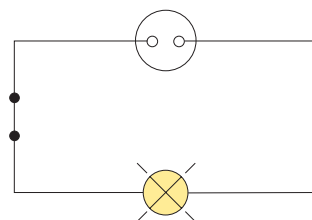
V začetku se bomo ukvarjali predvsem z enosmernim tokom, ki vam je domač od prej. Da bi stekel, moramo poskrbeti za *sklenjen električni krog*. Vanj s prevodnimi žicami povežemo *generator*, npr. baterijo, in *porabnike*, npr. žarnico, elektromotor, grelec ali elektrolizno celico. Ko staknemo stikalo (slika 1.1), steče po krogu električni tok, žarnica sveti, grelec oddaja toploto, motor se vrti, v elektrolizni celici poteka elektroliza, v okolici kroga zaznamo magnetno polje.

Dejavnost Z baterijami in različnimi porabniki sestavite preproste električne kroge in opazujte učinke električnega toka! Odgovorite še na naslednja vprašanja: Kaj so prevodniki in izolatorji? Za kaj jih uporabljamo? Kako in s čim merimo električni tok? S katero enoto izražamo jakost toka? S katerimi grafičnimi simboli označujemo električne priprave v shemah? Kaj je varovalka in kako deluje?

Električni tok merimo z *ampermetri*. Ampermeter nam kaže *jakost* električnega toka, izraženo v *amperih*. Amper je ena od osnovnih enot mednarodnega sistema enot. Definiran je takole:

Meter dolga odseka zelo dolgih vzporednih vodnikov v razdalji 1 m, po katerih tečeta tokova z jakostjo 1 A, delujeta drug na drugega s silo $2 \cdot 10^{-7}$ N. Sila je privlačna, če tečeta tokova v isti smeri, in odbojna, če tečeta v nasprotnih smereh.

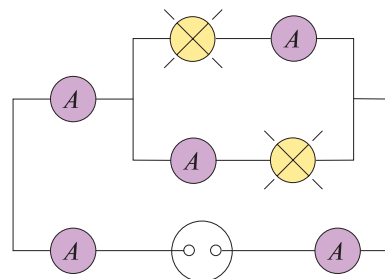
Dejavnost Na različna mesta v preprostem električnem krogu, v katerem so zvezani baterija in zaporedno z njo več žarnic, vključite ampermetre. Kaj ugotovite? Poskus ponovite še v krogu, v katerem je eno ali več razvejišč (slika 1.3)!



Slika 1.1 preprost električni krog



Slika 1.2 Igračka predstavlja mehanski model električnega kroga. Pingvinčki na kolesčkih se spuščajo po stezi navzdol, potem pa se dvigajo po stopnišču zopet navzgor. Pingvinčki igrajo vlogo nabojev; njihovu gibanju ustreza tok.



Slika 1.3 merjenje električnega toka po krogu

Zgornji eksperimenti dajejo prva pomembna spoznanja: V nerazvejenem električnem krogu je tok po vseh presekih enak. V razvejiščih je vsota pritekajočih tokov enaka vsoti odtekajočih. Če pritekajočim tokovom pripišemo pozitivni, odtekajočim pa negativni znak, lahko trdimo, da je vsota tokov v razvejišču enaka nič:

$$\sum I = 0.$$

? Izberite si točko v nerazvejenem električnem krogu. Ali lahko zanjo uporabite I. Kirchhoffov zakon?

Povezava Pri kemiji ste se učili o sestavi atoma in atomskega jedra. Kaj so ioni? Katere vrste ionov poznate? Kaj se dogaja pri elektrolizi?

To spoznanje imenujemo *I. Kirchhoffov zakon* ali tudi *zakon o ohranitvi električnih tokov*.

I. Kirchhoffov zakon kaže, da se po žicah pretaka nekaj, kar niti ne nastaja, niti ne izgineva. To je *električni naboj*. Električni tok je v tem smislu podoben vodnemu toku v sklenjenem omrežju. V njem kroži voda, ki niti ne nastaja niti ne izgineva, le črpalka jo poganja naokrog.

Električni naboj je vezan na materialne delce, ki sestavljajo atome. Lahko je *pozitiven* ali *negativen*. Osnovni nosilec pozitivnega naboja je *proton*, ki je sestavni del atomskega jedra. Osnovni nosilec negativnega naboja pa je *elektron*.

V elektrolizni celici prenašajo električni tok *pozitivni* in *negativni ioni*. Smer potovanja pozitivnih ionov izberemo za *smer toka*. Negativni ioni potujejo v nasprotni smeri.

Smer potovanja ionov z različnimi predznaki lahko lepo opazujemo pri temle poskusu: filtrirni papir na objektivnem steklu omočimo z raztopino amoniaka in položimo nanj kristalček kalijevega permanganata in kristalček modre galice. Ko robova papirja priključimo na baterijo, se začneta gibati v nasprotnih smereh modra pega, v kateri so pozitivni bakeramonijevi ioni, in vijolična pega, v kateri so negativni mangantni (VII) ioni.

PRETOČENI NABOJ IN MERJENJE NABOJA

Naboj, ki se v izbranem času pretoči skozi presek vodnika, izračunamo podobno kakor prostornino vode, ki se pretoči skozi izbrani presek vodovodne cevi:

pretočeni naboj je enak produktu jakosti električnega toka in časa ali, zapisano s simboli,

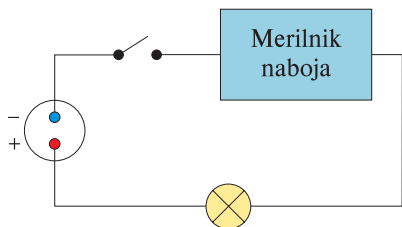
$$e = I t.$$

Enota za električni naboj je produkt enot za jakost toka in za čas, torej

$$\text{A} \cdot \text{s} = \text{As}.$$

Imenovali jo bomo *ampersekunda*. Drugo ime za enoto je *coulomb* (Cb).

Pretočeni naboj lahko tudi merimo. Električni krog na izbranem mestu prekinemo in na prekinjeno mesto vključimo *merilnik naboja* (slika 1.4). Pred tem moramo merilnik naboja še umeriti. Meriti moramo čas



Slika 1.4 merjenje pretočenega električnega naboja

in jakost toka, ki teče skozi merilnik, ter skalo merilnega instrumenta na izhodu označiti v enotah naboja.

Dejavnost Umerite merilnik naboja in z njim izmerite naboj, ki se pretoči skozi različne preseke izbranega električnega kroga.

Skozi presek kroga, po katerem teče izmenični električni tok, v povprečju ni pretočenega naboja. Naboj le niha sem in tja.

OSNOVNI NABOJ

V elektrolizni celici so nosilci električnega naboja pozitivni in negativni ioni. Ob stiku z elektrodo se ioni nevtralizirajo in se, če ni kakih kemijskih reakcij, izločijo na elektrodi kot nevtralni atomi.

Upravičeno pričakujemo, da imajo istovrstni ioni enak naboj. V to nas prepričajo poskusi. Množina snovi, ki se pri elektrolizi nabere na elektrodi, je sorazmerna s pretočenim nabojem. Pri tem je naboj, ki je potreben za izločitev *kilomola* enovalentne snovi, enak značilnemu naboju

$$e_F = 96.10^6 \text{ As} ,$$

ki ga imenujemo tudi *Faradayev naboj*. Za izločitev kilomola večvalentne snovi se mora pretočiti večkratnik tega naboja. Ker se mora za kilomol izločiti na elektrodi *Avogadrovo število* atomov oziroma ionov, pomeni, da nosi posamezni ion večkratnik naboja

$$e_0 = \frac{e_F}{N_A} = 1,6.10^{-19} \text{ As} ,$$

ki ga imenujemo tudi *osnovni naboj*. Mnogi poskusi, o katerih bomo govorili kasneje, kažejo, da je to najmanjši naboj, ki ga najdemo v naravi prostega. Nosilci naboja, ki je $1/3$ ali $2/3$ osnovnega, so *kvarki*, ki sestavljajo protone in nevtrone, vendar ne morejo nastopati posamično.

O določevanju osnovnega naboja bomo govorili še v poglavju o Millikanovem poskusu.

Zaradi velike gibljivosti so prosti elektroni nosilci električnega toka po kovinah. Naboj elektronov je enak negativnemu osnovnemu naboju, torej

$$e = -e_0 = -1,6.10^{-19} \text{ As} .$$

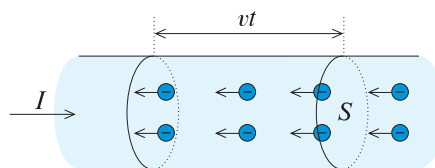
Prosti elektroni se v žicah neprestano neurejeno gibljejo z veliko hitrostjo. Povprečna hitrost velikega števila elektronov pa je nič. Ko teče po žici električni tok, si pridobijo elektroni še komponento hitrosti vzdolž smeri toka. Ta komponenta hitrosti ali *potovalna* hitrost predstavlja tedaj povprečno hitrost velikega števila elektronov. Ker je naboj elektronov negativen, je potovalna hitrost nasprotna dogovorjeni smeri toka. Na skicah označujemo le potovalno hitrost. Poglejmo, kolikšna je!



Slika 1.5 Michael Faraday v svojem laboratoriju v Londonu leta 1860

Povezava Pri kemiji ste obravnavali sestav trdnih snovi in posebej kovin. Za razumevanje električnih lastnosti kovin moramo vedeti, da oddajo atomi pri združevanju v kristale del elektronov v skupno zalogo kristala. Ti elektroni se po kristalu skoraj prosto gibljejo.

Slika 1.6 Električni tok po žici je posledica urejenega gibanja elektronov.



? Elektroliza je pomembna pri površinski obdelavi kovin. Z njo nanašajo na kovine prevleke, odporne proti koroziji. Pomembna je tudi pri rafiniranju bakra ali pri pridobivanju aluminija. Razne industrijske in polindustrijske elektrolizne delavnice so nevarni onesnaževalci okolja. Poučite se o uporabi elektrolize in o ekoloških problemih, povezanih z njo.

Kolikšen naboj mora preteči skozi elektrolizno celico, da se pri rafiniranju bakra s pozitivne elektrode prenese na negativno 1 kg dvovalentnega bakra?



Slika 1.7 elektronke

Slika 1.8 priključitev diode

Slika 1.6 kaže žico, po kateri teče električni tok z izbrano jakostjo I . Skozi presek žice, postavljen pravokotno na smer toka, se v izbranem času t pretoči ves naboj, ki je v valju z osnovno ploskvijo S in z višino vt , to pa je

$$e = n S v t e_0 ,$$

če je n gostota prostih elektronov v žici. Jakost električnega toka je tedaj

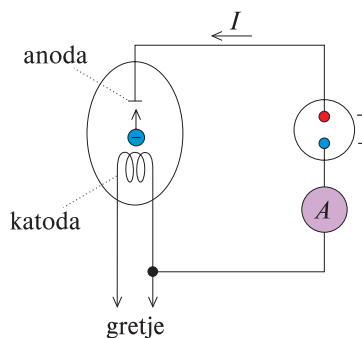
$$I = \frac{e}{t} = n S v e_0 ,$$

potovalna hitrost elektronov pa

$$v = \frac{I}{S n e_0} .$$

V bakreni žici je gostota prostih elektronov $8,5 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$. S tem izračunamo, da je v žici s presekom 1 mm^2 , po kateri teče 10 A , potovalna hitrost elektronov okoli $0,7 \text{ mm/s}$.

Elektroni izhlapevajo iz segrete kovine na podoben način kakor molekule iz segrete kapljevine. Ta pojav, ki ga imenujemo *termična emisija*, izkoriščajo v *elektronkah*.



Slika 1.8 shematično kaže *diodo*, povezano z generatorjem in ampermetrom. V stekleni, evakuirani bučki sta zataljeni dve kovinski elektrodi, od katerih je ena – *katoda* – kovinska žička, ki jo segrevamo z električnim tokom, druga – *anoda* – pa kovinska plošča ali valj, ki oddaja segreto žičko. Tok po krogu teče le, če pozitivni pol generatorja priključimo na anodo in negativni pol na katodo. Ker vemo, da oddaja elektrone le segreta žička, pomeni, da je smer njihovega gibanja res nasprotna smeri toka in je torej njihov naboj negativen.

2. ELEKTRIČNE SILE IN ELEKTRIČNO POLJE

UVOD

Da po sklenjenem električnem krogu dobimo tok, moramo vanj vključiti *generator*, to je baterijo, akumulator, sončno celico, dinamo ali termoelement. Vloga generatorja je podobna vlogi črpalke v vodnem krogu. Za razumevanje te vloge moramo spoznati sile, ki delujejo med nabitimi delci.

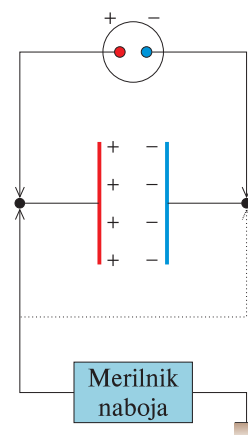
Najprej opazujemo sile med telesi, na katerih naboj miruje. Na generator za hip priključimo razsežni vzporedni kovinski plošči, *ploščati kondenzator*, nato pa vsako posebej staknemo z merilnikom naboja, tako da lahko naboj steče skozenj v zemljo (slika 2.1). Merilnik pokaže, da je bila na vsaki od plošč enaka množina naboja, vendar z nasprotnim znakom. Pravimo, da sta bili plošči kondenzatorja *nabiti*. Domenimo se, da imenujemo naboj na plošči, ki je bila priključena na pozitivni priključek generatorja, *pozitiven*, naboj na plošči, ki je bila priključena na negativni priključek generatorja, pa *negativen*.

Prilepimo na vsako od plošč listič aluminijeve folije, tako da je dovolj gibljiv. Ko plošči nabijemo, se lističa približata. Ker je na vsakem lističu naboj istega znaka kakor na plošči, na katero je prilepljen, sklepamo, da se telesa, ki so nabita z nabojem z nasprotnim znakom, privlačijo. Na podoben način se lahko prepričamo, da se telesa, ki nosijo naboj istega znaka, odbijajo. Odboj in privlak teles pripišemo *električni sili* med telesoma.

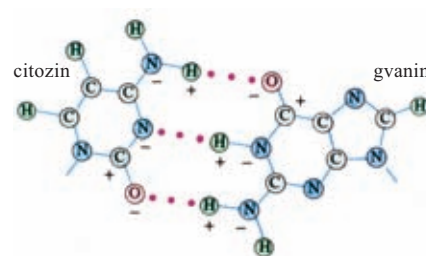
Slika 2.3 kaže *elektroskop*, ki rabi za odkrivanje naboja na telesih. Ko se z nabitim telesom dotaknemo elektroskopa, se naboj razleze po kovinski palici s kazalcem. Zaradi odbojnih sil se kazalec odkloni.

Z elektroskopom se prepričamo, da se lahko nabijejo telesa tudi na druge načine. Nabije se npr. glavnik, s katerim potegnemo skozi suhe lase, polivinilna ali steklena palica, ki jo podrgnemo z volneno krpo. Nabijemo se tudi mi, ko hodimo po tleh s plastično prevleko – zaradi tega nas neprijetno strese, ko se dotaknemo ozemljenih kovinskih predmetov.

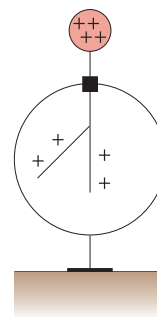
Če se s kakim nabitim telesom približamo natrganim papirčkom, se najprej prilepijo nanj, nato pa odletavajo stran. Če se z nabito palico približamo curku vode, se ta uviije proti palici. Če se s palico pribli-



Slika 2.1 merjenje naboja na ploščah kondenzatorja



Slika 2.2 Elektrostatske sile držijo skupaj dve vijačnici molekule DNA.

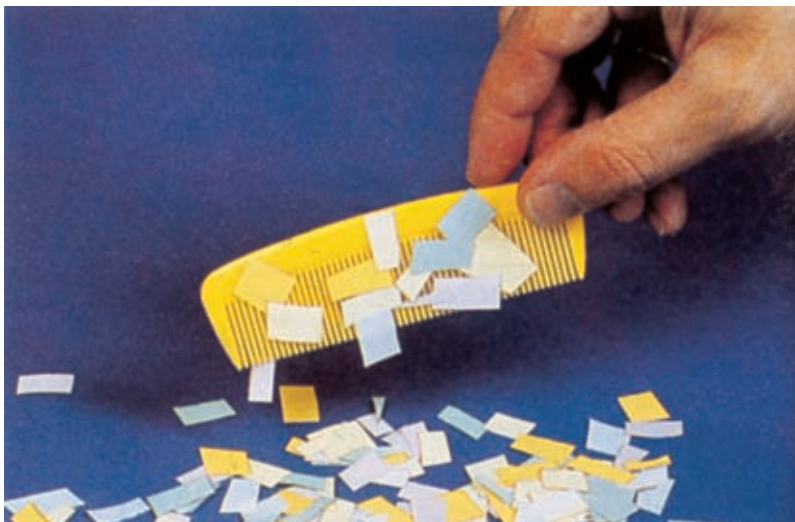


Slika 2.3 elektroskop

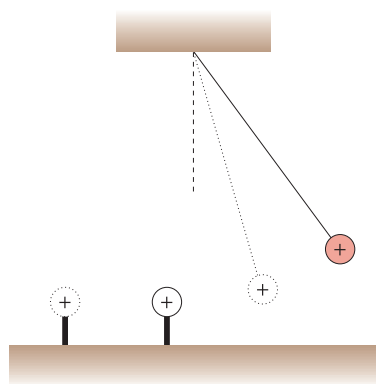


Slika 2.4 elektroskop

žamo nenabiti kovinski kroglici, ki visi na neprevodni nitki, se kroglica najprej približa palici, in če se je slučajno dotakne, se takoj odbije od nje.



Slika 2.5 naelektreni glavnik privlači papirčke



Slika 2.6 prikaz električne sile med pozitivno nabitima kroglicama

? Kako iz odklona viseče kroglice določimo velikost električne sile? Najprej premislite, katere sile delujejo na kroglico v ravnovesju!

? Zakon za silo med nabitima kroglicama spominja na gravitacijski zakon. V čem je podobnost in v čem razlika?

Vsi ti pojavi kažejo osnovni lastnosti električnih sil, ki smo ju spoznali doslej. Hkrati pa kažejo električno naravo snovi. To, da se nevtralna telesa nabijejo, ko se tarejo drugo ob drugo, si razlagamo kakor posledico prehajanja elektronov z enega na drugo telo.

COULOMBOV ZAKON

Opazovali bomo električno silo med enakomerno nabitima kroglicama. Shemo poskusa kaže slika 2.6. Ena od kroglic je z izolatorjem pritrjena na stojalo, druga pa visi na neprevodni niti. Opazujemo senci kroglic na steni. Najprej določimo ravnovesno lego viseče kroglice, nato pa kroglici nabijemo z istovrstnim nabojem. Viseča kroglica se zaradi električne sile odkloni iz ravnovesne lege.

Vidimo, da lahko določimo električno silo iz majhnega odmika viseče kroglice iz ravnovesne lege. Naredimo nekaj poskusov. Če se ene ali druge kroglice dotaknemo z enako veliko nenabito kroglico, da odnesemo polovico naboja, se sila v dani razdalji zmanjša na polovico. Z dodatnimi dotiki kroglice z nenabito kroglico lahko spreminjamo naboj še naprej in pokažemo, da je električna sila sorazmerna z nabojem obeh kroglic. Ko spreminjamo še razdaljo med kroglicama, ugotovimo, da je sila obratno sorazmerna s kvadratom razdalje med njunima središčema. Z enačbo zapisano:

$$F = \frac{k e_1 e_2}{r^2},$$

če sta e_1 in e_2 naboja kroglic, r pa razdalja med središčema.

Enačba izraža *Coulombov zakon*. Dopolniti jo moramo še s konstanto k . Določimo jo s poskusom, pri katerem izmerimo oba naboja, razdaljo

med središčema kroglic in silo. V primeru, da sta nabiti kroglici v zraku, dobimo za konstanto k vrednost

$$k = 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{(\text{As})^2}.$$

Navadno pišemo konstanto v obliki

$$k = \frac{1}{4 \pi \varepsilon_0},$$

kjer je ε_0 influenčna konstanta:

$$\varepsilon_0 = 8,9 \cdot 10^{-12} \frac{(\text{As})^2}{\text{Nm}^2}.$$

Poudarimo pa, da velja Coulombov zakon za kroglice le, če je naboj po njima enakomerno porazdeljen. To kar drži, kadar je razdalja med kroglicama velika v primerjavi s premerom kroglic. Sila je tedaj taka, kakor da bi imeli točkasta naboja, ki bi bila v središčih kroglic.

Iz pojavov v atomskem svetu sklepamo, da velja Coulombov zakon tudi za električno silo med elektroni ali med elektroni in protoni.

* Električna sila med dvema točkastima nabojema ni odvisna od prisotnosti drugih točkastih nabojev v okolici. Pomeni, da je skupna električna sila na izbrani naboj enaka vektorski vsoti sil drugih nabojev v okolici. Za vsak par pa je sila določena s Coulombovim zakonom. Vse izkušnje in podrobna merjenja potrjujejo to pravilo.

Oglejmo si tale zgled. Kroglice z naboji $e = 2 \cdot 10^{-9} \text{ As}$, $-e = -2 \cdot 10^{-9} \text{ As}$ in $e' = 1 \cdot 10^{-9} \text{ As}$ so na ogliščih enakostraničnega trikotnika s stranico 10 cm. Kolišna je sila na kroglico z nabojem e' ?

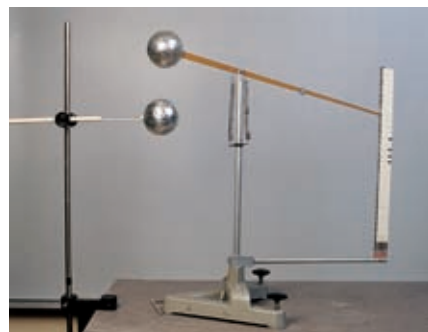
Sili na opazovano kroglico kaže slika 2.8. Po velikosti sta enaki

$$F = \frac{e e'}{4 \pi \varepsilon_0 a^2} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

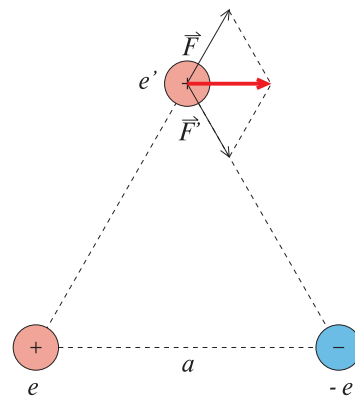
in se sestavljata v rezultanto, ki je tudi enako velika. Poiščemo jo grafično ali računsko. Poglejte, kako se sila spreminja, če se kroglica z nabojem e' premika po simetrali trikotnika!

ELEKTRIČNO POLJE

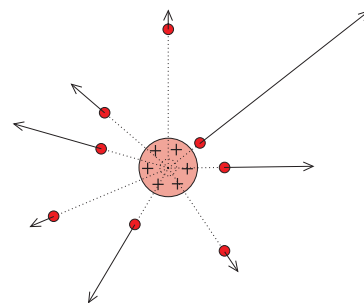
Z visečo nabito kroglico lahko zaznamo električne sile v vsej okolici nabitih teles. Povsod je sila sorazmerna z nabojem kroglice. Sorazmernostni koeficient med silo in nabojem pa je od kraja do kraja različen in odvisen od razdalje do nabitega telesa, od oblike telesa in od naboja na njem. Slika 2.9 kaže električno silo na nekaterih mestih v meridianski ravnini nabite kovinske krogle. Sile po dogovoru predstavimo z usmerjenimi daljicami, katerih dolžina je sorazmerna z velikostjo sil. Če bi imela kroglica drugačen naboj, bi se vse daljice podaljšale ali skrajšale v enakem razmerju. Prav tako bi se sorazmerno spremenile vse sile in njihove slike, če bi se spremenil naboj na krogli. Podobno sliko bi dobili za sile v okolici drugačnih nabitih teles.



Slika 2.7 Priprava, s katero lahko natančneje preverimo Coulombov zakon.



Slika 2.8 sestavljanje električnih sil



Slika 2.9 Električne sile na pozitivno nabito kroglico v okolici pozitivno nabite krogle.

Radi govorimo, da so električne sile v okolici nabitega telesa odraz njegovega *električnega polja*. Električne sile npr., ki jih predstavlja slika 2.9, so tedaj odraz električnega polja, ki obdaja nabito kroglo.

Za raziskovanje električnega polja si moramo izbrati drobno nabito kroglico z majhnim nabojem, ki ne moti okoliških nabojev. *Jakost električnega polja* $\vec{E}$ na izbranem mestu tedaj definiramo kot sorazmernostni koeficient med električno silo $\vec{F}$ in nabojem kroglice e' :

$$\vec{F} = \vec{E}e'.$$

Jakost električnega polja je torej vektor, ki ima smer sile na kroglico, če je njen naboj pozitiven, in nasprotno smer, če je njen naboj negativen.

Iz definicije sledi, da je enota za jakost električnega polja, $[E]$, enaka N/As, vendar pogosteje kakor to uporabljamo enakovredno enoto

$$\text{volt/meter} = \text{V/m},$$

v kateri je $V = \text{J/As}$. Hitro se prepričamo, da je res

$$\text{V/m} = \text{N/As}.$$

Enoto *volt* bomo podrobneje spoznali kasneje.

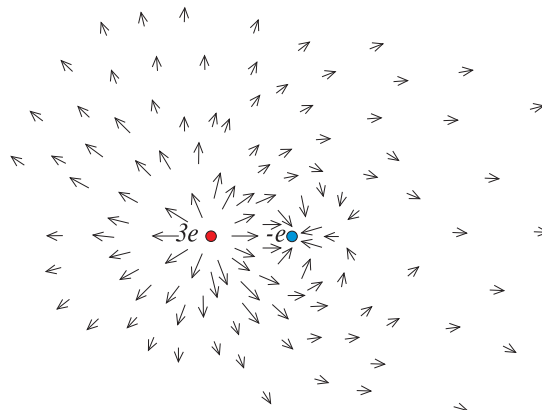
Jakost električnega polja okoli enakomerno nabite krogle po zgornji definiciji zapišemo takole:

$$E = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Pri tem je e naboj krogle. Polje je radialno in je usmerjeno stran od središča krogle, če je naboj e pozitiven, in proti središču, če je naboj e negativen. Enako obliko ima polje okoli točkastega naboja.

Jakosti električnega polja se vektorsko seštevajo, kakor se vektorsko seštevajo električne sile. Z vektorskim seštevanjem lahko poiščemo jakost električnega polja v okolici poljubnega sistema točkastih nabojev.

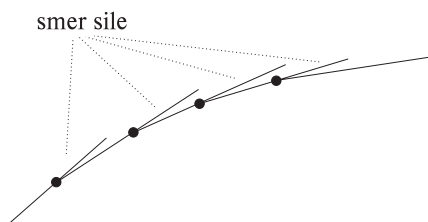
O električnem polju si skušamo ustvariti nazorno predstavo. Slika 2.10 kaže z vektorji predstavljeno električno polje v ravnini v okolici dveh drobnih nabitih kroglic, od katerih ima pozitivna trikrat tolikšen naboj kakor negativna. Dolžine vektorjev so sorazmerne z jakostjo električnega polja.



? Primerjajte enoto za jakost električnega polja z enoto za jakost gravitacijskega polja!

? *Z vektorskim seštevanjem prikažite jakost električnega polja na nekaj mestih v okolici dveh ali treh točkastih nabojev v ravnini!

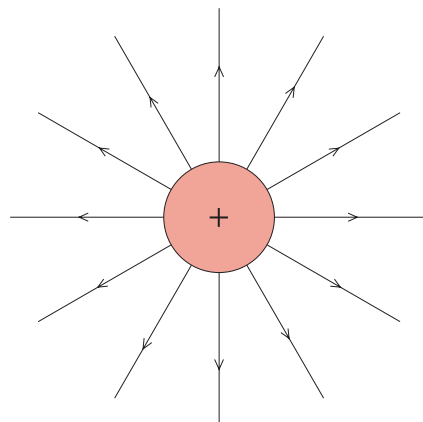
Slika 2.10 Električno polje v bližini nabitih kroglic, od katerih ima ena trikrat tolikšen naboj kakor druga.



Slika 2.11 Kako poiščemo silnico električnega polja.

Slika z vektorji postane nepregledna, če jo skušamo preveč zgostiti ali če vektorji segajo drug čez drugega. V prostoru med nabitimi telesi, kjer ni drugega naboja, si lahko pomagamo drugače. V izbrani točki prostora narišemo le smer polja (slika 2.11). V tej smeri se pomaknemo nekoliko naprej in zarišemo novo smer. Postopek nadaljujemo. S tem dobimo lomljeno črto, ki preide v gladko krivuljo, če so koraki dovolj majhni. Tako konstruiramo *silnico električnega polja*. Iz konstrukcije vidimo, da tangenta na silnico povsod kaže smer polja.

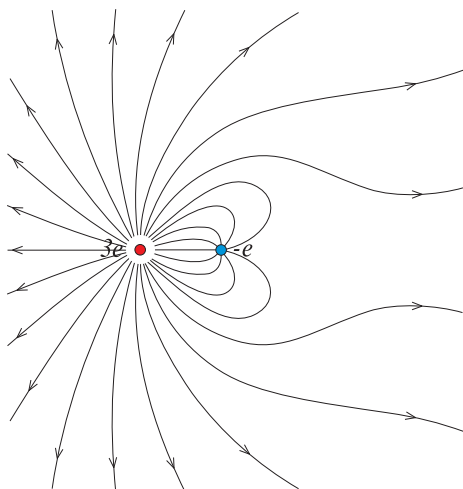
S konstrukcijo silnice lahko začnemo kjerkoli v polju. Navada pa je, da začnemo ob pozitivno nabitih telesih. Domenimo se še, da začnemo risati silnice tako, da je njihova gostota sorazmerna z jakostjo električnega polja. Ob enakomerno nabiti krogli je jakost električnega polja ob vsem površju po velikosti enaka, zato nanizamo silnice enakomerno. Slika 2.12 kaže silnice v meridianski ravnini enakomerno nabite krogle. Ker je električno polje radialno, so silnice ravne črte, ki izvirajo v pravokotni smeri s površja krogle in potekajo radialno navzven.



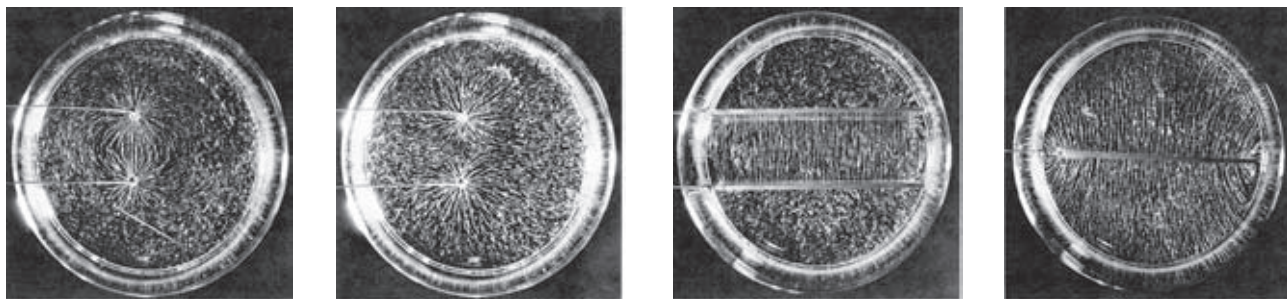
Slika 2.12 električne silnice v meridianski ravnini enakomerno nabite krogle

Silnice so najgostejše na površju krogle, dalj od krogle pa vse redkejše. Njihova gostota je obratno sorazmerna s kvadratom razdalje od središča krogle, saj so enakomerno porazdeljene po površju krogle, ki je koncentrična z nabito kroglo. Lahko zaključimo, da je gostota silnic, ki jih rišemo po omenjenem dogovoru, mera za jakost električnega polja. To lepo vidimo na sliki 2.13, ki kaže s silnicami predstavljeno polje s slike 2.10.

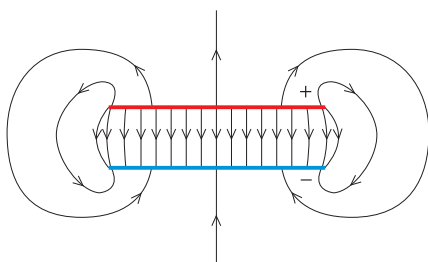
Ravninska polja lahko nazorno predstavimo. Nabita telesa postavimo v posodo z oljem, ki je dober izolator. Na olje natresemo travno seme ali koščke plastične niti. Ti podolgasti predmeti se v električnem polju zasučejo v smer polja. Tako lahko nazorno sledimo silnicam, ki si jih mislimo v prostoru med nabitimi telesi.



Slika 2.13 s silnicami predstavljeno električno polje s slike 2.10



a) b) c) č)
Slika 2.14 slike električnih polj v nekaj značilnih primerih



Slika 2.15 silnice električnega polja med ploščama kondenzatorja

Slika 2.14 kaže električne silnice v nekaj značilnih zgledih. Sliki 2.14a in 2.14b ponazarjata električno polje v ravnini, pravokotni na vzporedni žici. V primeru a) sta žici nabiti z nasprotnim nabojem, v primeru b) pa z enakim nabojem. Slika 2.14c ponazarja električno polje med ploščama kondenzatorja, slika 2.14č pa polje v okolici nabite plošče.

V polju med ploščama kondenzatorja so zrnca postavljena pravokotno na plošči in vzporedna, kar kaže, da je smer električnega polja med ploščama konstantna. Z merjenjem bi se lahko prepričali, da je tam konstantna tudi jakost električnega polja. Pravimo, da je polje *homogeno*. Slika 2.15 je ponazoritev tega polja s silnicami. Kjer je polje homogeno, so silnice vzporedne in enakomerno posejane. Na robu plošč se ukrivijo in razredčijo.

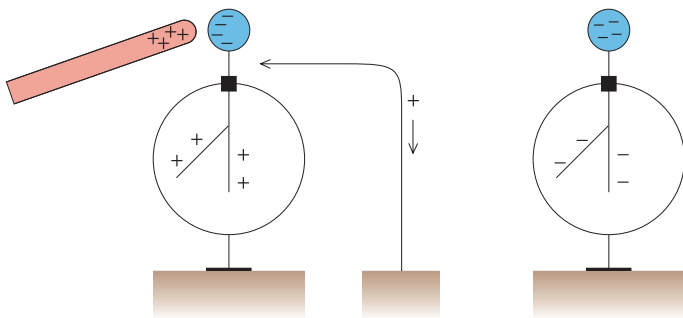
ELEKTRIČNO POLJE V SNOVI

Snov sestavljajo delci, ki nosijo električni naboj. V atomih so pozitivna jedra in negativni elektroni. Navzven niti atomi niti snov, ki jo sestavljajo, navadno ne kažejo električnega naboja, kar pomeni, da se pozitivni in negativni naboj natanko izravna. Na električno naravo snovi pa opozarjajo pojavi, kakor je nabijanje s trenjem pri dotiku različnih snovi, električni tok in podobno.

V električnem polju, ki prodre v snov, delujejo električne sile tudi na gradnike snovi. Delci s pozitivnim nabojem se premaknejo glede na delce z negativnim nabojem, kar ima za posledico, da se električno polje v telesih in v njihovi okolici spremeni. Kar nastane, je posledica polja zunanjih in notranjih nabojev.

Najbolj izrazit je pojav pri kovinah. Električno polje, ki prodre v kovino, povzroči gibanje elektronov, ki traja, dokler električno polje v kovini ne izgine. Na površju, po katerem električno polje vstopa v kovino, se nabere presežek negativnega naboja, na površju, iz katerega polje izstopa, pa presežek pozitivnega naboja. Električno polje tega naboja se s prvotnim poljem sestavi tako, da je zunaj kovine električno polje pravokotno na površje, znotraj pa polja ni. Pojav imenujemo *influenca*.

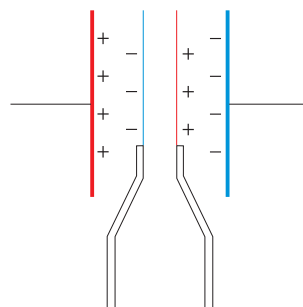
Pojav lepo prikažemo s poskusom. Bučki elektroskopa približamo nabito plastično palico. Kazalec elektroskopa se odkloni in s tem pokaže, da je prej nevtralni kovinski del s kazalcem sedaj nabit, ker je



Slika 2.16 prikaz influence z elektroskopom

del naboja odtekel v bučko, kamor ga je pritegnilo električno polje palice. Ko palico odmaknemo, se kazalec vrne v prvotno lego. Nabiti notranji del elektroskopa lahko razelektrimo z dotikom z ozemljeno žico. Ko nato palico odmaknemo, se naboj z bučke razleze po notranjosti. Elektroskop tako naelektrimo z nasprotnim nabojem, kakor ga ima palica (slika 2.16).

* Še nazornejši je tale poskus: V homogeno električno polje med vzporednima nabitima ploščama vtaknemo vzporedno s ploščama staknjena kovinska loparja in ju v polju rahlo razmaknemo. Z merilnikom naboja pokažemo, da je na loparjih sedaj nasprotno enak naboj, ki je enako gost, kakor na ploščah samih. Le tako je mogoče, da je električno polje v loparjih in med njima enako nič (slika 2.17).



Slika 2.17 influencia v polju kondenzatorja

V izolatorjih ali *dielektrikih*, kakor jim pravimo, je zaradi premika nabojev v molekulah električno polje šibkejše, kakor bi bilo samo polje zunanjih nabojev.

* ELEKTRIČNI PRETOK

Slika električnega polja s silnicami nas spominja na sliko tekočinskega toka s tokovnicami. Po analogiji s *prostorninskim tokom* vpeljemo novo količino, *električni pretok* Φ_e , ki je sorazmeren s produktom jakosti električnega polja in velikosti ploskve, ki je postavljena pravokotno na smer polja (slika 2.18) :

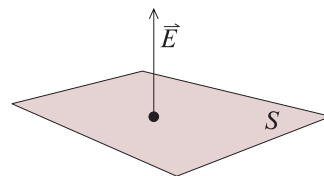
$$\Phi_e = \varepsilon_0 E S ,$$

kjer je ε_0 že znana influenčna konstanta.

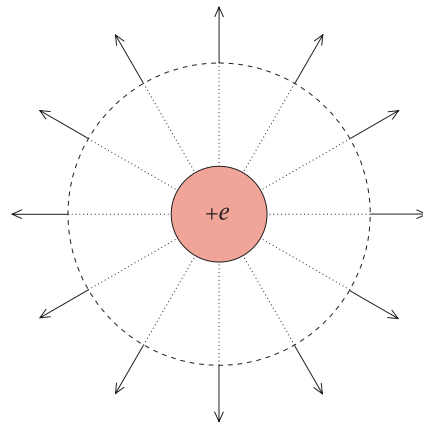
Če se polje po ploskvi spreminja, izračunamo pretok tako, da si ploskev v mislih razdelimo na tako majhne dele, da je na vsakem električno polje homogeno. Če ploskev ni pravokotna na smer polja, pri računanju pretoka upoštevamo le pravokotno komponento jakosti električnega polja.

Izračunajmo električni pretok skozi kroglo, ki je koncentrična z enakomerno nabito kroglo z nabojem e (slika 2.19). Električno polje je povsod pravokotno na površje krogle in po velikosti konstantno. Tako lahko izračunamo

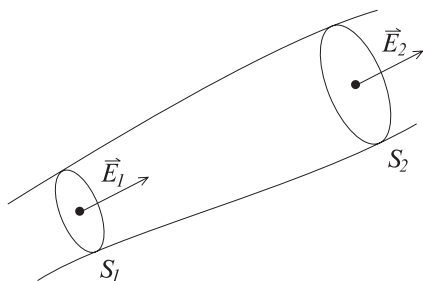
$$\Phi_e = \varepsilon_0 E S = \varepsilon_0 \frac{e}{4 \pi \varepsilon_0 r^2} 4 \pi r^2 = e .$$



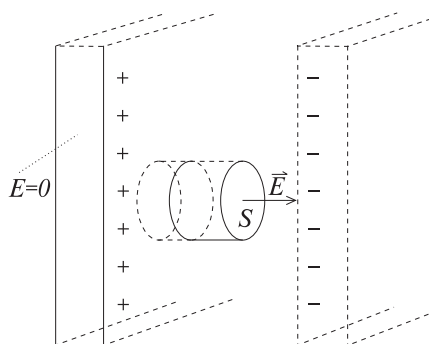
Slika 2.18



Slika 2.19



Slika 2.20 Pretok po tokovni niti je konstanten.



Slika 2.21

? Kolikšna gostota naboja se influencira na kovinski plošči, ki jo postavimo v električno polje z jakostjo 1000 V/m pravokotno na silnice?

Kolikšna je jakost električnega polja znotraj enakomerno nabite kovinske krogle?

Električni pretok je torej enak naboju na nabiti krogli, nič pa ni odvisen od tega, s kolikšno kroglo jo objamemo.

Ugotovitev je poseben zgled za *izrek o električnem pretoku*, ki pravi, da je električni pretok skozi zaključeno ploskev enak objemu naboju. Pri tem štejemo, da je električni pretok, ki izhaja iz zaključene ploskve, pozitiven, električni pretok, ki teče v ploskev, pa negativen. Tudi objeti naboj je lahko pozitiven ali negativen.

* Zamislimo si *tokovno nit* v električnem polju in jo objemimo z zaključeno ploskvijo, ki jo tvorijo plašč tokovne niti in ploskvici, ki sta pravokotni na silnice (slika 2.20). Če znotraj te ploskve ni naboja, je električni pretok, ki izstopa, enak pretoku, ki vstopa. Sledi, da je električni pretok po tokovni niti konstanten, če v njej ni naboja. Spomnimo se podobne ugotovitve za prostorninski ali masni tok po tokovni niti v tekočinskem toku.

Oglejmo si, kaj nam izrek o električnem pretoku pove o jakosti električnega polja med razsežnima ploščama ploščatega kondenzatorja, na katerem je naboj enakomerno nanešen na notranji strani plošč. Na sliki 2.21 je narisana presek zaključene valjaste ploskve, ki nam rabi pri računanju. Os valja in plašč sta pravokotna na ploščo. Ena od osnovnih ploskev je znotraj plošče, druga pa je med ploščama in je vzporedna z njima. Ker znotraj plošče ni električnega polja, je pretok skozi površje valja enak pretoku skozi osnovno ploskev, ki je med ploščama. Enak je naboju na objetem delu plošče:

$$\epsilon_0 E S = e .$$

Iz tega sledi, da je jakost električnega polja med ploščama enaka

$$E = \frac{e}{\epsilon_0 S} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} ,$$

če s $\sigma = e/S$ označimo *gostoto naboja*. Enaka je zveza med jakostjo električnega polja in gostoto naboja ob poljubnem nabitem kovinskem površju ali pa ob kovinskem površju, v katero ponika polje. O tem se ni težko prepričati. Valj, ki nam rabi za računanje električnega pretoka, postavimo pravokotno na ploskev. Ena osnovna ploskev je tik nad površjem kovine, druga pa pod njim.

ELEKTRIČNA POTENCIALNA ENERGIJA

Nabitim telesom v električnem polju pripišemo *električno potencialno energijo*. Ta ima enake lastnosti kakor težnostna ali gravitacijska potencialna energija, ki jo poznamo iz mehanike.

Mislimo si pozitivno nabito telo, ki miruje v električnem polju pozitivno nabitega telesa. Električno silo na to telo tedaj uravnoveša druga zunanja sila. Če ta preneha delovati, se začne telo pospešeno gibati, pri tem pa mu narašča kinetična energija. Po analogiji z gibanjem teles ob zemeljskem površju trdimo, da gre povečanje kinetične energije na račun električne potencialne energije. Vsota električne potencialne

? Ponovite poglavje o težnostni potencialni energiji. Primerjajte ohranitev energije pri prostem gibanju nabitih teles v električnem polju z ohranitvijo energije pri prostem gibanju teles v težnem polju!

energije in kinetične energije telesa je pri tem konstantna, podobno kakor je konstantna vsota težnostne potencialne energije in kinetične energije pri prostem gibanju po težnem polju.

Kako določimo električno potencialno energijo? Telo jo pridobi, ko ga prenesemo v izbrano točko v električnem polju z mesta, kjer je električna potencialna energija enaka nič. Če je telo med prenosom v ravnovesju, pomeni, da ves čas uravnovešamo električno silo, je potencialna energija ravno enaka delu, ki ga opravimo. To delo pa lahko naprej izrazimo kot negativno delo električne sile, ki deluje na telo med prenosom, ali negativno *električno delo*. Tako izražena električna potencialna energija je neodvisna od načina premikanja:

$$W_e = -A_e .$$

O mestu, kjer je potencialna energija enaka nič, se moramo dogovoriti. Spomnite se podobnega dogovora pri obravnavi težnostne potencialne energije!

Določimo za zgled električno potencialno energijo pozitivno nabitega telesa v homogenem električnem polju z jakostjo E med ploščama kondenzatorja. Vzemimo, da prenesemo telo z nabojem e z negativne plošče, kjer naj bo potencialna energija enaka nič, vzdolž silnice v razdaljo x od negativne plošče (slika 2.22). Električna sila $F = eE$ pri tem opravi delo

$$A_e = -Fx = -eEx ,$$

tako da je električna potencialna energija

$$W_e = -A_e = eEx .$$

Potencialna energija ni odvisna od poti, saj je delo od začetne do končne točke vselej enako. Vsako pot si namreč lahko razdelimo na odseke, ki potujejo vzdolž silnic, in odseke, pravokotne na silnice. Električna sila opravlja delo le pri premikih vzdolž silnic, pri premikih pravokotno na silnice pa ne (slika 2.23).

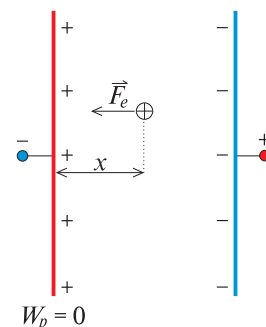
Pogostejše kakor potencialna energija sama nas zanimajo njene spremembe. Do njih pride, ko se telo premika po električnem polju. Tudi spremembo potencialne energije izračunamo kot negativno delo električnih sil pri premiku po električnem polju:

$$\Delta W_e = -A_e .$$

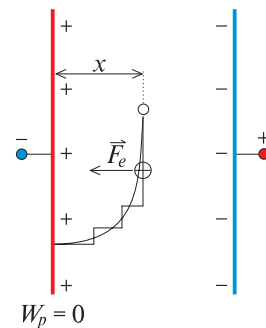
Potencialna energija nabitega telesa v električnem polju je sorazmerna z nabojem telesa. Kvocient med potencialno energijo in nabojem

$$\frac{W_e}{e}$$

pa je odvisen le od električnega polja in od lege telesa v polju. Imenujemo ga *potencial*. Običajno ga zaznamujemo s simbolom φ . Poten-



Slika 2.22 Električna sila opravlja delo pri premiku nabitega telesa vzdolž silnic.



Slika 2.23 Električno delo ni odvisno od poti.

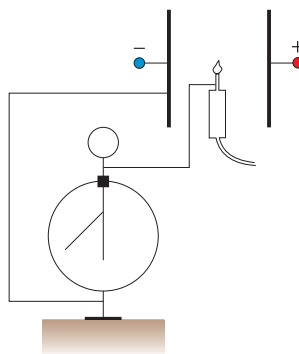


Slika 2.24 Vsakič, ko srce utripne, se spremeni električni potencial na njegovi površini. Te spremembe zaznajo elektrode, ki jih pritrdimo na kožo. Ojačeni signal (EKG) gleda zdravnik na zaslonu.

? Prepričajte se, da je ta enota enakovredna enoti N/As, ki smo jo uporabljali doslej!

? Kolikšen je potencial v notranjosti kovinskih teles? Spomnite se, da v kovinah z mirujočim nabojem ni električnega polja.

Slika 2.25 merjenje potenciala med ploščama kondenzatorja



cialno energijo nabitega telesa v električnem polju izrazimo tedaj kot produkt med nabojem telesa in potencialom na mestu telesa:

$$W_e = e \varphi .$$

Potencial navadno izražamo z novo električno enoto, *voltom* (V). Iz definicije potenciala sledi, da je

$$[\varphi] = \frac{[W_e]}{[e]} = \frac{J}{As} = V \text{ (volt)} .$$

Z novo enoto pogosto izražamo tudi potencialno energijo in električno delo: namesto joula uporabimo VAs.

V ploščatem kondenzatorju je:

$$\varphi = E x .$$

Iz te zveze dobimo tudi novo enoto za jakost električnega polja, V/m:

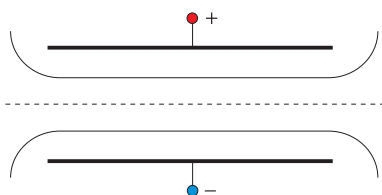
$$[E] = \frac{[\varphi]}{[x]} = \frac{V}{m} .$$

Potencial med ploščama kondenzatorja lahko izmerimo z elektroskopom, ki nam rabi za *statični voltmeter*. Z enim priključkom ga povežemo z negativno ploščo, na kateri naj bo potencial nič, z drugim priključkom pa s tanko kovinsko iglo, ki jo postavimo na izbrano mesto v polju (slika 2.25). Da se na igli ne nabere influencirani naboj, napeljemo skoznjo gorilni plin in ga zažgemo, da gori z majhnim plamenom. Pripravo imenujemo *plamenska sonda*. Z njo se prepričamo, da je potencial med ploščama res odvisen le od razdalje od negativne plošče.

Vse točke z enakim potencialom ležijo na ploskvah, ki jih imenujemo *ekvipotencialne ploskve*. Po njih lahko premikamo nabita telesa, ne da bi opravljali delo, saj so povsod pravokotne na silnice. Ekvipotencialne ploskve so npr. kovinska površja, na katerih miruje naboj.

Pri kondenzatorju sta dve izmed ekvipotencialnih ploskev površji plošč. Med ploščama so ekvipotencialne ploskve ravnine, ki so vzporedne s ploščama, ob robu plošč pa se ukrivijo (slika 2.26). Njihovemu poteku lahko sledimo tudi zunaj plošč.

S statičnim voltmetrom, ki ga vključimo med dve plamenski sondi, merimo razliko potencialov na izbranih mestih. Imenujemo jo *napetost* in označujemo s simbolom *U*. Tudi to izražamo v voltih.



Slika 2.26 ekvipotencialne ploskve v kondenzatorju

Napetost med točkama v električnem polju kondenzatorja je odvisna le od razlike med razdaljama teh točk od negativne plošče:

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = E (x_2 - x_1) .$$

Ko govorimo o napetosti med ploščama kondenzatorja, imamo v mislih potencialno razliko med pozitivno in negativno ploščo, to je

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 = E d .$$

To zvezo bomo kasneje še velikokrat uporabljali.

Dejavnost S statičnim voltmetrom izmerite potek potenciala v bližini nabite krogle in v okolici nabitega kondenzatorja! Kako potekajo ekvipotencialne ploskve?

* Zamislimo si, da prenesemo telo z nabojem e po električnem polju po krožni poti nazaj v začetno točko. Ker je električna potencialna energija telesa odvisna le od lege v električnem polju, je njena sprememba pri tem enaka nič. Izrazimo skupno spremembo potencialne energije kot vsoto sprememb na posameznih odsekih poti, te pa z ustreznimi napetostmi:

$$\Delta W_e = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \dots + \Delta W_n = e (U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n) = 0 .$$

Tako kakor skupna sprememba potencialne energije, je tudi vsota napetosti po sklenjeni poti enaka nič.



Slika 2.27 V mirnem vremenu je na zemeljskem površju navpično navzdol usmerjeno električno polje z jakostjo okoli 100 V/m. Proti vrhu atmosfere se jakost polja zmanjšuje. Med površjem in ionosfero v višini 50 km je napetost okoli 400 kV. Tudi strele ob nevihtah so posledica električnih pojavov v ozračju.

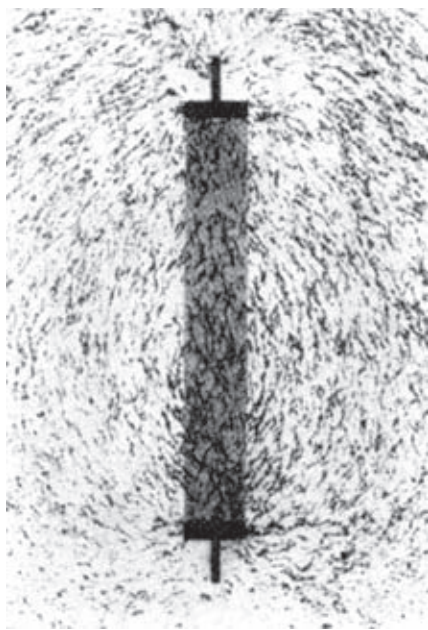
? Pokażite, da lahko razliko potencialnih energij nabitega telesa med dvema mestoma v električnem polju izrazimo z napetostjo med tema mestoma:

$$\Delta W_e = e U .$$

? *Primerjajte spremembo potencialne energije pri krožni poti v električnem polju s spremembo potencialne energije pri krožni poti v težnem polju!

3. ELEKTRIČNI KROGI

ELEKTRIČNO POLJE V PREVODNIKIH



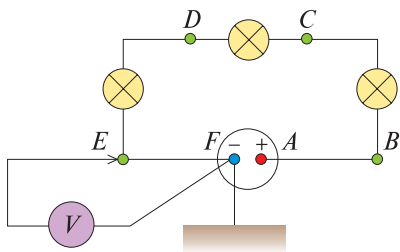
Slika 3.1 slika električnega polja ploskega vodnika s tokom

V prevodnikih, po katerih teče električni tok, je električno polje. O tem se prepričamo z naslednjim poskusom. Na očiščeno stekleno ploščo zarišemo s prozornim tušem širok trak, ki naj predstavlja odsek vodnika. Ko se tuš osuši, priključimo zarisani trak na generator. Občutljiv ampermeter, ki ga priključimo zaporedno s trakom in generatorjem, pokaže, da teče po krogu majhen tok. Potresimo zarisani trak s travnim semenom ali položimo nanj posodico, v kateri je tanka plast ricinusovega olja, ki ga potresemo s semenom. Seme nad trakom se zasuče tako, da je vzporedno z osjo, kar kaže, da je v traku električno polje, vzporedno z osjo traku. Tudi v okolici traku se seme uredi, iz česar sklepamo, da se električno polje razteza tudi tja (slika 3.1).

Polje v vodniku nastane, ko sklenemo električni krog. S slike sklepamo, da je električno polje v vodniku *homogeno*. Usmerjeno je od pozitivnega k negativnemu priključku generatorja.

V električnem polju znotraj vodnika deluje na pozitivni naboj sila v smeri polja, to je od pozitivnega k negativnemu priključku generatorja. Na negativni naboj deluje sila v nasprotni smeri. Gibljiv naboj dobi komponento hitrosti vzdolž vodnika – dobimo električni tok. Spomnimo se, da je smer gibanja pozitivnega naboja v električnem toku od pozitivnega k negativnemu priključku generatorja, torej v smeri električnega polja v vodnikih, smer gibanja negativnega naboja pa je tej nasprotna.

Poglejmo, kako je s potencialom in z napetostmi v električnem krogu, po katerem teče električni tok!



Slika 3.2 merjenje potenciala v električnem krogu

Sestavimo električni krog iz generatorja – baterije in nekaj porabnikov – žarnic in veznih žic. Po dogovoru merimo potencial glede na negativni priključek generatorja. Ta priključek mnogokrat tudi *ozemljimo*, kar pomeni, da ga povežemo z vodnikom, ki sega v tla. Merili bomo z *voltmetrom*. Namesto statičnega lahko uporabimo kar navadni voltmeter, saj sedaj ne moti, če teče skozenj majhen tok. Negativni priključek voltmetra povežemo z negativnim priključkom generatorja, pozitivni priključek voltmetra pa z izbranimi mesti v krogu (slika 3.2). Voltmeter, ki kaže potencialno razliko ali napetost med svojima sponkami,

kaže v tem primeru kar potencial v izbranih točkah, saj smo za negativni priključek generatorja izbrali potencial nič.

Slika 3.3 kaže potek potenciala po opisanem krogu. Ko se premikamo po krogu od pozitivnega priključka generatorja v smeri toka, potencial pada. Po veznih žicah se padec potenciala komaj kaj pozna, skoraj ves padec je na porabnikih. Pri prehodu z negativnega na pozitivni priključek generatorja se potencial spet poveča na začetno vrednost.

Izmerimo še napetosti na delih kroga. Prepričamo se lahko, da se napetosti seštevajo. Tako je vsota napetosti med točkama A in B in napetosti med točkama B in C enaka napetosti med točkama A in C:

$$U_{AB} + U_{BC} = U_{AC}.$$

Ko obidem ves krog v istem smislu in seštejemo vse napetosti, ugotovimo, da je njihova vsota enaka nič. Tako tudi mora biti, saj predstavlja vsota napetosti po sklenjenem krogu napetost med začetno in končno točko, ki pa sta v tem primeru enaki (slika 3.3). To spoznanje velja za drugi osnovni zakon o električnih krogih. Imenuje se *II. Kirchhoffov zakon*. S simboli ga zapišemo v obliki

$$\sum U = 0.$$

Vidimo, da velja za sklenjene poti po električnih krogih enaka zakonitost kakor za sklenjene poti v statičnem električnem polju.

Dejavnost Sestavite električni krog z več razvejišči in se z merjenjem prepričajte o veljavnosti II. Kirchhoffovega zakona.

ELEKTRIČNO DELO IN ELEKTRIČNA POTENCIALNA ENERGIJA NABOJA V ELEKTRIČNEM KROGU

Električno delo, ki ga sprejme porabnik, izračunamo kot produkt napetosti U in pretočenega naboja $e = It$:

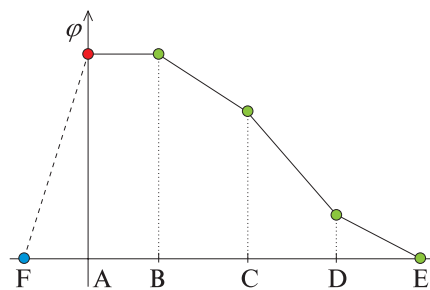
$$A_e = Ue = UIt.$$

Od tod določimo še električno moč, to je kvocient med delom in zanj porabljenim časom:

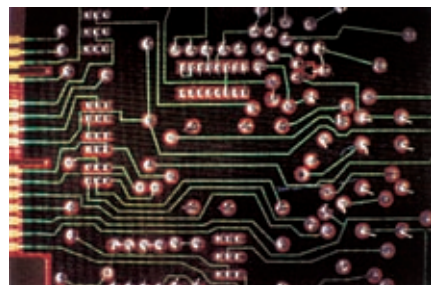
$$P = \frac{A_e}{t} = UI.$$

Poglejmo še, kaj je z energijo pretakajočega se naboja. Vzemimo, da je naboj pozitiven; to pomeni, da teče tako kakor tok, od pozitivnega priključka generatorja k negativnemu priključku. Na pozitivnem priključku generatorja, kjer je potencial največji, ima naboj največjo potencialno energijo. V smeri padajočega potenciala se mu potencialna energija zmanjšuje. Iz poteka potenciala sledi, da je zmanjšanje po veznih žicah neznatno; skoraj vso potencialno energijo izgubi naboj v porabnikih. Izgubljeno potencialno energijo naboja prejmejo porabniki kot električno delo. Po energijskem zakonu je tedaj

$$A_e = -\Delta W_e$$

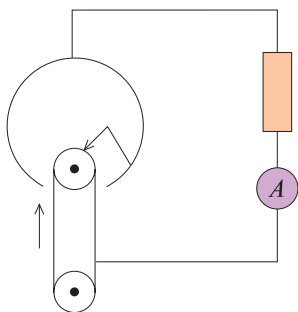


Slika 3.3 potek potenciala v električnem krogu s prejšnje slike

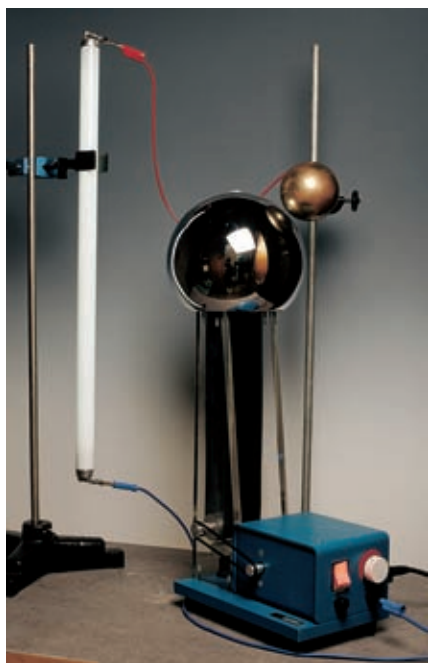


Slika 3.4 Vezja na sliki ne moremo preprosto poenostaviti na vzporedne in zaporedne ve-zave, zagotovo pa ga lahko analiziramo s Kirchhoffovimi pravili.

? Opazujmo električni krog v *stacionarnem* stanju, ko se razmere s časom ne spreminjajo. Grelci, vključeni v krog, tedaj oddajajo toploto, žarnice svetlobo, elektromotorji delo – vse po zaslugi *električnega dela*, ki ga v krog pošilja generator. Generator lahko opravlja električno delo zaradi svoje notranje energije ali pa zaradi sprejetega dela, toplote ali svetlobe.



Slika 3.5 električni krog z Van de Graafvim generatorjem



Slika 3.6 Van de Graafov generator in fluorescenčna cev

oziroma $|A_e| = |\Delta W_e|$, če nas zanimajo samo velikosti. Izgubljeno potencialno energijo dobi naboj nazaj pri vnovičnem prehodu skozi generator.

Za zgled si oglejmo električni krog, ki ga sestavljajo Van de Graafov elektrostatični generator in tlivka – z razredčenim plinom napolnjena cev. Naboj pridobi potencialno energijo z delom, ki ga opravi motor, ko premika nabiti trak, izgubi pa jo pri prehodu skozi tlivko, ki ob tem sveti (slika 3.5).

Spremembe v električnem krogu si lahko ponazorimo s spremembami na urejenem smučišču, kjer se smučarji nikjer ne nabirajo. Od zgornje postaje vlečnice se smučarji spuščajo po skoraj vodoravnem delu smučišča do strmine. Po njej vijugajo skoraj do višine spodnje postaje, nakar se spustijo po skoraj vodoravnem delu do sider, ki jih ponovno dvignejo na vrh. Z energijskega stališča je slika takale: skoraj brez izgube potencialne energije se spustijo smučarji od zgornje postaje vlečnice do strmine. Pri vijuganju navzdol, ko razrivajo smučišče, se jim zmanjšuje potencialna energija, nato se skoraj brez izgub spustijo do spodnje postaje vlečnice, ki jih ponovno potegne na hrib in jim s tem povrne izgubljeno potencialno energijo (slika 3.7).

Po prehodu celega kroga je skupna sprememba potencialne energije naboja nič: na porabnikih izgubljena potencialna energija je po velikosti enaka v generatorju pridobljeni

$$(\Delta W_e)_{\text{porabniki}} = (\Delta W_e)_{\text{generator}} .$$

Naj se pretoči po krogu naboj e . Izguba njegove potencialne energije v porabniku je enaka produktu naboja in napetosti na porabniku. Če je porabnikov več, je treba v produktu upoštevati vsoto napetosti oziroma skupno potencialno razliko:

$$(\Delta W_e)_{\text{porabniki}} = e (\sum U)_{\text{porabniki}} .$$

Tudi spremembo potencialne energije v generatorju izrazimo na enak način:

$$(\Delta W_e)_{\text{gen}} = e U_{\text{gen}} ,$$

kjer je U_{gen} napetost na sponkah generatorja. Ker je pretočeni naboj po vsem krogu enak, sledi, da je

$$(\sum U)_{\text{porabniki}} = U_{\text{gen}}$$

ali, z besedami: vsota napetosti na porabnikih je enaka napetosti na generatorju. Enačba izraža II. Kirchhoffov zakon za posebni primer, ko je v krog vključen generator. Če je v krogu več generatorjev, moramo na desni strani enačbe upoštevati vsoto vseh njihovih napetosti. Predznak napetosti določimo glede na to, ali se potencialna energija naboja pri prehodu skozi generator v izbrani smeri poveča ali pomanjša.

Po opravljeni poti po krogu je potencialna energija naboja takšna kakor na začetku, celotna sprememba potencialne energije je torej nič.



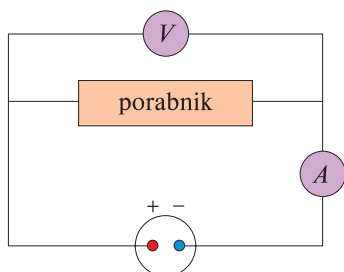
? Kako si ustrezajo posamezni deli smučišča in deli električnega kroga?

Slika 3.7 Smučišče je energijsko analogno električnemu krogu.

Pri prehodu skozi porabnike se naboju potencialna energija zmanjša, pri prehodu skozi generatorje pa se lahko poveča ali zmanjša. V prvem primeru generator delo oddaja, v drugem primeru pa ga prejema. Generatorjem, ki smo jih spoznali doslej, se pri tem spreminja notranja energija.

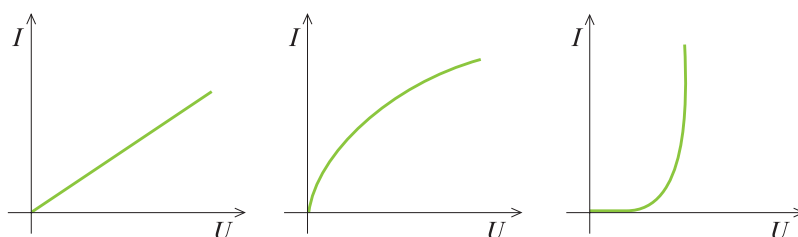
4. ZVEZA MED TOKOM IN NAPETOSTJO

OHMOV ZAKON



Slika 4.1 Vezje, ki ga uporabimo pri raziskavi zveze med tokom in napetostjo.

Slika 4.2 karakteristika upornika, žarnice in diode



Pri upornikih sta napetost in tok premo sorazmerna. To spoznanje, ki ga poznamo kot *Ohmov zakon*, navadno zapišemo z enačbo

$$U = R I ,$$

kjer sorazmernostni koeficient R imenujemo *upor*¹. Iz enačbe razberemo enoto za upor:

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{\text{V}}{\text{A}} = \text{ohm } (\Omega) .$$

Slika 4.3 kaže nekaj upornikov, ki jih najdemo v elektronskih vezjih. Upor teh upornikov je standardiziran in ga največkrat razberemo po barvnih oznakah.



Slika 4.3 uporniki

Pri prehodu upornika se naboju zmanjša potencialna energija, upornik pa prejema električno delo. Zato se upornik greje ali pa oddaja toploto, če poskrbimo za hlajenje tako, da je njegova temperatura konstantna. Ko se pretoči skozi upornik naboj $e = It$, je prejeto električno delo

$$A_e = U e = U I t$$

¹ O uporah govorimo tudi pri drugih porabnikih. Izračunamo ga kot kvocient med napetostjo in tokom $R = U/I$. Tako določen upor je lahko pri vsaki napetosti drugačen.

in s tem toplotni tok

$$P = \frac{A_e}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

To količino pogosto imenujemo tudi *Joulov toplotni tok*.

Joulov toplotni tok oddajajo vsi deli električnih naprav, po katerih teče električni tok, zlasti pa uporniki. Uporniki, ki morajo oddajati večji toplotni tok, so večji, da bi bilo hlajenje bolj učinkovito. Standardni uporniki so narejeni za moči (1/16) W, (1/8) W in tako naprej. Da se naprave ne bi preveč segrele, jih hladimo z ventilatorji.

Vezava upornikov. Upornike povezujemo zaporedno in vzporedno in dobimo tako kombinacije z različnimi upori (slika 4.4). Spomnimo se, da je skupni upor zaporedno vezanih upornikov enak vsoti uporov:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots,$$

recipročna vrednost skupnega upora vzporedno vezanih upornikov pa je enaka vsoti recipročnih uporov:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

* UPOR AMPERMETRA IN VOLTMETRA

Spoznali smo že, da merimo jakost električnega toka z *ampermetri*, napetost pa z *voltmetri*. Za merjenje toka moramo električni krog na izbranem mestu prekiniti in vanj zaporedno vključiti ampermeter, za merjenje napetosti pa moramo med izbrani točki v krogu vzporedno priključiti voltmeter. S tem seveda zmotimo električni krog. Motnja je odvisna od upora ampermetra oziroma voltmetra. Želimo si, da bi bil upor ampermetra čim manjši, upor voltmetra pa čim večji. Idealen ampermeter bi bil brez upora, idealen voltmeter pa bi imel neskončen upor. Medtem ko ampermetrovi brez upora ni in merjenje toka vedno predstavlja motnjo, je pri merjenju napetosti z voltmetrom z dovolj velikim uporom ali celo s *statičnim voltmetrom* motnja zanemarljiva.

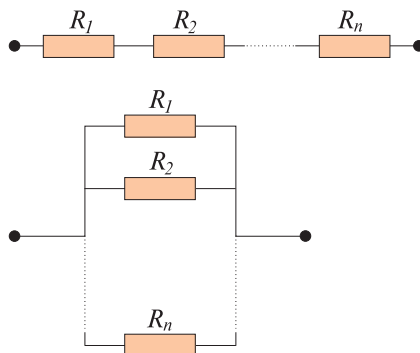
Najbolj poznani so kazalčni ampermetri in voltmetri. Njihov osnovni del je instrument na vrtljivo tuljavico – *mikroampermeter*. Tipično je upor instrumenta $R_0 = 1000 \, \Omega$ in kaže poln odklon pri toku $I_0 = 100 \, \mu\text{A}$. Tedaj je na instrumentu napetost $U_0 = I_0 R_0 = 100 \, \text{mV}$. Sam instrument lahko torej uporabljamo za merjenje tokov do $100 \, \mu\text{A}$ in za merjenje napetosti do $100 \, \text{mV}$. Merilno območje lahko spreminjamo z dodatnimi uporniki.

Naj bo tok I , ki ga želimo meriti, denimo $1 \, \text{mA}$, to je desetkrat tolikšen, kakor I_0 . Razliko $I - I_0$ speljemo po uporniku, ki ga vežemo vzporedno z instrumentom (slika 4.5). Iz Ohmovega zakona sledi, da je upor tega upornika enak $R_0/9$ ali v splošnem

$$R = \frac{R_0 I_0}{I - I_0} = \frac{R_0}{(I/I_0) - 1}.$$

? V kakem elektrotehniškem priročniku si oglejte vrste upornikov in barvne oznake upornikov. Poučite se tudi o zgradbi upornikov in o materialih, ki jih uporabljajo pri proizvodnji.

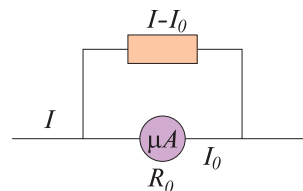
? Za kolikšno najmanjšo moč mora biti narejen upornik za $1000 \, \Omega$, ki ga priključimo na napetost $20 \, \text{V}$?



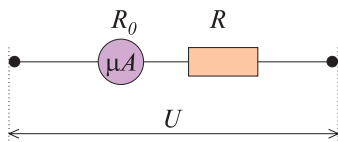
Slika 4.4 zaporedna in vzporedna vezava upornikov

? a) Pojasnite pravili o vezavi upornikov. Za osnovo vzemite, da je napetost med krajiščema verige upornikov enaka vsoti napetosti na posameznih upornikih in da je skupni tok po vzporedno vezanih upornikih enak vsoti tokov po posameznih upornikih. Tok in napetost po posameznih upornikih povezuje Ohmov zakon. Kaj se zgodi s skupnim uporom, če v verigo vključimo dodaten upornik, in kaj, če vzporedno vezanim upornikom dodamo še eno vejo? Premislite tudi, kako je z uporom pri različnih kombinacijah vzporednih in zaporednih vezav!

b)* Kakšna bi bila karakteristika $I(U)$ za vzporedno in za zaporedno vezana upornik in diodo?



Slika 4.5



Slika 4.6 vezava voltmetra

? Določite upore upornikov, s katerimi bi z zgornjim mikroampermetrom sestavili ampermeter za 1 A oziroma voltmeter za 100 V. Kolikšna bi bila upora ampermetra oziroma voltmetra?

? *Kako bi ocenili napako pri merjenju toka oziroma napetosti zaradi upora ampermetra oziroma voltmetra?

Skupni upor tako sestavljenega ampermetra je $R_0/10$ ali v splošnem $R_0 I/I_0$, v našem primeru $100\ \Omega$.

Naj bo U napetost, ki jo želimo meriti pri polnem odklonu instrumenta, denimo 1 V. Z upornikom, ki ga vežemo zaporedno z instrumentom, dosežemo, da teče tedaj po instrumentu največji dopustni tok I_0 (slika 4.6). Po Ohmovem zakonu sledi, da je upor tega upornika $9 R_0$ ali v splošnem

$$R = \frac{U}{I_0} - R_0 = \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) R_0.$$

Skupni upor tako sestavljenega voltmetra pa je $10 R_0$ ali v splošnem $R_0 U/U_0$, v našem primeru $10\ 000\ \Omega$.

SPECIFIČNI UPOR

Upor upornika je odvisen od velikosti, oblike in materiala, iz katerega je narejen. Vzemimo za zgled žico z dolžino l in s presekom S . Premislek pove, da je upor žice premo sorazmeren z dolžino in obratno sorazmeren s presekom¹:

$$R = \frac{\zeta l}{S}.$$

Koeficient ζ imenujemo *upornost* ali *specifični upor* in je značilna lastnost materiala. Iz enačbe razberemo enoto za specifični upor:

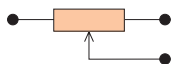
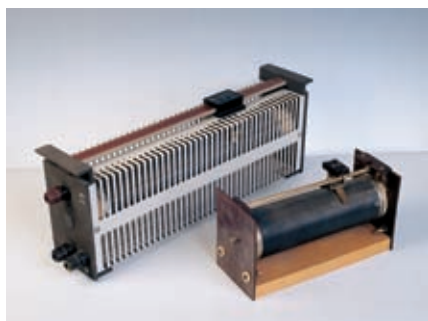
$$\text{ohm.m} = \Omega.\text{m}.$$

Pogosto najdemo tudi enoto

$$\frac{\text{ohm.mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega.\text{m},$$

ki jo radi uporabljajo v elektrotehniki, ker so preseki upornikov ponavadi podani v mm^2 .

Specifične upore nekaterih snovi kaže spodnja tabela.



Slika 4.7 drsna upornika in simbol, s katerim označujemo drsne upornike

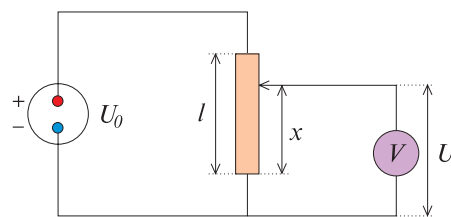
Snov	Specifični upor [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
Srebro	0,015
Baker	0,017
Aluminij	0,026
Železo	0,100
Konstantan	0,44 – 0,52
Cekas	1 – 1,2
Steklo	$10^{16} - 10^{20}$
PVC	10^{17}
Germanij, silicij	$10^{13} - 100$

¹ Uporniki na sliki 4.3 imajo neprevodno keramično jedro, na katero je nanesena tanka plast uporovnega materiala. Na koncih sta kovinski kapici z veznima žicama. Za upor sta pomembni dolžina uporovne plasti med kovinskima kapicama in njen prečni presek.

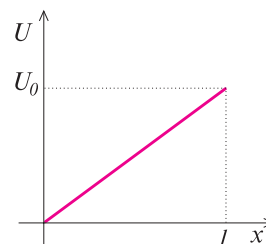
Specifični upor je odvisen od temperature. Pri kovinah narašča, pri polprevodnikih in izolatorjih pa pada z naraščajočo temperaturo. Temperaturno odvisnost upora izrabljajo za merjenje temperature. Med standardnimi termometri so *platinski uporovni termometri*. Zelo občutljivi so *termistorji*, to so uporniki, narejeni iz germanija, silicija ali kakih drugih polprevodniških materialov. Tako specifični upor kakor njegove temperaturne spremembe so odvisni od zgradbe snovi in od vrste delcev, ki so nosilci toka.

V elektronskih napravah najdemo *drsne upornike* s spremenljivim uporom, pri katerih izrabljamo sorazmernost med uporom in dolžino upornika. Upor med enim od priključkov upornika in drsnikom je sorazmerno z razdaljo od krajišča upornika do drsnika. Slika 4.7 kaže dva taka upornika. Na sliki je tudi simbol, s katerim jih označujemo.

Dejavnost Povežimo drsni upornik zaporedno z generatorjem, kakor kaže slika 4.8, in izmerimo napetost med enim od priključkov upornika in drsnikom. S slike 4.9 razberemo, da je napetost sorazmerna z razdaljo od krajišča upornika. Tako uporabljenemu drsnemu uporniku pravimo *potenciometer*. Kasneje bomo spoznali njegovo uporabo.



Slika 4.8 vezava potenciometra



Slika 4.9 napetost med drsnikom in enim krajiščem potenciometra

* JAKOST ELEKTRIČNEGA POLJA V VODNIKIH

Spomnimo se eksperimenta, s katerim smo pokazali, da je v vodnikih, po katerih teče tok, homogeno električno polje. Jakost električnega polja v vodniku z dolžino l , na katerem je napetost U , izračunamo po znani enačbi

$$E = \frac{U}{l},$$

ki jo smemo uporabiti za vsa homogena polja. V uporniku, za katerega velja Ohmov zakon, je jakost električnega polja sorazmerna s tokom, saj je

$$E = \frac{RI}{l} = \frac{\zeta I}{S}.$$

Izraz $I/S = j$ pomeni *gostoto toka* po uporniku. Tako dobimo končno

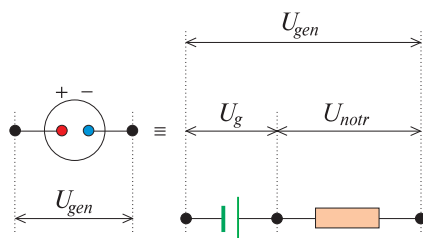
$$E = \zeta j.$$

V bakrenem vodniku, po katerem je gostota toka 10 A/mm^2 , je jakost električnega polja

$$E = \frac{0,017 \Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{10 \text{ A}}{\text{mm}^2} = 0,17 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

V grelni žici kuhalnika, ki je narejena iz cekasa z upornostjo $1 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, po kateri teče tok z enako gostoto, pa je

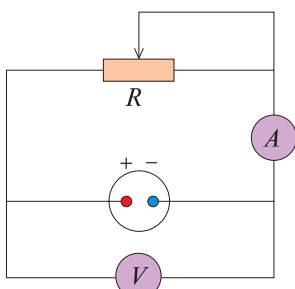
$$E = 10 \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$



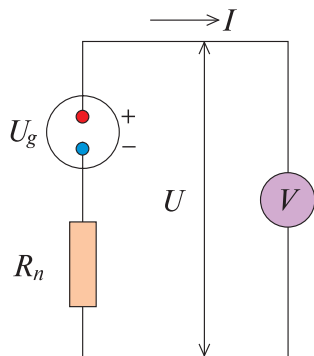
Slika 4.10 napetosti na generatorju

? Prepričajte se, da je napetost na sponkah kombinacije na sliki 4.10 res

$$U_{gen} = U_g - U_{notr} = U_g - R_n I .$$



Slika 4.11 merjenje karakteristike generatorja



Slika 4.13 merjenje napetosti na generatorju z voltmetrom

Slika 4.12 karakteristika generatorja

? Za kaj se porablja električna potencialna energija, ki jo naboj pridobi v generatorju v primeru kratkega stika? Kolikšna mora biti napetost na sponkah generatorja, če hočemo poganjati tok po generatorju v nasprotni smeri, kakor ga poganja sam? Tak je primer, ko “polnimo” akumulator.

* NOTRANJI UPOR IN GONILNA NAPETOST

Del potencialne energije, ki jo pridobi pri prehodu skozi generator, izgubi naboj že v generatorju. Zato vstopa v zunanji električni krog z manj potencialne energije, generator pa se greje ali oddaja toploto.

Spremembo potencialne energije naboja pri prehodu skozi generator, to je razliko potencialnih energij med pozitivnim in negativnim priključkom generatorja, zato zapišemo kot

$$(\Delta W_e)_{gen} = (\Delta W_e)_0 - (\Delta W_e)_{notr} ,$$

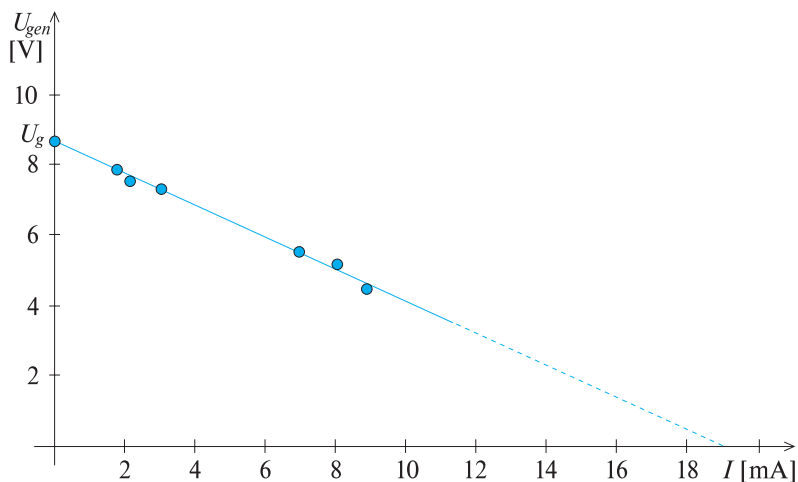
kjer pomeni $(\Delta W_e)_{gen}$ razliko med potencialnima energijama naboja na sponkah generatorja, $(\Delta W_e)_0$ spremembo potencialne energije naboja zaradi kemijskih in drugih sprememb v generatorju, $(\Delta W_e)_{notr}$ pa izgubo potencialne energije znotraj generatorja. Ko to izrazimo z napetostmi, dobimo:

$$U_{gen} = U_g - U_{notr} ,$$

kjer je U_{gen} napetost na sponkah generatorja, $U_g = (\Delta W_e)_0 / e$ gonilna napetost in U_{notr} padec potenciala znotraj generatorja. S poskusom pokažemo, da je ta padec sorazmeren s tokom:

$$U_{notr} = R_n I .$$

R_n imenujemo notranji upor generatorja. To je upor notranjih delov generatorja, po katerih teče električni tok. Generator v električnih shemah prikažemo kakor zaporedno povezavo “idealnega” generatorja z gonilno napetostjo U_g in upornika z uporom R_n (slika 4.10).



Gonilno napetost in notranji upor baterije določimo z eksperimentom, ki ga shematično kaže slika 4.11. Z voltmetrom z velikim uporom merimo napetost na sponkah generatorja, z ampermetrom pa tok, ki ga poganja generator po krogu. Spreminjamo ga s tem, da spreminjamo zunanji upornik z uporom R . Ko zmanjšujemo upor, se zmanjšuje napetost med sponkami generatorja. Graf na sliki 4.12 kaže merjenja z delno izrabljeno 9-voltno baterijo. S strmine dobljene premice razberemo notranji upor $R_n = 440 \, \Omega$, na napetostni osi, to je pri toku nič, pa

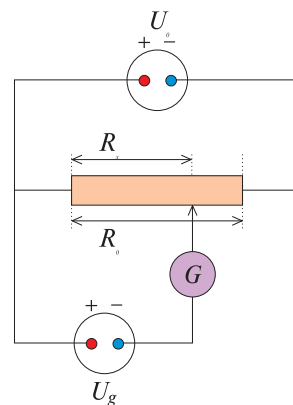
gonilno napetost $U_g = 8,5 \text{ V}$. Na tokovni osi razberemo še *kratkostični tok*, ki bi ga poganjal generator, ko bi njegovi sponki zvezali z debelo vezno žico. V našem primeru bi bil kratkostični tok 19 mA . To je le ocena, saj je delovanje baterije tedaj moteno. Kratek stik hitro uniči baterijo.

* Določimo gonilno napetost še neposredno. Lahko bi merili z voltmetrom (slika 4.13), vendar bi tudi v tem primeru zaradi toka namerili nekaj manjšo napetost od gonilne. Gonilno napetost bi lahko določili le s statičnim voltmetrom, po katerem ni toka.

Pomagamo pa si lahko tudi takole. Generator z neznano napetostjo priključimo na potenciometer, kakor kaže slika 4.14, in poiščemo z drsnikom lego, pri kateri po njem ni toka. Gonilno napetost tedaj izravnava napetost na odseku potenciometra med skupnim priključkom in drsnikom. V primeru, ki ga kaže slika 4.14, kjer je potenciometer priključen na znan generator z napetostjo U_0 , je neznan gonilna napetost enaka

$$U_g = \frac{U_0 R_x}{R} = \frac{U_0 x}{l}.$$

Pri bateriji na sliki 4.12 določimo na tak način gonilno napetost $U_g = 8,65 \text{ V}$.



Slika 4.14 kompenzacijsko merjenje napetosti

? Izpeljite enačbo z uporabo Kirchhoffovih zakonov! Izmerite gonilno napetost baterije za žepno svetilko!

* MERJENJE UPORA Z WHEATSTONOVIM MOSTOM

Podobno kakor napetost neznanega člena lahko s potenciometrom izravnamo napetost na neznanem uporniku. Neznani upornik vežemo zaporedno z znanim upornikom, oba skupaj pa vzporedno s potenciometrom (slika 4.15). Ko po občutljivem ampermetru, ki je priključen med drsnik in skupni priključek upornikov, ni toka, je napetost U na neznanem uporniku enaka napetosti na vzporednem odseku potenciometra:

$$U = IR = \frac{U_0 x}{l}.$$

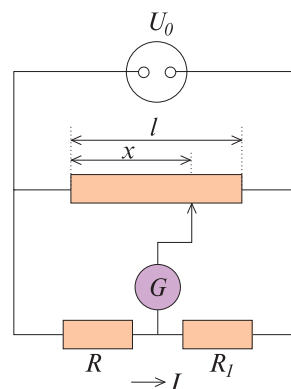
Po Ohmovem zakonu je tok I po neznanem uporniku enak

$$I = \frac{U_0}{R + R_l}.$$

S tem dobimo iz prejšnje enačbe neznani upor R :

$$R = R_l \frac{x/l}{1 - x/l}.$$

Vezje na sliki 4.15 imenujemo *Wheatstonov most* in ga uporabljamo za natančno merjenje uporov. Upor R_l izberemo tako, da je v ravnovesju drsnik blizu sredine potenciometra.



Slika 4.15 merjenje upora z Wheatstonovim mostom

Dejavnost Sestavite Wheatstonov most in z njim izmerite nekaj naključno izbranih upornikov, ki so vsi narejeni za enak upor. Kolikšna je zanesljivost zapisanih oznak?

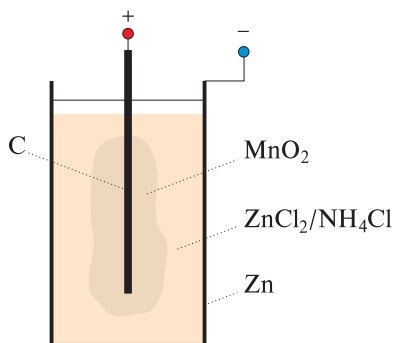
* Iste upornike izmerite še z univerzalnim instrumentom, na katerem s preklopnikom izberete merilno območje za upore. Ocenite natančnost. Poučite se o delovanju merilnika.

? Kolikšno je v ravnovesju razmerje uporov v vejah mostu?

5.* | GENERATORJI



Slika 5.1 električni avto poganja akumulator



Slika 5.2 baterijski člen

Generator ima v električnem krogu podobno vlogo kakor vlečnica na smučišču. Vlečnica vleče smučarje na vrh hriba in jim s tem podeli potencialno energijo. Pri tem opravljajo delo motorji vlečnice. Poglejmo, od kod generatorjem delo, ki je potrebno za dvig potencialne energije naboja.

Med generatorje štejemo *galvanske člene* ali *baterije*, *akumulatorje*, *sončne celice*, *termogeneratorje* in *dinamostroje*.

Dinamostroje bomo spoznali kasneje. Naša pozornost naj velja prvim trem naštetim.

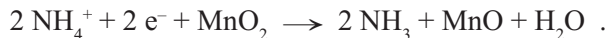
Med baterijami so najbolj razširjene *suhe baterije*. Vsi poznamo 1,5-voltna baterije, ki jih uporabljamo za napajanje prenosnih radijskih aparatov ali svetilk. Slika 5.2 kaže baterijo v prerezu.

Pozitivna elektroda je ogljena paličica, obdana s plastjo manganovega oksida MnO_2 , negativna elektroda pa je kar cinkova posodica. Prostor med elektrodama zapolnjuje pasta iz cinkovega klorida, ZnCl_2 , in amonijevega klorida, NH_4Cl .

Ko baterija poganja tok, se cink raztaplja in oddaja elektrone



ki vstopajo v žico. Na pozitivni elektrodi pritekajoči elektroni reagirajo s pozitivnimi amonijevimi ioni in z manganovim oksidom:



Notranja energija snovi po reakcijah je manjša od notranje energije snovi pred reakcijami. Razlika, okoli 3 eV, pokrije izgubo potencialne energije elektronov na poti po električnem krogu.

Suhe baterije izdelujejo v različnih velikostih. Povprečna baterija lahko pri pravilni uporabi opravi okoli 2 Wh električnega dela.

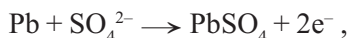
Suhe baterije lahko poganjajo le majhen električni tok, pa še hitro se izrabijo. V avtomobilih uporabljamo za zagon motorja *akumulatorje*. Znan je *svinčev akumulator*. V osebnih avtomobilih so akumulatorji za 12 V, ki zmorejo pretočiti naboj kakih 45 Ah, pri čemer opravijo okoli 0,5 kWh električnega dela.

? Kolikokrat dražja je uporaba suhih baterij od uporabe elektrike iz hišne napeljave?

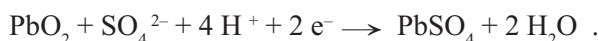
Akumulator je sestavljen iz več celic. Vsaka ima gonilno napetost okoli 2 V. Sestavljata jo svinčeni plošči, potopljene v razredčeno žvepleno kislino (slika 5.3).

Pri novem akumulatorju je pozitivna plošča prevlečena s plastjo svinčevega oksida PbO_2 , negativna plošča pa je neprekrita. Ko akumulator poganja tok, potekata v njem reakciji:

na negativni plošči



na pozitivni plošči pa

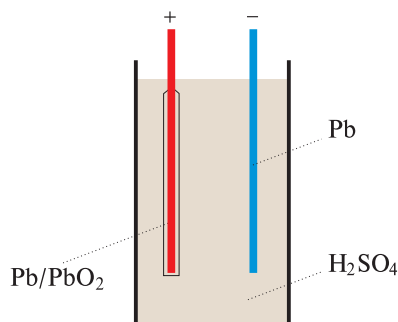


Pri reakcijah se porablja žveplena kislina, na ploščah pa se nalaga svinčev sulfat. Zato je treba akumulator občasno obnavljati ali, kakor pravimo, polniti. Z drugim izvirom poženemo tok po akumulatorju v nasprotni smeri. Tedaj potekata reakciji na elektrodah v nasprotnem smislu. Raztopi se naloženi sulfat in obnovi žveplena kislina. V avtu je poskrbljeno za sprotno obnavljanje akumulatorja. Če pa ga zaradi pozabljivosti izpraznimo, ga moramo posebej polniti.

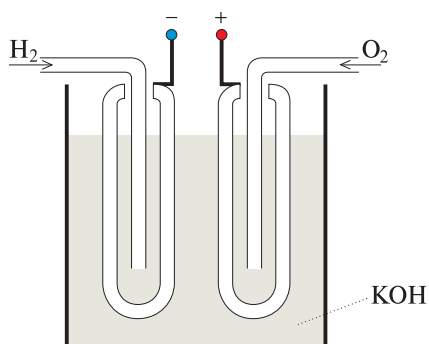
V vesoljskih laboratorijih napajajo električne naprave z *gorivnimi celicami*, v katerih poteka nadzorovana reakcija med kisikom in vodikom. Presek gorivne celice kaže slika 5.4. Vodik in kisik tečeta v porozne ogljene posode, potopljene v raztopino kalijevega hidroksida. Pri tem potekata reakciji, pri katerih nastaja vodna para. Gonilna napetost celic je okoli 1,2 V.

Med novejšje naprave štejemo tudi *sončne celice*. Znano je, da z njimi napajajo naprave v satelitih, srečujemo pa jih tudi v vsakdanjem okolju. Med drugim rabijo za napajanje žepnih kalkulatorjev.

Presek sončne celice kaže slika 5.5. To je ploščica silicija, v kateri s posebnimi postopki z dodajanjem primesi 3- in 5-valentnih elemen-

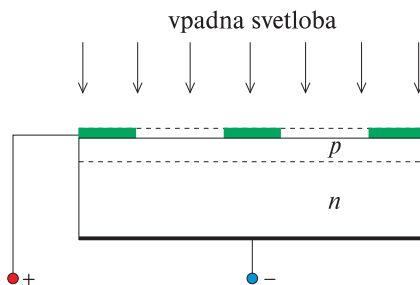


Slika 5.3 celica akumulatorja



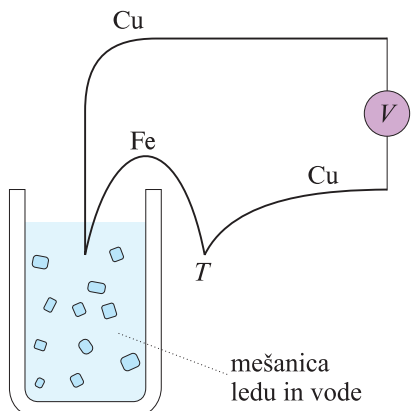
Slika 5.4 gorivna celica

Povezava Gonilna napetost baterij je povezana z reakcijsko entalpijo za reakcije, ki potekajo v njih. O tem ste podrobneje govorili pri kemiji. Ponovite ustrezna poglavja!

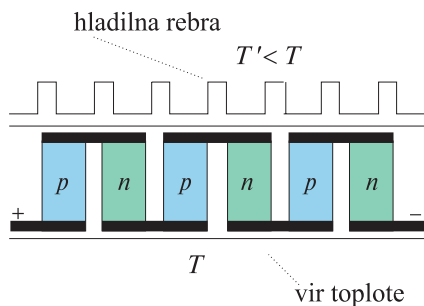


Slika 5.5 presek sončne celice

Sončne celice napajajo akumulator za osvetljevanje odmaknjenega križišča in žepni kalkulator.



Slika 5.7 merjenje napetosti termočlena



Slika 5.8 termobaterija na polprevodnike

tov naredimo dve električno različni plasti p in n , med katerima se ustvari močno električno polje, ki je usmerjeno od plasti n k plasti p . Svetloba povzroči prehod elektronov iz vezanih stanj v prosta stanja, električno polje med plastema pa tok po priključenem krogu. Pri prehodu skozi celico se potencialna energija naboja poveča zaradi energije, ki jo prinaša svetloba. Gonilna napetost celice je okoli 0,6 V. Pri polni sončni svetlobi lahko 1 cm^2 celice poganja tok okoli 20 mA.

Na koncu si oglejmo še *termoelektrične generatorje*. Med stikoma dveh kovin, ki sta pri različni temperaturi, se pojavi napetost, ki je sorazmerna s temperaturno razliko. Napetost lahko opazujemo pri eksperimentu, ki ga kaže slika 5.7. Enega od stikov med kovinama potopimo v mešanico ledu in vode pri temperaturi 0°C , drugega pa grejemo. Napetost, nekaj $10 \mu\text{V/K}$, merimo z občutljivim voltmetrom z velikim uporom ali pa kompenzacijsko. Ko je krog s stikoma sklenjen, steče po krogu tok. Pri tem stik z višjo temperaturo črpa toploto, stik z nižjo temperaturo pa jo oddaja. Razlika med prejeto in oddano toploto rabi pretočenemu naboju za povečanje potencialne energije. Podatke o termonapetostih za različne pare kovin dobimo v fizikalnem priročniku. Kovinske termočlene uporabljajo v laboratorijih za termometre.

Čeprav je napetost med stikoma majhna, pa lahko poganja velik tok, če je tudi upor v električnem krogu majhen. V *termoelektričnem varovalu* pri plinskih gorilnikih poganja termonapetost električni tok po tuljavi elektromagneta, ki nadzoruje dotok plina. Ko plamen ugasne, se zmanjša tok po tuljavi in dotok plina se ustavi.

Termonapetosti nastanejo tudi med stikoma polprevodnikov p in n , če imata različni temperaturi. Napetosti so nekaj $100 \mu\text{V/K}$. Za potrebe vesoljske tehnike so izdelali baterije takih termočlenov, ki izrabljajo toploto iz radioaktivnih izvirov (slika 5.8).

6. | KONDENZATOR

V električnih vezjih je kondenzator poleg upornikov najpogostejši element. Rabi za glajenje napetosti, za ločevanje enosmernih in izmeničnih napetosti, za zakasnjevanje časovno spremenljivih napetosti in podobno. V tem poglavju si bomo ogledali fizikalne osnove za te raznolike uporabe.

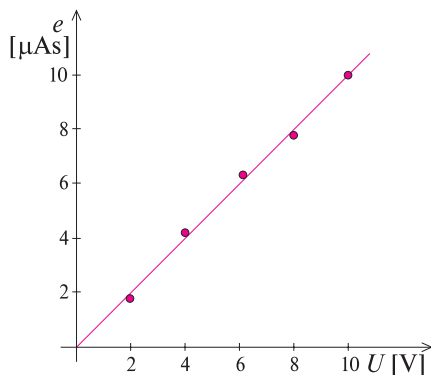
KAPACITETA

Ko nenabit kondenzator priključimo na izvir napetosti, steče kratkotrajen tok, s katerim se pretoči nekaj naboja z ene plošče na drugo. Tako se ustvari med elektrodama kondenzatorja električno polje in s tem napetost, ki zavira nadaljni tok naboja. Tok preneha, ko je napetost med ploščama kondenzatorja enaka napetosti izvira. Prav tako dobimo kratkotrajen tok, ko nabit kondenzator priključimo na upornik. Oba pojava lahko opazujemo pri poskusu, ki ga shematično kaže slika 6.2. S stikalom priključimo kondenzator najprej na izvir napetosti, nato pa na vzporedni upornik. Ampermeter ali drobna žarnica kaže, da teče tok. Potem ko ga izpraznimo skozi upornik, je kondenzator spet nenabit.

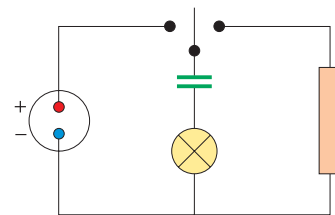
Z merilnikom naboja izmerimo naboj na eni od elektrod v odvisnosti od napetosti. V ta namen nam bo rabilo vezje, ki ga kaže slika 6.3. Kondenzator nabijemo, ko ga staknemo z izvirom napetosti, nakar ga izpraznimo, ko ga staknemo z merilnikom naboja.

Graf na sliki 6.4 kaže odvisnost med nabojem na elektrodi in napetostjo. Vidimo, da je naboj sorazmeren z napetostjo:

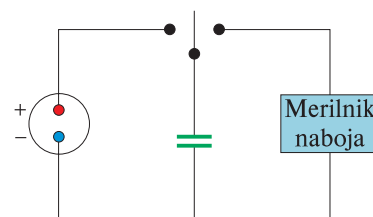
$$e = C U .$$



Slika 6.1 kondenzatorji

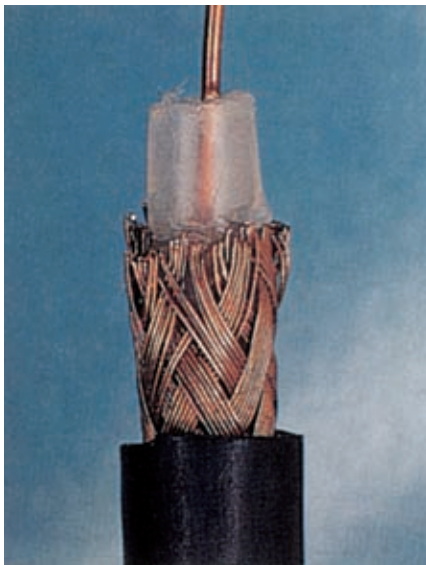


Slika 6.2 pretakanje naboja med ploščama kondenzatorja



Slika 6.3 merjenje naboja na plošči kondenzatorja

Slika 6.4 naboj na plošči kondenzatorja v odvisnosti od napetosti



Slika 6.5 Koaksialni kabel je primer valjastega kondenzatorja. Eno "ploščo" predstavlja najbolj notranja špica, ki jo od žičnega ovoja druge "plošče" loči izolator iz plastike.

? V izrazu za kapaciteto ploščatega kondenzatorja je influenčna konstanta. Predlagajte meritev, s katero bi jo lahko določili.

Povezava Preberite si poglavje o električnem polju v snovi.

? Premislite, kako bi določili dielektričnost stekla ali pleksi stekla!

Sorazmernostni koeficient C imenujemo *kapaciteta* kondenzatorja. Iz enačbe razberemo še enoto

$$\frac{As}{V} = F \text{ (farad)} .$$

Kapaciteto kondenzatorja v našem poskusu razberemo kot smerni koeficient premice, ki jo kaže graf na sliki 6.3. Ugotovimo, da je kapaciteta

$$C = 1,0 \cdot 10^{-6} \frac{As}{V} = 1,0 \mu F .$$

Kapaciteta je odvisna od zgradbe kondenzatorja. V elektronskih vezjih najdemo kondenzatorje s kapaciteto od nekaj *pikofaradov* ($pF = 10^{-12} F$) do nekaj tisoč *mikrofaradov*. V novejšem času lahko najdemo tudi kondenzatorje s kapaciteto nekaj faradov.

Pri ploščatem kondenzatorju lahko kapaciteto izračunamo. Vzemimo, da je razmik med ploščama majhen v primerjavi z razsežnostjo plošč. Tedaj lahko vzamemo, da je gostota naboja na ploščah konstantna. Vemo, da je sorazmerna z jakostjo električnega polja ob plošči:

$$\frac{e}{S} = \epsilon_0 E .$$

Upoštevamo zvezo med napetostjo med ploščama in jakostjo električnega polja med njima $U = Ed$, v kateri je d razmik med ploščama, in izračunamo naboj:

$$e = \frac{\epsilon_0 S}{d} U .$$

Izraz v oklepaju predstavlja kapaciteto ploščatega kondenzatorja:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} .$$

Kondenzator, ki ga uporabljamo pri šolskih poskusih, ima plošči s ploščino po 100 cm^2 . Razmik lahko spreminjamo, določimo, da je 1 mm in izračunamo:

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d} = 8,9 \cdot 10^{-11} \frac{As}{V} = 89 \text{ pF} .$$

V veliki večini so kondenzatorji ploščati. Plošči predstavljata tanki kovinski foliji. Med njima je tanka folija izolatorja, vse skupaj pa je zvito v rolo. Izolator med kovinskima ploščama poveča kapaciteto kondenzatorja. Pri nespremenjeni gostoti naboja na ploščah je napetost med ploščama manjša kakor pri praznem kondenzatorju, kar kaže, da se poveča kapaciteta. Prepričamo se lahko, da je kapaciteta kondenzatorja z izolatorjem med ploščama sorazmerna s kapaciteto praznega kondenzatorja:

$$C' = \epsilon C .$$

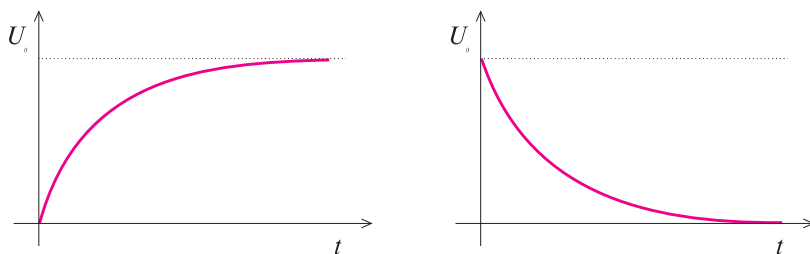
Koeficient ϵ , ki je odvisen od snovi, imenujemo *dielektričnost*.

Kot izolator običajno rabijo impregniran papir, plastične folije ali tanke plasti oksidov na ploščah. Preglednico dielektričnosti za največkrat uporabljane snovi najdete v fizikalnih ali elektrotehniških priročnikih.

* POLNJEJE IN PRAZNJENJE KONDENZATORJA

Polnjenje in praznjenje kondenzatorja lahko podrobneje spoznamo, če merimo napetost na kondenzatorju v odvisnosti od časa. Najlažje bo, če uporabimo računalnik z vmesnikom, ki ga programiramo tako, da izmerjene napetosti prikaže na ustreznem grafu. Grafa na slikah 6.6 in 6.7 kažeta vezavo kondenzatorja in časovni potek napetosti pri polnjenju in pri praznjenju.

Oglejmo si najprej graf, ki kaže praznjenje kondenzatorja. Z njega lahko razberemo značilni čas, v katerem pade napetost na kondenzatorju na polovico začetne vrednosti. Imenujemo ga *razpolovni čas*. Po preteku naslednjega razpolovnega časa je napetost enaka četrtini začetne, nato osmini začetne in tako naprej. Tak potek napetosti imenujemo *eksponenten*. Tudi potek napetosti pri polnjenju kondenzatorja je eksponenten. Tam se eksponentno zmanjšuje razlika med končno in trenutno napetostjo na kondenzatorju.



Razpolovni čas je odvisen od kapacitete kondenzatorja, C , in od upora upornika, R :

$$t_{1/2} = R C \ln 2 .$$

RC imenujemo tudi *relaksacijski čas*.

** Časovni potek napetosti pri praznjenju kondenzatorja lahko obravnavamo tudi računsko. Obidimo krog, v katerem sta zaporedno zvezana kondenzator in upornik, v smeri toka. Pri prehodu z negativne na pozitivno ploščo kondenzatorja se poveča potencial za napetost na kondenzatorju, U , pri prehodu prek upornika pa se zmanjša za napetost na uporniku, IR , tako da je

$$U - IR = 0 .$$

Ker se s tokom zmanjšuje naboj na kondenzatorju in s tem napetost, lahko zapišemo

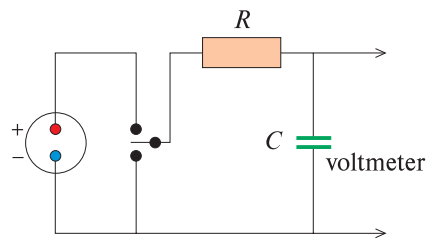
$$I = - \frac{de}{dt} = - \frac{C dU}{dt}$$

in dobimo

$$U + R C \frac{dU}{dt} = 0 ,$$

ali drugače zapisano

$$\frac{dU}{dt} = - \frac{U}{RC} .$$



Slika 6.6 polnjenje in praznjenje kondenzatorja

Slika 6.7 napetost na kondenzatorju pri polnjenju in praznjenju

Dobili smo *diferencialno enačbo*, ki pove, da napetost na kondenzatorju s časom pada, hitrost padanja pa je sorazmerna s trenutno napetostjo. Pri tem je RC že omenjeni značilni ali, kakor pravimo, *relaksacijski čas*. Enačba je značilna za *relaksacijske pojave*.

Pri matematiki boste spoznali, da je rešitev enačbe

$$U = U_0 e^{-t/RC} ,$$

ki potrjuje, da je pojemanje napetosti eksponentno. Potek napetosti pa lahko izračunamo tudi po korakih naravnost iz zapisane diferencialne enačbe.

Postopek poteka takole. Vemo, da je U_0 začetna napetost. Najprej izračunamo, za koliko se zmanjša napetost v kratkem času Δt po začetku praznjenja. To razberemo iz diferencialne enačbe, v kateri za napetost postavimo začetno napetost U_0 in za čas izbrani čas Δt :

$$\Delta U_1 = -\frac{U_0}{RC} \Delta t .$$

Napetost po preteku časa Δt je tedaj:

$$U_1 = U_0 + \Delta U_1 .$$

Z njo določimo spremembo napetosti v naslednjem časovnem intervalu Δt :

$$\Delta U_2 = -\frac{U_1}{RC} \Delta t ,$$

s tem pa novo napetost

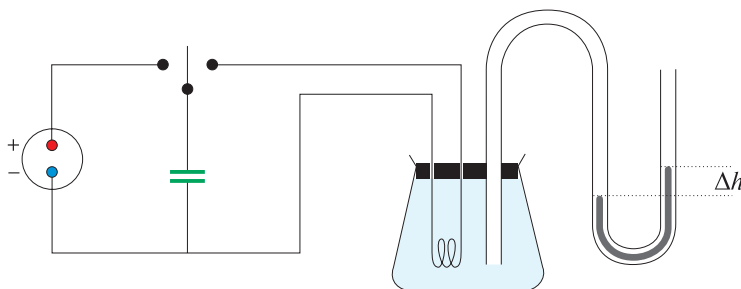
$$U_2 = U_1 + \Delta U_2 .$$

? Naredite računalniški program za ta postopek!

Postopek nadaljujemo. Že po nekaj korakih vidimo, da se napetost res eksponentno zmanjšuje. Po podobnem postopku lahko zasledujemo tudi polnjenje kondenzatorja.

ENERGIJA KONDENZATORJA

Ko nabiti kondenzator spraznimo skozi upornik, se ta segreje, ko se zmanjša električna potencialna energija naboja. Potencialno energijo prejme naboj, ko polnimo kondenzator. Navadno pravimo, da je energija shranjena v kondenzatorju ali da jo ima kondenzator. Izmerimo jo lahko s preprostim poskusom (slika 6.8).



Slika 6.8 merjenje energije kondenzatorja

Kondenzator nabijemo in nato spraznimo skozi grelni žičko, ki je v zaprti steklenici z zrakom. Skozi zamašek je v steklenico napeljan tekočinski manometer. Povečanje tlaka, ki ga pokaže manometer, je sorazmerno s povečanjem temperature zraka v posodi, to pa s povečanjem notranje energije zraka. Notranja energija zraka se poveča zaradi toplote, ki jo odda grelni žička ob praznjenju kondenzatorja. Poskus bi lahko izvedli tudi drugače, npr. tako, da bi grelni žičko ovili okoli drobnega termometra.

Iz meritev lahko sklepamo, da je električna energija nabitega kondenzatorja sorazmerna s kvadratom napetosti:

$$W_e \propto U^2 .$$

Seveda mora biti energija odvisna tudi od kapacitete kondenzatorja, saj bi bila dvakrat tolikšna, če bi vzporedno zvezali dva enaka kondenzatorja.

Za konec električno energijo še izračunajmo. Vzemimo, da nabijamo kondenzator tako, da prenašamo naboj z negativne plošče na pozitivno. Napetost na kondenzatorju se pri tem enakomerno povečuje od nič do končne vrednosti U , tako da je povprečna napetost med polnjenjem $U/2$. Prenesenemu naboju $e = CU$ se tako v povprečju poveča potencialna energija za

$$W_e = \frac{eU}{2} = \frac{CU^2}{2} .$$

Po prejšnjem je to povečanje enako energiji kondenzatorja.

* Pri nabijanju se med ploščama kondenzatorja vzpostavi električno polje. S kratkim računom pokažemo, da si lahko mislimo električno energijo kondenzatorja porazdeljeno po prostoru med ploščama in jo namesto naboju na ploščah pripišemo električnemu polju.

Vzemimo ploščat kondenzator. V izraz za energijo vnesemo izraz za kapaciteto in vse skupaj preuredimo:

$$W_e = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 S}{d} \frac{U^2}{2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{U}{d}\right)^2 S d .$$

V izrazu prepoznamo jakost električnega polja med ploščama, $U/d = E$, in prostornino med ploščama, $S d = V$, tako da lahko zapišemo:

$$W_e = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} V .$$

Vidimo, da je električna energija premo sorazmerna s prostornino med ploščama kondenzatorja, kjer je električno polje. Iz tega sklepamo, da je porazdeljena po tem prostoru in vezana na električno polje. Izraz v oklepaju razumemo kot *gostoto električne energije* v tem električnem polju:

$$w_e = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} .$$

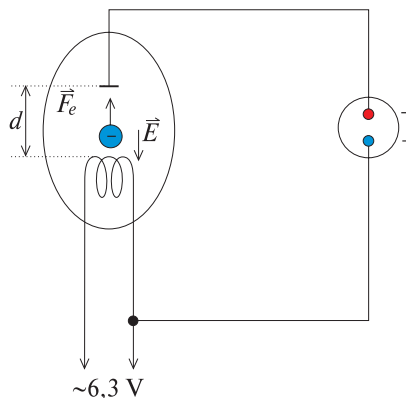
Dobljeni izraz pa velja splošno. To nas opozarja na velik pomen, ki ga ima električno polje pri obravnavi in razumevanju električnih pojavov.

Dejavnost Sestavite poskus, s katerim boste izmerili električno energijo kondenzatorja. Ravnajte se po zgledu na sliki 6.8 ali pa si izmislite kaj svojega!

7.* GIBANJE NABITIH DELCEV V ELEKTRIČNEM POLJU

CUREK ELEKTRONOV V VAKUUMU

Pri električnem toku po vodnikih je gibanje nosilcev toka, ponavadi elektronov, v povprečju enakomerno. V električnem polju v vodnikih se gibljejo elektroni sicer pospešeno, vendar pridobljeno kinetično energijo ob trkih sproti predajajo mreži pozitivnih ionov. Posledica tega je, da se vodniki segrevajo, če pa poskrbimo, da je temperatura konstantna, oddajajo toplotni tok.



Slika 7.1 elektron v električnem polju med katodo in anodo v diodi

Sedaj si oglejmo gibanje elektronov po *vakuumu* v *elektronkah*. Za zgled vzemimo *diodo* (slika 7.1). Elektroni izhlapevajo iz segrete katode skoraj brez hitrosti, nato pa jih električno polje med katodo in anodo pospeši proti anodi. Za elektrone smemo uporabiti izrek o kinetični energiji, po katerem izenačimo delo električne sile s kinetično energijo elektronov. Če je U napetost med anodo in katodo, je delo električne sile na elektron enako

$$A_e = e_0 U ,$$

prav tolikšna pa je kinetična energija elektronov ob anodi

$$W_k = e_0 U .$$

Kinetično energijo elektronov ponavadi izražamo v *elektronvoltih*, to je v enoti, ki je enaka produktu naboja elektrona in enote za napetost

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} . 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

? Ko curek elektronov zadene anodo in se ustavi, prevzame anoda kinetično energijo elektronov. Zaradi tega se segreje in oddaja toploto. Kolikšen toplotni tok mora v ravnovesnem stanju oddajati anoda elektronke, pri kateri je napetost med anodo in katodo 300 V in teče tok 100 mA?

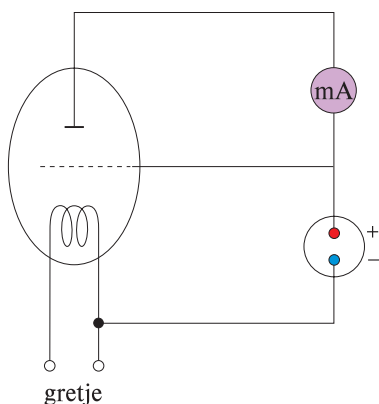
ter predstavlja kinetično energijo elektrona, ki ga iz mirovanja v vakuumu pospeši napetost 1 V. V diodi, kjer je napetost med anodo in katodo npr. 100 V, zadevajo elektroni v anodo s kinetično energijo

$$W_k = e_0 U = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 100 \text{ V} = 100 \text{ eV} .$$

Poglejmo še, kolikšna je hitrost elektronov, če pretečejo po vakuumu napetost 100 V. Upoštevamo podatek, da je masa elektronov $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ in izračunamo

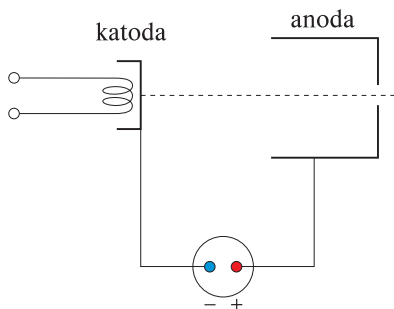
$$v = \sqrt{\frac{2 e_0 U}{m}} = 5,9 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} .$$

Velika hitrost je posledica majhne mase elektronov.



Slika 7.2 merjenje toka elektronov, ki uhajajo skozi mrežico

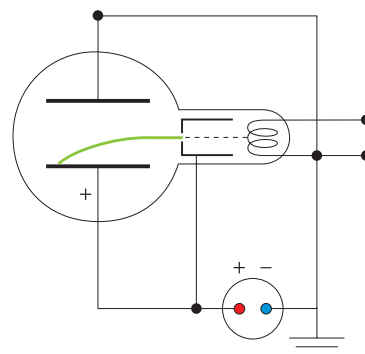
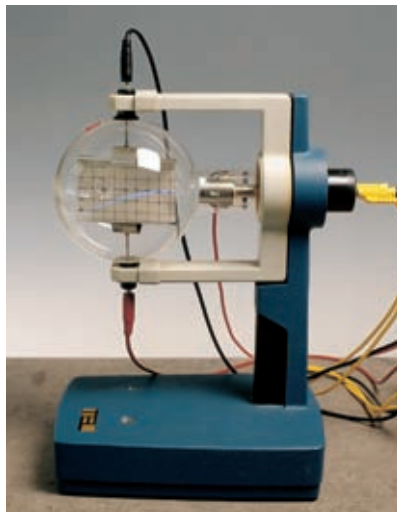
Če pa je v anodi luknjica, dobimo za njo *curek* elektronov. O tem se lahko prepričamo s poskusom, ki ga kaže slika 7.2. V *triodi*, to je v elektronki s tremi elektrodami, priključimo med *mrežico* in katodo pospeševalno napetost in merimo tok, ki teče med mrežico in anodo. Tok, ki ga izmeri vključen ampermeter, kaže, da se elektroni po prehodu skozi mrežico gibljejo naprej.



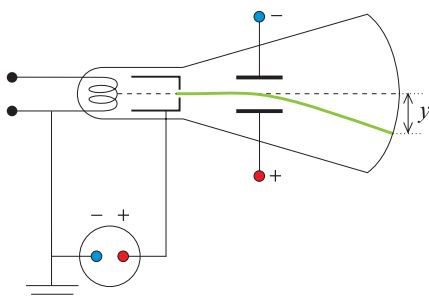
Slika 7.3 shema elektronskega topa v katodni cevi

Slika 7.3 poenostavljeno kaže *elektronski top*, s katerim ustvarimo curek elektronov v *katodni cevi*, ki je sestavni del osciloskopa ali televizorja. Elektrone, ki izhajajo iz segrete žičke, pospešuje električno polje med katodo in anodo, v kateri je drobna luknjica. Elektroni, ki pridejo skozi luknjico, predstavljajo curek, ki nadaljuje pot proti zaslonu cevi. Notranja stran cevi je prevlečena s prevodno plastjo in priključena na anodo. Tako v cevi ni električnega polja. Gibanje elektronov v

curku je zato enakomerno. Z dodatnimi odklonskimi elektrodami pa lahko curek odklanjamo v prečni smeri.



Sliki 7.4, 7.5 opazovanje odklona curka elektronov med ploščama kondenzatorja

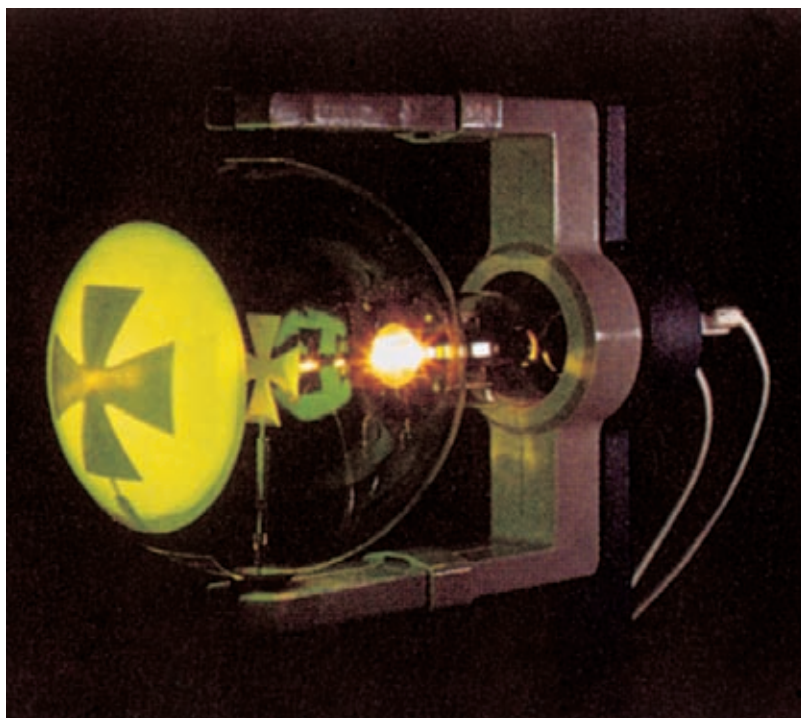


Slika 7.6 odklon elektronov pri prehodu med odklonskima ploščama v katodni cevi

? Kolikšen je odklon curka pri prehodu skozi odklonski kondenzator? Primerjajte izračunano vrednost z izmerjeno!

* Pri osciloskopu opazujemo odklon elektronskega curka na fluorescenčnem zaslonu odklonske cevi. Odklon na zaslonu je veliko večji od odklona med odklonskima ploščama (slika 7.6). Pokažite z računom, da je odklon na zaslonu sorazmeren z napetostjo na odklonskih ploščah!

Slika 7.7 elektroni mečejo senco križa na zaslon katodne cevi



* MILLIKANOV POSKUS

Leta 1909 je R. A. Millikanu uspelo pokazati, da je naboj na nabitih telesih večkratnik osnovnega naboja

$$e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} .$$

Zaradi preprostosti ponavljajo njegovo merjenje v mnogih različicah vsako leto študenti fizike povsod po svetu. Ne da bi se spuščali v podrobnosti, poskušajmo razumeti, za kaj pri tem merjenju gre.

Z mikroskopom opazujemo drobno kapljico olja, ki pada v prostoru med vodoravnima ploščama kondenzatorja. V začetku kondenzator ni nabit (slika 7.8a). Kapljica enakomerno pada pod vplivom teže in upora zraka.

Teža deluje navpično navzdol, upor zraka pa v nasprotni smeri. Tako mora biti

$$\text{teža} = \text{upor} ,$$

ali zapisano s simboli

$$F_g = F_u .$$

Če je kapljica majhna, če meri nekaj mikrometrov v premeru, je njeno gibanje tako počasno, da je upor sorazmeren s hitrostjo, ali

$$F_u = K v ,$$

tako da je tudi

$$F_g = K v .$$

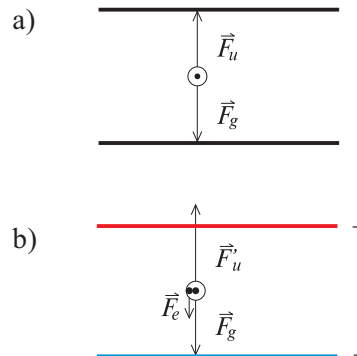
Priključimo kondenzator na generator z znano napetostjo. Če je kapljica nenabita, se njeno gibanje nič ne spremeni, če pa nosi naboj, se ji zaradi dodatne električne sile $F_e = e E$ spremeni hitrost. Vzemimo, da se giblje kapljica še naprej v prvotni smeri, vendar z večjo hitrostjo v' . Pomeni, da ima električna sila isto smer kakor teža (slika 7.8b) in je

$$F_g + e E = K v' .$$

Vidimo, da lahko iz dveh merjenj hitrosti kapljice izluščimo električno silo

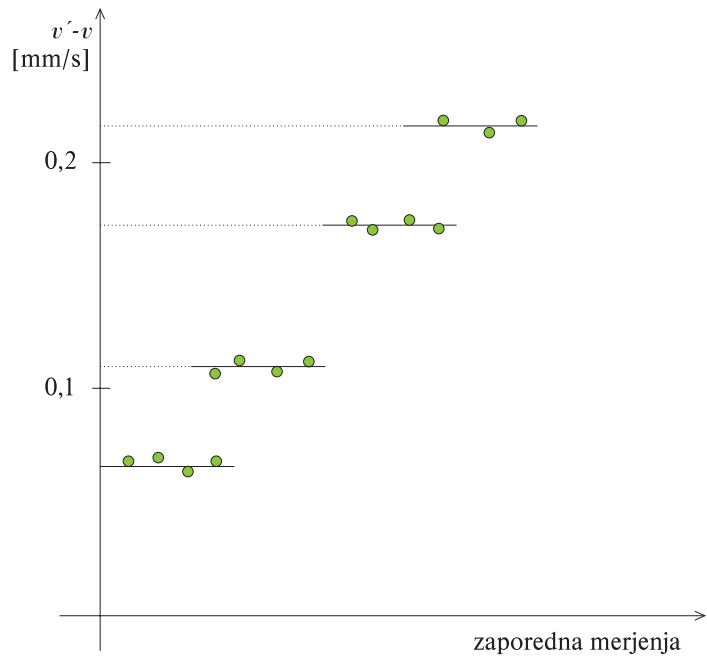
$$e E = K (v' - v) .$$

Pri merjenjih moramo poskrbeti, da kapljica ne uide iz zornega polja mikroskopa. Če posvetimo med plošči kondenzatorja z živosrebrno svetilko ali z rentgensko cevjo, se lahko naboj kapljice spremeni. Izmerimo novo hitrost in igro ponavljamo.



Slika 7.8 sile na padajočo kapljico pri Millikanovem poskusu

Slika 7.9 spremembe hitrosti padajoče kapljice pri spremembi naboja



Pri nekem eksperimentu so izbrani kapljici 20-krat spremenili naboj. Na grafu na sliki 7.9 so nanizane po velikosti urejene razlike med hitrostjo kapljice med ploščama nabitega in nenabitega kondenzatorja. Vidimo, da imajo razlike lahko le nekatere vrednosti, kar kaže, da se naboj kapljice spreminja v paketih. Najmanjša razlika hitrosti ustreza najmanjšemu naboju. Kapljica je imela premer $1 \mu\text{m}$, pri čemer je bil koeficient K enak $2,9 \cdot 10^{-10} \text{ Ns/m}$, jakost električnega polja pa je bila 100 V/mm . Izračunamo, da so bile najmanjše spremembe naboja kapljice enake

$$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As},$$

kar je ravno osnovni naboj.



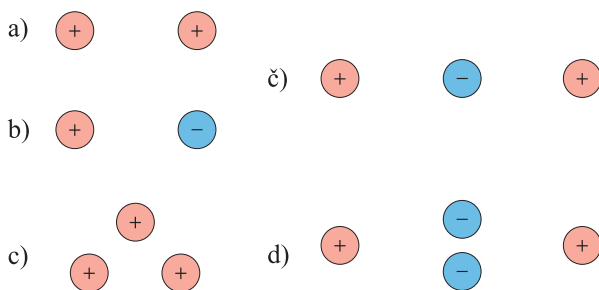
Slika 7.10 J. Thompson in njegova katodna cev. Z odklanjanjem elektronov (takrat so jih imenovali katodni žarki) v električnem in magnetnem polju je elektronom določil razmerje med nabojem in maso, e/m . Na zgornji sliki je moderna izvedba tega poskusa.



8. VPRAŠANJA IN NALOGE

VPRAŠANJA

1.] Enako velike prevodne krogle nabijemo s pozitivnim ali negativnim nabojem, kakor je označeno na sliki. Narišite sile med krogli!



2.] Kako se spremeni sila med točkastima telesoma, če naboj vsakega od njiju povečamo na štirikratno vrednost, razdaljo med njima pa zmanjšamo na polovico?

3.] Prevodno kroglo, nabito s pozitivnim nabojem, postavimo nad ozemljeno kovinsko ploščo. Narišite približen potek silnic med kroglo in ploščo!

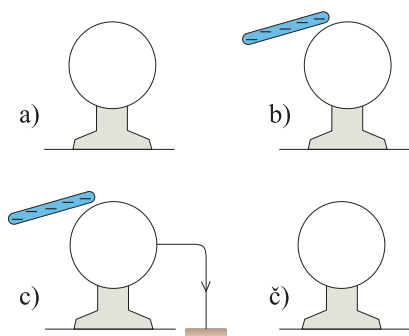
4.] Plošč ploščatega kondenzatorja se za hip dotaknemo s priključkom baterije. Nato razmaknemo plošči na dvojno razdaljo. Kako se pri tem spremeni jakost električnega polja med ploščama?

5.] Kovinsko kocko nabijemo s pozitivnim nabojem. Ali je v notranjosti električno polje? Utemeljite odgovor!

6.] Ploščati kondenzator priključimo na izvir enosmerne napetosti. Kako se spreminja naboj na ploščah, če:

- premaknemo plošči drugo proti drugi, ne da bi spremenili razdaljo med njima,
- zmanjšamo razdaljo med ploščama,
- med plošči vtaknemo stekleno ploščo,
- povečamo napetost med ploščama.

7.] Skicirajte električno polje med pozitivno nabitim oblakom in osamljenim drevesom na tleh. Kam bo najverjetneje udarila strela?



8. Kolikšna je jakost električnega polja v prostoru s konstantnim potencialom?

9. Enaki kovinski kroglici na izoliranih ročajih bi radi enkrat nabili z enakim, drugič pa z nasprotnim nabojem? Kako naj ravnamo, če imamo na voljo le plastično palico, na kateri lahko z drgnjenjem dobimo negativni naboj?

10. Enaki kovinski krogli sta nabiti z enakim nabojem. S tretjo, enako veliko, nenabito kroglo na izoliranem ročaju se dotaknemo najprej prve, nato pa še druge krogle. Kolikšna je po tem sila med prvima kroglama v primerjavi s silo pred opisanim posegom?

11. Prevodna krogla je pritrjena na izoliran podstavek (slika a). Približamo ji negativno nabito palico (slika b), nato pa jo ozemljimo (slika c) in na koncu odstranimo negativno naelektreno palico. Narišite porazdelitev naboja na krogli v posameznih primerih.

12. Žarnici, narejeni za enako napetost, a različno moč, zvežemo zaporedno in ju priključimo na primeren izvir napetosti. Katera izmed njiju močnejše sveti? Utemeljite odgovor!

13. Pojasnite naslednjo trditev: pri zaporedno vezanih upornikih je nadomestni upor vedno večji od največjega upora, pri vzporedno vezanih upornikih pa je vedno manjši od najmanjšega upora. Kako se glasi ustrezna izjava za kondenzatorje?

14. Kako lahko razširimo merilno območje voltmetra? Ali je mogoče, da bi v sili tudi jakost toka merili z voltmetrom? Kako bi to naredili?

15. Zakaj je električni tok skozi žarnico ob vključitvi večji kakor tedaj, ko žarnica že nekaj časa sveti?

16. Električni grelec ima dve grelni spirali, ki ju lahko priključimo posamič ali pa skupaj. Kako sta zvezani, ko deluje grelec z največjo močjo?

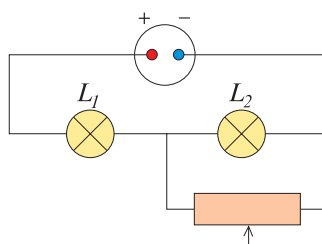
17. Ko v stanovanju vključimo večji porabnik, na primer termoakumulacijsko peč, svetijo žarnice nekoliko slabše. Zakaj?

18. V kovinah ni električnega polja, kadar naboj na njih miruje. Po drugi strani pa smo videli, da dobimo električni tok v električni napeljavi prav zaradi električnega polja v žicah. Ali si ti dve spoznanji ne nasprotujeta?

19. Tipična potovalna hitrost elektronov pri prenosu električnega toka po kovinah je 0,1 mm/s. Vendar žarnica v sobi zasveti takoj, ko vključimo stikalo. Zakaj?

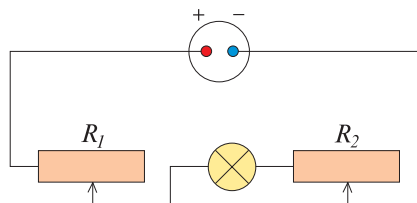
20. Jakost električnega toka skozi upornik se poveča za 20 %. Za koliko % se zaradi tega poveča moč, ki jo porablja upornik?

21. V električni krog vežemo baterijo, drsni upornik in dve žarnici. Upor drsnega upornika večamo. Opišite kvalitativno, kako to vpliva na svetenje žarnic L_1 in L_2 .



22.] V električni krog vežemo dva drsna upornika, bateriji in žarnico. Kakšen učinek ima spreminjanje upora upornikov R_1 in R_2 na svetenje žarnice, če:

- zmanjšamo upor R_1 ,
- zmanjšamo upor R_2 ,
- povečamo upor R_1 ,
- povečamo upor R_2 .



Razložite, zakaj.

23.] Žarnice, drsni upornik in baterija brez upora so zvezani, kakor kaže spodnja slika. Kako se spremeni svetlost posameznih žarnic, če povečamo upor drsnega upornika?

24.] Kondenzatorje lahko vežemo med seboj podobno kakor upornike. Pokažite, da se pri vzporedni vezavi seštevajo kapacitete, pri zaporedni vezavi pa recipročne kapacitete. Pomagajte si z definicijo kapacitete: izračunajte skupni naboj na zvezanih kondenzatorjih pri izbrani napetosti med priključkoma in skupno kapaciteto kakor razmerje med nabojem in napetostjo.

NALOGE

1.] Baterijska svetilka lahko neprekinjeno sveti 5 h. Skozi žarnico teče tok 200 mA. Koliko naboja lahko pretoči baterija?

Odgovor: 3600 As

2.] Na svinčnem akumulatorju piše “45Ah”. Kaj to pomeni?

3.] Bakreni predmet želimo posrebriti, zato ga kot katodo potopimo v raztopino srebrovega nitrata.

Koliko naboja se mora pretočiti, da se na katodi nabere 5,6 g srebra? Srebro je enovalentno in ima relativno atomsko maso 108.

Odgovor: 5000 As

4.] V vodikovem atomu v osnovnem stanju je elektron v povprečju 0,05 nm od središča protona. Kolikšna je električna sila med delcema?

Odgovor: $9,2 \cdot 10^{-8}$ N

5.] Na kovinsko kroglo s polmerom 24 cm nanesemo naboj $6,28 \cdot 10^{-9}$ As. Kolikšna je jakost električnega polja v središču krogle, v točki, ki je 12 cm oddaljena od središča krogle, in v točki, ki je 24 cm nad površjem krogle?

Odgovor: $E_1 = E_2 = 0$
 $E_3 = 240$ V/m

6.] Na krogli s polmerom 14 cm je pozitiven naboj s površinsko gostoto $1,5$ nAs/m². Kolikšen je pospešek elektrona, ki je v razdalji 10 m od središča krogle?

Odgovor: $5,8 \cdot 10^{11}$ m/s²

7.] Po Bohrovem modelu atoma vodika kroži elektron okoli protona v razdalji 0,053 nm. Kolikšna je frekvenca kroženja? Masa elektrona je $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Odgovor: $6,5 \cdot 10^{15}$ s⁻¹

8.] Kapljica olja z maso $2,5 \cdot 10^{-15}$ kg, ki ji manjka en elektron, lebdi v navpičnem električnem polju med ploščama kondenzatorja. Kolikšna je jakost električnega polja? Gostota olja je $0,9$ g/cm³.

Odgovor: $1,6 \cdot 10^5$ V/m

Odgovor: $9,0 \cdot 10^{-3} \text{ N}$

Odgovor: $3,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$

Odgovor: $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ As}$

Odgovor: Električno polje je usmerjeno vzdolž premice stran od ravnine kvadrata. Izračunamo ga tako, da seštejemo električni polji nabojev na nasprotnih krajiščih diagonal kvadrata (glej sliko a). Označimo z a stranico kvadrata, z d razdaljo od ravnine in z e naboj ene od kroglic. Za jakost električnega polja dobimo izraz:

$$E = \frac{E_0 \frac{d}{a}}{\sqrt{\left(+2 \frac{a}{d}\right)^3}}, \text{ kjer je}$$

$$E_0 = \frac{2 \sqrt{2} e}{\pi \varepsilon_0 a^2} = 6,5 \cdot 10^{-2} \text{ V/m.}$$

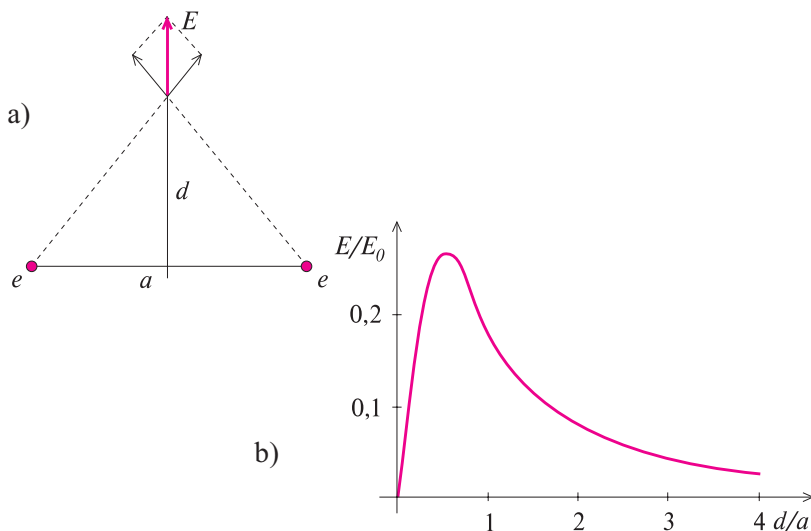
Polje je najmočnejše v razdalji $d = a/2$, kjer je jakost $E = E_0 \sqrt{6}/9$. Potek jakosti polja kaže slika b. V razdalji, ki je velika v primeri s stranico kvadrata, je polje takšno, kakor bi ga povzročilo točkasto telo z nabojem $4e$.

9.] Enaki kovinski kroglici z nabojema $-1,5 \cdot 10^{-7} \text{ As}$ oziroma $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ As}$ se zaradi privlačne sile dotakneta, nato pa ju namestimo v razdaljo $5,0 \text{ cm}$. Kolikšna je v tej razdalji sila med kroglicama?

10.] Kvadrat ima stranico 10 cm . V diagonalno nasprotni oglišči postavimo majhni kroglici z nabojem $200 \cdot 10^{-12} \text{ As}$ oziroma $-200 \cdot 10^{-12} \text{ As}$. Kolikšna sila deluje na posamezno kroglico?

11.] Enakostranični trikotnik ima stranico 5 cm . V vsako oglišče postavimo enako naelektrene drobne kroglice. Kolikšen je naboj na vsaki od kroglic, če je sila nanjo $0,002 \text{ N}$?

12*.] Štiri drobne kroglice z nabojem po $+1,5 \cdot 10^{-15} \text{ As}$ so na ogliščih kvadrata s stranico 5 cm . Kako se z razdaljo od ravnine kvadrata spreminja jakost električnega polja po premici, ki je pravokotna na ravnino kvadrata in gre skozi središče kvadrata? V kateri razdalji je električno polje najmočnejše?

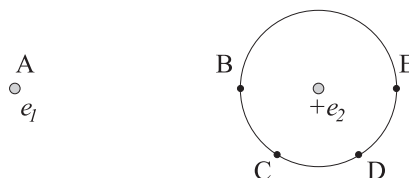


13.] Tri nabita telesa razvrstimo po premici, kakor kaže slika. Prvo telo z nabojem $5 \mu\text{As}$ postavimo v točko A, drugo telo z nabojem $-4 \mu\text{As}$ pa v točko B, ki je 3 m stran. Določite velikost naboja tretjega telesa, ki je v točki C, 6 m stran od A, tako da je jakost električnega polja v točki D, ki je 2 m stran od A, enaka nič.



Odgovor: $+180 \mu\text{As}$

14.] Primerjajte delo, ki ga opravimo pri premikanju telesa z nabojem e_1 iz točke A v točke B, C, D in E, ki so v enaki razdalji od telesa z nabojem e_2 .



15.] Kolikšen je upor 40-vatne žarnice, ki je narejena za omrežno napetost?

Odgovor: $1,2 \text{ k}\Omega$

16. V stanovanju so hkrati vključeni 60-vatna žarnica, 1250-vatni toaster, 1500-vatna pečica in 5-vatni radio. Kolikšen je tok skozi glavno varovalko?

Odgovor: 12,8 A

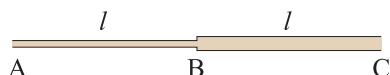
17. Kaj moramo storiti, da lahko miliampermeter z obsegom 100 mA in z uporom $60\ \Omega$ uporabimo za merjenje napetosti do 20 V?

Odgovor: Dodamo predupornik za 140 Ω .

18. Žični upornik porablja moč 30 W pri napetosti 15 V. Kako dolga je žica iz nikelina, ki je v uporniku, če je njen presek $0,50\ \text{mm}^2$? Specifični upor nikelina je $0,42\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{m}$.

Odgovor: 8,9 m

19. Bakrena žica je sestavljena iz dveh delov. Na delu AB ima presek $4\ \text{mm}^2$, na delu BC pa presek $2 \times 4\ \text{mm}^2$. Po žici teče tok 10 A. Kolikšne so napetosti na odsekih AB, BC in AC? Upornost bakra je $0,017\ \Omega\ \text{mm}^2/\text{mm}$.



Odgovor: $U_{AB} = 12,5 \cdot 10^{-6}\ \text{V}$
 $U_{BC} = 6,25 \cdot 10^{-6}\ \text{V}$
 $U_{AC} = 18,75 \cdot 10^{-6}\ \text{V}$

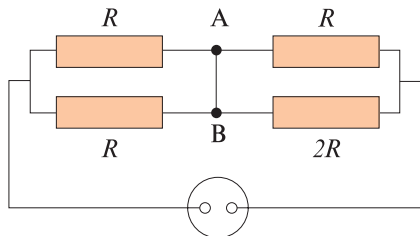
20. Na baterijo z gonilno napetostjo 4,5 V priključimo žarnico z uporom 15 W. Napetost na žarnici je 3,5 V. Kolikšen je notranji upor baterije? Kolikšen bi bil tok pri kratkem stiku?

Odgovor: 4,3 W
1 A

21. Upornike za 10 Ω , 20 Ω oziroma 30 Ω zvežemo najprej zaporedno, nato pa vzporedno, in jih priključimo na ustrezen generator. Kolikšna mora biti napetost generatorja v prvem in kolikšna v drugem primeru, da teče po uporniku za 20 Ω vsakič tok 0,2 A?

Odgovor: 12 V
4 V

22. Na sliki je električni krog. Upori upornikov R so 100 Ω , upor upornika $2R$ pa je 200 Ω .



Napetost med priključkoma baterije je 4,5 V. Med točkama A in B je vezan voltmetr z zelo velikim uporom. Kolikšno napetost izmeri voltmetr?

Odgovor: 1V

23. Baterija je vezana zaporedno s spremenljivim upornikom in z ampermetrom z zanemarljivim uporom. Ko ima upornik upor 10 Ω , teče skozenj tok 2 A, ko pa ima upor 5 Ω , teče skozenj 3,8 A. Kolikšna sta gonilna napetost in notranji upor baterije?

Odgovor: 21 V
0,56 Ω

24. Za žarnico z močjo 5 W pri toku 0,5 A imamo na voljo le izvir za 18 V. Kolikšen naj bo upor upornika, ki ga večemo zaporedno z žarnico, da bo le-ta normalno svetila?

Odgovor: 16 Ω

25. Med pola baterije z gonilno napetostjo 4,5 V in z notranjim uporom 0,5 Ω priključimo žarnico za 6,0 V, 0,5 A. Ocenite, s kolikšno močjo sveti žarnica!

Odgovor: 1,6 W

Odgovor: 15,4 min

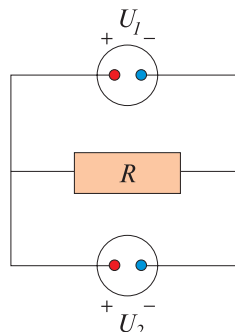
Odgovor: 5,5 %

Odgovor: 0,47 A

26. V posodi je 2 l vode s temperaturo 20° C. V kolikšnem času segrejemo vodo do vrelišča s potopnim grelcem, ki ima upor 50 Ω in je priključen na omrežno napetost? Zaradi prevajanja v okolico se izgubi okoli 25 % dovedene toplote.

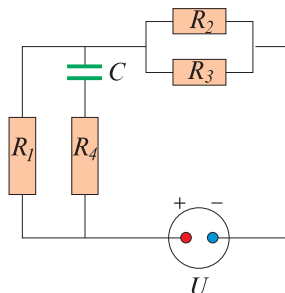
27. Avtomobilsko žarnico za 12 V, 40 W želimo priključiti na omrežno napetost. Kaj moramo storiti, da žarnica normalno sveti? Kolikšen del iz omrežja dovedene moči porablja žarnica?

28. V narisanim vezju ima prva baterija gonilno napetost 2V in notranji upor 1 Ω, druga baterija pa gonilno napetost 4 V in notranji upor 2 Ω. Kolikšen je tok po uporniku za 5 Ω?



Odgovor: 45 V
75 V

29. V narisanim vezju so upori upornikov $R_1 = R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$ in $R_4 = 4 \text{ k}\Omega$, kapaciteta kondenzatorja je 470 pF, napetost izvira pa 120 V. Kolikšni sta v stacionarnem stanju napetosti na upornikih R_2 in R_3 ? Kolikšna je napetost na kondenzatorju?

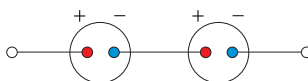


Odgovor: 6,75 W

30. Baterije za 4,5 V brez notranjega upora in žarnice za 4,5 V, 0,5 A so povezane, kakor kaže slika. Kolikšno skupno moč oddajajo žarnice?

31. Dve bateriji za 4,5 V vežemo, kakor kažejo slike. Kolikšne so napetosti na prostih priključkih? Pri katerih od teh vezav sta bateriji v kratkem stiku?

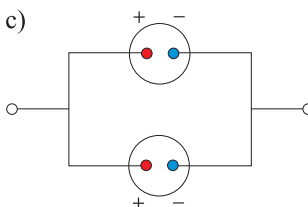
a)



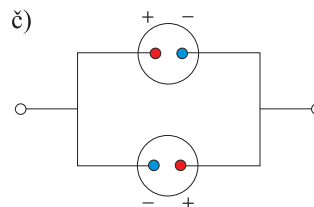
b)



c)



č)



32. Ploščati kondenzator sestavljata okrogli plošči s polmerom 55 cm, ki sta v razdalji 0,2 mm. Na plošči naneseemo naboj 12 nAs. Kolikšna je napetost med ploščama?

Odgovor: 0,29 V

33. Razdalja med ploščama kondenzatorja s ploščino 1 cm^2 je 0,05 mm. Med ploščama je snov z dielektričnostjo 8. Kolikšen je naboj na ploščah in kolikšna je energija kondenzatorja?

Odgovor: $(+/-)1,4 \cdot 10^{-8} \text{ As}$
 $7 \cdot 10^{-7} \text{ J}$

34. Kondenzatorja s kapacitetama $0,46 \text{ }\mu\text{F}$ oziroma $0,33 \text{ }\mu\text{F}$ vežemo zaporedno. Kolikšna mora biti kapaciteta kondenzatorja, ki ga povežemo vzporedno z njima, da je skupna kapaciteta $0,66 \text{ }\mu\text{F}$?

Odgovor: $0,47 \text{ }\mu\text{F}$

35. Vzporedno zvezane kondenzatorje s kapacitetami $2 \text{ }\mu\text{F}$, $3 \text{ }\mu\text{F}$ in $5 \text{ }\mu\text{F}$ priključimo na napetost 100 V. Kolikšen je naboj na kondenzatorjih? Kolikšna je nadomestna kapaciteta tako zvezanih kondenzatorjev?

Odgovor: $e_1 = 0,2 \text{ mAs}$
 $e_2 = 0,3 \text{ mAs}$
 $e_3 = 0,5 \text{ mAs}$
 $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$

36. Kondenzator v fotografski bliskavici ima kapaciteto $50 \text{ }\mu\text{F}$. Pri vsakem blisku odda energijo 0,05 J. Kolikšna je napetost na kondenzatorju, preden ga izpraznimo, in kolikšen je naboj na ploščah?

Odgovor: 45 V
 $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ As}$

37. Med ploščama kondenzatorja, ki sta v zraku na razdalji 2 cm, je homogeno električno polje z jakostjo $10\,000 \text{ V/m}$. Kolikšna je napetost med ploščama? Kolikšna pa je napetost, ko vtaknemo med plošči kovinsko ploščo z debelino 0,5 cm?

Odgovor: 200 V
150 V

38. Kondenzator s kapaciteto $6,0 \text{ }\mu\text{F}$ nabijemo na napetost 400 V. Nato staknemo kondenzator s praznim kondenzatorjem s kapaciteto $10 \text{ }\mu\text{F}$. Kolikšna je napetost na kondenzatorjih? Kolikšen je naboj na prvem in kolikšen na drugem kondenzatorju?

Odgovor: $U = 150 \text{ V}$
 $e_1 = 0,9 \text{ mAs}$
 $e_2 = 1,5 \text{ mAs}$

39. Plošči kondenzatorja nabijemo z nabojem e . Površina plošče je S , razdalja med ploščama je d .

a) Kolikšno delo je potrebno opraviti, da bi podvojili razmik med ploščama?

b) Kolikšno delo opravimo, če sta pri tem plošči povezani z baterijo z napetostjo U .

Kako razložimo razliko v opravljenem delu?

Odgovor: a) $A = \frac{e^2 d}{2 \epsilon_0 S}$
b) $A = \frac{e^2 d}{4 \epsilon_0 S}$

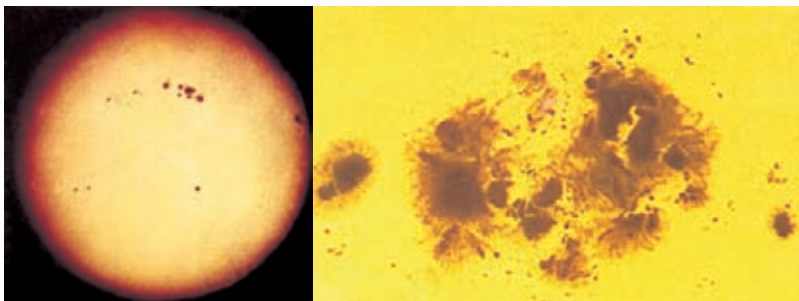
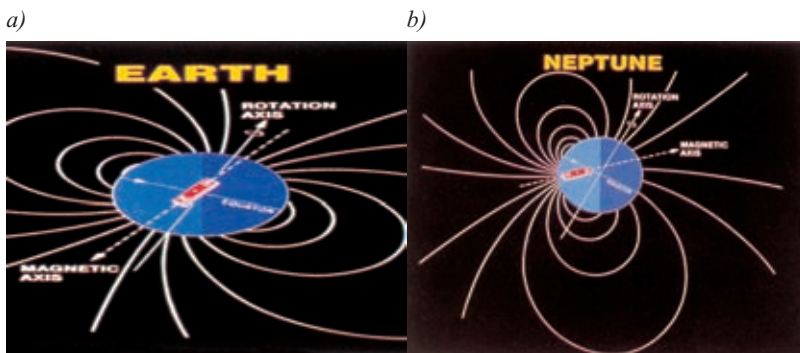
9. | MAGNETNO POLJE

PONOVITEV



Slika 9.1 Magnetni kompas so za orientacijo najbrž prvi uporabljali Kitajci v 10. stoletju.

Slika 9.2 Zemeljsko magnetno polje je v bližini Zemlje podobno polju paličastega magneta (a). V večji oddaljenosti pa je zaradi sončnega vetra spremenjeno (b).



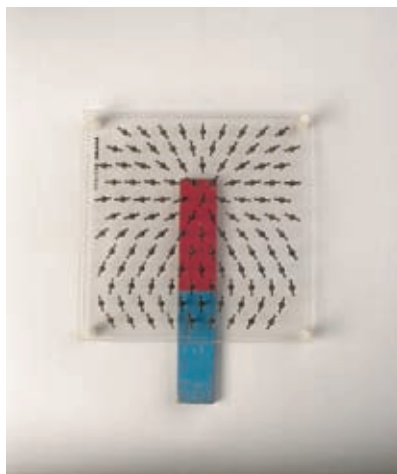
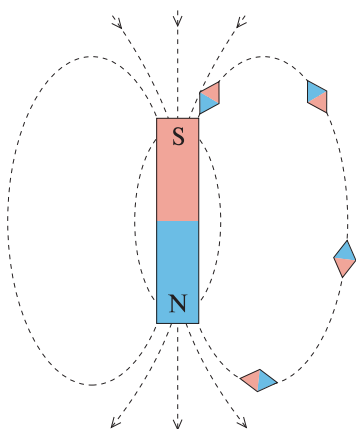
Sliki 9.3, 9.4 Sončne pege so področja močnega magnetnega polja.

Dejavnost Z magnetno iglo, ki je vrtljiva okoli dveh pravokotnih osi, ali s kompasom, ki ga lahko postavimo v dve pravokotni ravnini, določite smer magnetnega polja v razredu.

Z magnetno iglo raziščimo magnetno polje stalnega magneta in magnetno polje električnih tokov. Poglejmo najprej *paličasti* magnet.

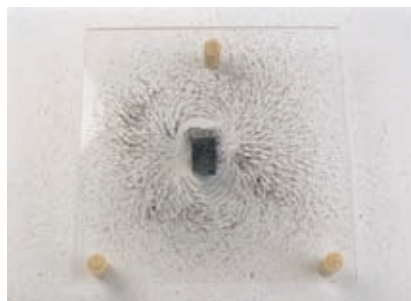
Magnetna igla pokaže, da je magnetno polje posebno močno na krajiščih magneta, ki ju tako kakor pri igli imenujemo *pola*. Pol, ob katerem je magnetno polje usmerjeno stran od magneta, imenujemo severni pol, pol, ob katerem je polje usmerjeno k magnetu, pa južni pol. Paličasti magnet, ki bi ga obesili na tanko vrvico, bi se, podobno kakor magnetna igla zasukal v smer sever – jug, saj magnetna igla ni nič drugega kakor majhen paličast magnet.

Z magnetno iglo si ustvarimo nazorno sliko o magnetnem polju. Postavimo iglo na izbrano mesto in jo malce premaknimo v smeri, ki jo kaže. Postopek ponavljamo. Črta, ki jo tako dobimo, predstavlja *silnico magnetnega polja*. S puščico na silnici nakažemo smer magnetnega polja. Pri paličastem magnetu in drugih stalnih magnetih potekajo silnice od severnega pola proti južnemu (slike 9.6, 9.7, 9.8).

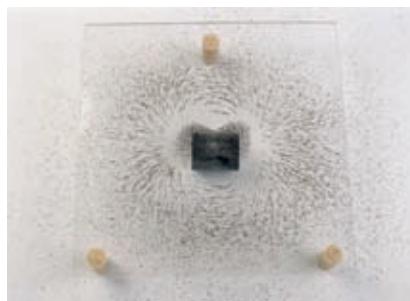


Potek silnic magnetnega polja na hitro zaznamo z železnimi opilki. Nazoren je potek silnic okoli paličastega magneta, ki ga sestavimo iz več enakih manjših magnetov. Slika 9.9a kaže opilke pri posameznem magnetu, slika 9.9b pri magnetu, ki ga sestavljata dva dela, slika 9.9.c pa pri magnetu, ki ga sestavljajo trije deli. Slike so si podobne, ugotovimo lahko, da so si podobna tudi magnetna polja in da imata tudi sestavljena magneta lastnosti paličastega magneta. Do enakega spoznanja bi prišli, če bi prvotni paličasti magnet razlomili na manjše kose. Vsak od njih bi imel dva pola, pa naj bi bili deli še tako drobni. Pri vsakem iz enega dela polje izhaja, v drugega pa ponika.

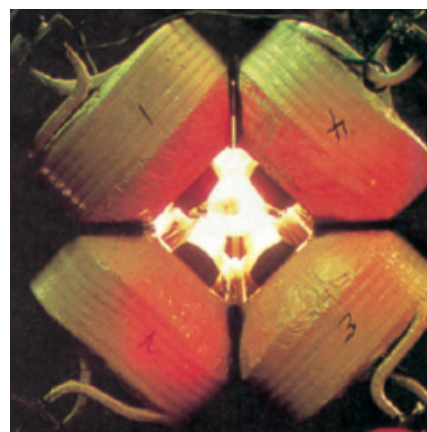
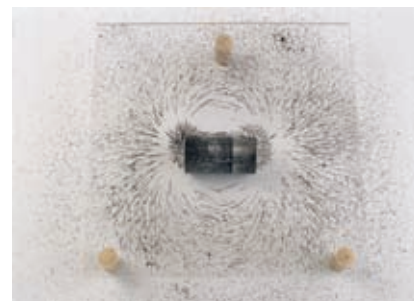
a)



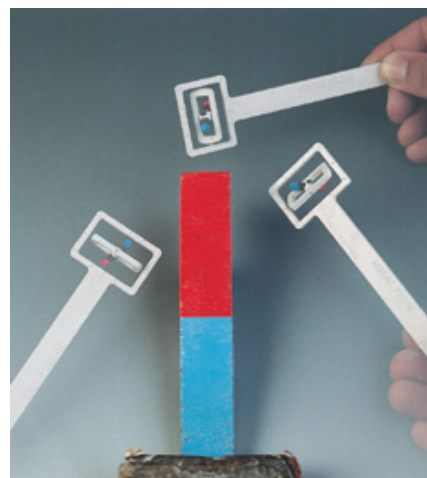
b)



c)



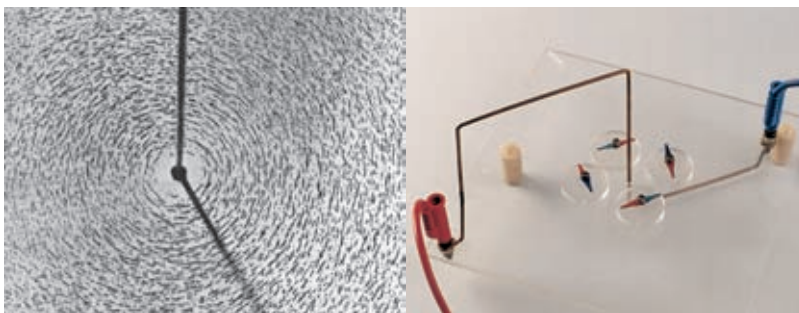
Slika 9.5 Kvadrupolni magnet z dvema severnima in dvema južnima poloma uporablja jo za zbiranje snopa delcev v pospeševalniku.



Slike 9.6, 9.7, 9.8 silnice v okolici paličastega magneta

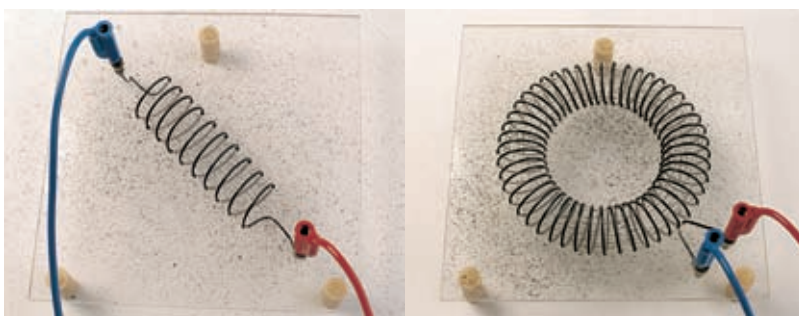
Slika 9.9 porazdelitev oplikov v okolici dodelnega magneta

Sliki 9.10, 9.11 smer magnetnega polja okoli vodnika



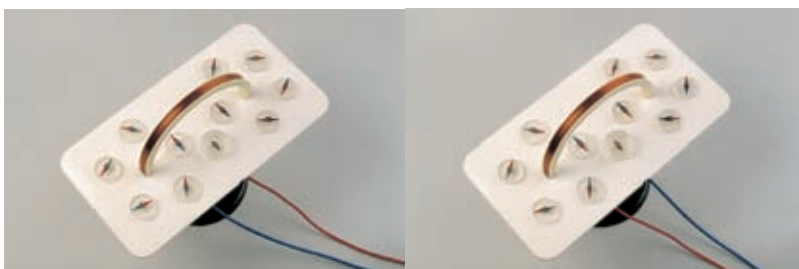
Magnetna igla in opilki kažejo, da je magnetno polje tudi v okolici vodnikov, po katerih teče električni tok. Slika 9.10 kaže razporeditev opilkov v okolici vodnika, ki je pravokoten na ravnino papirja. Opilki so nanizani v krožnice, kar kaže, da so silnice magnetnega polja okoli vodnika krožnice in je torej polje sklenjeno vase. S slike silnic ne moremo razbrati smeri polja. Magnetne igle (slika 9.11) pa pokažejo, da je smer polja odvisna od smeri toka. Pri tem razberemo tako imenovano *svedrsko pravilo*: če desni sveder zasučemo v smeri polja, leze v smeri toka.

Slika 9.12 opilki v tuljavi in toroidu



Slika 9.12 kaže porazdelitev opilkov po tuljavi. Vidimo, da je v tuljavi magnetno polje vzporedno z osjo tuljave. Meritev z iglo tudi pokaže, da je polje po vsej tuljavi približno enako močno. Predstavimo ga z vzporednimi in enakomerno gostimi silnicami. Zunaj tuljave se polje razširi po prostoru. Z magnetno iglo, s katero sledimo izbrani silnici, se prepričamo, da so silnice sklenjene. Vase sklenjeno je torej tudi magnetno polje tuljave. Smer polja je odvisna od smeri toka. Znotraj tuljave spet velja svedrsko pravilo. Pravi, da je smer polja v tuljavi tista, v katero leze desni vijak, če ga sučemo v smeri toka po tuljavi (sliki 9.13, 9.14).

Sliki 9.13, 9.14 smer magnetnega polja v središču žične zanke



Dejavnost Opazujte potek magnetnega polja v okolici tuljave in z magnetno iglo konstruirajte nekaj silnic.

SILA NA VODNIK V MAGNETNEM POLJU

Med pola podkvastega magneta pravokotno na smer silnic namestimo žico in jo priključimo na izvir enosmerne napetosti. Žica se odkloni v smeri, ki je pravokotna na smer magnetnega polja in pravokotna na žico (slika 9.15). To pomeni, da deluje na žico sila v tej smeri (slika 9.16). Vidimo, da je sila pravokotna na ravnino, ki jo določata vektor, ki kaže smer magnetnega polja, in vektor, ki kaže smer toka. Sila deluje v smeri, v katero se premakne desni vijak, če ga zasučemo tako, kakor po najkrajši poti zasučemo vektor, ki kaže smer toka, k vektorju, ki kaže smer polja. Silo imenujemo *magnetna sila*. Če teče tok v smeri magnetnega polja ali v nasprotni smeri, sile ni.

Dejavnost Predlagajte poskus, pri katerem bi izmerili velikost magnetne sile. Vodnik naj bo pravokoten na smer magnetnega polja. Načrtovani poskus tudi izvedite!

Ugotovimo, da je magnetna sila premo sorazmerna z jakostjo toka po vodniku. Sklepamo pa lahko, da je premo sorazmerna tudi z dolžino vodnika, ki je v magnetnem polju. Kar mislimo si, da sta v magnetnem polju dva enako dolga zaporedno postavljena vodnika, po katerih je enak tok. Na vsakega od njiju deluje enaka sila. Če ju nadomestimo z enim samim vodnikom z dvojno dolžino, bo pri enakem toku tudi sila dvojna. Sorazmernostni koeficient je odvisen od magnetnega polja, saj namerimo v različnih poljih različne sile. Imenujemo ga *gostota magnetnega polja* in označujemo z B . Tako velja

$$F_m = B I l .$$

Iz enačbe razberemo enoto za gostoto magnetnega polja:

$$[B] = \frac{[F]}{[I][l]} = \frac{\text{VAs}}{\text{Am}^2} = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \text{tesla (T)} .$$

Gostota magnetnega polja je vektor, ki ima smer polja. Z njim bomo odlej predstavljali magnetno polje.

Gostota zemeljskega magnetnega polja v naših krajih je okoli $5 \cdot 10^{-5}$ T. Ob polih trajnih magnetov je gostota magnetnega polja nekaj sto mT, elektromagneti z železnim jedrom dajejo okoli 1 T, superprevodni elektromagneti pa okoli 10 T. Na površjih nevtronskih zvezd so magnetna polja do 10^8 T in več.

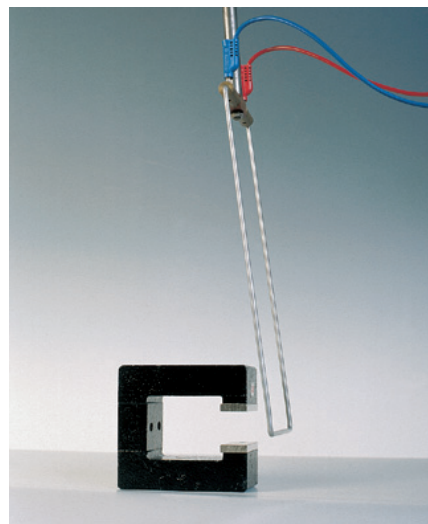
Ko vodnik in magnetno polje nista pravokotna, je za magnetno silo odločilna komponenta magnetnega polja, pravokotna na vodnik (slika 9.18), zato je

$$F_m = B I l \sin \varphi .$$

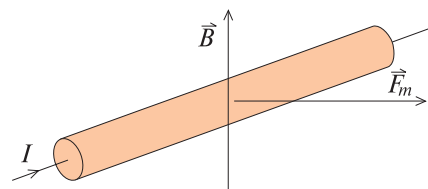
* Vidimo, da ima magnetna sila vse lastnosti *vektorskega produkta* med gostoto magnetnega polja in vektorjem, ki ga usmerimo v smeri toka. Običajno zapišemo

$$\vec{F}_m = I \vec{l} \times \vec{B} ,$$

kjer je $\vec{l}$ vektor v smeri toka, ki ima za velikost dolžino vodnika.



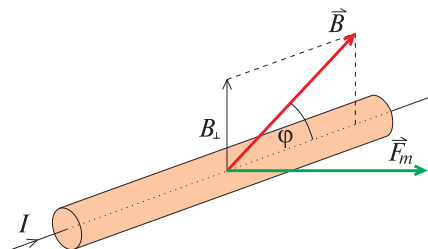
Slika 9.15 vodnik med poloma podkvastega magneta



Slika 9.16 sila na vodnik v prečnem magnetnem polju

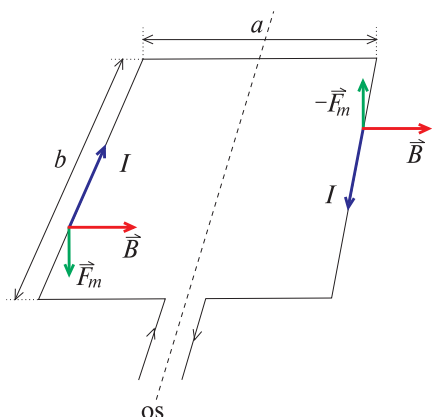


Slika 9.17 Majhen trajen magnet lebdi nad ploščo supraprevodnika.



Slika 9.18 sila na vodnik v magnetnem polju, ki je nagnjeno proti vodniku

* NAVOR NA TULJAVO V MAGNETNEM POLJU



Slika 9.19 žična zanka v magnetnem polju, ki je v ravnini zanke



Slika 9.20 tuljave

Slika 9.21 instrument na vrtljivo tuljavo

? *Premislite, kolikšen je navor na zanko, če magnetno polje ni v ravnini zanke, je pa pravokotno na os, okoli katere je vrtljiva zanka! Medsebojno lego zanke in magnetnega polja najlažje opredelimo s kotom med smerjo magnetnega polja in smerjo magnetnega polja toka v zanki.

Slika 9.19 kaže pravokotno žično zanko, ki leži v magnetnem polju, ki je v ravnini zanke. Ko teče po zanki tok v nakazani smeri, delujeta na stranici, ki sta pravokotni na magnetno polje, sili, ki sta pravokotni na ravnino zanke. Sili sta nasprotno enaki in delujeta na zanko z navorom, ki skuša zasukati zanko tako, da je pravokotna na magnetno polje. Zanka, ki je vrtljiva okoli narisane osi, ki je pravokotna na magnetno polje, se zasuče v ravnovesno lego, v kateri je magnetno polje toka v zanki v smeri zunanjega magnetnega polja.

Izračunajmo navor na tuljavo! S slike razberemo, da je sila na stranico b enaka

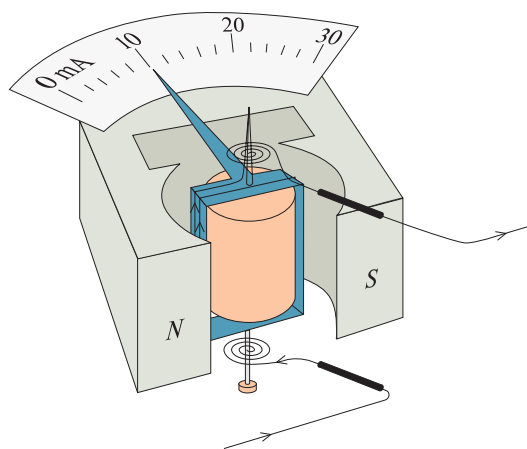
$$F_m = B I b ,$$

navor pa je

$$M = F_m a = B I a b = B I S .$$

Produkt ab , ki predstavlja ploščino zanke, označimo z S . Navor na tuljavo z N ovoji je N -krat večji:

$$M = N B I S .$$



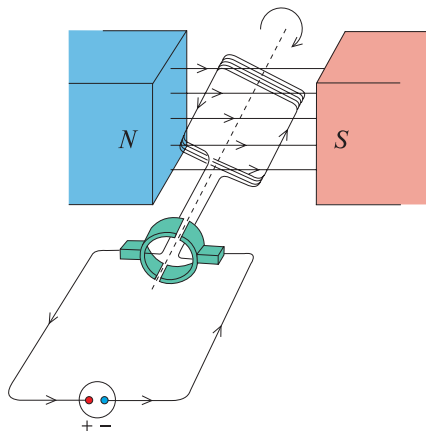
Navor na tuljavo v magnetnem polju izrabljajo v instrumentih na vrtljivo tuljavico (slika 9.21). Tuljavica je v magnetnem polju med poloma podkvastega magneta in železnim jedrom v sredini. Polje je v vseh legah pravokotno na ovoje, tako da magnetni navor na tuljavico tudi pri večjem zasuku ni odvisen od zasuka. Tuljavica je povezana z ohišjem prek polžaste vzmeti, ki pri zasuku uravnovesi magnetni navor s svojim navorom, tako da je

$$N I B S = D \varphi ,$$

če je D koeficient vzmeti.

Magnetni navor na tuljave v rotorju ali kotvi elektromotorja omogoča vrtenje. Pri motorjih na enosmerni tok komutator poskrbi za to, da

poganja navor kotvo ves čas v istem smislu. Ko se kotva s komutatorjem zasučje za 180° , pri čemer pridejo stranice tuljave v območje, kjer bi imel navor nasprotno smer, se obrne smer toka po tuljavi. Sile in navori tako ohranijo smer (slika 9.22). Magnetno polje navadno ustvarjajo tuljave, ki so navite na notranji strani ohišja motorja ali, kakor mu pravimo, *statorja*.



Povezava V kaki tehniški enciklopediji ali elektrotehniškem učbeniku si oglejte podrobnejšo zgradbo elektromotorja na enosmerni tok! Katere so značilne povezave med tuljavami v rotorju in v statorju? Kako bi definirali izkoristek elektromotorja? Kako bi ga izmerili?

Slika 9.22 tuljava s komutatorjem

* GIBANJE NABITIH DELCEV V MAGNETNEM POLJU

Opazujemo pahljačast curek elektronov, ki izhaja iz elektronskega topa v odklonski cevi (slika.9.23). Ko plošči odklonskega kondenzatorja priključimo na napetost anode, v bučki ni električnega polja. Sled curka elektronov, ki jo vidimo na fluorescenčnem zaslonu, je zato ravna. Ko se bučki približamo s paličastim magnetom, tako da je smer magnetnega polja ob curku pravokotna na curek, se le ta odkloni. Odklon je posledica magnetne sile. Hitro se prepričamo, da se odkloni curek v nasprotno smer kakor vodnik, po katerem bi tekkel tok v smeri gibanja elektronov. Upoštevati moramo, da je naboj elektronov negativen in zato smer električnega toka v curku nasprotna smeri gibanja elektronov.

Sila na curek je posledica sile na posamezne elektrone. Opazujemo kratenk del curka v magnetnem polju (slika 9.23). Sila na ta del curka je

$$\Delta F_m = B I \Delta l = B (n e v S) \Delta l = (n S \Delta l) e v B .$$

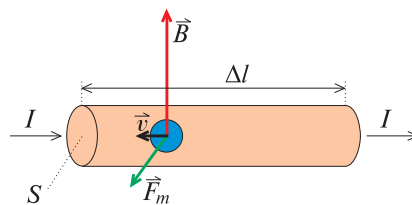
Jakost električnega toka v curku smo izrazili na že znani način in enačbo preuredili. Dobljeni izraz si razlagamo kot produkt števila delcev v delu curka in sile na posamezen delec. Ta je torej

$$F_m = e v B ,$$

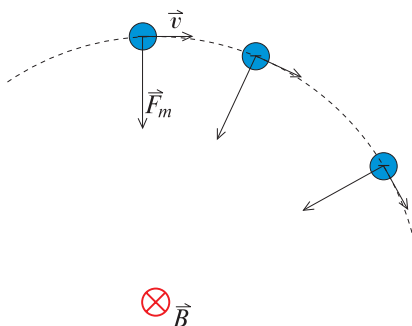
če sta hitrost in magnetno polje pravokotna druga na drugo.

* Tudi silo na delec predstavimo z vektorskim produktom, tokrat kot

$$\vec{F}_m = e \vec{v} \times \vec{B} .$$



Slika 9.23 magnetna sila na elektrone v curku



Slika 9.24 magnetna sila ukrivi curek v krožnico



Slika 9.25 Prvi ciklotron-krožni pospeševalnik za protone je skonstruiral Lawrence leta 1932. Velik je bil toliko kot človeška dlan.

Slika 9.26 Posnetek sledi, ki so jih zaznali detektorji v pospeševalniku ob trku med protonom in antiprotonom.

Dopolnimo prejšnji poskus tako, da v bučki ustvarimo homogeno magnetno polje. Navadno uporabimo za to dve kratki tuljavi, ki sta tolikšni, da objameta bučko, njuna medsebojna razdalja pa je enaka radiju. Po obeh tuljavah teče tok v isti smeri. Taki tuljavi imenujemo *Helmholtzovi*. Sled curka na zaslonu je sedaj zakrivljena v krožnico.

Magnetna sila je vselej pravokotna na hitrost, zato deluje na elektrone v curku podobno, kakor deluje sila vrvi na krožeč kamen (slika 9.24).

* Določimo še radij tira, po katerem zakrožijo elektroni v curku. Po Newtonovem zakonu mora biti vsota vseh sil na krožeče telo enaka $m v^2/r$, zato je

$$e v B = \frac{m v^2}{r} .$$

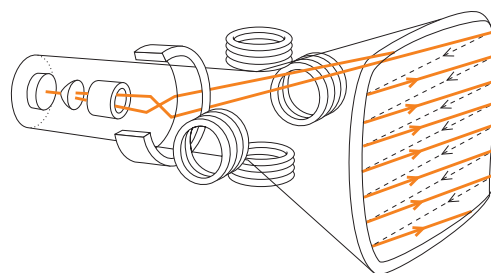
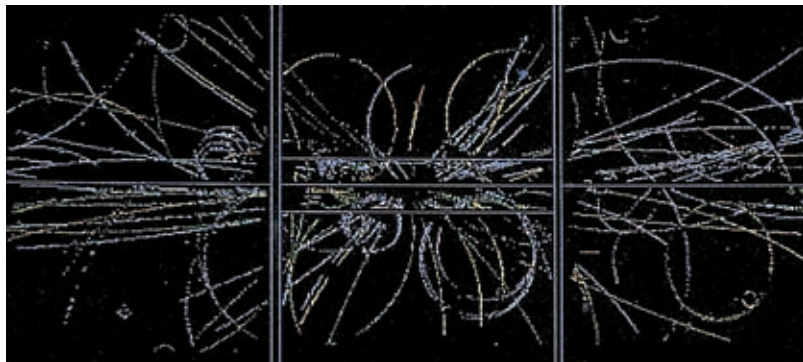
Radij tira

$$r = \frac{m v}{e B}$$

je torej premo sorazmeren z gibalno količino.

Rezultat lahko preverimo v elektronski cevi, v kateri je helij z majhnim tlakom (okoli 0,01 mbar). Atomi helija, na katere zadenejo elektroni v curku, oddajajo modro zeleno svetlobo, ki kaže sled curka.

Z merjenjem radija tira določajo gibalno količino delcev, ki nastajajo pri trkih med delci z velikimi energijami. Slika 9.26 kaže posnetek sledi, ki so jih zaznali z detektorji pri pospeševalniku SPS v CERN-u ob trku med protonom in antiprotonom z energijo 270 GeV.



Slika 9.27 katodna cev s paroma odklonskih tuljav

? *V televizijskih ceveh odklanjamo curek elektronov z magnetnimi polji, ki jih ustvarjamo z odklonskimi tuljavami (slika 9.27). Pokažite z računom, da je odklon curka na zaslonu sorazmeren z gostoto magnetnega polja v odklonski tuljavi!

* MERJENJE GOSTOTE MAGNETNEGA POLJA

Sila na vodnik v magnetnem polju ali navor na tuljavo v magnetnem polju sta osnovi za določanje gostote magnetnega polja.

Z merjenjem sile na vodnik ali navora na tuljavo lahko določimo gostoto magnetnega polja brez dodatnega umerjanja, saj izhajata iz definicije gostote magnetnega polja. Tako merjenje je uporabno v merilnih laboratorijih, za vsakdanjo rabo pa je dokaj nerodno. Merilniki magnetnega polja največkrat izrabljajo *Hallov pojav*. V vodnikih, ki sekajo silnice magnetnih polj, električno polje ni vzpo-redno z osjo vodnika, ampak ima komponento, ki je pravokotna na vodnik. Jakost prečne komponente je sorazmerna z gostoto magnetnega polja. *Prečna napetost*, ki jo izmerimo z občutljivim voltmetrom, nam zato rabi kot mera za gostoto magnetnega polja.

Vzemimo tanko ploščico, ki ima prečni presek s stranicama a in b (slika 9.28). Ploščico postavimo v magnetno polje, tako da je pravokotno nanjo. Ko teče po ploščici enosmerni tok z jakostjo I , se po njej gibljejo nosilci toka s hitrostjo

$$v = \frac{I}{n a b e} ,$$

če je n gostota nosilcev in e njihov naboj. V magnetnem polju deluje na nosilce sila

$$F = e v B ,$$

ki jih odklanja v prečni smeri. Če je naboj nosilcev pozitiven, se na stranici, proti kateri jih polje odklanja, pojavi višek pozitivnega naboja, na nasprotni stranici pa višek negativnega naboja. Zaradi tega nastalo prečno električno polje E s svojo silo uravnesi magnetno silo, tako da se poslej gibljejo nosilci vzdolž vodnika. Izenačenje električne in magnetne sile da enačbo

$$e E = e v B ,$$

iz katere izračunamo jakost električnega polja $E = v B$ in prečno ali *Halovo napetost*

$$U = b E = \frac{I}{n a e} B .$$

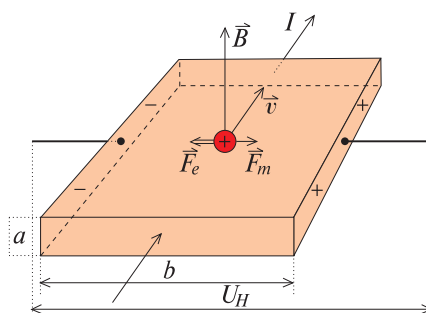
Vidimo, da je Hallova napetost sorazmerna z gostoto magnetnega polja in z jakostjo električnega toka. Ob meritvah imamo opraviti vselej z enakim električnim tokom, zato lahko rečemo, da je Hallova napetost sorazmerna z gostoto magnetnega polja:

$$U = k B .$$

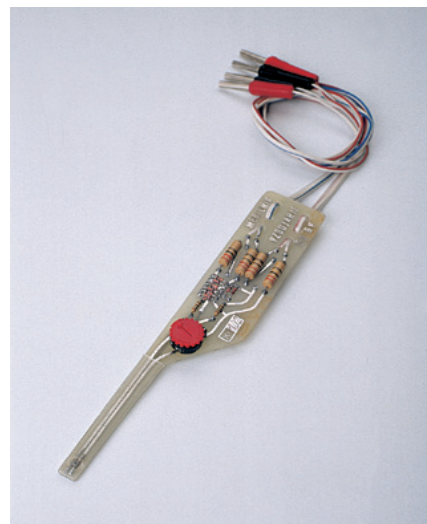
Koeficient k določimo z umeritvijo merilnika. Hallov merilnik je med najbolj razširjenimi merilniki gostote magnetnega polja. V naslednjem poglavju bomo spoznali še eno vrsto merilnikov.

Dejavnost Umerite Hallov merilnik magnetnega polja. Magnetno polje ustvarite s primerno tuljavo in ga določite s tehtanjem sile na vodnik ali navora na tuljavo. Hkrati v vsakem polju izmerite še Hallovo napetost. Na koncu lahko skalo na voltmetru priredite za merjenje gostote magnetnega polja.

? Zamislite si merilnik gostote magnetnega polja, ki bi temeljil na merjenju sile na vodnik v magnetnem polju. Kako bi umerili merilnik in kako bi ga uporabljali? Zamislite si še merilnik, ki bi imel za osnovo merjenje navora na merilno tuljavico! Tudi tu predlagajte merilni postopek!



Slika 9.28 nastanek Hallove napetosti



Slika 9.29 merilnik s Hallovo sondo

MAGNETNO POLJE ELEKTRIČNEGA TOKA

Magnetno polje, ki ga povzroča električni tok, je najpreprostejše v *dolgi tuljavi* in v okolici *dolgega ravnega vodnika*.

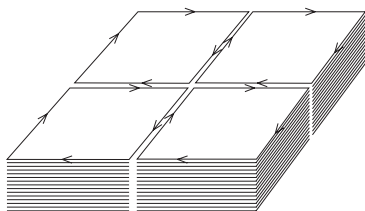
Dolga tuljava je takšna, ki ima v primerjavi z dolžino majhen premer. Magnetno polje v tuljavi je skoraj po vsej dolžini tuljave homogeno. Ugotovimo, da je gostota magnetnega polja *sorazmerna z jakostjo električnega toka in z gostoto ovojev na tuljavi*. Za prazno tuljavo z dolžino l in z N ovoji, po katerih je tok z jakostjo I , zapišemo

$$B = \mu_0 I \frac{N}{l} ,$$

kjer je μ_0 *indukcijska konstanta*. Njena vrednost je

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} .$$

Dejavnost Zamislite si poskus, s katerim bi preverili izraz za gostoto magnetnega polja v tuljavi, in ga naredite!



Slika 9.30 Gostota magnetnega polja v tuljavi ni odvisna od preseka.

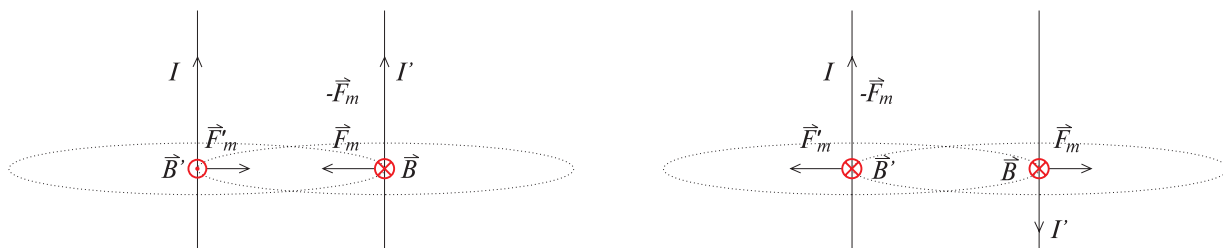
Preseneča nas, da gostota magnetnega polja ni odvisna od premera tuljave. To lahko razumemo takole. Zložimo več enakih dolgih tuljav, po katerih teče enak tok v isti smeri, drugo poleg druge, tako da se tesno stikajo (slika 9.30). Pri tem ostane gostota magnetnega polja v tuljavah nespremenjena. Zložene tuljave pa lahko obravnavamo kot eno samo sestavljeno tuljavo. Po stičnih ploskvah tuljav tečejo namreč tokovi v nasprotnih smereh, tako da se njihov učinek paroma uravnoveša. K magnetnemu polju sestavljene tuljave lahko prispeva le tok po obodu tuljave. Ker je gostota magnetnega polja v sestavljeni tuljavi enaka kakor v sestavnih tuljavah, ne more biti odvisna od preseka tuljave.

* V okolici *dolgega ravnega vodnika* so silnice magnetnega polja koncentrične krožnice, ki potekajo v ravninah, pravokotnih na smer toka. Gostota magnetnega polja je odvisna od jakosti toka in od razdalje od osi vodnika :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} .$$

Dva dolga vzporedna vodnika, po katerih teče tok v isti smeri, se zaradi medsebojnih magnetnih sil privlačita, vodnika, po katerih je tok v nasprotnih smereh, pa se odbijata (slika 9.31). Naj bosta tokova enaka. Tedaj je sila na odsek vodnika z dolžino l enaka

$$F = I l B = I l \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} = \frac{\mu_0 I^2 l}{2 \pi r} .$$



Slika 9.31 sila med vodnikoma

Za primer, ko je v žicah tok z jakostjo 1 A in sta vodnika 1 m narazen, izračunamo, da je sila na 1 m vodnika enaka

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}.$$

To je vrednost, s katero je definirana enota za jakost toka, 1A. Na osnovi te definicije je določena induksijska konstanta.

Oglejmo si še, kako se spremeni magnetno polje, če tuljavo napolnimo s snovjo. Vzemimo primerno tuljavo in vtaknimo vanjo jedra iz različnih snovi. Žal ne moremo opazovati sprememb magnetnega polja v notranjosti tuljave, nekaj pa povedo že spremembe v njeni bližini.

Edinole jedra iz železa, niklja, kobalta, njihovih zlitin in še nekaterih manj znanih snovi znatno spremenijo magnetno polje v okolici tuljave. Večina drugih snovi povzroči le majhne, komaj merljive spremembe. Zaradi izrazitega vpliva, ki ga imajo železo in druge take snovi na magnetno polje, jih imenujemo *feromagnetne*.

Velik vpliv feromagnetnih snovi na magnetno polje je posledica tega, da so v njih *magnetne domene*, ki predstavljajo drobne magnetke. Železo navzven ne kaže magnetnih lastnosti, ker so domene v njem povsem neurejene. Ko pa je železo v magnetnem polju, na primer v polju tuljave, se poveča delež domen, ki imajo smer magnetnega polja. Železo postane magnetno in ojači zunanje polje. Del magnetizma železo obdrži tudi tedaj, ko zunanjega polja ni več. Zlitine železa, iz katerih izdelujejo stalne magnete, je mogoče v magnetnem polju za stalno *namagnetiti*.

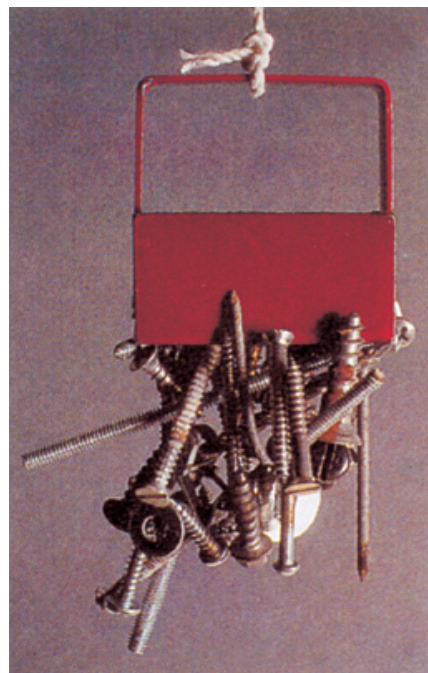
Feromagnetne snovi obržijo značilne lastnosti le do *Curiejeve temperature*. Ta je pri železu okoli 770° C. Nad Curiejevo temperaturo je vpliv feromagnetnih snovi na magnetno polje neznaten. Nekatere feromagnetne snovi in njihove Curiejeve temperature so našteje v tabeli. Še več jih najdete fizikalnih priročnikih.

Tabela

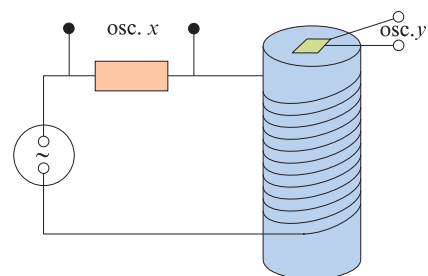
Snov	Curiejeva temperatura [° C]
Gadolinij	20
Nikelj	385
Železo	774
Kobalt	1140

* Urejanje domen v magnetnem polju ima za posledico, da gostota magnetnega polja v tuljavi in jakost toka po tuljavi nista sorazmerna. Še več, gostota magnetnega polja je odvisna celo od tega, kako je namagneteno železo ob vključitvi toka. Pojav imenujemo *histereza*. Najlažje ga opazujemo s poskusom, ki ga kaže slika 9.33.

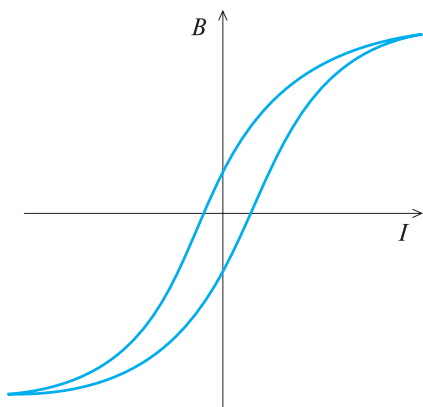
Tuljavo povežemo zaporedno z upornikom za nekaj ohmov in jo priključimo na izvir sinusne izmenične napetosti. Na krajišče železnega jedra tuljave pritismo Hallov merilnik magnetnega polja. Napetosti na uporniku in Hallovo napetost opazujemo z osciloskopom. Napetost



Slika 9.32 Trajni magnet pritegne le vijake iz feromagnetnih materialov.



Slika 9.33 opazovanje histereze pri magnetanju železa



Slika 9.34 histerezna krivulja

? Kakšen material bi svetovali za izdelavo stalnih magnetov in kakšnega za izdelavo transformatorskega jedra, kjer se smer magnetnega polja neprestano spreminja?

S katerimi podatki označujejo materiale za proizvodnjo stalnih magnetov in jeder elektromagnetov?

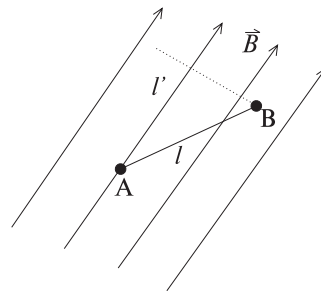
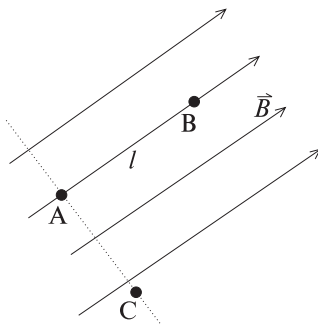
na uporniku, ki je sorazmerna s tokom, priključimo tako, da odklanja curek v osciloskopu v vodoravni smeri, Hallovo napetost, ki je sorazmerna z gostoto magnetnega polja ob jedru, pa tako, da odklanja curek v navpični smeri. Na zaslonu dobimo sliko, ki kaže odvisnost gostote magnetnega polja od električnega toka po tuljavi (slika 9.34). Krivulji pravimo tudi *histerezna krivulja*. Oblika histerezne krivulje je odvisna od materiala, iz katerega je jedro. Pri jedru iz mehkega železa je histerezna krivulja ozka, pri jedru iz jekla ali kakega materiala za izdelavo magnetov pa široka. Ploščina ploskve, ki jo oklepa histerezna krivulja, pove, kolikšno električno delo gre v izgubo pri enem magnetenju in razmagnetanju železnega jedra, pri katerem se vrnemo v začetno stanje. Zaradi tega se jedro segreje.

** Enačbi, ki povezujeta gostoto magnetnega polja v dolgi tuljavi in v okolici ravnega vodnika z jakostjo toka po vodnikih, izhajata iz *zakona o magnetni napetosti*. Magnetno napetost definiramo podobno kakor napetost v električnem polju. Slika 9.35 kaže dve točki v razdalji l vzdolž silnice *homogenega* magnetnega polja. Magnetna napetost med točkama je enaka produktu gostote magnetnega polja in razdalje:

$$U_m = B l .$$

Pri tem je napetost v točki A glede na točko B pozitivna, napetost v točki B glede na točko A pa negativna.

Napetost med točkama, katerih zveznica je pravokotna na silnice, je nič. Napetost med točkama, katerih zveznica poteka povprek po magnetnem polju, izračunamo tako, da množimo gostoto magnetnega polja s projekcijo razdalje na silnice (slika 9.36).



Slika 9.35, 9.36

Magnetna napetost med točkama magnetnega polja, v katerem ni električnih tokov ali stalnih magnetov, je neodvisna od poti, po kateri jo izračunamo. To lastnost smo spoznali že pri električni napetosti. Napetost med začetno in končno točko sklenjene poti, to je vsota delnih napetosti vzdolž poti, je zato nič. Drugače pa je, če s sklenjeno potjo objamemo vodnik z električnim tokom. Objemimo dolg raven vodnik s krožno zanko po silnici magnetnega polja. Vsota delnih napetosti je

$$2 \pi r B = 2 \pi r \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} = \mu_0 I ,$$

torej je sorazmerna z objetim tokom. Tudi v drugih primerih bi se pričeli, da je vsota magnetnih napetosti po sklenjeni poti sorazmerna z objetim tokom. Sorazmernostni koeficient je induksijska konstanta.

? Z uporabo zgornjega zakona izpeljite izraz za gostoto magnetnega polja v dolgi tuljavi. S sklenjeno potjo objemite tuljavo in računajte, kakor da zunaj nje ni magnetnega polja.

* | MAGNETNI PRETOK

Tudi magnetni pretok skozi izbrano ploskev definiramo kot produkt med velikostjo ploskve in komponente gostote magnetnega polja, ki je pravokotna na ploskev (slika 9.37):

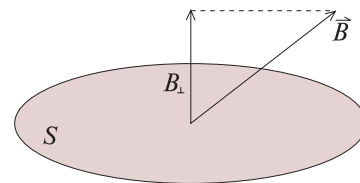
$$\Phi_m = B_{\perp} S.$$

Če je magnetno polje na različnih delih ploskve različno ali ima različno smer, si mislimo ploskev razdeljeno na tako majhne dele, da je magnetno polje tam konstantno, izračunamo pretok skozi vsak del posebej in vse skupaj seštejemo. Iz enačbe razberemo, da je enota za magnetni pretok *voltsekunda* (Vs).

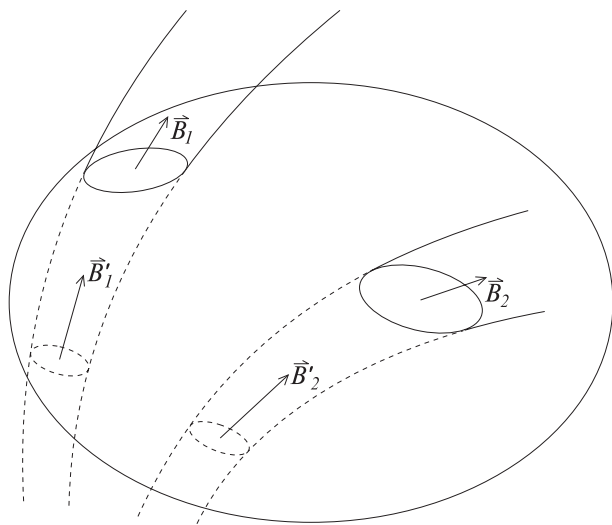
Poglejmo, kaj lahko povemo o magnetnem pretoku.

V magnetnem polju, na primer v polju tuljave, si izberimo *snop silnic*. Znotraj tuljave je snop stisnjen, zunaj pa se razširi in se znova stisne na drugem koncu tuljave. Spominja nas na tokovnice v sklenjenem toku nestisljive tekočine. Magnetni pretok bi lahko primerjali s prostorninskim tokom. Spomnimo se, da je prostorninski tok nestisljive tekočine v snopu tokovnic skozi vse preseke snopa enak.

Poskusi nas prepričajo, da velja v snopu silnic v magnetnem polju enaka zakonitost tudi za magnetni pretok. To zakonitost imenujemo *zakon o magnetnem pretoku*. Povemo ga lahko še drugače.

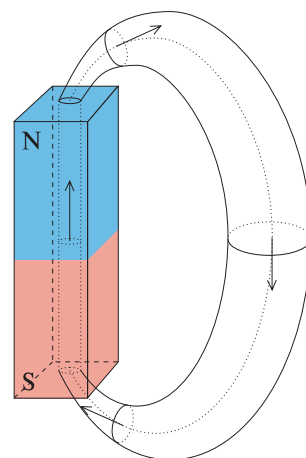


Slika 9.37



Zamislimo si sklenjeno ploskev v magnetnem polju (slika 9.38). Magnetni pretok po snopih silnic, ki sekajo ploskev, je ob vstopu in izstopu iz ploskve enak. Iz tega lahko sklepamo, da je skupni magnetni pretok skozi sklenjeno ploskev nič. Izrek velja vedno, če ploskev objema le del magnetnega polja, tako kakor zgoraj, če objema tuljavo, po kateri teče tok, ali če objema stalni magnet. Je posledica tega, da so magnetne silnice sklenjene in se torej nikjer ne začenjajo in nikjer ne nehajo. Tudi pri stalnih magnetih, kjer magnetne silnice izvirajo na enem polu in ponikajo v drugi pol, si moramo predstavljati, da se znotraj magnetna nadaljujejo v sklenjenem toku (slika 9.39).

Slika 9.38 magnetni pretok skozi sklenjeno ploskev je nič

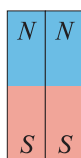


Slika 9.39 Tudi pri stalnih magnetih so tokovne niti sklenjene.

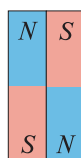
10. VPRAŠANJA IN NALOGE

VPRAŠANJA

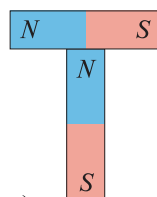
1. Magnete na gladki podlagi zadržimo v narisani legi. Kaj se zgodi v posameznih primerih, ko magnete spustimo?



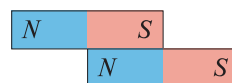
a)



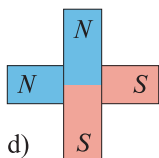
b)



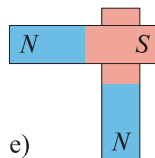
c)



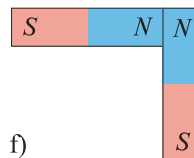
č)



d)



e)



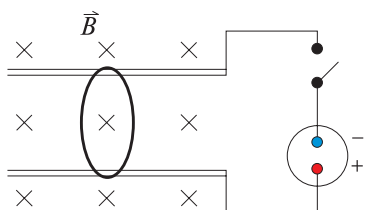
f)

2. Vzemimo, da imamo tri enake železne palice. Dve sta namagneteni, tretja pa ne. Kako bi ugotovili, kateri palici sta namagneteni, ne da bi uporabljali dodatne naprave?

3. Nabit delec kroži v homogenem magnetnem polju v ravnini, ki je pravokotna na silnice. Nato vključimo homogeno električno polje, ki ima enako smer kakor magnetno polje. Kako se giblje delec?

4. Curek elektronov vstopa od zunaj v prostor s homogenim magnetnim poljem v smeri, pravokotni na silnice. Ali je lahko tir elektronov sklenjen? Utemeljite odgovor!

5. Magnetno silo lahko uporabimo pri izdelavi elektromagnetne črpalke za prečrpavanje prevodnih kapljev. Kako bi sestavili tako črpalko? Naredite poskus po svoji zamisli!



6. V magnetnem polju je obroč iz aluminija, ki miruje na dveh vodoravnih aluminijastih palicah, povezanih z baterijo in stikalom (gl. sliko). Magnetno polje je pravokotno na ravnino palic. V katero smer se premakne obroč, ko staknemo stikalo?

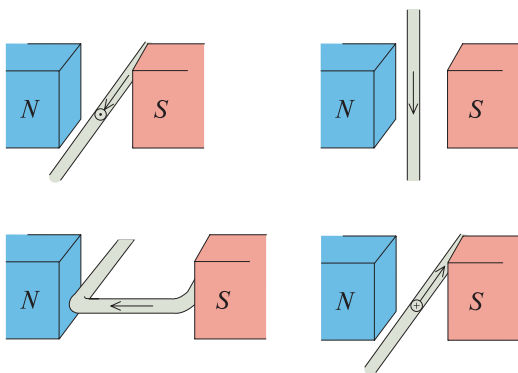
7.] Danes verjamemo, da je zemeljsko magnetno polje posledica električnih tokov, ki tečejo v zemeljski sredici. Skicirajte, kako morajo teči tokovi, da dajo opazovano polje.

8.] Da zmanjšamo gostoto magnetnega polja v okolici vodnika, ga obdamo s kovinskim plaščem, po katerem teče enako velik tok v nasprotni smeri. Tako dobimo *koaksialni vodnik*. Pojasnite, zakaj v okolici koaksialnega vodnika ni magnetnega polja.

9.] Kako določimo, kje sta severni in južni pol pri trajnem magnetu? Ali lahko govorimo o polih pri dolgi tuljavi? Kako pa je s tem pri dolgem vodniku?

10.] Sredi vesolja smo zašli v oblak prahu, v katerem so delci pozitivno nabiti. Kakšno polje zaznajo merilniki na vesoljski ladji, ki miruje oziroma se giblje glede na oblak?

11.] Žico postavimo med pola magneta v narisanih legah. S puščicami je označena smer toka. Katero smer ima v posameznih primerih magnetna sila?



NALOGE

1.] Po žici, ki jo napnemo med poloma magneta pravokotno na smer magnetnega polja, teče tok z jakostjo 30 A. Izmerimo, da je magnetna sila na žico 3,80 N. Kolikšna je povprečna gostota magnetnega polja med poloma, če je njun premer 25 cm?

Odgovor: 0,51 T

2.] Proton se giblje po krožnem tiru pravokotno na homogeno magnetno polje z gostoto 1,40 T. Kolikšna je kinetična energija protona, če je radij tira 8,45 mm?

Odgovor: 6,7 keV

3.] Kvadratno zanko s stranico 3 cm potisnemo med pola elektromagneta tako, da je ravnina zanke vzporedna z magnetnim poljem. Ko teče po zanki tok 4,5 A, deluje nanjo magnetno polje z navorom 0,001 Nm. Kolikšna je gostota magnetnega polja med poloma?

Odgovor: 0,25 T

4.] Po dveh dolgih vzporednih žicah, ki sta 10,0 cm narazen, tečeta tokova po 25 A v isti smeri. Kolikšna je gostota magnetnega polja v točki, ki je na zveznici žic 15 cm od prve in 5 cm od druge žice?

Odgovor: $1,33 \cdot 10^{-4}$ T

Odgovor: $F_1/l = F_2/l = 6,67 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}$
 $F_3/l = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$

Odgovor: 0,03 N

Odgovor: Navor je največji, ko je geometrijska os tuljavice pravokotna na silnice. Tedaj je enak 0,1 Nm. Navora ni, ko je geometrijska os tuljavice vzporedna s silnicami.

Odgovor: $5,7 \cdot 10^{-4} \text{ T}$

Odgovor: $1,6 \cdot 10^{-14} \text{ N}$

Odgovor: 0,20 N
0

Odgovor: 1,7 N

Odgovor: 9 cm
100 cm

5. Trije dolgi vzporedni vodniki potekajo pravokotno na ravnino skozi oglišča enakokrakega trikotnika s stranico 27,0 cm. Kolikšne so sile med vodniki, če tečeta po prvih dveh tokova po 30 A v isti smeri, po tretjem pa enak tok v nasprotni smeri?

6. Na ekvatorju so silnice magnetnega polja skoraj vodoravne in usmerjene od juga proti severu. Gostota magnetnega polja je okoli $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. Kolikšna sila deluje na 20 m dolgo žico, ki leži v smeri vzhod – zahod, če je v njej tok 30 A?

7. Tuljavica s 100 ovoji in s presekom 5 cm^2 je v homogenem magnetnem polju z gostoto 1 T vrtljiva okoli osi, ki je pravokotna na silnice. Po tuljavici teče tok 2 A. V kateri legi je magnetni navor na tuljavico največji in kolišen je? Kako moramo tuljavico zasukati, da navora ni?

8. Dolga prazna tuljava z 250 ovoji ima presek 1 dm^2 in dolžino 30 cm. Kolikšna je gostota magnetnega polja v tuljavi, ko teče po njej tok 0,54 A?

9. Curek elektronov s hitrostjo 10^6 m/s se giblje po homogenem magnetnem polju z gostoto 0,1 T v ravnini, pravokotni na silnice. Kolikšna je sila, ki deluje na elektron v curku?

10. Raven vodnik z dolžino 0,5 m je v homogenem magnetnem polju z gostoto 0,1 T postavljen pravokotno na silnice. Kolikšna sila deluje na vodnik, če je v njem tok 4 A? Kolikšna pa je sila, če je vodnik v smeri magnetnega polja?

11. Pri zaganjanju avtomobila steče skozi zaganjač tok z jakostjo 400 A. Kolikšna magnetna sila deluje pri tem med kabloma od akumulatorja do zaganjača, ki sta 0,8 m dolga in 1,5 cm vsaksebi?

12. Po dveh vzporednih ravni vodnikih v razdalji 20 cm teče električni tok v isti smeri. Jakost toka po prvem vodniku je 1,5 A, jakost toka po drugem pa 1,8 A. Magnetno polje je v ravnini, ki je pravokotna na vodnika. V kateri razdalji od prvega vodnika na zveznici, ki povezuje preseka vodnikov z ravnino, je gostota magnetnega polja enaka nič? Ali obstajajo taka mesta tudi, če tečeta tokova v nasprotnih smereh? Skicirajte!

11. | INDUKCIJA

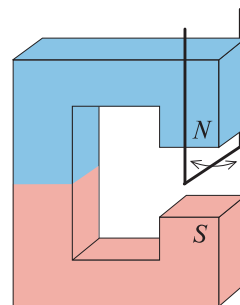
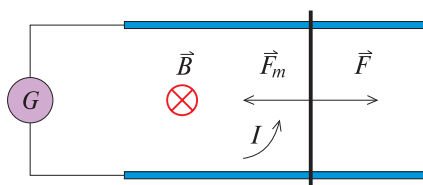
Naredimo poskuse, ki jih kažejo slike 11.1, 11.2 in 11.3. Pri prvem premikamo gibljivo prečko, da se giblje v smeri prečno na magnetno polje, in z občutljivim merilnikom merimo napetost na prečki. Namesto da bi premikali prečko, lahko premikamo magnet. Pri drugem s stikalom vklapljamemo in izklapljamemo tok po tuljavi in merimo napetost na drugi tuljavi, ki je v bližini prve. Pri tretjem spreminjamo tok po delu tuljave in merimo napetost na drugem delu, ki je v osi s prvim.

Na krajiščih prečke, ki se giblje pravokotno na magnetno polje, zaznamo napetost. Prav tako zaznamo napetost na tuljavi, ki je v bližini druge tuljave, v kateri se zaradi sprememb toka spreminja magnetno polje. Napetost, ki jo opazujemo, imenujemo *inducirana napetost*, pojav pa *indukcija*.

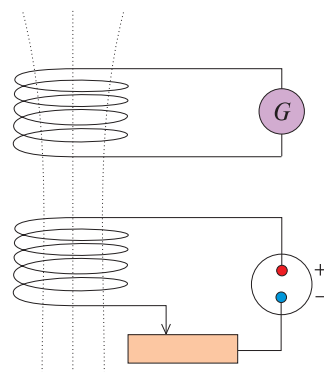
INDUKCIJA PRI GIBANJU VODNIKA PO MAGNETNEM POLJU

Oglejmo si podrobneje indukcijo pri gibanju vodnika v magnetnem polju. Poskus naredimo s pripravo, ki jo kaže slika 11.4. Na dveh vzporednih kovinskih vodnikih sloni gibljiva kovinska prečka, ki je postavljena pravokotno na vodnika. Kovinska vodnika sta povezana z občutljivim ampermetrom, vsa naprava pa je v magnetnem polju, ki je pravokotno na ravnino vodnikov.

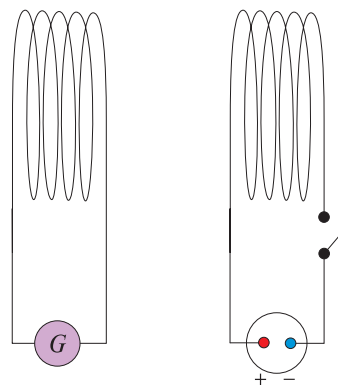
Med gibanjem prečke teče po sklenjenem krogu električni tok, ki ga imenujemo *inducirani tok*. Iz odklona kazalca na instrumentu lahko ugotovimo, katera je smer induciranega toka. Nato na krajišči prečke za kratek hip priključimo baterijo, ki požene po prečki tok v isti smeri, kakor teče inducirani tok. Prečka se začne gibati v smer, ki je nasprotna smeri, v katero se je gibal pred tem. Vemo, da to gibanje povzroči magnetna sila, ki deluje na prečko v magnetnem polju. V isti smeri deluje



Slika 11.1 indukcija pri premikanju prečke po magnetnem polju

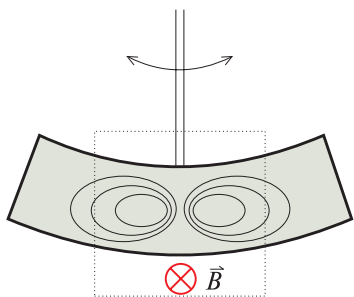


Slika 11.2 indukcija pri spreminjanju toka

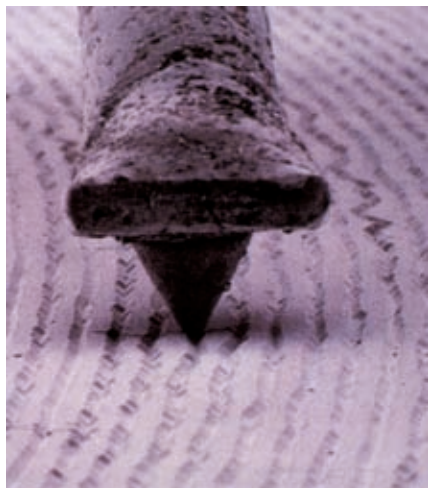


Slika 11.3 indukcija pri prekinjanju toka

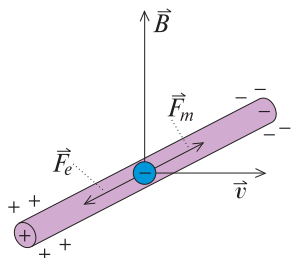
Slika 11.4



Slika 11.5 kovinska ploščica niha v prečnem magnetnem polju



Slika 11.6 Zelo lahka gramofonska igla sledi reži z zapisom zvoka. Ročica je povezana s tuljavo, v kateri se inducira napetost. To ojačimo in vodimo na zvočnike. Zapis na plošči je analogen zapis zvoka.



Slika 11.7

magnetna sila tudi tedaj, ko teče v prečki inducirani tok. Magnetna sila zaradi inducirane toka torej zavira gibanje prečke. Če naj se giblje prečka enakomerno, jo moramo vleči z zunanjo silo, ki uravnoveša magnetno silo. Do podobnih ugotovitev pridemo pri vseh indukcijskih pojavih. Inducirani tokovi imajo tako smer, da zavirajo gibanja ali druge spremembe, zaradi katerih so nastali. To je *Lenzovo pravilo*. Učinek Lenzovega pravila lepo opazujemo pri gibanju kovinske ploščice, ki niha prečno na magnetno polje. V ploščici se inducirajo sklenjeni ali *vrtnični* tokovi, ki zavirajo gibanje (slika 11.5).

Lenzovo pravilo je posledica energijskega zakona. Ko bi tekel inducirani tok v nasprotni smeri, bi se pri indukcijskih poskusih delo in energija ustvarjala sama od sebe iz nič. Premislite, kaj bi se dogajalo s prečko pri poskusu na sliki 11.4.

Energijski zakon nam pomaga pri iskanju izraza za inducirano napetost. Pri našem poskusu je prečka generator, inducirana napetost U_i pa njegova gonilna napetost. Če je I_i inducirani tok, se v izbranem času Δt skozi prečko pretoči naboj $\Delta e = I_i \Delta t$, ki prejme delo

$$U_i \Delta e = I_i U_i \Delta t .$$

To delo mora biti ravno enako delu zunanje sile F , s katero vlečemo prečko, $A = F \Delta s$.

Ker je sila F po velikosti enaka magnetni sili, lahko izenačimo:

$$A = F \Delta s = (I_i l B) \vartriangle \Delta t = I_i U_i \Delta t .$$

Od tod dobimo za inducirano napetost izraz

$$U_i = l \vartriangle B ,$$

ki se sklada s tem, kar kaže eksperiment.

Na pojav lahko gledamo še nekoliko drugače. Ko se prečka giblje prečno na magnetno polje, se skupaj z njo giblje tudi naboj, ki je v njej. Na pozitivne ione in elektrone deluje pri tem magnetna sila, ki ima smer vzdolž prečke (slika 11.7). Lahko gibljive elektrone magnetna sila požene proti krajišču prečke. Če prečka ni vključena v električni krog, se zaradi tega na tem krajišču gostota elektronov poveča, hkrati pa se zmanjša na drugem krajišču. Posledica je, da nastane v prečki vzdolžno električno polje, sila na elektrone v njem pa uravnovesi magnetno silo. Iz enačbe $e E = e \vartriangle B$, ki kaže enakost obeh sil, izračunamo jakost električnega polja v prečki:

$$E = \vartriangle B .$$

To električno polje ima za posledico inducirano napetost med krajiščema prečke. Pri prečki z dolžino l dobimo:

$$U_i = l E = l \vartriangle B .$$

Inducirana napetost pri gibanju vodnika nas spominja na Hallovo napetost. Prva je posledica magnetne sile na nabite delce, ki se gibljejo

hkrati z vodnikom, druga pa posledica magnetne sile na delce, ki se gibljejo zaradi toka.

* Oglejmo si še splošnejši zgled, ko hitrost, prečka in magnetno polje niso pravokotni med seboj. Slika 11.8 kaže prečko, ki je pravokotna na magnetno polje, vendar se giblje v smeri, ki tvori z magnetnim poljem kot θ . Magnetna sila na elektrone v prečki ima smer prečke, po velikosti pa je $F_m = e v B \sin \theta$. Inducirana napetost je tedaj

$$U_i = l v B \sin \theta .$$

Premisliti, kako je, če so hitrost, prečka in magnetno polje poljubno usmerjeni.

* Indukcija pri gibanju vodnikov po magnetnem polju je osnova za delovanje *dinamov*. V rotorju dinama so v žične zanke zviti vodniki, ki se vrtijo enakomerno v homogenem magnetnem polju statorja. Slika 11.9 kaže tako zanko v trenutku, ko je magnetno polje v ravnini zanke. Stranici zanke, ki sta vzporedni z osjo zanke, sekata silnice magnetnega polja, zato je v njima inducirana napetost. Na sliki sta označeni smeri magnetnih sil na elektrone v žicah.

Vidimo, da potiskata sili v obeh stranicah elektrone v isto smer. Med krajiščema zanke je zato inducirana napetost, ki je vsota napetosti na stranicah. V narisani legi je napetost pozitivnega priključka glede na negativni priključek enaka $U = 2avB$. V drugačni legi moramo upoštevati komponento hitrosti, ki je pravokotna na magnetno polje. Mislimo si, da sta krajišči zanke priključeni na obročka, na katerih z drsnima priključkoma otipavamo napetost. Upoštevajmo, da se zanka enakomerno vrti, in začnimo opazovati v trenutku, ko je ravnina zanke pravokotna na magnetno polje. Slika 11.10 kaže začetni in trenutni presek zanke z ravnino, ki je pravokotna na os. S slike razberemo, da sta kota med smerjo magnetnega polja in trenutno hitrostjo prečk enaka

$$\varphi = \omega t \quad \text{oziroma} \quad \varphi' = \pi - \omega t .$$

Inducirani napetosti na prečkah sta tedaj

$$U_i = a v B \sin \varphi = a v B \sin \omega t$$

oziroma

$$U_i' = a v B \sin \varphi' = a v B \sin (\pi - \omega t) = a v B \sin \omega t .$$

Napetosti v prečkah se seštevata, tako da je napetost med priključkoma

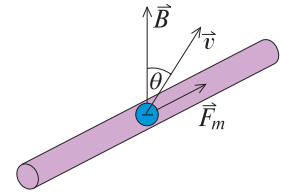
$$U = 2 a v B \sin \omega t .$$

Hitrost prečke izrazimo s kotno hitrostjo zanke, $v = \omega b/2$, in dobimo za inducirano napetost izraz

$$U = \omega B (ab) \sin \omega t .$$

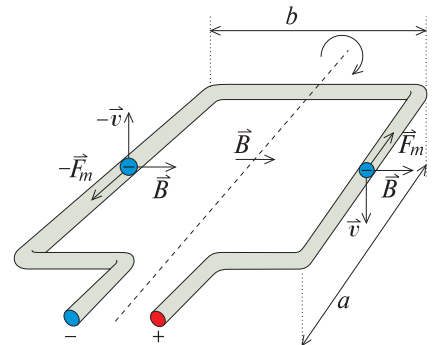
Produkt v oklepaju predstavlja ploščino zanke, $ab = S$, tako, da lahko končno napišemo

$$U = \omega B S \sin \omega t .$$

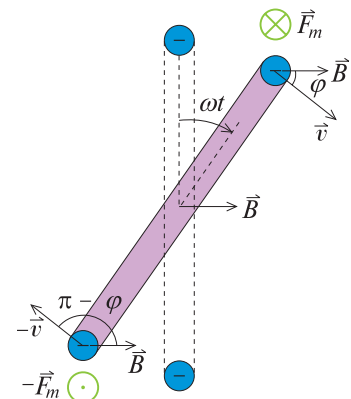


Slika 11.8 magnetna sila na elektron v vodniku, ki se giblje po magnetnem polju pod kotom glede na silnice

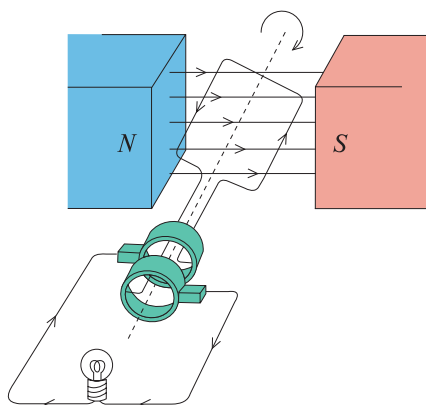
? *Poiščite izraz za inducirano napetost pri poševnem gibanju prečke po magnetnem polju še iz energijskega zakona.



Slika 11.9 magnetne silnice na elektron v zanki, ki se vrti v magnetnem polju

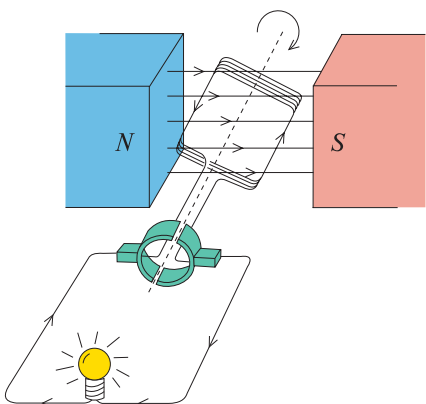


Slika 11.10 začetni in trenutni presek zanke z ravnino, ki je pravokotna na os



Slika 11.11 žična zanka, ki se vrti v magnetnem polju

Slika 11.12 časovni potek inducirane napetosti na priključnih tuljave, ki se vrti v magnetnem polju



Slika 11.13 tuljava s komutatorjem

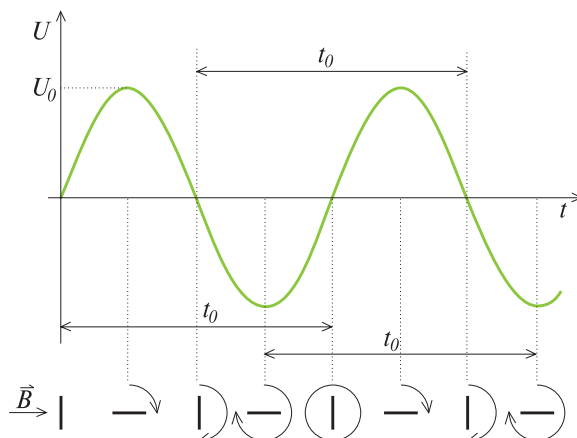
Povezava V kakem učbeniku za elektrotehniko ali v tehnični enciklopediji si podrobneje oglejte zgradbo dinamoma za enosmerni tok!

Slika 11.14 časovni potek napetosti na četkah, ki drsita po komutatorju

Slika 11.12 kaže časovni potek napetosti na zanki, ki se vrti v magnetnem polju, kakor kaže slika 11.11. Napetost se sinusno spreminja, pravimo tudi, da je *izmenična* ali da *sinusno niha*. Značilna podatka za napetost sta *amplituda*

$$U_0 = \omega B S$$

in *nihajni čas* t_0 , to je najkrajši čas, v katerem se časovna slika ponovi. To je hkrati čas, ki ga potrebuje zanka za en vrtljaj, $t_0 = 2\pi/\omega$. Frekvenca izmenične napetosti, $\nu = 1/t_0$, je enaka frekvenci vrtenja zanke.

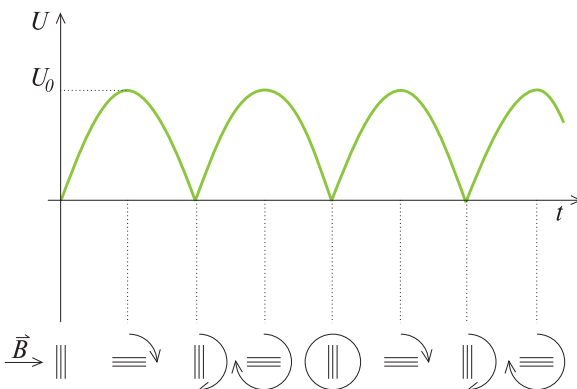


V dinamu je zaporedno vezanih več zank, zato je inducirana napetost ustrezno večja. Dinamo, v katerem je, denimo, vezanih N zank, daje napetost z amplitudo

$$U_0 = \omega N B S .$$

Ko priključimo vrtečo se zanko na žarnico ali kak drug porabnik, teče po njem izmenični sinusni tok. O tem bomo govorili še kasneje.

Namesto na drsne obroče lahko priključimo vrtečo se zanko ali tuljavo na *komutator* (slika 11.13). Med odvzemnima četkama dobimo tedaj enosmerno napetost, ki se spreminja, kakor kaže slika 11.14.



SPLOŠNA OBLIKA INDUKCIJSKEGA ZAKONA

Vrnimo se k eksperimentom na začetku. Inducirana napetost se pojavi tudi brez gibanja vodnikov ali magnetov, dovolj so spremembe magnetnega polja (sliki 11.2 in 11.3). V tuljavah, imenujmo jih *sekundarne*, zaznamo inducirano napetost, ko spreminjamo električni tok po sosednjih tuljavah, imenujmo jih *primarne*. S spreminjanjem toka se spreminja magnetno polje primarne tuljave, s tem pa tudi magnetno polje v sekundarni tuljavi. Poskuse delamo najlažje, če priključimo primarno tuljavo na izvir izmenične napetosti. Skupaj z izmeničnim tokom se neprestano spreminja tudi magnetno polje. Na sekundarni tuljavi dobimo zaradi tega izmenično inducirano napetost, ki jo zlahka merimo z občutljivim voltmetrom. Takoj vidimo, da je inducirana napetost sorazmerna z jakostjo toka po primarni tuljavi in s tem z gostoto magnetnega polja. Prav tako je sorazmerna s hitrostjo spreminjanja gostote magnetnega polja. To ugotovimo, če spreminjamo frekvenco izmeničnega toka v primarni tuljavi. Dalje ugotovimo, da je inducirana napetost pri izbranem paru tuljav največja, če sta tuljavi na isti osi ali celo, če ena ovija drugo. Inducirana napetost je majhna ali pa je ni, če sta tuljavi pravokotni druga na drugo. Zanimive rezultate dajo tuljavnice z različnim presekom in z enakim številom ovojev. Lahko si jih zvijemo sami iz dovolj dolge žice. Dokler je sekundarna tuljava v magnetnem polju znotraj primarne tuljave, narašča inducirana napetost, ko se povečuje presek sekundarne tuljave. Ko s sekundarno tuljavo objamemo primarno, se inducirana napetost s presekom ne povečuje več. Pri nadaljnjem povečevanju preseka se celo zmanjša.

Pri vseh opisanih poskusih se hkrati z gostoto magnetnega polja spreminja *magnetni pretok* skozi sekundarno tuljavo. Prav spreminjanje magnetnega pretoka pa je odločilno za indukcijo. *Splošni indukcijski zakon* pravi, da je inducirana napetost po žični zanki enaka hitrosti spreminjanja magnetnega pretoka, ki ga zanka objema, z enačbo zapisano:

$$U_i = \frac{d\Phi_m}{dt}.$$

Po Lenzovem pravilu požene inducirana napetost tok v taki smeri, da zavira spremembe magnetnega pretoka.

Enaka zakonitost kakor za žično zanko velja za tuljavo. Upoštevati moramo le, da tuljava ovija magnetno polje tolikokrat, kolikor ovojev ima, ali da se magnetno polje pretaka skozi vse ovoje tuljave. Če je Φ_l magnetni pretok skozi ovoj tuljave, definiramo magnetni pretok skozi tuljavo, Φ_m , kot

$$\Phi_m = N \Phi_l = N B_{\perp} S.$$

Inducirana napetost na tuljavi je enaka hitrosti spreminjanja ali časovnemu odvodu tega pretoka.

* Vrnimo se k prečki, ki se giblje po magnetnem polju pravokotno na silnice in pravokotno na svojo smer (slika 11.4). Tudi izid tega poskusa lahko razložimo v okviru splošnega indukcijskega zakona. Ko se pre-

 Razložite izide indukcijskih poskusov s tuljavami na osnovi splošnega indukcijskega zakona.

čka premika v narisani smeri, se povečuje magnetni pretok skozi zanko, po kateri teče inducirani tok. V času opazovanja Δt se poveča ploščina zanke za $\Delta S = l v \Delta t$ in s tem magnetni pretok za

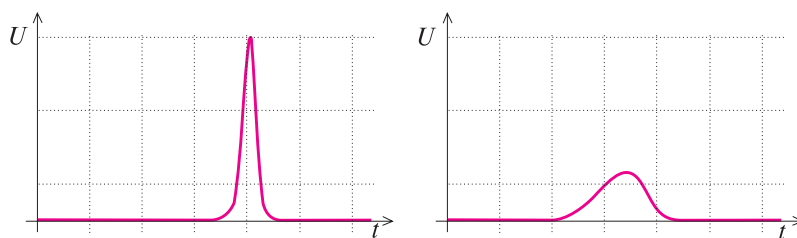
$$\Delta \Phi_m = B \Delta S = (B l v) \Delta t .$$

? *Pojasnite izraz za inducirano napetost pri vrtenju tuljave v magnetnem polju še na osnovi splošnega indukcijskega zakona.

V izrazu na desni strani enačbe je $B l v$ inducirana napetost. Vidimo, da jo res lahko izračunamo kot kvocient med spremembo magnetnega pretoka in ustreznim časom. Tudi Lenzovo pravilo lahko razberemo. Inducirani tok teče v taki smeri, da zavira povečevanje magnetnega pretoka skozi ravnino zanke, saj je magnetno polje zanke nasprotno zunanjemu magnetnemu polju.

* | SUNKI INDUCIRANE NAPETOSTI

Pri večini indukcijskih poskusov so spremembe hitre in kratkotrajne. Inducirana napetost se neprestano spreminja. Opazujemo jo na osciloskopu ali na zaslonu računalnika, ki je povezan z merilnim vmesnikom in tako programiran, da pokaže graf izmerjene napetosti v odvisnosti od časa. Dva taka posnetka kaže slika 11.15.



Slika 11.15 sunka inducirane napetosti pri enaki spremembi magnetnega pretoka

Kazalčni instrument ni dovolj hiter, da bi sledil hitrim spremembam inducirane napetosti. Pač pa lahko pri zelo hitrih spremembah, ko kazalec instrumenta samo zamahne, iz začetnega odklona instrumenta razberemo, kolikšen je *sunek inducirane napetosti*.

Sunek napetosti definiramo kot produkt med povprečno napetostjo in časom trajanja napetosti:

$$\text{sunek napetosti} = \overline{U} \Delta t ,$$

oziroma kot vsoto vseh delnih sunkov

$$\text{sunek napetosti} = \int U dt ,$$

kjer so delni sunki $U dt$ tako kratki, da lahko vzamemo, da je napetost med njimi konstantna. Integralski znak označuje seštevanje. Sunke napetosti izrazimo v enoti Vs .

Delni sunek inducirane napetosti je po indukcijskem zakonu enak spremembi magnetnega pretoka v času trajanja

$$U_i dt = \left(\frac{d\Phi_m}{dt} \right) dt = d\Phi_m ,$$

skupni sunek pa enak skupni spremembi magnetnega pretoka v času trajanja sunka:

$$\overline{U}_i \Delta t = \int U_i dt = \int d\Phi_m = \Delta\Phi_m.$$

Z merjenjem sunkov inducirane napetosti lahko še dodatno preverimo veljavnost induksijskega zakona. Uporabimo ploščato induksijsko tuljavico in jo priključimo na občutljiv instrument. Tuljavico potisnemo v tuljavo tako, da je pravokotna na magnetno polje. Tam jo zasujemo za 90° pa za 180° v eno in drugo smer. Na koncu, ko je spet pravokotna na smer magnetnega polja, izključimo tok po tuljavi in ga spet vključimo. Primerjajmo sunke inducirane napetosti pri posameznih spremembah. Ugotovimo, da so sunki enaki, če so enake spremembe magnetnega pretoka.

* LASTNA INDUKCIJA

Naredimo poskus, ki ga shematično kaže slika 11.16. Veliko tuljavo z železnim jedrom povežemo zaporedno z žarnico in vzporedno s spremenljivim upornikom in enako žarnico. Oboje prek stikala povežemo z izvirom enosmerne napetosti. Vključimo stikalo in počakamo nekaj časa, nato pa naravnomo upor spremenljivega upornika tako, da žarnici v obeh vejah enako žarita. Ko ponovno vključimo stikalo, opazimo, da žarnica v veji s tuljavo zasveti kasneje kakor tista v veji z upornikom. Zamenjajmo žarnici z miliampermetroma, ki imata ničlo na sredi. Ko vključimo stikalo, vidimo, da tok v veji z upornikom naraste takoj, tok v veji s tuljavo pa počasi. Ko prekinemo stikalo, se začne tok po tuljavi počasi zmanjševati, tok po veji z upornikom pa spremeni smer in je po velikosti enak toku po tuljavi.

Pojav si razložimo takole: ko staknemo stikalo, inducirana napetost zavira naraščanje toka, ob izključitvi pa še naprej poganja tok v prvotni smeri. Tok teče sedaj po sklenjenem krogu, ki ga tvorita upornik in tuljava.

Inducirano napetost na tuljavi določimo po induksijskem zakonu upoštevaje, da jo povzroča spreminjanje magnetnega pretoka, ki ga ustvarja tuljava sama. V dolgi, prazni tuljavi je pretok lastnega magnetnega polja

$$\Phi_m = NBS = NS \frac{\mu_0 NI}{l} = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} I = LI$$

sorazmeren s tokom. Kot sorazmernostni koeficient uvedemo novo količino, *induktivnost* tuljave L :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}.$$

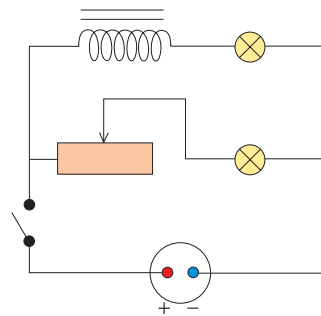
Iz enačbe razberemo, da je enota za induktivnost

$$[L] = \frac{[\Phi_m]}{[I]} = \frac{\text{Vs}}{\text{A}}.$$

Imenujemo jo tudi *henry*.

? Sunki inducirane napetosti nam lahko rabijo za določanje gostote magnetnega polja. Premislite, kako bi določili gostoto magnetnega polja z induksijsko tuljavico!

S slike 11.15, kjer so posnetki inducirane napetosti na tuljavici, ki smo jo enkrat počasi, drugič pa hitro zasovali v magnetnem polju za 90° , se prepričajte, da je sunek inducirane napetosti v obeh primerih enak. Sunki inducirane napetosti dobimo kot ploščino med krivuljo napetosti in časovno osjo.



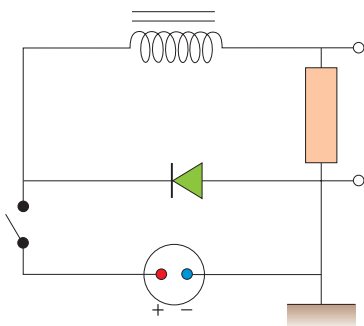
Slika 11.16 Ko vklopimo stikalo, zasveti žarnica v veji s tuljavo kasneje kakor žarnica v veji z upornikom.

Sorazmernost med magnetnim pretokom in jakostjo toka velja tudi za drugačne tuljave, induktivnost pa je odvisna od tega, kako so tuljave narejene.

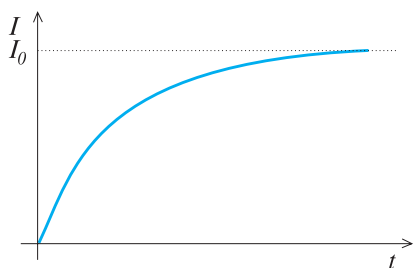
Z novo količino zapišemo inducirano napetost kot

$$U_i = \frac{d\Phi_m}{dt} = L \frac{dI}{dt}.$$

Vidimo, da je napetost odvisna od tega, kako hitro se spreminja tok v tuljavi. Pri prejšnjem poskusu je ob vklopu in izklopu stikala inducirana napetost enaka napetosti generatorja, nakar se počasi zmanjšuje, ko se tok vse počasneje spreminja. Naredimo pa še tale poskus. Prekinimo vejo z upornikom pri prejšnjem poskusu in vzporedno s tuljavo vežimo tlivko, ki zasveti šele pri napetosti okoli 100 V. Ko prekinemo stikalo, tok po tuljavi takoj pade, hkrati pa zasveti tlivka. To kaže, da je lahko pri izklopu inducirana napetost tudi veliko večja od napetosti generatorja. Inducirana napetost ob hitri prekinitvi toka bi bila lahko nevarno visoka pri velikih elektromagnetih. Da se ji izognejo, poskrbijo za postopno zmanjševanje toka pri izklopu.



Slika 11.17 Poskus, pri katerem opazujemo naraščanje in padanje toka po tuljavi.



Slika 11.18 naraščanje toka po vklopu tuljave

** Časovni potek toka pri vklopu in izklopu tuljave lahko podrobneje zasledujemo z računalniškim eksperimentom, ki ga kaže slika 11.17. Tuljavo zvežemo zaporedno z upornikom in merimo napetost na uporniku v odvisnosti od časa. Ta napetost je po Ohmovem zakonu sorazmerna s tokom po tuljavi.

Z grafa na sliki 11.18, ki kaže časovni potek toka po vklopu tuljave, razberemo, da se tok *eksponentno* približuje končni vrednosti I_0 . Ta je odvisna od gonilne napetosti izvira in od skupnega upora tuljave in upornikov v krogu:

$$I_0 = \frac{U_0}{R}.$$

Karakteristični relaksacijski čas τ pa je odvisen od induktivnosti tuljave in upora:

$$\tau = \frac{L}{R}.$$

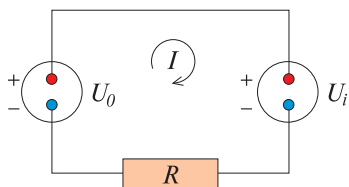
Pojav razložimo z indukcijskim zakonom. Ob vklopu deluje tuljava kot generator, tako kakor je predstavljeno na sliki 11.19. Tok po krogu je določen z napetostjo na uporniku, ta pa je enaka razliki med napetostjo izvira in inducirano napetostjo. Zato je

$$IR = U_0 - U_i = U_0 - L \frac{dI}{dt}.$$

Ker je $U_0 = I_0 R$, sledi

$$\frac{dI}{dt} = \frac{R(I_0 - I)}{L} = \frac{I_0 - I}{\tau}.$$

Enačba je značilna za eksponentni pojav. Hitrost naraščanja toka je sorazmerna z razliko med trenutnim in končnim tokom. Iz enačbe razberemo, da je karakteristični čas $\tau = L/R$.



Slika 11.19

V matematičnem priročniku najdemo, da ima zgornja enačba rešitev:

$$I = I_0 (1 - e^{-t/\tau}) .$$

Poskusite izračunati potek toka še po postopku, ki smo ga spoznali pri obravnavanju kondenzatorja.

Dejavnost Izmerite še potek toka pri izklopu generatorja. Poskus sestavite po shemi na sliki 11.17. Skozi vgrajeno diodo lahko teče tok le ob izklopu generatorja.

* | ENERGIJA TULJAVE

Poskus na sliki 11.17 nas prepriča, da deluje tuljava ob vklopu in izklopu napetosti kot generator. Njena gonilna napetost je inducirana napetost. Ob vklopu inducirana napetost zavira naraščanje toka, ob izklopu pa zavira padanje toka s tem, da sama poganja tok v prvotni smeri. Tako je, kakor da bi tuljava ob vzpostavljanju toka dobila energijo, ki jo vrne, ko izklopimo zunanji generator in sama poganja tok. Pojav nas spominja na polnjenje in praznjenje akumulatorja. Ko z zunanjim virom poganjamo tok po akumulatorju, se mu poveča notranja energija, ko pa akumulator sam poganja tok po krogu, to energijo porabi.

Pomagajmo si s podobnostjo z akumulatorjem še naprej. Ob sliki 11.19, ki kaže smer toka in inducirano napetost na tuljavi, vidimo, da opravi zunanji generator pri pretoku naboja de električno delo, ki ga sprejmeta upornik in tuljava:

$$dA = U_0 de = U_R de + U_i de .$$

Upornik se zaradi prejetega dela, $U_R de$, segreje ali odda Joulovo toploto, v tuljavi pa se zaradi prejetega dela, $U_i de$, poveča magnetno polje. To, da je za izgradnjo magnetnega polja potrebno delo, kaže, da je z magnetnim polje povezana energija.

Ko izrazimo inducirano napetost na tuljavi in pretočeni naboj na znani način, izračunamo, da je delo, ki ga prejme tuljava, enako

$$dA = U_i de = L I dI .$$

Celotno delo, ki ga prejme tuljava od trenutka, ko vključimo stikalo, do takrat, ko naraste tok do vrednosti I_0 , dobimo s seštevanjem:

$$A = \int_0^{I_0} L I dI .$$

To smo, kakor ponavadi, nakazali z integralskim znakom in ob njem označili meji, med katerima seštevamo. Pri matematiki zvemo, da je rezultat seštevanja

$$A = \frac{L I_0^2}{2} .$$

Po zgornjem premisliku to delo izenačimo z energijo magnetnega polja v tuljavi oziroma z *magnetno energijo tuljave* W_m :

? *Premislite, kako bi po zgledu za kondenzator izmerili magnetno energijo tuljave!

? Načrtujejo, da bi velike tuljave iz supraprevodnih žic uporabili za shranjevanje odvečne energije v elektroenergetskih sistemih. Shranjeno energijo bi lahko uporabili ob konicah ali ob izpadih. Ocenite, kolikšno energijo bi lahko shranili v tuljavi s premerom 120 m, z višino 20 m in s 100 ovoji, po kateri bi tekla tok 200 kA.

$$W_m = A = \frac{L I_0^2}{2}$$

To energijo tuljava vrne, ko ob izključitvi zunanega izvira še naprej poganja tok po krogu.

Izračunajmo za zgled magnetno energijo dolge prazne tuljave, po kateri je tok z jakostjo I . V zgornji izraz zapišimo že znani izraz za induktivnost in vse skupaj preuredimo, pa dobimo

$$W_m = \frac{L I^2}{2} = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} \frac{I^2}{2} = \frac{1}{2 \mu_0} \left(\frac{\mu_0 N I}{l} \right)^2 l S .$$

V zadnjem izrazu spoznamo v oklepajih gostoto magnetnega polja v dolgi tuljavi in prostornino tuljave, tako da lahko zapišemo

$$W_m = \frac{B^2}{2 \mu_0} V .$$

Enačba kaže, da si smemo predstavljati magnetno energijo tuljave enakomerno porazdeljeno po prostoru, ki ga zapolnjuje magnetno polje. Iz nje tudi razberemo, kolikšna je *gostota energije v magnetnem polju*:

$$w_m = \frac{B^2}{2 \mu_0} .$$

Pojavi, ki jih bomo spoznali kasneje, kažejo, da je taka razlaga dopustna.

12. IZMENIČNA NAPETOST IN IZMENIČNI TOK

EFEKTIVNA NAPETOST IN EFEKTIVNI TOK

Izmenična napetost in izmenični tok neprestano spreminjata svojo smer. Spoznali smo, da dobimo sinusno izmenično napetost na krajiščih žične zanke ali tuljave, ki se enakomerno vrti v homogenem magnetnem polju. Časovni potek sinusne napetosti kaže slika 12.1. To pa ni edina oblika izmenične napetosti. Na slikah 12.2, 12.3 in 12.4 je časovni potek nekaterih izmeničnih napetosti, ki jih dobimo iz *funkcijskega generatorja*.

Zanima nas predvsem *sinusna izmenična napetost*. Z njo imamo največ opravka, pa tudi vsako drugo periodično napetost lahko predstavimo kot vsoto sinusnih napetosti. Sinusna je tudi napetost, ki jo dobimo iz električnega omrežja. Njena frekvenca je 50 s^{-1} , amplituda pa 310 V. Sinusno napetost z enako frekvenco pa z drugimi amplitudami dobimo tudi iz *transformatorjev*, ki jih priključimo na omrežje. Potek napetosti z amplitudo nekaj voltov lahko opazujemo z osciloskopom.

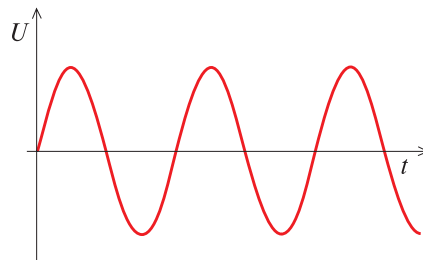
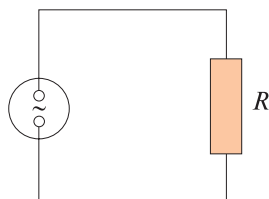
Po električnem krogu, ki ga priključimo na izvir izmenične napetosti, teče *izmenični tok*. Vključimo v krog še merilnik naboja in izmerimo naboj, ki se v izbranem času pretoči skozenj. Očitno je, da v povprečju pretočenega naboja ni. Naboj teče polovico časa v eno, polovico časa pa v nasprotno smer.

Po krogu, v katerem so sami uporniki (slika 12.5), je tok *v fazi* z napetostjo, saj ju v vsakem trenutku povezuje Ohmov zakon. Naj bo napetost (slika 12.6a):

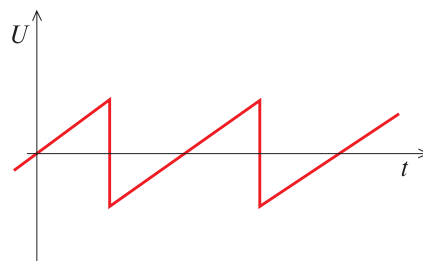
$$U = U_0 \sin \omega t ,$$

pri čemer je U_0 amplituda, $\omega = 2\pi\nu$ pa *krožna frekvenca*. Tedaj je tok

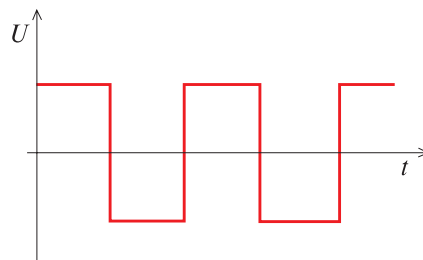
$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t$$



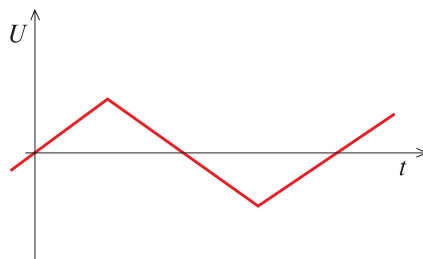
Slika 12.1 sinusna napetost



Slika 12.2 žagasta napetost



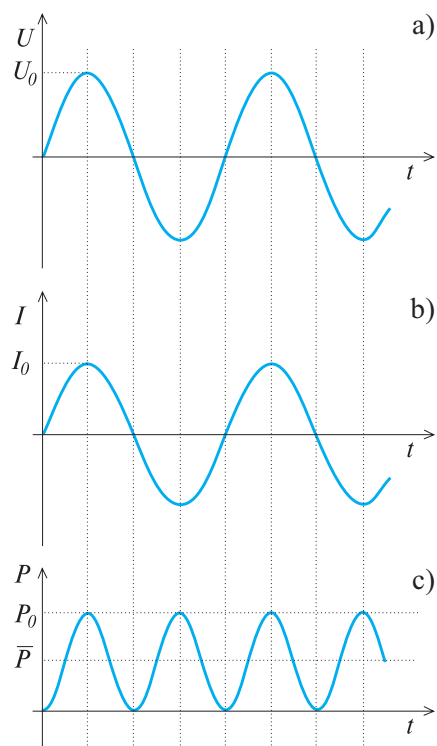
Slika 12.3 škatlasta napetost



Slika 12.4 trikotna napetost

Slika 12.5 upornik, ki je priključen na vir izmenične napetosti

Slika 12.6 časovni potek napetosti, toka in moči pri uporniku



(slika 12.6b). Amplituda toka I_0 je očitno povezana z amplitudo napetosti

$$I_0 = \frac{U_0}{R}.$$

Električna moč, ki jo prejema upornik, je v vsakem trenutku enaka produktu napetosti in toka

$$P = UI = U_0 I_0 \sin^2 \omega t$$

in se spreminja, kakor kaže slika 12.6c. Za uporabnike je največkrat pomembna le *povprečna* moč, ki je odločilna npr. za gretje upornikov ali za toplotni tok, ki ga ti ddajajo. S slike 12.6c razberemo, da je povprečna moč enaka polovici največje moči:

$$\bar{P} = \frac{U_0 I_0}{2}.$$

Izrazimo jo kot produkt *efektivne napetosti* $U_{ef} = U_0 / \sqrt{2}$ in *efektivnega toka* $I_{ef} = I_0 / \sqrt{2}$, tako da je

$$\bar{P} = U_{ef} I_{ef}.$$

Efektivno napetost na uporniku in efektivni tok povezuje Ohmov zakon

$$U_{ef} = R I_{ef},$$

tako da je moč, ki jo prejema upornik, tudi

$$\bar{P} = R I_{ef}^2 = \frac{U_{ef}^2}{R}.$$

V omrežju je efektivna napetost 220 V. Transformatorji za šolske potrebe dajejo efektivno napetost od nekaj voltov do okoli 20 V. Na daljnovodih je efektivna napetost do nekaj 100 kV.

Tudi pri drugih oblikah izmenične napetosti pogosto govorimo o efektivni napetosti. Zveza med efektivno napetostjo in amplitudo napetosti pa je drugačna kakor pri sinusni izmenični napetosti.

Merilni instrumenti za izmenično napetost in izmenični tok kažejo efektivne vrednosti. O tem se prepričamo, če hkrati merimo napetost z instrumentom in opazujemo njen časovni potek z osciloskopom.

Dejavnost Z voltmetrom za izmenično napetost izmerite napetost, ki jo dobite iz kakega šolskega napetostnega izvira. Hkrati opazujte napetost z osciloskopom. Primerjajte izmerjene napetosti z amplitudami napetosti. Merjenje ponovite še z različno oblikovanimi izmeničnimi napetostmi, ki jih dobite iz funkcijskega generatorja.

* IZMENIČNI TOK PO KONDENZATORJU IN PO TULJAVI

S preprostim poskusom, kaže ga slika 12.7, se lahko prepričamo, da teče izmenični električni tok tudi po krogu, v katerega je vključen kondenzator. Pri tem se kondenzator izmenično polni zdaj v eni, zdaj v drugi smeri s frekvenco izmeničnega toka v . Efektivna napetost na kondenzatorju in efektivni tok sta sorazmerna:

$$U_{ef} = \frac{1}{\omega C} I_{ef}.$$

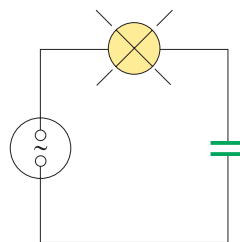
Po analogiji z Ohmovim zakonom za upornike imenujemo kvocient $1/\omega C$ *efektivni upor* kondenzatorja.

Naredimo še tale poskus: v električni krog zaporedno vežimo upornik in kondenzator in ju priključimo na izvir izmenične napetosti. Opazujemo napetosti na kondenzatorju in na uporniku z dvokanalnim osciloskopom (slika 12.8). Ker je napetost na uporniku sorazmerna s tokom po uporniku, meritev hkrati pokaže časovno odvisnost toka in napetosti na kondenzatorju.

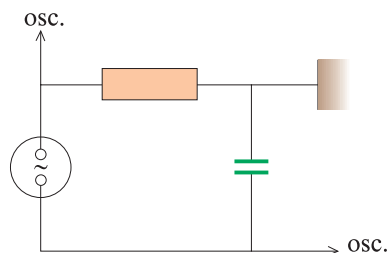
Sliki 12.9a in 12.9b kažeta obe odvisnosti. Vidimo, da napetost na kondenzatorju zaostaja za tokom v krogu. To si lahko razložimo: na kondenzatorju je napetost le, če je nabit. Naboj pa priteče s tokom.

Poglejmo še, kolikšno moč porablja kondenzator. Slika 12.9c kaže časovni potek trenutne moči. V vsakem trenutku jo določimo kot produkt toka in napetosti. Vidimo, da je moč polovico časa pozitivna, polovico časa pa negativna, kar pomeni, da kondenzator polovico časa prejema energijo, polovico časa pa jo oddaja. Tako je povprečna moč nič. Kondenzator pogosto vključujemo zaporedno z drugimi porabniki, če hočemo zmanjšati napetost na njih. Pred uporniki ima kondenzator prednost, saj ne porablja električne moči.

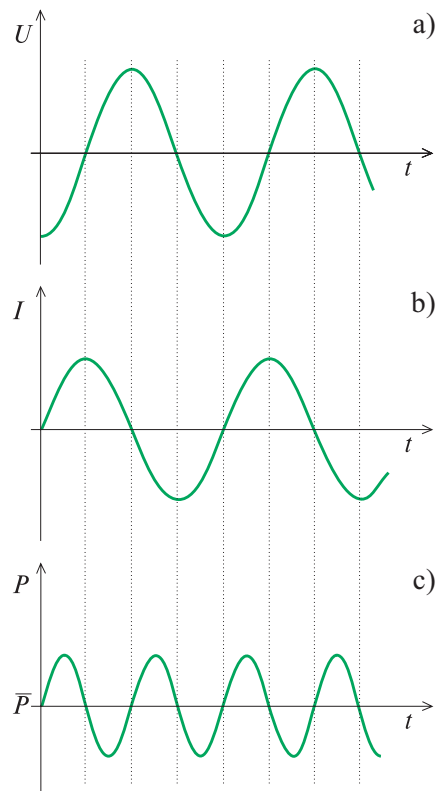
Tudi tuljava je pogosto vključena v električni krog, po katerem je izmenični tok. Četudi je upor tuljave za enosmerni tok zanemarljiv, je tuljava močna ovira za izmenični tok. To je posledica inducirane nape-



Slika 12.7 izmenični tok teče tudi po kondenzatorju

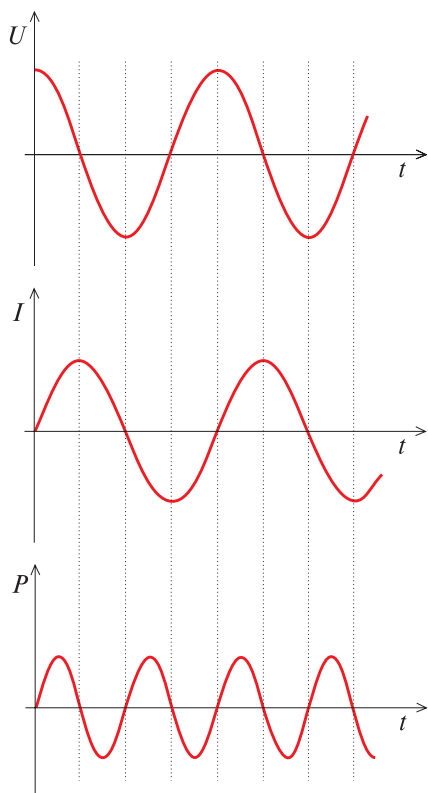


Slika 12.8 Poskus, pri katerem opazujemo časovni potek napetosti in toka po kondenzatorju.

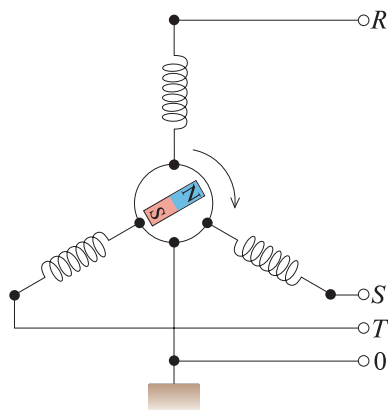


Slika 12.9 časovni potek moči pri kondenzatorju

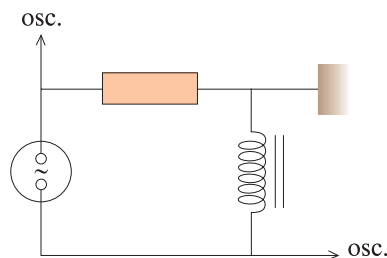
Slika 12.10 Poskus, pri katerem opazujemo časovni potek napetosti in toka po tuljavi.



Slika 12.11 časovni potek napetosti, toka in moči na tuljavi



Slika 12.12 generator za trifazni tok



tosti, ki se pojavi na tuljavi zaradi neprestanega spreminjanja magnetnega polja. Ta napetost po Lenzovem pravilu zavira spremembe toka in omejuje tok.

Efektivna napetost na tuljavi, U_{ef} , in efektivni tok I_{ef} sta sorazmerna:

$$U_{ef} = (\omega L) I_{ef}.$$

Po analogiji z Ohmovim zakonom imenujemo produkt ωL *efektivni upor* tuljave.

S poskusom, ki ga kaže slika 12.10, pokažemo, da napetost na tuljavi in tok nista v fazi. S slike 12.11 razberemo, da tok zaostaja za napetostjo za četrto nihanje. Tudi tuljava, v kateri je izmenični tok, v povprečju ne porablja električne moči in jo podobno kakor kondenzator uporabljajo za zmanjševanje napetosti na porabnikih.

O podrobnostih pri izmeničnem toku po kondenzatorju in tuljavi se lahko poučite v kakem učbeniku elektrotehnike.

* GENERATORJI ZA OMREŽNI IZMENIČNI TOK

V prejšnjem poglavju smo spoznali, da se v tuljavi, ki se enakomerno vrti v homogenem magnetnem polju, inducira sinusna izmenična napetost. Namesto da se vrti tuljava, se lahko v generatorju vrti magnet ali elektromagnet mimo mirujoče tuljave. Če je relativno gibanje tuljave in magnetnega polja takšno kakor v prvem primeru, tudi v drugem primeru dobimo na tuljavi sinusno napetost. Tako deluje npr. kolesarski dinamo, bolj pomembno pa je, da delujejo tako tudi generatorji v elektrarnah.

Slika 12.12 shematično kaže presek generatorja za *trifazni tok*. Na statorju generatorja so tri tuljave, R, S in T, ki so zasukane druga proti drugi za 120° . Iz generatorja vodijo štiri vodniki: skupni *ničelni* vodnik in trije *fazni* vodniki. Magnetno polje, ki se vrti skupaj z rotorjem, inducira v tuljavah *fazne napetosti*, ki si sledijo, kakor kaže slika 12.13. Vzemimo napetost na tuljavi S za osnovo. Napetost na tuljavi R jo prehiteva v fazi za 120° , napetost na tuljavi T pa za njo za prav toliko zaostaja.

V omrežju večemo porabnike med izbrani fazni vodnik in med ničelni vodnik ali med dva fazna vodnika. V puše v stanovanja sta največkrat napeljana po en fazni vodnik in ničelni vodnik.

Vse tri faze trifaznega toka uporabljamo za pogon *trifaznih elektromotorjev*. S tremi fazami napajamo tri tuljave *statorja*, ki so nameščene na enak način kakor tiste v generatorju. Magnetna polja tuljav se sestavljajo v *vrteče se magnetno polje*, ki se vrti okoli osi statorja s frekvenco izmeničnega toka. Okoli iste osi je vrtiljiv *rotor* motorja, ki ga sestavlja več bakrenih okvirov. V mirujočem rotorju vrteče se magnetno polje inducira tokove, magnetni navor nanje pa pospeši rotor, da začne slediti vrtečemu se polju. Če ni zunanjih navorov, ki bi zavirali vrtenje rotorja, rotor ujame polje in se vrti skupaj z njim. Tedaj ni induciranih tokov v okvirih rotorja. Če zunanji navor zavira vrtenje rotorja, se rotor vrti počasneje od magnetnega polja. Na rotor deluje v vrtečem se polju magnetni navor, ki uravnesi zunanji navor. Električna moč, ki jo pri tem prejema motor iz omrežja, je v idealnem primeru enaka mehanični moči, s katero motor opravlja delo. Ker se trifazni motor vrti z manjšo frekvenco, kakor je frekvenca izmeničnega toka, ki ga poganja, se imenuje tudi *asinhronski*.

Več si o delovanju trifaznih generatorjev in elektromotorjev oglejte v kakem učbeniku za elektrotehniko. Poučite se tudi o podrobnostih pri konstrukciji generatorjev in elektromotorjev za trifazni tok.

* TRANSFORMATOR

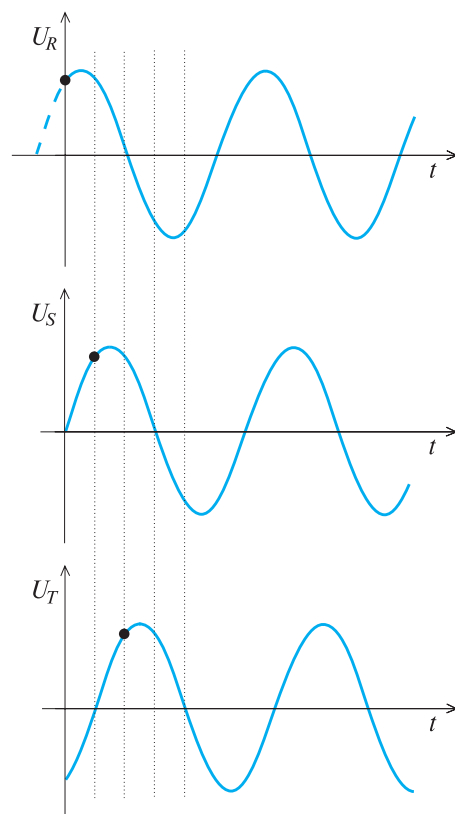
Transformator uporabljamo za prilagajanje izmeničnih električnih napetosti potrebam različnih uporabnikov. Tako najdemo transformatorje v vseh elektronskih napravah, kjer transformirajo omrežno napetost na napetost nekaj voltov, potrebno za napajanje tranzistorjev in integriranih vezij. Transformatorje uporabljajo za varjenje in taljenje. So tudi bistven del električnega omrežja, ki prenaša električno moč od elektrarn do porabnikov.

Oglejmo si zgradbo in delovanje transformatorja. Sestavljata ga dve tuljavi, oviti okoli skupnega železnega jedra. Jedro je sestavljeno iz lamel, ki so med seboj izolirane, da ni vrtničnih tokov. *Primarno tuljavo* z N_1 ovoji priključimo na vir izmenične napetosti, *sekundarna tuljava* z N_2 ovoji pa rabi za napajanje porabnikov (slika 12.14).

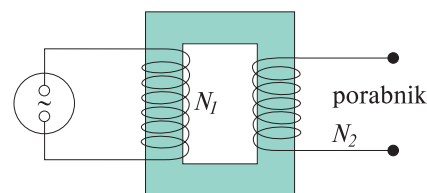
Poglejmo, kolikšne so učinkovite napetosti in tokovi po tuljavah. Vzemimo za začetek, da je sekundarna tuljava neobremenjena, to pomeni, da porabnike odklopimo. Tok po primarni tuljavi ustvarja v železnem jedru magnetno polje, ki ga ovijata obe tuljavi. V vsakem od ovojev tuljav se zaradi nihajočega magnetnega polja v jedru inducira enaka učinkovita napetost U .

Tako je inducirana napetost na primarni tuljavi $U_1 = N_1 U$, inducirana napetost na sekundarni tuljavi pa $U_2 = N_2 U$. Če je upor primarne tuljave dovolj majhen, je inducirana napetost na njej kar enaka napetosti vira U_1 . Razmerje napetosti na tuljavah je tako enako razmerju med števili ovojev:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}.$$



Slika 12.13 napetost na tuljavah za trifazni tok



Slika 12.14 priključitev transformatorja na izvir izmenične napetosti in na porabnik

Tako kakor vselej, ko teče po tuljavi izmenični tok, sta tudi na primarni tuljavi tok in napetost premaknjena v fazi za četrto nihaja. Pomeni, da primarna tuljava v transformatorju, ki ima neobremenjeno sekundarno tuljavo, ne porablja električne moči.

Sedaj priključimo na sekundarno tuljavo porabnik, na primer upornik. Po sekundarni tuljavi, ki deluje kot generator z gonilno napetostjo U_2 , teče tok I_2 , tuljava oddaja porabniku povprečno električno moč $U_2 I_2$. Ker je transformator le posrednik med virom izmenične napetosti in porabnikom, mora oddano moč prejeti od vira. Po primarni tuljavi steče dodatni tok I_1 , ki je v fazi z napetostjo vira. Električna moč, ki jo pri tem prejema od vira primarna tuljava, je v idealnem primeru enaka moči, ki jo oddaja sekundarna tuljava:

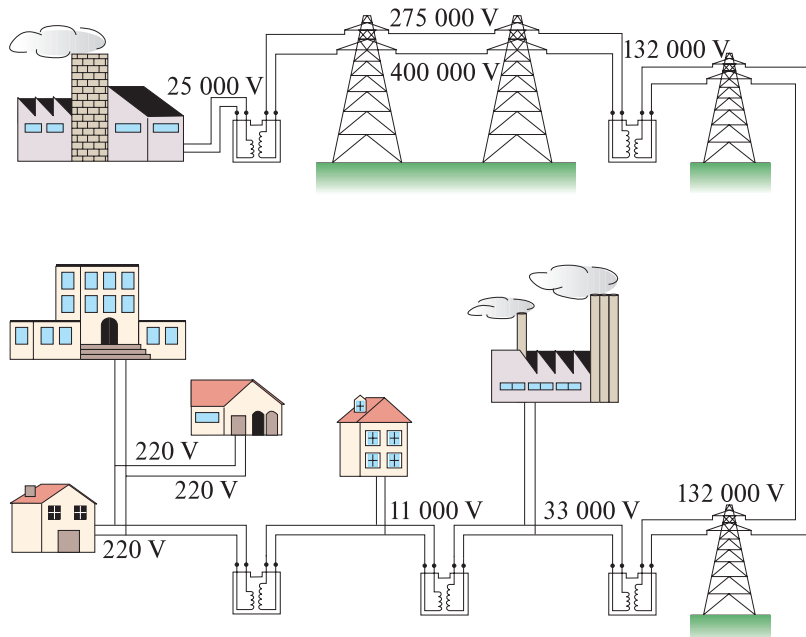
$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Vidimo, da ima dodatni tok po primarni tuljavi efektivno vrednost

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} I_2 = \frac{U_2}{U_1} I_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2.$$

Zaradi izgub je moč, ki jo oddaja vir primarni tuljavi, večja od tiste, ki jo oddaja sekundarna tuljava. Veliki transformatorji so zelo učinkoviti in oddajo okoli 98 % prejete moči, pri majhnih transformatorjih pa je ta delež manjši.

Dejavnost Sestavite šolski transformator in preverite zveze med napetostmi in tokovi. Kako bi določili izkoristek?



Slika 12.15 skica električnega omrežja

Oglejmo si še vlogo transformatorja pri prenosu električne moči po omrežju. Slika 12.15 shematično kaže del električnega omrežja. Na generatorju v elektrarni je napetost okoli 25 kV. Za prenos po daljnovodu transformirajo napetost na 400 kV. S tem se izognejo velikim izgubam zaradi gretja žic v daljnovodu, saj se jakost toka pri transformaciji navzgor zmanjša. Z zaporedno transformacijo na koncu predelajo napetost za potrebe posameznih porabnikov.

***Dejavnost** Z dvema šolskima transformatorjema sestavite daljnovod, ki bo prenašal električno moč za napajanje kolesarske žarnice od vira napetosti po nekaj metrov dolgih žicah iz cekasa. S kolikšno močjo moramo napajati daljnovod brez uporabe transformatorjev, da bo žarnica normalno svetila? Kolikšna pa je potrebna moč, če uporabimo transformatorja?

NEVARNOSTI ELEKTRIČNEGA TOKA

Ob koncu spoznavanja z električnimi pojavi namenimo nekaj besed skrbi za varnost pri delu z električnimi napravami, zlasti s tistimi, ki so priključene na omrežno napetost. Prav nehoteni stiki z omrežno napetostjo so vzrok za največ nesreč, ki jih povzroča elektrika.

Pri šolskih poskusih večinoma uporabljamo le nizko napetost z efektivno napetostjo do 25 V, ki jo dobimo s transformacijo omrežne napetosti v malonapetostnih virih. Ta napetost naj bi bila po izkušnjah nenevarna. Vendar tudi tu ni odveč previdnost, saj nas ob dotiku z vlažno kožo kljub vsemu lahko neprijetno strese. Da bi preprečili morebitno nesrečo zaradi stika z omrežno napetostjo, je napeljava v razredu zavarovana tako, da se napetost v njej samodejno izklopi, če kakorkoli pride do toka med vodniki pod napetostjo in tlemi ali vodovodno napeljavo.

V vsakdanjem okolju za varnost pred stikom z omrežno napetostjo ponavadi ni tako dobro poskrbljeno. Nevarni so zlasti: neozemljena kovinska ohišja električnih naprav, priključni kabli s poškodovano izolacijo in razmajanimi vtiči, poškodovane ali slabo pritrjene vtičnice. Najhuje je, ko se z roko dotaknemo vodnika pod napetostjo, tok pa steče po trupu skozi noge v tla ali skozi prsni koš in drugo roko v kak ozemljen kovinski predmet ali vodovodno napeljavo. Manj nevarno je, če steče tok le skozi manjši del telesa.

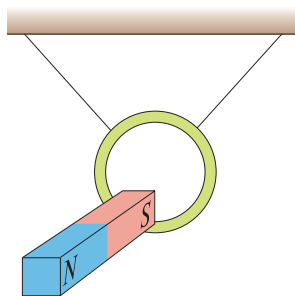
Notranjost človeškega telesa je skoraj brez upora. Glavna ovira za električni tok je zato koža. Kvadratni centimeter suhe kože ima lahko upor do 100 k Ω . Vendar pri tanki in vlažni koži tolikšnega upora ne moremo pričakovati. Upor se še zmanjša ob električnem toku, zaradi česar je dalj časa trajajoč stik z vodnikom pod napetostjo toliko nevarnejši. Resnost poškodbe je odvisna od jakosti toka, ki steče pri stiku skozi telo. Izmenični tok z efektivno jakostjo do 1 mA povzroča le rahlo ščegetanje. Le malo večji tok pa že povzroča bolečino in krč. Pri toku več kakor 10 mA krč prepreči žrtvi, da bi spustila vodnik. Na stiku se koža vname in navlaži, kar je lahko usodno. Tok okoli 20 mA povzroči krč prsnih mišic in zastoj dihanja, tok okoli 100 mA pa fibrilacijo srca. Tok 1 A ali več povzroči skoraj hipno smrt.

Za varno uporabo elektrike je potrebna v prvi vrsti stalna skrb za varno napeljavo. Če kljub skrbi pride do nehotenega stika z omrežno napetostjo, moramo najprej poskrbeti za prekinitev stika, nato pa ponuditi ponesrečencu prvo pomoč in, če gre za kaj hujšega, poskrbeti za zdravniško pomoč.

13. VPRAŠANJA IN NALOGE

VPRAŠANJA

1. Bakrenemu obročku, ki visi na tankih neprevodnih nitkah, se približamo s paličastim magnetom. Kaj se dogaja z obročkom med približevanjem magneta in kaj med oddaljevanjem?

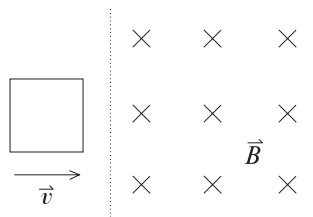


2. Na tuljavi je kovinski predmet. Zakaj se ta predmet segreva, če teče po tuljavi izmenični tok, in ostane hladen, če je tok enosmeren?

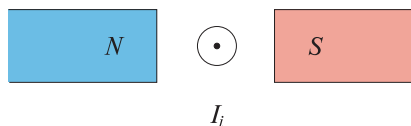
3. Naštejte različne zglede za uporabo indukcije. Podrobneje razložite enega od njih!

4. Slika 11.5 kaže vrtilne tokove v kovinski plošči, ki niha med poloma magneta. Kako bi bilo, če bi bila plošča narezana kakor glavnik?

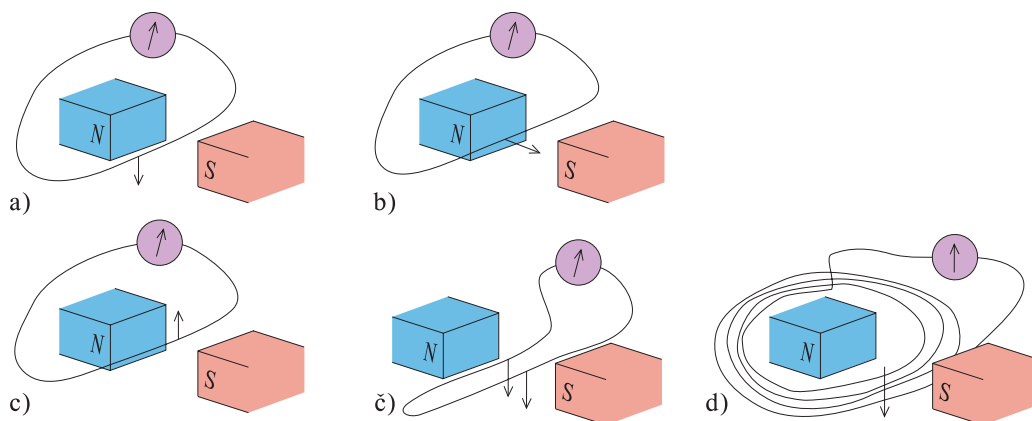
5. Kvadratna zanka se s konstantno hitrostjo približuje prostoru s homogenim magnetnim poljem, kakor kaže slika, in ga prečka. Skicirajte časovni potek induciranege toka po zanki!



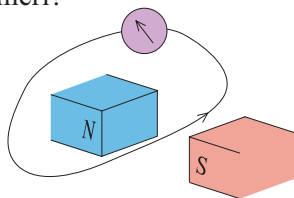
6. Vodnik se giblje med poloma magneta pravokotno na silnice, kakor kaže slika. Inducirani tok ima smer iz papirja ven. V kateri smeri se giblje vodnik?



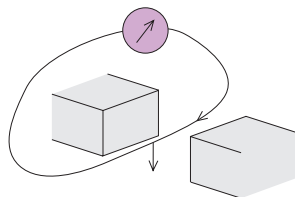
7.] Iz žice naredimo zanko in vanjo vežemo galvanometer. Zanko premikamo v magnetnem polju v smereh, ki jih kažejo puščice na slikah. Kaj pokaže galvanometer v posameznih primerih? Kaj je treba storiti, da se bo kazalec galvanometra bolj odklonil?



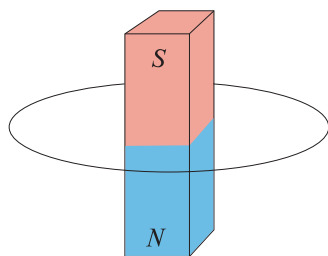
8.] a) V kateri smeri moramo premikati zanko na sliki, da bo po njej stekel tok v narisani smeri?



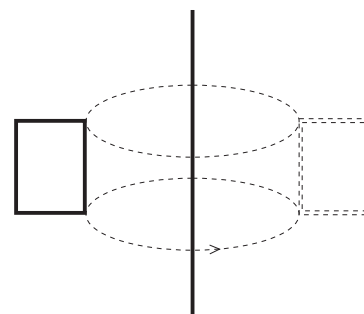
b) Označite pola na magnetih, če teče pri gibanju zanke navzdol inducirani tok v zanki v narisani smeri.



9.] Žična zanka objema paličast magnet, kakor kaže slika. Magnet sunkovito potegnemo navzgor. V kateri smeri steče po zanki inducirani tok?

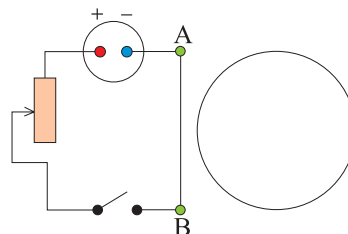


10.] Pravokotni okvir na sliki (desno) kroži okoli osi skozi dolg raven vodnik, po katerem teče enosmerni tok. Kolikšen je inducirani tok? Kolikšen pa je, če se okvir vrti okoli ene od stranic?



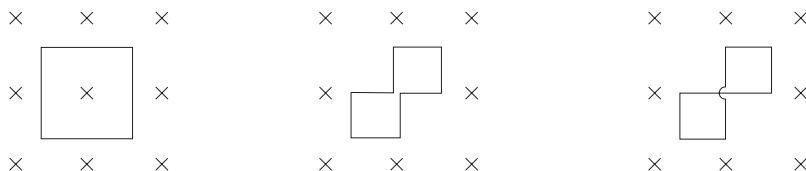
11.] Žična zanka in dolg raven vodnik sta v isti ravnini, kakor kaže slika. Določite smer induciranege toka v žični zanki, če

- vklopimo stikalo,
- izklopimo stikalo,
- z drsnikom povečamo upor,
- z drsnikom zmanjšamo upor,
- zanko približamo odseku AB,
- zanko odmaknemo od odseka AB.

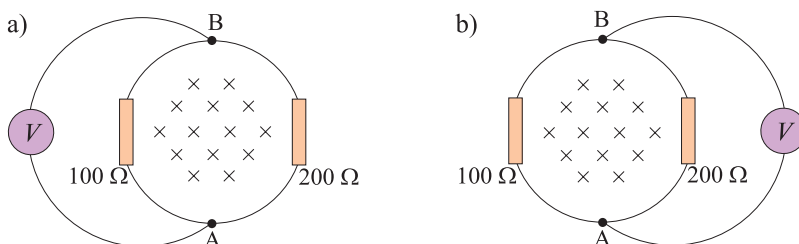


12.] Baterija, tuljava in stikalo so zvezani zaporedno. Ko je stikalo sklenjeno in teče po tuljavi tok, ima tuljava magnetno energijo. Kaj se zgodi z njim, ko stikalo razklenemo?

13.] Kvadratni žični okvir s stranico a položimo v homogeno magnetno polje z gostoto B tako, da je ravnina okvira pravokotna na magnetno polje. Zaradi indukcije se po okviru preteče naboj e . Kolikšen naboj se preteče pri ponovljenih poskusih, pri katerih okvir zvijemo, kakor kažejo skice?



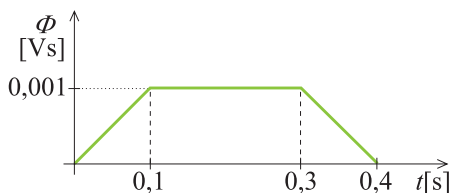
14.*] Tuljavo, v kateri je nihajoče magnetno polje, objamemo z žično zanko, v katero sta vgrajena upornika za $100\ \Omega$ oziroma za $200\ \Omega$. Ko merimo napetost med točkama A in B tako, kakor kaže slika b, namerimo 2 V, ko pa merimo napetost, kakor kaže slika a, namerimo 1 V. Kako bi to razložili?



15.*] Tuljava z induktivnostjo L_1 in tuljava z induktivnostjo L_2 sta zvezani zaporedno. Kolikšna bi morala biti induktivnost tuljave, s katero bi lahko nadomestili zaporedno zvezani tuljavi? Kolikšna bi bila nadomestna induktivnost pri vzporedno vezanih tuljavah?

16.] Magneti in elektromagneti pritegujejo železne predmete. To lastnost uporabljamo v tehniki. Na sliki je vezje električnega zvonca. Razložite njegovo delovanje.

17.] Magnetni pretok skozi tuljavo se spreminja s časom, kakor kaže slika. Narišite graf inducirane napetosti v odvisnosti od časa.



NALOGE

1.] Raven vodnik z dolžino 2 m se giblje s hitrostjo 80 km/h po magnetnem polju z gostoto 0,076 T pravokotno na silnice. Kolikšna je inducirana napetost med krajiščema vodnika?

2.] Ravna kovinska prečka z dolžino 1,2 m drsi po vzporednih kovinskih palicah, ki sta priključeni na baterijo z gonilno napetostjo 24 V in z uporom $0,5 \Omega$ in ki ležita v homogenem magnetnem polju z gostoto 0,8 T, pravokotnem na njuno ravnino. Upor palic in vodnikov je $2,5 \Omega$. Kolikšna je jakost toka v vodniku, ki se giblje s hitrostjo 12,5 m/s? Kolikšna je jakost toka v mirujočem vodniku?

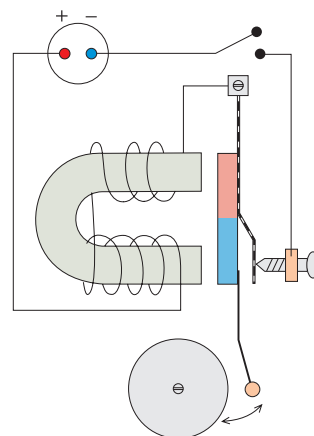
3.] Po prazni tuljavi, ki ima 100 ovojev, dolžino 1 m in premer 20 cm, napeljemo tok 10 A. Kolikšen sunek se inducira na tuljavi ob prekinitvi tega toka?

4.] Po tuljavi z dolžino 70 cm in s 500 ovoji teče tok 0,7 A. V tuljavi je žična zanka s polmerom 2,5 cm postavljena pravokotno na os tuljave. Kolikšen napetostni sunek se inducira v zanki, ko prekinemo tok po tuljavi?

5.] Kvadratna tuljava s stranico 30 cm in 25 ovoji se s frekvenco 300 min^{-1} enakomerno vrti v homogenem magnetnem polju z gostoto 0,05 T. Os tuljave je simetrala stranic in je pravokotna na smer magnetnega polja. Kolikšna je amplituda inducirane napetosti?

6.] V magnetnem polju z gostoto 0,34 T je tuljava z radijem 6 cm in z 230 ovoji. Os tuljave je na začetku vzporedna z magnetnimi silnicami, nato pa v času 0,25 s tuljavo zasučemo za 90° tako, da je na koncu njena os pravokotna na magnetne silnice. Kolikšna je povprečna inducirana napetost?

7.] Dolga tuljava je priključena na vir enosmerne napetosti, ki ustvarja v njej magnetno polje z gostoto 0,078 T. V tuljavi je ploščata tuljavica s polmerom 8 cm in s 15 ovoji postavljena tako, da njena os sovpada z osjo dolge tuljave. Magnetno polje dolge tuljave se v času 0,076 s enakomerno zmanjša na nič. Kolikšna je med tem časom inducirana napetost na ploščati tuljavici?



Odgovor: 3,4 V

Odgovor: V prečki se inducira napetost 12 V. Če ta napetost nasprotuje napetosti baterije, je tok 4 A, če jo podpira, pa je tok 12 A. Če prečka miruje, je tok 8 A.

Odgovor: 4 mVs

Odgovor: $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Vs}$

Odgovor: 35 V

Odgovor: 3,5 V

Odgovor: 0,31 V

Odgovor: 0,3 V

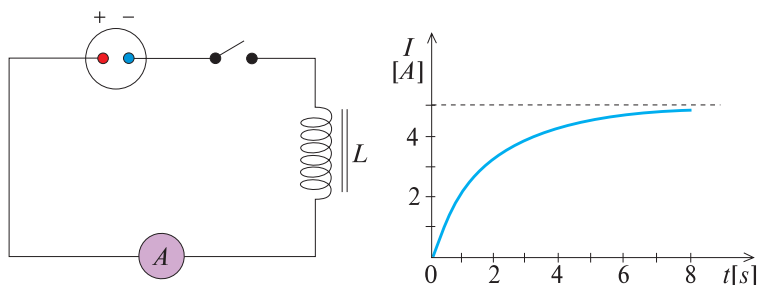
Odgovor: $U_o = 0,50 \text{ V}$
 $U_{ef} = 0,35 \text{ V}$
 $M = 0,001 \text{ Nm}$

8.] Satelit kroži v ravnini ekvatorja 200 km na Zemljo. Vodoravna komponenta gostote zemeljskega magnetnega polja v tej višini je $20 \mu\text{T}$. Kolikšna je največja napetost, ki se inducira v 2 m dolgi anteni?

9.] V homogenem magnetnem polju z gostoto $0,50 \text{ T}$ se okoli osi, ki je pravokotna na smer magnetnega polja, vrti s frekvenco 20 s^{-1} obroč s polmerom 5 cm in z uporom 1Ω . Kolikšna je amplituda inducirane napetosti? Kolikšna je efektivna napetost? S kolikšnim povprečnim navorom moramo vrteti obroč?

10.] V električni krog vežemo vir napetosti za 10V, stikalo, tuljavo in ampermeter. Ko staknemo stikalo, se tok spreminja, kakor kaže diagram. Iz diagrama razberite:

- kolikšen je upor v krogu,
- kolikšna je induktivnost tuljave.



Odgovor: 1,25 A
2,75 V

11.] V transformatorju za varjenje ima primarna tuljava 320 obojev in sekundarna 4 oboje. Priključimo ga na napetost 220V. Skozi sekundarno tuljavo teče tok 100A.

- Kolikšen tok teče v primarni tuljavi?
- Kolikšna je napetost na sekundarni tuljavi (upor kroga zanemarimo)?

Odgovor: $P_1 = 1,44 \text{ kW}$
 $P_2 = 14,4 \text{ W}$

12.] Po daljnovodu z uporom $0,4 \Omega$ odteka iz elektrarne moč 120 kW proti oddaljeni vasi. Kolikšne so izgube v daljnovodu, če prenašamo moč pri napetosti 2000 V, in kolikšne, če jo prenašamo pri napetosti 20000 V?

13.] Ko priklučimo primarno tuljavo transformatorja z 800 oboji na napetost 220 V, je napetost na neobremenjeni sekundarni tuljavi 12 V. Koliko obojev ima sekundarna tuljava, če je magnetni pretok skozi jedro na sekundarni strani le 92,6 % magnetnega pretoka skozi jedro na primarni strani?

Odgovor: 45 obojev

14.] Transformator oddaja porabniku na sekundarni strani moč 40 W pri napetosti 24 V. Pri tem črpa iz generatorja tok 14 A. Kolikšna je napetost na primarni tuljavi, če je izkoristek 55 %?

Odgovor: 5,2 V

15.] Amplituda magnetnega polja v železnem jedru transformatorja je 1,0 T. Kolikšno število obojev mora imeti primarna tuljava transformatorja, ki ima jedro s presekom 20 cm^2 , da jo bomo lahko priklučili na omrežno napetost z efektivno vrednostjo 220 V?

Odgovor: 495

14. | SINUSNO NIHANJE

Ko govorimo o *nihanju*, imamo navadno v mislih bolj ali manj pravilno ponavljajoče se gibanje teles okoli ravnovesnih leg. Iz vsakdanjega okolja poznamo *nihala*, ki nihajo v urah, gugalnice, nihajna vrata in podobno. Nihanje pa srečujemo vsepovsod. Zanihajo viseča telesa, ko jih izmaknemo iz ravnovesne lege, kroglica, preden se umiri v plitvi kotanji, deščica, ki pade na vodno gladino, avtomobil, ki zapele preko nizke ovire na cesti ali se ustavi pred semaforom. Nihajo strune na godalih, na harfi ali v klavirju, veje na drevju, glasilke v grlu, Zemlja ob potresu. Nihajo pa lahko tudi električni naboj, temperatura, tlak ali električno in magnetno polje. V tem poglavju bomo ob nihanju preprostih nihala spoznali količine, ki so značilne za nihajne pojave, in nekatere splošne zakonitosti.

NIHALA IN OPIS NIHANJA

Oglejmo si nekaj preprostih *mehaničnih nihala*. Utež, viseča na vrvici, ali ravnilo, obešeno na žebelj, sta zgloda za *težno nihalo*. Oba nihata *sučno* okoli obesišča. Sučno je tudi nihanje nemirike v uri, ki ima gred povezano s podlago prek polžaste vzmeti. Utež, obešena na vijačno vzmet, ali voziček, pritrjen z vzmetema med dve steni, sta *nihali na vijačno vzmet*. Njuno nihanje je *premo*.

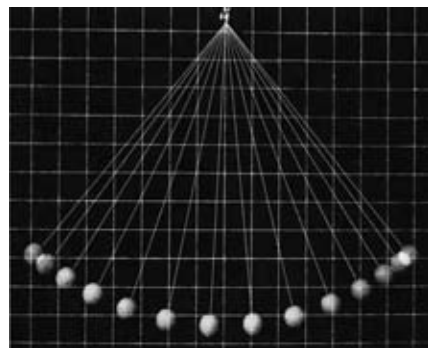
Odmaknimo utež na vrvici iz ravnovesne lege in jo spustimo, da zaniha. Utež se začne pospešeno gibati proti ravnovesni legi, jo preide in se giblje naprej pojemajoče, dokler se hitrost ne zmanjša na nič. Nato se spet giblje pospešeno proti ravnovesni legi in naprej pojemajoče proti začetni legi. Za tem se gibanje navidez natančno ponovi. Po daljšem opazovanju seveda vidimo, da se največji odmak iz ravnovesne lege zmanjšuje, kar ima za posledico, da nihanje prej ali slej zamre. Pravimo, da je nihanje *dušeno*. Vzrok za dušenje sta trenje v ležajih in upor v zraku.

Vzemimo, da je dušenje neznatno. Gibanje nihala je tedaj opredeljeno z dvema količinama: z *nihajnim časom*, t_0 , in z velikostjo največjega odmika od ravnovesne lege ali *amplitudo*.

Nihajni čas imenujemo najmanjši čas, po katerem se gibanje nihala ponovi. Najlažje ga določimo kot čas med dvema prehodoma skozi



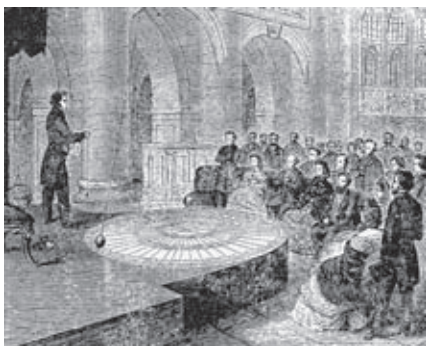
Slika 14.1 Služabnik mora povleči gugalnico ravno v pravem trenutku. Premislite, kdaj je to!



Slika 14.2 stroboskopska slika nihala



Slika 14.3 Pravijo, da je Galilei v katedrali v Pisi opazoval nihanje viseče svetilke. Iz opazovanj naj bi sklepal, da je nihajni čas viseče svetilke neodvisen od amplitude.



Slika 14.4 Foucault je leta 1851 pred občinstvom v pariškem Panteonu izvedel znameniti poskus, s katerim je pokazal vrtenje Zemlje. Na strop kupole je pritrdil 67 metrov dolgo jekleno žico, na kateri je visela 28 kg težka krogla. Nihalo je pognal z amplitudo 6 metrov. Konica na krogli je v pesek pod nihalom zarisovala sled, ki je pokazala, da se ravnina nihanja vrti v nasprotni smeri, kot se vrti Zemlja okoli svoje osi.

ravnovesno lego v isti smeri ali kot čas med dvema zaporednima največjima odklikoma na isti strani. V splošnem je to najkrajši čas, ki preteče med dvema trenutkoma, v katerih je nihalo enako odklonjeno iz ravnovesne lege in se giblje v isti smeri. Z nihajnim časom povezana količina je frekvenca, ν , ki opredeljuje število nihajev na enoto časa. Brž uvidimo, da je

$$\nu = \frac{1}{t_0}.$$

Dejavnost Določite nihajni čas in frekvenco uteži na vrvici! Kaj mislite, od česa sta odvisna? S poskusi preverite domneve! Kako pa je z nihajnim časom pri nihalu na vijačno vzmet?

Ugotovimo, da je nihajni čas pri viseči uteži odvisen od razdalje med obesiščem vrvice in težiščem uteži, nihajni čas nihala na vijačno vzmet pa od koeficienta vzmeti in od mase uteži. *Nihajni čas je neodvisen od amplitude, dokler je ta majhna.*

Oglejmo si gibanje nihala podrobneje. Visečo utež nadomestimo s posodico, iz katere počasi kaplja črnilo. Pod posodico položimo papirnato brisačo in poženemo nihalo. Na mirujoči brisači dobimo čez čas množico pik, ki so nanizane po daljici, katere dolžina je povezana z dvojnimi največjim odklikom posodice od ravnovesne lege. Iz tega sledi, da niha nihalo v *stalni ravnini*. Če začnemo brisačo enakomerno vleči v smeri, ki je pravokotna na ravnino nihanja oziroma na daljico, se pike nanizajo v *sinusno* krivuljo. Sklepamo, da je odklik nihala od ravnovesne lege *sinusna funkcija časa*.

Na modernejši način določamo lego nihajoče uteži z *ultrazvočnim daljinomerom*, ki ga v ravnini nihanja usmerimo proti nihalu. Daljinomer je hkrati oddajnik in sprejemnik ultrazvočnih signalov. Signale pošilja proti nihajoči uteži in zaznava odbite signale. Povezan je z računalnikom, ki je programiran tako, da iz časa med oddajo signala in sprejemom odbitega signala določi razdaljo med daljinomerom in utežjo. Z zaslona računalnika razberemo, kako se lega uteži spreminja s časom. Slika 14.5 kaže nekaj nihajev uteži, viseče na vrvici, ki smo jih posneli na opisani način. Na sliki je narisana tudi ravnovesna lega uteži. S posnetka razberemo, da je nihajni čas nihala 2,6 s, amplituda ob začetku opazovanja pa 0,62 m. Prepričajte se o tem!

Zapišimo odklik nihala od ravnovesne lege še z enačbo. Za zgled naj bo nihalo na vijačno vzmet, ki ga kaže slika 14.6. Ker je nihanje premo, določimo odklik v enorazsežnem koordinatnem sistemu, katerega izhodišče je v ravnovesni legi telesa in je usmerjen proti desni. Odmiki na desno so tedaj pozitivni, odkliki na levo pa negativni. Vzemimo, da štejemo čas od trenutka, ko gre nihalo skozi ravnovesno lego v pozitivni smeri. Tedaj izrazimo odklik od ravnovesne lege s sinusom takole:

$$s = s_0 \sin \left(2 \pi \frac{t}{t_0} \right) = s_0 \sin (2 \pi \nu t),$$

kjer je s_0 amplituda, t čas in t_0 nihajni čas, $\nu = 1/t_0$ pa frekvenca.

Enačba predstavlja zapis *sinusnega* ali *harmoničnega* nihanja. Vidimo, da je v tem zapisu odklik res periodična funkcija časa, saj se po

preteku nihajnega časa t_0 funkcija ponovi. Izraz $2\pi\nu$ imenujemo tudi *krožna frekvenca* in ga označimo s simbolom ω . Argument pri sinusu,

$$2\pi \frac{t}{t_0} = 2\pi \nu t = \omega t ,$$

imenujemo *faza*. Nihajni čas in amplituda sta neodvisna, kakor nas je prepričal že poskus.

Dejavnost Naredite si nekaj nihal z različnimi vzmetmi in utežmi. Od česa je odvisen njihov nihajni čas in kakšna je ta odvisnost? Poskus ponovite še z utežmi na vrvicah!

Enačbo, ki smo jo dobili za premo nihanje, uporabimo tudi za druga nihala, ki nihajo sinusno. Le odklik od ravnovesne lege moramo posebej opredeliti. Pri uteži na vrvi npr. določimo odklik od ravnovesne lege s kotom med vrvi in navpičnico. Amplituda je tedaj velikost tega kota pri največjem odkliku od ravnovesne lege. Podobno lahko opredelimo odklik tudi kot dolžino loka, za katerega je odmaknjena utež iz ravnovesne lege. Če je nit dolga, se pri majhnih odklikih dolžina loka ne razlikuje veliko od dolžine premege odklika uteži od navpičnice. Nihanje uteži na vrvi zato pogosto obravnavamo kot premo. Pri drugih težnih nihalih opredelimo odklik s kotom med navpičnico in zveznico med obesilcem in težiščem nihala. S kotom zasuka opredelimo odklik od ravnovesne lege tudi pri sučnih nihalih, npr. pri kolesu na polžasti vzmeti.

* Če bi namesto ob prehodu skozi ravnovesno lego začeli opazovati nihalo ob kakem drugem trenutku, npr. ko je odklik nihala v pozitivni smeri največji ali ko je odklik enak polovici največjega v negativni smeri, bi bil zapis nihanja drugačen. Slika 14.7 kaže tak primer. Z nje razberemo, da je v tem primeru mogoče zapisati odklik nihala kot

$$s = s_0 \sin(\omega t + \varphi) ,$$

kjer je φ začetna faza.

HITROST IN POSPEŠEK PRI SINUSNEM NIHANJU

Naj bo odklik nihala

$$s = s_0 \sin \omega t .$$

Tedaj je hitrost nihala

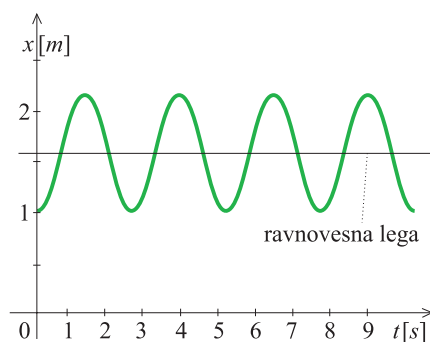
$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_0 \cos \omega t = v_0 \cos \omega t .$$

Vidimo, da tudi hitrost nihala niha. Amplituda hitrosti, v_0 , je sorazmerna z amplitudo odklika nihala:

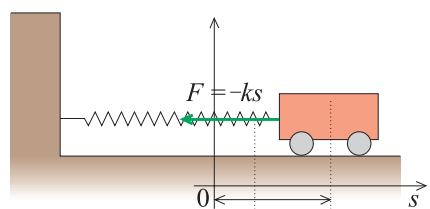
$$v_0 = \omega s_0 .$$

Poglejmo še pospešek

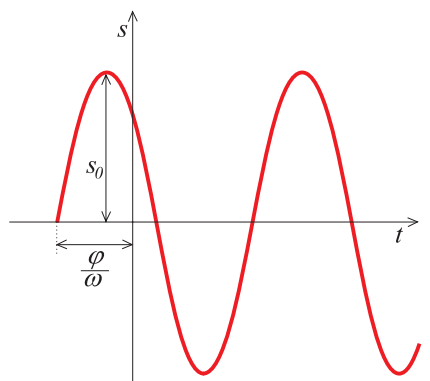
$$a = -\omega^2 s_0 \sin \omega t = -\omega^2 s .$$



Slika 14.5

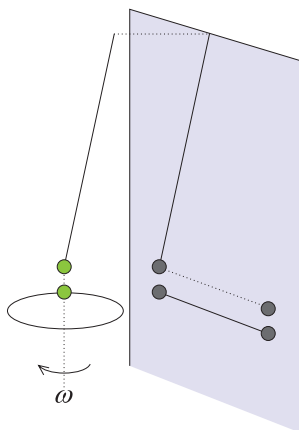


Slika 14.6 nihalo na vijačno vzmet

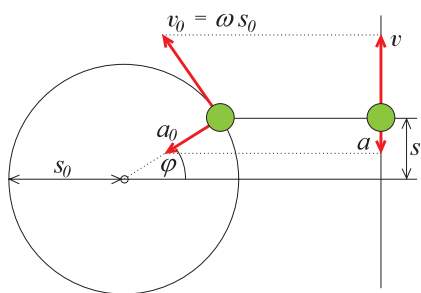


Slika 14.7 Časovni potek odklika pri sinusnem nihanju. Ob času $t = 0$ je nihalo odmaknjeno iz ravnovesne lege v pozitivno smer.

? Prikažite grafično potek odklika, hitrosti in pospeška za kako sinusno nihalo. Amplitudo in nihajni čas si izberite sami.



Slika 14.8 Senca enakomerno krožečega telesa niha sinusno.



Slika 14.9 nihanje projekcije krožečega telesa

Tudi ta sinusno niha, pri tem pa je sorazmeren z odmikom in je odniku nasproten. Usmerjen je proti ravnovesni legi. To je osnovna lastnost vseh sinusnih nihal. Enačbo, ki to izraža,

$$a = -\omega^2 s,$$

imenujemo *enačba sinusnega* ali *harmoničnega nihanja*.

* Sinusno nihanje je tesno povezano z enakomernim kroženjem. Opazujemo gibanje sence, ki jo meče na steno kroglica na enakomerno vrteči se plošči (slika 14.8). Medtem ko kroglica enakomerno kroži, njena senca niha. Z nekaj truda lahko kotno hitrost plošče naravnamo tako, da se nihanje sence ujame z nihanjem primerne nihal.

Na sliki 14.9 sta trenutna lega kroglice, ki kroži enakomerno s kotno hitrostjo ω po krogu z radijem s_0 , in njene projekcije na izbrano premico. Lego kroglice opredelimo s kotom, lego projekcije pa z odmikom. Čas štejemo od trenutka, ko je kroglica na premici, ki določa smer projekcije in gre skozi središče kroga, oziroma od trenutka, ko je odmik projekcije enak nič. Tedaj je kot

$$\varphi = \omega t$$

in odmik

$$s = s_0 \sin \omega t.$$

Projekcija enakomerno krožeče kroglice torej sinusno niha. Krožna frekvenca tega nihanja je enaka kotni hitrosti, s katero kroži kroglica, amplituda pa je enaka radiju kroga. Prepričate se lahko, da je hitrost projekcije enaka projekciji hitrosti kroglice, pospešek projekcije pa enak projekciji radialnega pospeška.

FILE PRI NIHANJU

Po II. Newtonovem zakonu sklepamo, da pride do sinusnega nihanja takrat, ko je vsota zunanjih sil, ki delujejo na nihajoče telo, sorazmerna z odmikom in ima smer proti ravnovesni legi. Vsota zunanjih sil ali rezultanta je po II. Newtonovem zakonu enaka produktu mase in pospeška, pospešek pri sinusnem nihanju pa je, kakor smo videli, sorazmeren z odmikom in usmerjen proti ravnovesni legi.

Poskusimo si delovanje rezultante nazorno predstaviti. Vzemimo, da je nihalo najbolj odmaknjeno od ravnovesne lege. Sila, ki deluje proti ravnovesni legi, je tedaj največja in povzroči, da se začne nihalo gibati pospešeno proti ravnovesni legi. Hitrost kljub vse manjši sili narašča in doseže največjo vrednost pri prehodu skozi ravnovesno lego. Tedaj začne delovati na telo vse večja sila v nasprotni smeri, ki ima za posledico zmanjševanje hitrosti. Ko doseže nihalo največji odmik na drugi strani, je hitrost spet nič, sila pa še naprej deluje v isti smeri in začne pospeševati nihalo proti ravnovesni legi. Tako se igra ponavlja.

Poglejmo, katere so sile, ki povzročajo sinusno nihanje pri nekaj nihalih.

Pri nihalu na vijačno vzmet je to sila vzmeti (slika 14.6), pri viseči uteži rezultanta teže in sile niti (slika 14.10), pri sučnem nihalu navor vzmeti, pri obešeni palici navor teže palice, pri plavajočem kosu lesa rezultanta teže in vzgona.

Za zgled vzemimo nihalo na vijačno vzmet, ki ga kaže slika 14.6. V narisani legi, ko je nihajoče telo odmaknjeno za s od ravnovesne lege, deluje nanj sila vzmeti $F = -ks$, usmerjena proti ravnovesni legi. Ker je to hkrati rezultanta, je z njo po II. Newtonovem zakonu določen pospešek telesa. Iz enačbe

$$ma = -ks$$

izračunamo pospešek telesa

$$a = -\frac{k}{m}s.$$

Vidimo, da je pospešek premo sorazmeren z odmikom. Ta lastnost je značilna za sinusno nihanje. Primerjava z enačbo za sinusno nihanje

$$a = -\omega^2 s$$

da za krožno frekvenco ω izraz

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Iz tega izračunamo še nihajni čas:

$$t_0 = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Vidimo, da sta krožna frekvenca in nihajni čas odvisna od koeficienta vzmeti in od mase uteži. To smo že prej ugotovili z eksperimentom.

Več dela imamo z utežjo na vrvici ali s težnim nihalom (slika 14.10). Utež se giblje po krožnem loku, katerega radij je enak dolžini vrvice. Če je amplituda nihanja majhna, se odmik po loku skoraj ne razlikuje od odmika s v vodoravni smeri. Zato bomo nihanje z majhno amplitudo obravnavali kot premo.

V narisani legi se sili, ki delujeta na utež, sestavljata v rezultanto, ki ima komponenti v radialni in tangentni smeri. Za nihanje je odločilna tangentna komponenta rezultante:

$$F_t = F_g \sin \varphi,$$

ki po II. Newtonovem zakonu določa tangentni pospešek uteži:

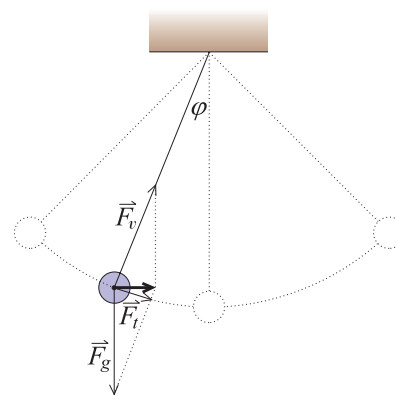
$$a_t = \frac{F_t}{m} = \frac{F_g}{m} \sin \varphi.$$

S slike razberemo, da je

$$\sin \varphi = \frac{s}{l},$$

s tem pa dobimo iz prejšnje enačbe povezavo med pospeškom in odmikom:

$$a_t = -\frac{g}{l} s.$$



Slika 14.10 težno nihalo

Upoštevali smo še, da je $F_g = mg$ in da imata pospešek in odmik nasprotni smeri. Spet lahko sklepamo, da je nihanje sinusno. Krožna frekvenca in nihajni čas sta:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad t_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

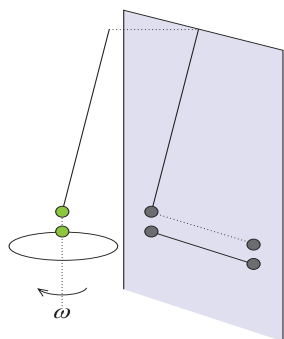
* Iz zakonov za vrtenje lahko najdemo krožne frekvence in nihajne čase drugih težnih nihal. Pri majhnih odklilih od ravnovesne lege je

$$\omega = \sqrt{\frac{mgd}{J}}, \quad t_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd}},$$

če je J vztrajnostni moment visečega telesa okoli osi skozi obesišče in d razdalja med obesiščem in težiščem.

Dejavnost Naredite si težno nihalo in izmerite nihajni čas pri različnih amplitudah. Kaj opazite? Nihanje lahko jemljemo kot sinusno, dokler nihajni čas ni odvisen od amplitude.

ENERGIJA NIHANJA

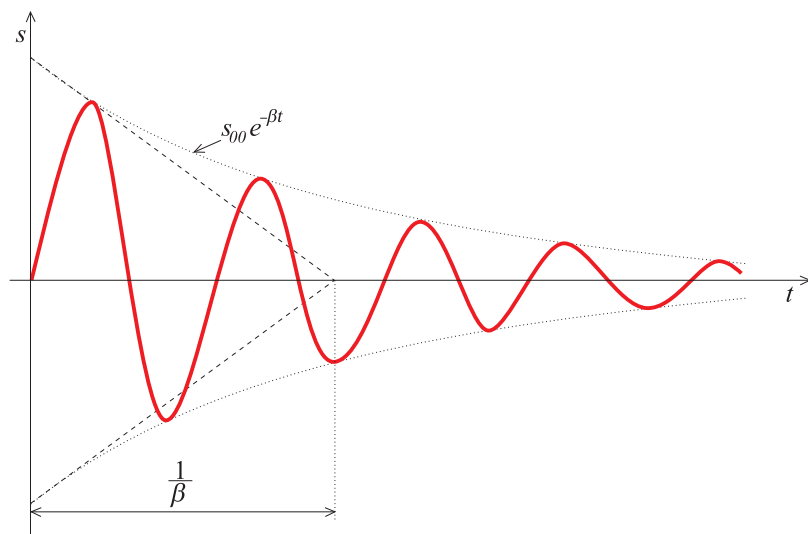


Slika 14.11 Ko odmaknemo težno nihalo iz ravnovesne lege v amplitudo, se mu poveča potencialna energija.

Ko nihalo odmaknemo od ravnovesne lege, opravimo delo. Pri nitnem nihalu, ki ga dvignemo za h nad ravnovesno lego, je to delo enako mgh (slika 14.11), pri nihalu na vijačno vzmet, ki jo stisnemo ali raztegnemo za s , je delo enako $k s^2/2$ in tako naprej. V prvem primeru ima zaradi dela nihalo v začetku potencialno, v drugem primeru pa prožnostno energijo.

Ko nihalo spustimo, da zaniha, se ta energija prej ali slej izgubi zaradi upora, trenja in drugih vzrokov. Zato je nihanje *dušeno* (slika 14.12). V mnogih primerih je dušenje majhno in zato čas, v katerem se nihalo izniha, dolg v primerjavi z nihajnim časom. Tedaj vpliva okolice ne upoštevamo in dušenje zanemarimo.

Vzemimo tako nedušeno nihalo. Po energijskem zakonu je njegova energija konstantna in enaka tisti, ki mu jo podelimo z delom pri od-



Slika 14.12 časovni potek dušenega nihanja

miku iz ravnovesne lege. Pač pa se z gibanjem spreminja oblika energije.

Naj bo za zgled nihalo na vijačno vzmet. Ko ga odmaknemo iz ravnovesne lege, mu podelimo prožnostno energijo. Ko ga spustimo, se v začetku ob zmanjševanju prožnostne energije vzmeti povečuje kinetična energija uteži. V ravnovesni legi, ko je vzmet nenapeta, je vsa energija nihala kinetična energija uteži. Nato se na škodo kinetične energije uteži spet večja prožnostna energija vzmeti in igra se ponavlja. Simbolično lahko zapišemo:

$$W = W_k + W_{pr} = \frac{m v^2}{2} + \frac{k s^2}{2} = \frac{m v_0^2}{2} = \frac{k s_0^2}{2}.$$

Enačba izraža, kar smo pravkar povedali z besedami: energijo nihanja sestavljata prožnostna in kinetična energija. V ravnovesni legi, ko je vzmet nenapeta, je vsa energija kinetična, v amplitudni legi, ko nihalo miruje, pa je vsa energija prožnostna.

Po daljšem času se energija nihanja zaradi dušenja zmanjša. Največkrat je zmanjševanje energije *eksponentno*. Pri nihalu, ki ima ob začetku opazovanja energijo W_0 , je energija W ob času t enaka:

$$W = W_0 e^{-2\beta t}.$$

Koeficient β imenujemo *koeficient dušenja*. Določimo ga lahko iz opazovanja amplitude nihanja. Ker je energija nihanja, kakor smo videli, premo sorazmerna s kvadratom amplitude, sklepamo, da se tudi ta zmanjšuje eksponentno. Iz enačbe za energijo dobimo

$$s_0 = s_{00} e^{-\beta t},$$

kjer je s_{00} parameter. Njegov pomen lahko razberete s slike 14.12.

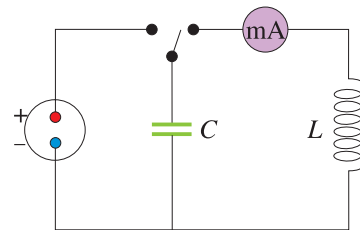
Dejavnost Določite koeficient dušenja za izbrano nihalo in ugotovite, od česa je odvisen!

ELEKTRIČNI NIAJNI KROG

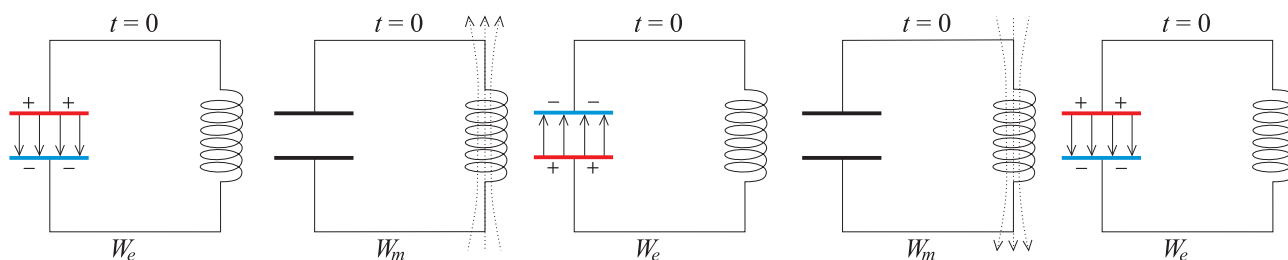
Naredimo poskus, ki ga shematično kaže slika 14.13. Tuljavo z induktivnostjo nekaj tisoč henryjev in kondenzator s kapaciteto nekaj mikrofardov zvežemo zaporedno z miliampermetrom. S primernim stikalom priključimo kondenzator na izvir enosmerne napetosti, da se nabije, nato pa ga preko ampermetra priključimo na tuljavo.

Kazalec na instrumentu pri tem zaniha, kar kaže, da je po krogu izmenični tok. Nihanje je sicer dušeno, kljub temu pa lahko razberemo glavne značilnosti. Ko kondenzator zamenjamo s takim z manjšo kapaciteto, tuljavo pa s tako z manjšo induktivnostjo, se poveča frekvenca nihanja toka. Z nadaljnjim zmanjševanjem kapacitete in induktivnosti postane frekvenca tolikšna, da kazalni instrument ne more več slediti nihanju. Če hočemo še naprej opazovati nihanje toka, moramo namesto ampermetra v krog vključiti upornik z majhnim uporom in z osciloskopom meriti napetost na njem. Ta napetost je sorazmerna s tokom. Če

? Kaj sestavlja energijo nihanja pri težnem nihalu in kakšne so spremembe med nihanjem? Kako je pri sučnem nihalu?



Slika 14.13 Električni nihajni krog. Tuljava ima induktivnost okoli 10 000 henryjev, kondenzator pa kapaciteto 30 μF . Električno nihanje vzbudimo, ko nabit kondenzator priključimo na tuljavo.



Slika 14.15 električno in magnetno polje pri nihanju nihajnega kroga

priključimo osciloskop na kondenzator oz. na tuljavo, lahko opazujemo nihanje napetosti na njima.

Kako si razlagamo nihanje v krogu, kaže slika 14.15. Ko nabiti kondenzator priključimo na tuljavo, začne teči tok, zaradi katerega se prazen kondenzator, pri tem pa v tuljavi nastajajoče magnetno polje zavira naraščanje toka. Oboje ima za posledico, da doseže tok po tuljavi največjo vrednost šele tedaj, ko je kondenzator že izprazen. Tok začne padati, s tem pa se na tuljavi inducira napetost, zaradi katere teče tok v prvotni smeri še naprej in se zaradi njega nabije kondenzator z nasprotnim nabojem. Tok se med tem zmanjšuje in je nič, ko je napetost na kondenzatorju največja. Zatem se igra ponovi v nasprotni smeri, tako da je po enem nihaju kondenzator spet nabit enako kakor na začetku.

Poglejmo, kako je frekvenca nihanja odvisna od kapacitete kondenzatorja in od induktivnosti tuljave. Ker se kondenzator z veliko kapaciteto polni in prazni počasneje kakor kondenzator z majhno kapaciteto, tuljava z veliko induktivnostjo pa bolj zavira hitre spremembe toka kakor tuljava z majhno induktivnostjo, pričakujemo, da bo frekvenca nihajnega kroga s kondenzatorjem z majhno kapaciteto in s tuljavo z majhno induktivnostjo večja od frekvence nihajnega kroga s kondenzatorjem z veliko kapaciteto in s tuljavo z veliko induktivnostjo. Eksperimenti to potrjujejo. Iz zakonov za električne kroge sledi, da je krožna frekvenca nihajnega kroga

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} ,$$

nihajni čas pa potem

$$t_0 = 2 \pi \sqrt{LC} .$$

Dejavnost Sestavite nihajni krog in določite njegovo frekvenco pri različnih kondenzatorjih in tuljavah.

* Poskusimo določiti frekvenco nihajnega kroga še računsko. Vzemi-mo, da niha naboj na kondenzatorju sinusno, kakor kaže enačba

$$e = e_0 \cos \omega t ,$$

pri čemer je ω še neznana krožna frekvenca nihajnega kroga. Tok po krogu, ki teče zaradi naboja na kondenzatorju, je tedaj

$$I = \frac{de}{dt} = -\omega e_0 \sin \omega t .$$

Ta tok povzroča na tuljavi napetost

$$U = L \frac{dI}{dt} = L \omega^2 e_0 \cos \omega t ,$$

ki je po velikosti enaka napetosti na kondenzatorju

$$U = \frac{e}{C} = \frac{e_0}{C} \cos \omega t .$$

Ko izenačimo desne strani enačb, vidimo, da je krožna frekvenca kroga enaka

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} ,$$

kakor smo že zapisali.

Energijo nihanja v nihajnem krogu sestavljata električna energija kondenzatorja in magnetna energija tuljave. V našem primeru je v začetku nihanja nabit kondenzator, toka po tuljavi pa ni. Vsa energija je tedaj v kondenzatorju:

$$W = W_e = \frac{CU_0^2}{2} .$$

Po četrtnih nihanjih je kondenzator prazen in je tok po tuljavi največji. Tedaj je vsa energija v tuljavi

$$W = W_m = \frac{LI_0^2}{2} .$$

Vlogi kondenzatorja in tuljave se menjavata na četrtnih nihanjih, vmes pa je energija porazdeljena med oba dela kroga.

Iz enačb za energijo lahko izračunamo zvezo med amplitudama toka in napetosti:

$$I_0 = \sqrt{\frac{C}{L}} U_0 .$$

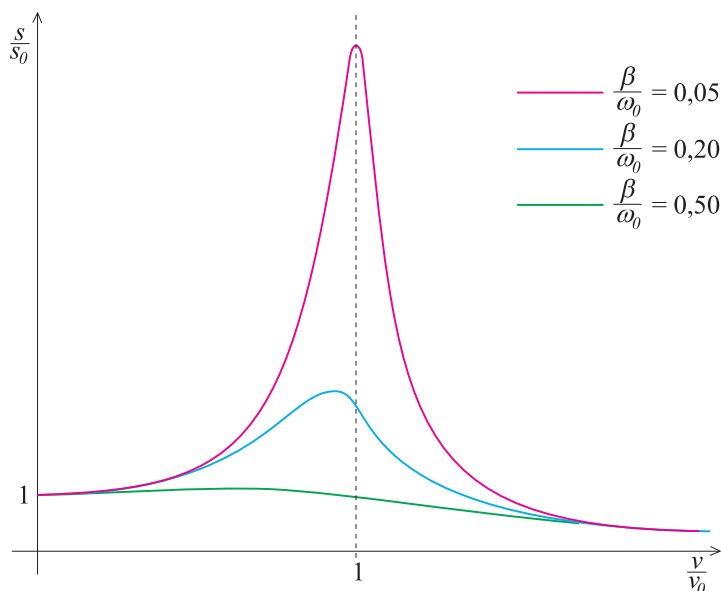
Dejavnost Opazujte nihanje nihajnega kroga z osciloskopom in primerjajte amplitudo napetosti na kondenzatorju ali na tuljavi z amplitudo toka!

15. | VSILJENO NIHANJE

Doslej smo opazovali nihanje nihala, ki smo jih vzbudili ali z odmikom od ravnovesne lege ali s sunkom in jih nato prepustili samim sebi. Nihala nihajo z značilno frekvenco, ki je odvisna od njihove zgradbe. Taka nihanja imenujemo tudi *lastna nihanja*, frekvence pa *lastne frekvence*. Nihala pa lahko nihajo s poljubno frekvenco, če jim nihanje *vsiljujemo*.

Pozibavajmo sem in tja obesišče viseče uteži. Primerjajmo frekvenco nihala in frekvenco roke, ki zanihava obesišče, njuno amplitudo in njuno fazo.

Ugotovimo, da je frekvenca nihala, ki ustaljeno niha, enaka frekvenci roke. Pri zelo majhni frekvenci je amplituda nihala enaka amplitudi roke, roka in nihalo pa nihata z enako fazo ali *v fazi*. Ko se povečuje frekvenca roke, postajajo amplitude nihala vse večje, nihalo pa vse bolj zaostaja za roko. Če nihalo pozibavamo s frekvenco, ki je enaka lastni frekvenci nihala, postane amplituda zelo velika, nihalo pa zaostaja za roko za četrto nihaja. Pravimo, da je nihalo *v resonanci* z roko, ali krajše, *v resonanci*. Ko frekvenco povečujemo naprej, postanejo amplitude vse manjše, zaostanek nihala za roko pa se še poveča in se približa polovici nihaja.



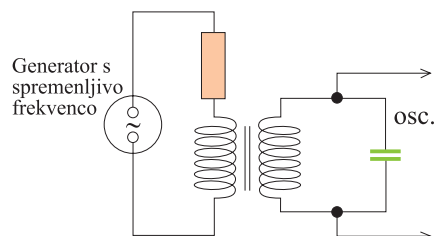
Slika 15.1 resonančna krivulja

Vsiljeno nihanje in resonančne pojave opazujemo pri vseh nihalih. S poskusom, ki ga kaže slika 15.1, opazujemo vsiljeno nihanje in resonanco napetosti v električnem nihajnem krogu.

Dejavnost Naredite si kako mehanično nihalo in preverite opisani pojav. Bodite pozorni zlasti v okolici resonance. Opazujte tudi vsiljeno nihanje električnega nihajnega kroga!

Vidimo, da je v nasprotju z lastnim nihanjem, pri katerem je frekvenca nihala odvisna le od lastnosti nihala, amplituda pa je poljubna, frekvenca vsiljenega nihanja poljubna, amplituda vsiljenega nihanja pa je odvisna od amplitude in od frekvence vsiljevanega nihanja in od dušenja nihala. Razmerje med amplitudo nihala in amplitudo vsiljevanega nihanja pri različnih dušenjih v odvisnosti od razmerja med frekvencama vsiljevanega in lastnega nihanja kaže graf na sliki 15.2. Tri krivulje dobimo pri treh različnih koeficientih dušenja. Izrazitost resonance je odvisna od razmerja med koeficientom dušenja in lastno frekvenco nihala. Čim manjše je to razmerje, tem izrazitejša je resonanca.

Za razliko od lastnega nihanja vsiljeno nihanje ni dušeno. Izvir nihanja sproti nadomesti izgube zaradi dušenja. Zlasti v okolici resonance mora izvir opravljati veliko dela pri zanihavanju nihala. Ko začnemo zanihавati mirujoče nihalo, se v začetku zaradi dela povečuje energija nihala, ko pa je doseženo *stacionarno* stanje, se delo v celoti porabi za pokrivanje izgub zaradi dušenja.

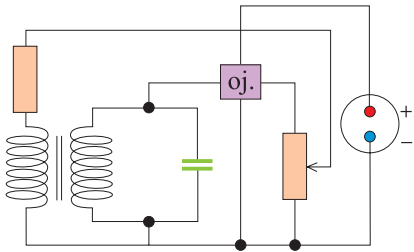


Slika 15.2 shema poskusa, pri katerem opazujemo resonanco električnega nihajnega kroga



Slika 15.3 Štiri mesece po otvoritvi se je višje most Tacoma Narrows v ZDA zrušil v hudem vetru. Zaradi vrtincev je začelo cestišče sučno nihati okoli vzdolžne osi (leva slika). Nihanje se je "ujelo" z nastajanjem vrtincev, postajalo vse izrazitejše, dokler se cestišče ni zrušilo (desna slika). Pri novi konstrukciji so poskrbeli, da do tega ne more več priti.

Že majhne motnje lahko v resonanci vzbudijo izrazito nihanje nihal. Zaradi izrednega povečanja amplitude so lahko resonančni pojavi tudi nevarni. Tako je strumni korak čete vojakov povzročil, da se je leta 1850 podrl most v Angersu v Franciji. Podobnih nesreč z mostovi je bilo že več. V novejšem času je znan Tacoma Narrows v ZDA, ki se je 7. novembra 1940 zrušil zaradi resonance v hudem vetru (slika 15.3). Inženirji morajo pri načrtovanju mostov poskrbeti za zadostno dušenje, zlasti pa za to, da se frekvence mostov dovolj razlikujejo od frekvence najbolj pogostih motenj.



Slika 15.4 električni oscilator

? Kako je za stalno amplitudo poskrbljeno v mehaničnih urah? Delovanje mehanične ure lahko ponazorimo tudi z nihajnim krogom, ki ga vzbuja-

mo s periodičnimi sunki.

* Vrnimo se k poskusu na sliki 15.1. Namesto da bi vzbujevali električni nihajni krog od zunaj, priključimo nihajni krog na ojačevalnik, izhod iz ojačevalnika pa prek potenciometra povežemo z vzbujevalno tuljavo (slika 15.4). Z osciloskopom se prepričamo, da tako povezan nihajni krog zaniha s stalno amplitudo, če le s potenciometrom izberemo dovolj velik del izhodne napetosti. Frekvenca nihanja je enaka lastni frekvenci, amplituda pa je odvisna od tega, kolikšen del izhodne napetosti vodimo nazaj na vzbujevalno tuljavo. O tem se lahko prepričamo z eksperimentiranjem. Dobili smo *oscilator*. S *pozitivno povratno* zvezo prek ojačevalnika se nihanje, ki se slučajno sproži v nihajnem krogu, ojači. V stacionarnem stanju ojačevalnik sproti nadomešča izgube v nihajnem krogu.

16.* NESINUSNO NIHANJE

Oglejmo si eksperiment, ki ga kaže slika 16.1. Upornik, označen z R , povežemo z dvema generatorjema sinusnih izmeničnih napetosti prek upornikov R_1 in R_2 . Napetost na uporniku R opazujemo z osciloskopom. Priključimo najprej samo prvi generator, nato samo drugega, na koncu pa oba hkrati. Slika 16.2 kaže sledi na osciloskopu. Ko prvemu sinusnemu nihanju prištejemo drugo z drugačno frekvenco, nihanje ni več sinusno. Slika sledi je odvisna od frekvence in amplitude sestavljajočih se nihanj in od njune faze. S spreminjanjem ene od frekvenc lahko ugotovimo, da je sestavljeno nihanje *periodično*, če je razmerje frekvenc racionalno. Tega ni težko razumeti. V času, v katerem se sestavljeno nihanje ponovi, mora preteči celo število nihajev prvega in drugega nihanja hkrati. Torej mora biti

$$n_1 t_{01} = n_2 t_{02}$$

in s tem

$$\frac{t_{01}}{t_{02}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Med drugimi je zanimiv primer, ko sta amplitudi enaki, frekvenci pa se le malo razlikujeta. Slika 16.3 kaže značilne *utripe*, ki jih tedaj opazujemo.

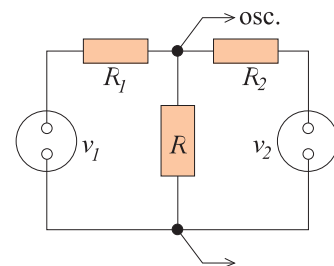
* Nastanek utripov lahko pokažemo tudi z računom. Naj bo ω srednja krožna frekvenca nihanj. Prvo ima frekvenco $\omega - \Delta\omega/2$, drugo pa frekvenco $\omega + \Delta\omega/2$. Označimo z s_0 amplitudi nihanj. Če sta ob začetku opazovanja, ob času $t = 0$, odmika za obe nihanji enaka nič, predstavimo sestavljeno nihanje z enačbo:

$$s = s_0 \sin(\omega - \Delta\omega/2)t + s_0 \sin(\omega + \Delta\omega/2)t = 2s_0 \cos(\Delta\omega/2)t \sin \omega t.$$

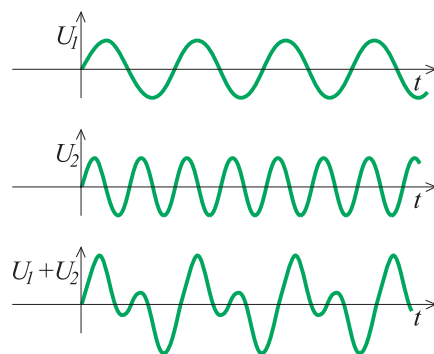
Produkt $2s_0 \cos(\Delta\omega/2)t$ predstavlja spremenljivo amplitudo utripajočega nihanja. Čas utripa τ , to je čas med zaporednima trenutkoma, ko je amplituda nič, je določen z enačbo

$$(\Delta\omega/2)\tau = \pi,$$

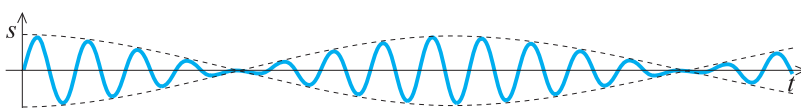
iz katere izračunamo $\tau = 2\pi/\Delta\omega = 1/\Delta\nu$. Razlika frekvenc, $\Delta\nu = 1/\tau$, je *frekvenca utripanja*.



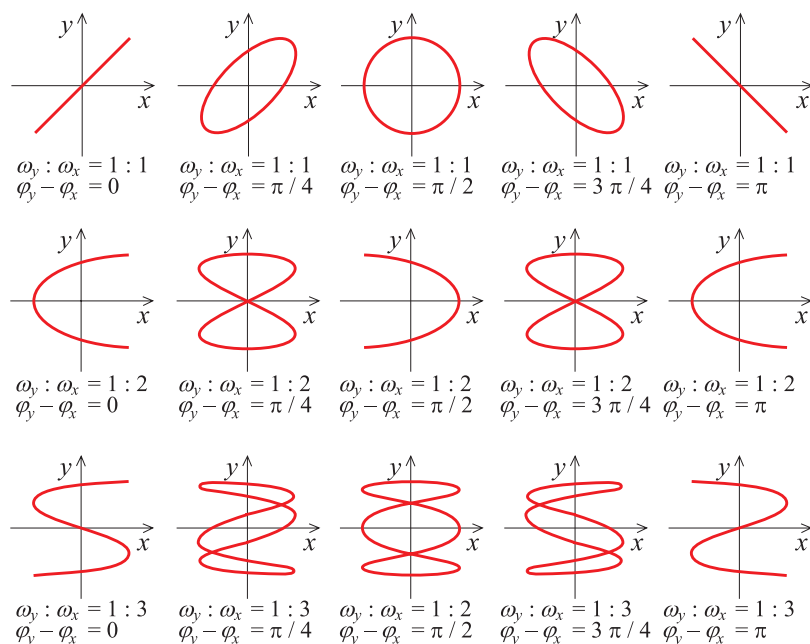
Slika 16.1 sestavljanje in opazovanje izmeničnih napetosti



Slika 16.2 časovni potek sestavljenega nihanja



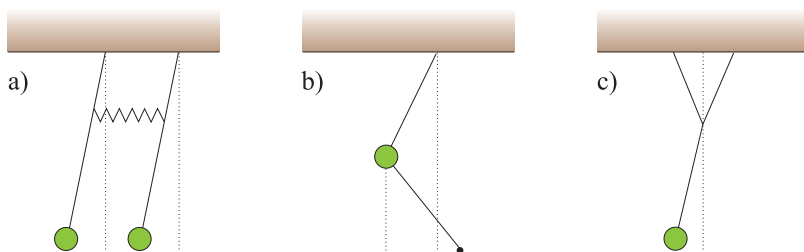
Slika 16.3 časovni potek utripanja



Slika 16.4 Lissajousove krivulje. Ob vsaki sličici, ki kažejo tire nihajočih delcev, je zapisano razmerje frekvenc in fazna razlika med pravokotnima nihanjema ob začetku opazovanja, ob času $t = 0$.

Naredimo še tale poskus. Vzemimo dva ločena generatorja sinusnih izmeničnih napetosti. Priključimo en generator na vhod **Y**, drugega pa na vhod **X** pri osciloskopu. Curek elektronov sedaj niha po zaslonu osciloskopa znotraj pravokotnika, ki ima za stranici amplitudi napetosti. Gibanje je periodično, če sta frekvenci v racionalnem razmerju, sicer pa čez čas curek porišo ves pravokotnik. Značilne tire, ki jih zariše curek pri periodičnem gibanju, imenujemo *Lissajousove krivulje* (slika 16.4).

Dejavnost Opazujte Lissajousove krivulje. Pokażite, da se curek giblje po krožnici, če imata nihanji enaki frekvenci in amplitudi, drugo pa kasni za prvim za četrto njihaja. Kakšno pa je gibanje pri drugačnih zakasnitvah med nihanjema?



Slika 16.5 sestavljena nihala

Slika 16.5 kaže nekaj nihala, pri katerih je nihanje podobno tem, ki smo jih sestavili na zaslonu osciloskopa. V vseh primerih je nihalo *sklopljeno* z drugimi nihali. Če sta sklopljeni nihali enaki, pride do utripanja, če sta različni, pa največkrat do neperiodičnega nihanja. Nastanek utripanja si lahko razložimo kot resonančni pojav. Nihajoče nihalo prek medsebojne povezave rahlo zanihava svojega soseda. Ker je frekvenca motnje enaka lastni frekvenci tega nihala, se sosedu zaradi

motnje učinkovito povečujeta energija in amplituda, energija in amplituda prvega nihala pa se zato zmanjšata. Po enem utripu se pojav ponovi.

Tudi nihalo, ki je povezano z drugimi nihali, lahko niha sinusno, če vsa nihala poženemo hkrati na izbran način. Nihali na sliki 16.5 a npr. nihata sinusno, če obe hkrati enako odmaknemo v isto ali pa v nasprotno smer. O tem se lahko prepričamo s poskusom. Frekvenci sinusnih nihanj se med seboj nekoliko razlikujeta. S poskusom se lahko prepričate, da je njuna srednja vrednost enaka frekvenci nihal, njuna razlika pa frekvenci utripanja.

Dejavnost Naredite si nekaj sklopljenih nihal in poiščite njihova sinusna nihanja.

Pri sistemu več nihal najdemo toliko sinusnih nihanj, kolikor je nihal. Splošno nihanje izbranega nihala lahko predstavimo kot vsoto teh sinusnih nihanj z različnimi amplitudami.

Dejavnost Z računalnikom seštejte več sinusnih nihanj! Poglejte, kdaj je sestavljeno nihanje periodično.

17. | VPRAŠANJA IN NALOGE

VPRAŠANJA

Odgovor: O nihanju odloča rezultanta zunanjih sil. Če naj bo nihanje telesa sinusno, mora biti premo sorazmerna z odmikom in usmerjena proti ravovesni legi.

Odgovor: a) v ravovesni legi,
b) je najbolj odklonjeno,
c) v ravovesni legi,
č) je najbolj odklonjeno,
d) je najbolj odklonjeno,
e) v ravovesni legi,
f) pri odkliku $s = s_0/\sqrt{2}$.

Odgovor: Na utež delujejo enake sile kakor na težno nihalo, ki ima za dolžino radij krogelne ploskve. Nihajni čas je

$$t_0 = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g}}.$$

Odgovor: Na vodo deluje tlačna sila, ki je sorazmerna z razliko v višini gladin. Izračunamo, da niha višinska razlika z nihajnim časom

$$t_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{2g}},$$

kjer je l dolžina celotnega vodnega stolpca v cevki.

Odgovor: Nihajni čas se povečuje, ker se znižuje težišče vode v vedru.

1. Kako lahko vnaprej ugotovimo, ali je nihanje kakega telesa ali sistema sinusno?

2. Težno nihalo niha s stalno amplitudo. V kateri legi je nihalo, ko je:

- a) hitrost največja,
- b) hitrost enaka nič,
- c) pospešek enak nič,
- č) pospešek največji,
- d) vsa energija nihanja potencialna,
- e) vsa energija nihanja kinetična,
- f) kinetična energija enaka potencialni?

Pri odgovorih na vprašanja od 3 do 5 obravnavajte nihanja teles pri majhnih odklikih od ravovesne lege. Skušajte brez računa presoditi, od česa je odvisen nihajni čas.

3.* Majhna utež brez trenja drsi po notranji ploskvi krogelne lupine. Kolikšen je nihajni čas pri tem gibanju?

4.* V stekleno cevko, ki je zvita v obliko črke U, nalijemo vodo. Ko pihnemo v cevko, voda zaniha. Kolikšen je nihajni čas?

5. Lahko valjasto vedro napolnimo z vodo in obesimo na vrvi. Na dnu vedra je luknjica, skozi katero počasi odteka voda. Kako se zaradi odtekanja vode spreminja nihajni čas, s katerim niha vedro na vrvi?

6. Pri vzmetnem nihalu masa vzmeti ne vpliva na nihajni čas, če je le zanemarljiva v primerjavi z maso uteži. Vzemimo, da je masa vzmeti

primerljiva z maso uteži. Kolikšen je nihajni čas takega nihala v primerjavi z nihajnim časom nihala z zanemarljivo maso in enakim koeficientom?

7. Vzamemo dve enako veliki kroglici iz iste snovi, le da je prva votla, druga pa polna. Obesimo ju na enako dolgi vrvici in odmaknemo od ravnovesne lege, da zanihata z enako amplitudo. V čem se razlikujeta nihanji kroglic? Odgovor utemeljite!

8. Zaželeno je, da je lastna frekvenca membrane na zvočniku manjša od 30 s^{-1} . Kako naj bo pripeta membrana na okvir in kolikšna naj bo njena masa, da bo želji zadoščeno? Vzemite, da je membrana toga in prožno vpeta na okvir zvočnika.

9. Železna kroglica, obešena na vrvico, niha z majhno amplitudo. Tik pod ravnovesno lego kroglice postavimo paličast magnet tako, da s polom kaže proti obesišču vrvice. Kako se zaradi tega spremeni nihajni čas kroglice? Ali je nihanje še sinusno?

10. * Na krajišče viseče prožne vzmeti privežemo vrvico z utežjo na drugem koncu. Utež potegnemo malo navzdol in spustimo, da zaniha v navpični smeri s frekvenco 2 s^{-1} . Koliko smemo utež največ odmakniti, da ostane vrvica med nihanjem ves čas napeta?

11. * Kako se spremeni nihajni čas težnega nihala v dvigalu, ki se giblje pospešeno navzgor oziroma navzdol? Ali gibanje nihala vpliva tudi na nihajni čas vzmetnega nihala?

12. Ura na težno nihalo kaže ob morju natančen čas. Kako kaže ura v kraju, ki je na nadmorski višini 300 m?

13. Naštejte nekaj zgledov za resonanco!

14. Tudi dele človeškega telesa lahko obravnavamo kot nihala. Ocenite lastni frekvenci svojih rok in nog. Premislite, kako je z njima povezana hitrost hoje.

15. Med centrifugiranjem se pralni stroj včasih močno trese. Kaj lahko izdelovalec naredi, da se tresenje zmanjša?

16. V električnem nihajnem krogu je vgrajen vrtilni kondenzator, katerega kapaciteto lahko spreminjamo od C do $2C$. V kolikšnem obsegu lahko spreminjamo lastno frekvenco kroga?

Odgovor: Nihajni čas je daljši.

Odgovor: Nihalo s prazno kroglico se hitreje izniha.

Odgovor: Membrana mora imeti dovolj veliko maso in mora biti mehko vpeta.

Odgovor: Nihajni čas se skrajša, nihanje je sinusno le, če je amplituda zelo majhna.

Odgovor: Sila, s katero vzmet vleče vrvico, je najmanjša, ko je utež najvišje. V mejnem primeru je ta sila enaka nič. Tedaj je pospešek uteži enak težnemu pospešku. V našem primeru je dovoljen odmik 6 cm.

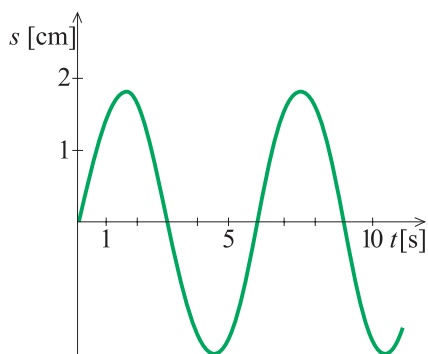
Odgovor: Če je pospešek usmerjen navzgor, se nihajni čas zmanjša ($t_0 = 2\pi \sqrt{l/(g+a)}$), če je usmerjen navzdol, pa poveča ($t_0 = 2\pi \sqrt{l/(g-a)}$). Na nihajni čas vzmetnega nihala pospešek dvigala ne vpliva.

Odgovor: Ura zaostaja, ker je tam težni pospešek manjši.

Odgovor: Ocenimo lahko, da je lastna frekvenca rok okoli $0,8 \text{ s}^{-1}$, lastna frekvenca nog pa $0,6 \text{ s}^{-1}$.

Odgovor: Boben pralnega stroja je na ohišje pripet z vzmetmi. Vrteči se boben, v katerem je perilo zgneteno na enem kraju, vzmeti periodično napanja, to pa se prenaša na ohišje. Izdelovalec lahko stroj dodatno obteži, da zmanjša lastno frekvenco, ali pa poskrbi za dobro dušenje.

Odgovor: od ν_0 do $\nu_0 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$



Odgovor: a) 3,8 m/s
 b) 95 m/s²
 c) 3,0 m/s; 56 m/s²
 č) 26 ms
 d) 0,72 J

Odgovor: a) 82 N/m
 b) 0,98 s
 c) 1,4 s

Odgovor: 0
 1,3 m/s

Odgovor: $v = 0,14$ m/s
 $a = -25$ cm/s²

Odgovor: 0,25 s
 3,8 m/s²

1.] Slika kaže odmik uteži pri nihalu na vijačno vzmet v odvisnosti od časa. Z grafa preberite:

- a) čas, v katerem je odmik od ravnovesne lege največji,
- b) nihajni čas,
- c) število nihajev v 18 sekundah,
- č) amplitudo.

V graf približno vrišite še časovni potek hitrosti in pospeška!

2.] Vzmetno nihalo niha z amplitudo 5 cm in napravi 150 nihajev v minuti. Narišite v primernem merilu časovni potek odmika od ravnovesne lege, če je ob začetku opazovanja odmik nihala največji!

3.] Telo z maso 100 g niha sinusno z amplitudo 15 cm in s frekvenco 4 Hz. V trenutku $t = 0$ je telo v ravnovesni legi. Izračunajte:

- a) največjo hitrost,
- b) največji pospešek,
- c) hitrost in pospešek, ko je odmik 9 cm,
- č) čas, v katerem se nihalo premakne za 9 cm iz ravnovesne lege,
- d) največjo kinetično energijo nihala.

4.] Narišite graf, ki kaže, kako se kinetična energija telesa iz prejšnje naloge spreminja:

- a) z odkikom,
- b) s časom.

5.] Telo z maso 2,0 kg visi na lahki vzmeti, ki je zaradi tega raztegnjena za 24 cm.

- a) Kolikšen je koeficient vzmeti?
- b) S kolikšnim nihajnim časom zaniha utež, ko jo izmaknemo iz ravnovesne lege?
- c) S kolikšnim nihajnim časom bi na isti vzmeti nihala utež z dvakrat tolikšno maso?

6.] Na lahki vijačni vzmeti s koeficientom 10 N/m niha utež z maso 10 g. Amplituda je 4,0 cm. Kolikšna sta odmik in hitrost uteži po času 50 ms po začetka nihanja, če je utež v trenutku $t = 0$ v eni od skrajnih leg?

7.] Nihajni čas vzmetnega nihala je 2,0 s, amplituda 5,0 cm, ob času $t = 0$ pa je nihalo v ravnovesni legi in se giblje v pozitivni smeri. Kolikšna je hitrost, ko je odmik od ravnovesne lege 2,5 cm? Kolikšen je tedaj pospešek?

8.] Krajišče jeklenega traku trdno pritrdimo na mizo. Na prosto krajišče pritrdimo utež z maso 20 g in jo izmaknemo iz ravnovesne lege, tako da zaniha s frekvenco 4 Hz in amplitudo 6 mm. Izračunajte nihajni čas in največji pospešek uteži.

9.] Telo je z vzmetema pripeto med navpični steni in z amplitudo s_0 niha po gladki vodoravni podlagi.

- a) Opišite energijske spremembe med nihanjem nihala.

- b) Narišite graf, ki kaže, kako je prožnostna energija nihala odvisna od odmika. Označite največjo prožnostno energijo.
- c) V grafu z daljico označite še kinetično energijo, ko je odmik enak polovici amplitude.
- č) Narišite graf, ki kaže odvisnost kinetične energije nihala od odmika.
- d) Narišite še graf, ki kaže, kako se spreminja kinetična energija nihala s časom. V isti koordinatni sistem vrišite še krivuljo, ki kaže odvisnost prožnostne energije od časa.

10.] Bat v avtomobilskem motorju se giblje približno tako kakor utež vzmetnega nihala med nihanjem. Razdalja med zgornjo in spodnjo mrtvo točko (dvojna amplituda) bata je 12 cm, motor pa se vrti s 3600 obrati v minuti. Masa bata je 0,50 kg.

- a) Kolikšen je pospešek bata v spodnji ali zgornji mrtvi točki?
- b) Kolikšna sila takrat deluje na bat?
- c) Kolikšna je največja hitrost bata?
- č) Kolikšna sta največja hitrost in največji pospešek bata, ko se motor vrti s 4800 vrtljaji v minuti?

Odgovor: a) 85 m/s^2
 b) 43 N
 c) 23 m/s
 č) 30 m/s; 150 m/s^2

11.*] Boja v obliki ploščatega valja z osnovno ploskvijo 1 m^2 ima maso 200 kg in plava na morski gladini. Za koliko se potopi, ko stopi nanjo mož z maso 80 kg? S kolikšnim nihajnim časom zaniha? Gostota morske vode je $1,03 \text{ kg/dm}^3$. Računajte, kakor da okoliška voda ne niha hkrati z bojo.

Odgovor: 8 cm
 1,0 s

12.] Utež na vrvi z dolžino 99 cm niha na Zemlji z nihajnim časom 2,0 s. Kolikšen je nihajni čas takega nihala na površju Lune, kjer je težni pospešek 6-krat manjši kakor na Zemlji?

Odgovor: 4,9 s

13.] Utež z maso 2,5 kg visi na 3,4 m dolgi vrvi in niha z amplitudo 45 cm. Izračunajte energijo nihanja in hitrost v trenutku, ko je odmik 30 cm!

Odgovor: $W = 0,74 \text{ J}$
 $v = 0,57 \text{ m/s}$

14.] Alpinisti trenirajo na umetnih stenah v telovadnicah in na prostem.

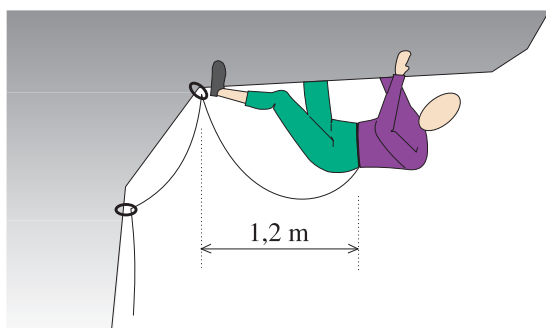
a) Oglejte si skico in izračunajte, s kolikšnim nihajnim časom zaniha plezalec ob padcu, če vzamemo, da se vrv od plezalca do prve vponke pri padcu ne raztegne.

b) Kolikšna je potencialna energija plezalca v steni glede na najnižjo točko, ki jo doseže s padcem? Masa plezalca je 65 kg.

c) S kolikšno hitrostjo zaniha plezalec skozi najnižjo točko?

č) S kolikšno silo deluje plezalec na klin v steni, ko se giblje skozi najnižjo točko?

Odgovor: a) 2,2 s
 b) 780 J
 c) 4,9 m/s
 č) 1950 N



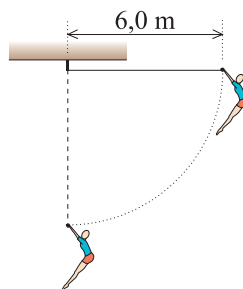
Odgovor: 0,84 s

15.] Ko potniki s skupno maso 300 kg sedijo v avtomobil, se vzmeti skrčijo za 6,0 cm. Vzmeti so takrat obremenjene s skupno silo $9,0 \cdot 10^3$ N. Kolikšen je nihajni čas tako obteženega vozila?

Odgovor: a) 11 m/s
b) 4,9 s
c) 1,5 m/s

16.] Telovadec z maso 70 kg se spusti na trapezu, kakor kaže skica, in zaniha po krožnici z radijem 6,0 m.

- a) S kolikšno hitrostjo se giblje skozi najnižjo točko loka?
b) Zaradi upora zraka se amplituda nihanja zmanjšuje. S kolikšnim nihajnim časom niha, tik preden se zaustavi?
c) Po nekaj nihajih, ko je njegova hitrost v najnižji točki loka 2,5 m/s, telovadec pobere s tal prijatelja z maso 50 kg. S kolikšno hitrostjo se telovadca gibljeta takoj za tem?

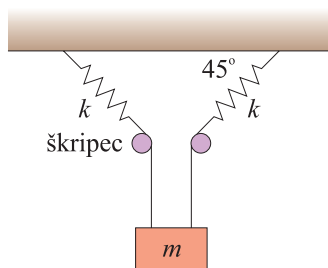


Odgovor: za 20 odstotkov

17.] V breztežnem prostoru tehtamo tako, da pripnemo merjenec z vzmetema na toga nosilca in merimo frekvenco nihanja. Za koliko odstotkov se razlikujeta masi merjencev, če se njuni frekvenci razlikujeta za 10 odstotkov?

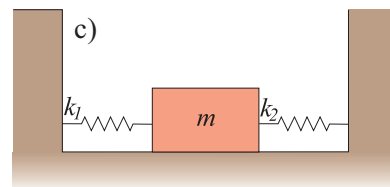
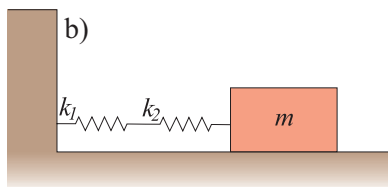
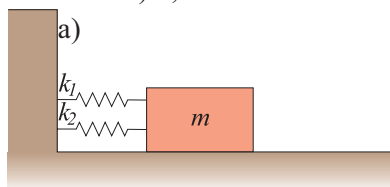
Odgovor: 2,25 s⁻¹

18.] Določite frekvenco nihala na sliki, če je koeficient vsake od vzmeti po 30 N/m, masa obešenega telesa pa je 0,3 kg. Masa škripcov in vrvic je zanemarljiva.



Odgovor: a) 4,4 s⁻¹
b) 2,1 s⁻¹
c) 4,4 s⁻¹

19.] Kolikšne so frekvence nihala na slikah a, b in c? Koeficienta vzmeti sta 50 N/m oziroma 100 N/m, masa telesa pa je 200 g.



20.*] Učenec z maso 68 kg določi vztrajnostni moment svojega telesa glede na os skozi težišče takole: najprej se z rokami obesi na drog in ugotovi, da je njegov nihajni čas 2,3 s. Nato prečno leže na gred in

ugotovi, da je njegovo telo v ravnovesju, ko je razdalja med gredjo in dlanmi iztegnjenih rok enaka 103 cm. Kako je iz teh podatkov določil vztrajnostni moment in kolikšen je?

Odgovor: 92 kgm²

21.* Klada iz mehkega lesa, ki ima maso 5,0 kg, visi na 4,3 m dolgi vrvi. V klado ustrelimo kroglo z maso 8,5 g in hitrostjo 600 m/s v vodoravni smeri. Krogla obtiči v kladi. Izračunajte amplitudo, s katero zaniha klada. Kolikšen del začetne energije se je ob ustavljanju krogle v kladi spremenil v notranjo energijo?

Odgovor: 0,67 m
50 %

22.* Pri streljanju z zračno puško se krogla z maso 10 g zarije v leseno klado z maso 400 g. Klada, ki je obešena na 3 m dolgi lahki vrvici, se pri tem odkloni za 5°. Kolikšna je hitrost krogle?

Odgovor: 19,6 m/s

23.* Mož z maso 80 kg je privezan za noge s 30 m dolgo prožno vrvo, katere drugo krajišče je pritrjeno na ograjo 50 m visokega mostu. Ko skoči z mostu navpično navzdol, se zaustavi tik nad vodno gladino. S kolikšnim nihajnim časom zaniha v navpični smeri? Kako dolg kos enake vrvi bi za tak skok potrebovala ženska z maso 60 kg?

Odgovor: 4 s ; 32 m

Pri reševanju moramo upoštevati, da je prožnostni koeficient vrvi obratno sorazmeren z dolžino vrvi. Če je prožnostni koeficient vrvi z dolžino l , s katero skačejo moški, k , je koeficient vrvi z dolžino l' , s katero skačejo ženske, $k' = k(l/l')$.

24. Utež na vrvici z dolžino 50 cm odmaknemo iz ravnovesne lege za 5 cm in jo spustimo. Po 4 nihajih je amplituda le še 4 cm. Kolikšen je koeficient dušenja nihala? Za koliko odstotkov se je zmanjšala energija nihala?

Odgovor: 0,039 s⁻¹
za 36 %

25. Električni nihajni krog je sestavljen iz tuljave z induktivnostjo 0,010 H in iz kondenzatorja s kapaciteto 0,41 μF. Izračunajte nihajni čas.

Odgovor: 4,0·10⁻⁴ s

26. Napetost na kondenzatorju v nihajnem krogu niha z amplitudo 10 V in frekvenco 5 kHz. Kapaciteta kondenzatorja je 0,1 μF. Izračunajte induktivnost tuljave, ki je vgrajena v nihajni krog. S kolikšno amplitudo niha tok?

Odgovor: 10 mH
32 mA

27. V nihajnem krogu sta kondenzator s kapaciteto 25 μF in tuljava z induktivnostjo 0,015 H. Kolikšna je lastna frekvenca kroga? Kondenzatorju nihajnega kroga dovedemo naboj 2,5 μAs. S kolikšno amplitudo niha napetost na kondenzatorju, če izgub ne upoštevamo? Kolikšen je največji tok, ki teče skozi ovoje tuljave?

Odgovor: 260 Hz
0,10 V
4,1 mA

28. Nihajni krog je sestavljen iz tuljave z induktivnostjo 0,2 H in kondenzatorja s kapaciteto 10 μF. V trenutku, ko je napetost na kondenzatorju 1 V, je tok v tuljavi 0,01 A. Kolikšen je največji tok v nihajnem krogu? Kolikšen je naboj na kondenzatorju, ko je tok enak 0,005 A?

Odgovor: 12 mA
0,15 mAs

29. Med vožnjo nihajo vagoni v navpični smeri zaradi udarcev koles ob tračnice. Pri kolikšni hitrosti vlaka je amplituda nihanja največja, če je lastni nihajni čas vagona za nihanje v navpični smeri 0,70 s, tračnice pa so dolge po 12,5 m. Pri kateri hitrosti vlaka še pričakujemo izrazitejše nihanje?

Odgovor: 18 m/s
36 m/s

18. VALOVANJE



Slika 18.1 nekdanja svetovna prvakinja v umetnostnem drsanju Katarina Witt med valovi na svojem krilu



Slika 18.2 Karikatura iz leta 1906 je nastala neposredno po katastrofalnem potresu v San Franciscu. Zemlja toži: »Upam, da mi ne bo nikoli več treba prestajati tako neznosnega glavobola.«

RAZŠIRJANJE VALOV

Živimo sredi različnih valovanj in jih sami nesprestano povzročamo. Ko se pogovarjamo, oddajamo in sprejemamo valove, ki se širijo po zraku. To so *zvočni valovi*. Tudi *svetloba*, ki jo oddajajo Sonce in svetila, je valovanje. Svet je prepreden z *radijskimi valovi*, ki prenašajo sporočila. Po vodnih površjih potujejo neprestano v različnih smereh *površinski valovi*. Nenadni premiki v notranjosti Zemlje povzročajo *seizmične valove*, ki potujejo do površja, kjer jih zaznavamo kot potrese.

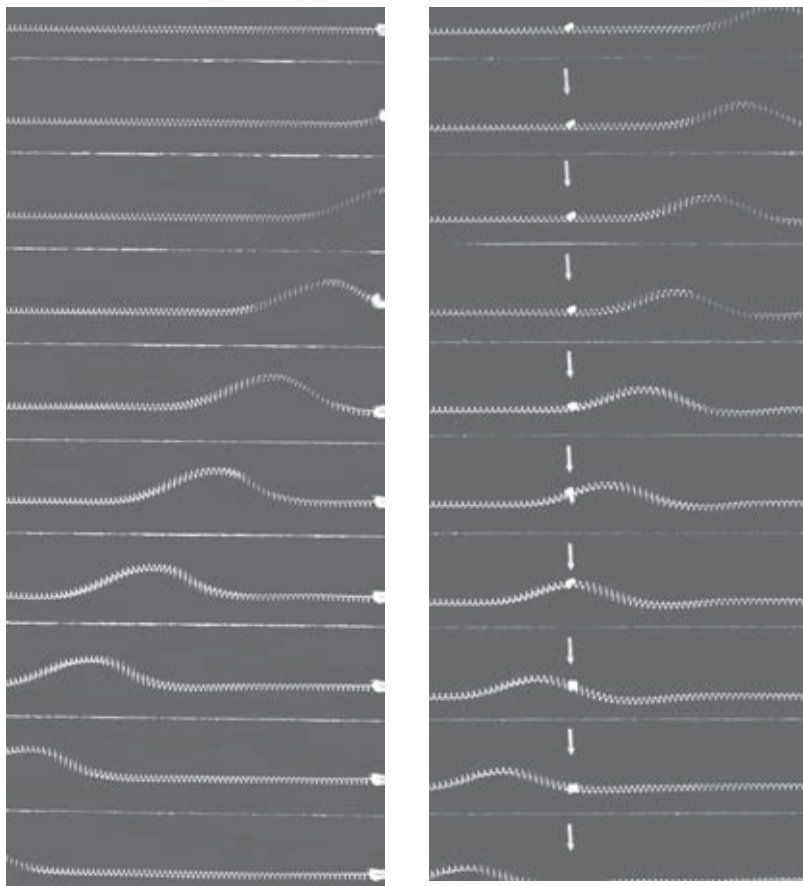
Vsako od naštetih valovanj ima svoje posebnosti, mnoge lastnosti pa so skupne. Ogledali si jih bomo pri valovih, ki jih lahko znova in znova delamo sami pri poskusih.

Za začetek vzemimo valove, ki jih lahko povzročimo na dolgi vzmeti ali vrvi. Položimo jo na tla in jo rahlo napnemo. Zamahnimo s krajiščem v prečni smeri. Naredi se val v obliki *hriba*, ki potuje do drugega krajišča, se tam odbije, pride spet do našega krajišča in po nekaj odbojih izzveni. Slika 18.3 kaže nekaj *trenutnih slik* dolge vzmeti s potujočim hribom, posnetih v hitrem zaporedju.

Označimo na vzmeti kratek odsek in ga opazujemo. Pri vsakem prehodu hriba se označeni del odmakne v prečni smeri in spet obmiruje. Slika 18.4 kaže nekaj trenutnih slik vzmeti z zaznamovanim odsekom.

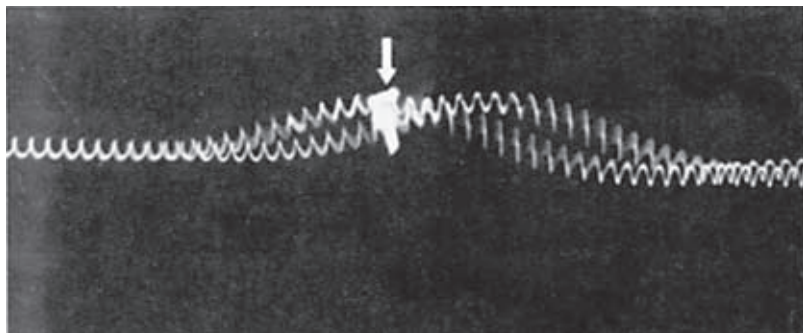
Val, v katerem se gibljejo deli sredstva prečno na smer potovanja vala, imenujemo *prečni* ali *transverzalni val*. Transverzalni so npr. valovi po vrveh in strunah. Transverzalni so tudi radijski valovi in svetloba.

V vzmeti pa lahko ustvarimo tudi *vzdolžni* ali *longitudinalni val*. Na krajišču stisnemo del vzmeti, da ustvarimo *zgoščino*. Ko jo spustimo, potuje zgoščina po vzmeti nekajkrat sem in tja. Pri vsakem prehodu zgoščine zaniha označeni del vzmeti v vzdolžni smeri. Longitudinalni val povzročimo tudi z vrati, ki jih nenadoma odpremo in zapremo. Ob odpiranju vrat nastane na eni strani zgoščina, na drugi pa *razredčina*, pri zapiranju pa se zgoščina in razredčina zamenjata. Ko se gibljeta po sobi, zanihata zaveso, ki jo zadeneta. Med najznačilnejše longitudinalne valove sodi *zvok*.



Slika 18.3 (levo) širjenje motnje po dolgi vzmeti

Slika 18.4 (desno) gibanje zaznamovanega dela vrvi



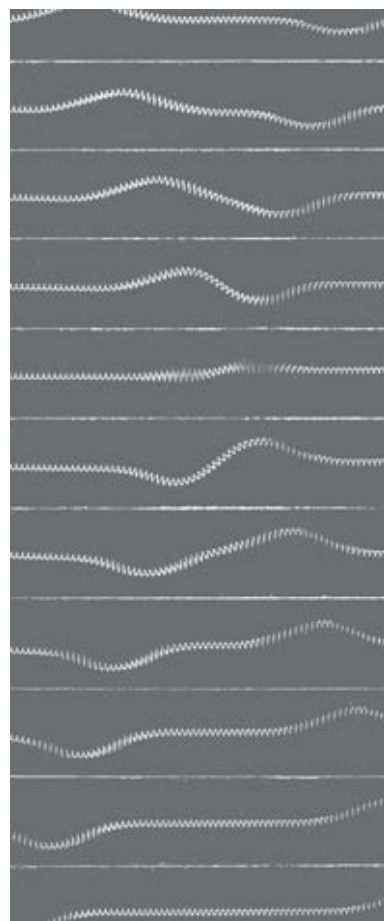
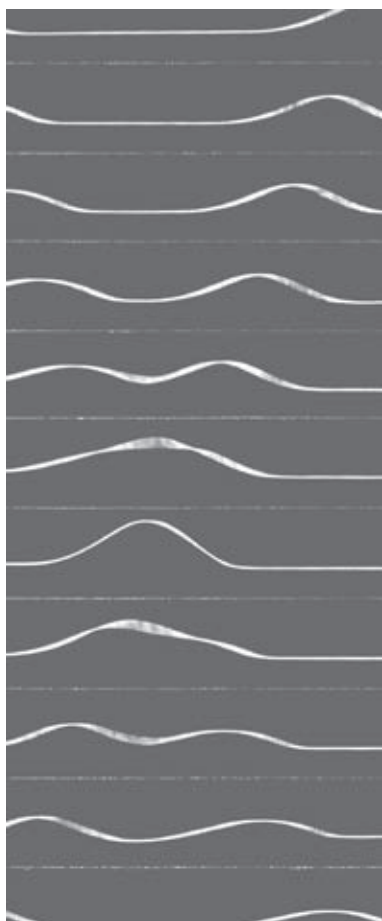
Slika 18.5 zaporedni trenutni snemki vzmeti, po kateri se širi motnja

Vrnimo se k vzmeti, po kateri potuje transversalni val. Poglejmo podrobneje, kako se gibljejo deli vzmeti v valu. Narišimo dve bližnji trenutni legi vala (slika 18.5). Primerjava obeh kaže, da se na čelni strani vala deli odmikajo od ravnovesne lege, na zadnji strani pa se vanjo vračajo. Prečne razdalje med legami izbranih točk kažejo, kolikšne so hitrosti delov vzmeti. Največje so tam, kjer je val najbolj strm. Slika 18.6 kaže trenutne hitrosti delov vzmeti.

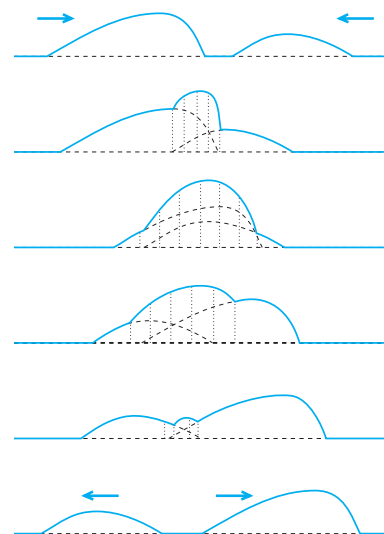
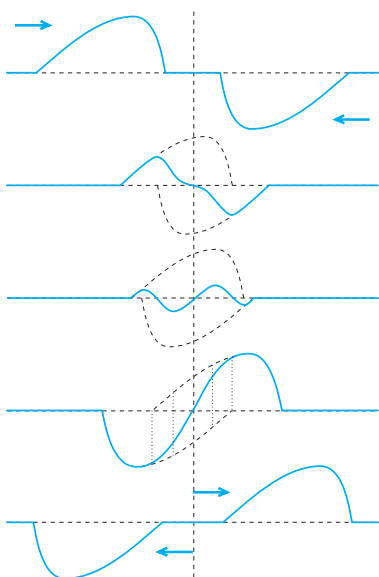
Eksperimentirajmo še naprej. S kratkima sunkoma ustvarimo na krajših dva hriba, ki se gibljeta drug proti drugemu. Srečata se, preideta drug skozi drugega in se gibljeta nemoteno naprej. Odmik vzmeti na mestu srečanja je enak vsoti odmikov, ki ju narekujeta vala.



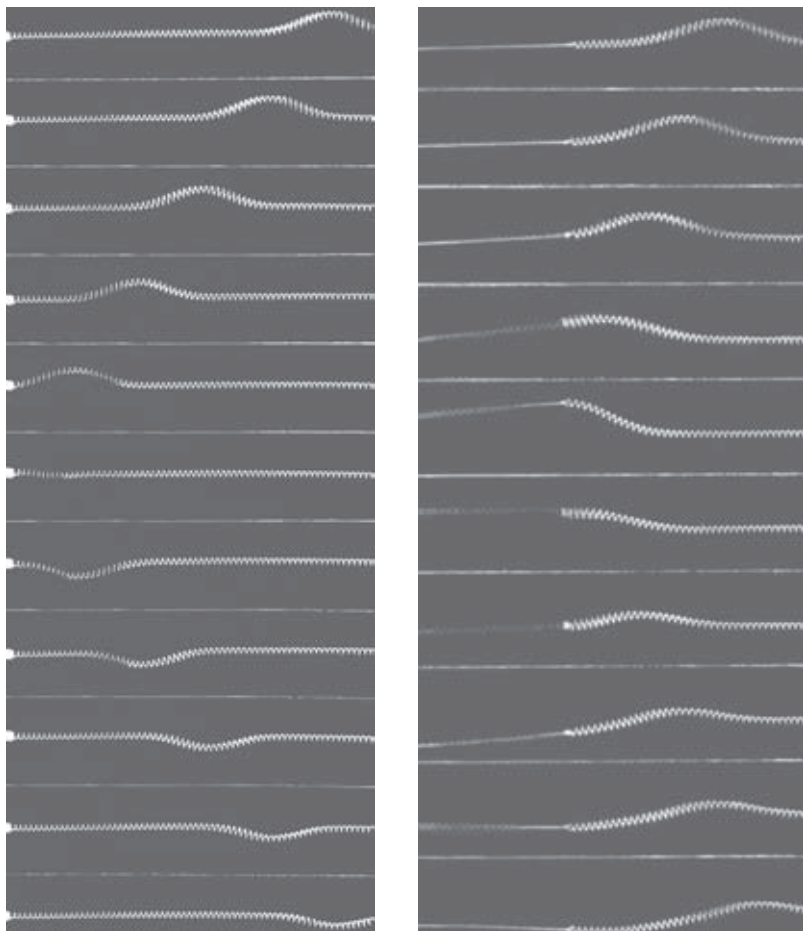
Slika 18.6 premiki delov vzmeti pri prehodu motnje



Sliki 18.7, 18.8 sestavljanje motenj na vzmeti



Sliki 18.9, 18.10 ponazoritev sestavljanja motenj



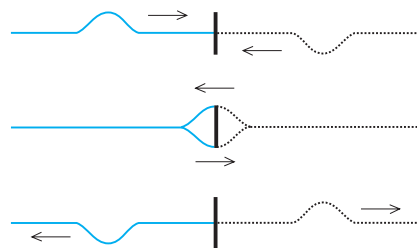
Slika 18.11 odboj motnje na pritrjenem krajišču

Slika 18.12 odboj motnje na prostem krajišču

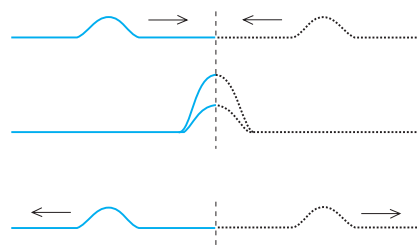
Slika 18.7 kaže srečanje dveh hribov, ki sta obrnjena v isto smer, slika 18.8 pa srečanje dveh nasprotnih hribov. V prvem primeru je na mestu srečanja hrib še izrazitejši, v drugem primeru pa ga ni. Slika 18.9 in slika 18.10 podrobneje ponazarjata prehod valov. Pravimo, da se valovi *naložijo* drug na drugega ali da se *superponirajo* ali da *interferirajo*. Zaradi tega pojava lahko po istem sredstvu hkrati potuje več valov, ne da bi se motili med seboj. Pojav lepo opazujemo na vodnem površju. Valovi, ki se širijo od mest, kamor smo vrgli nekaj kamnov, se gibljejo drug skozi drugega in se nemoteni širijo naprej.

Na koncu si oglejmo še, kaj se zgodi, ko valovi naletijo na oviro, npr. na krajišče vzmeti, ki je trdno pritrjeno. Zazibajmo krajišče vzmeti, da dobimo hrib. Ta se na pritrjenem krajišču odbije in pripotuje nazaj *obrnjen* (slika 18.11). Slika je drugačna, če je krajišče vzmeti prosto. Pristrdimo ga na tanko vrvico, ki ne moti prečnega gibanja vzmeti. Hrib se tedaj odbije neobrnjen, kar lahko razberemo s slike 18.12.

Dogajanje na krajiščih vzmeti je takšno, kakor bi ga opazovali na polovici neomejene vzmeti v točki, proti kateri bi se z nasprotnih strani približevala enaka vala, v prvem primeru nasprotna hriba, v drugem primeru pa hriba v isti smeri (sliki 18.13 in 18.14).

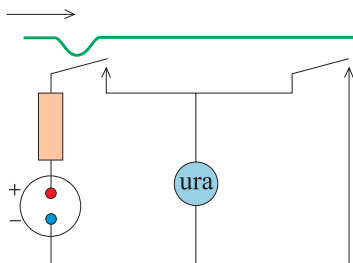


Slika 18.13 ponazoritev odboja motnje na pritrjenem krajišču



Slika 18.14 ponazoritev odboja motnje na prostem krajišču

Dejavnost Opazujte še odboj longitudinalnih valov!



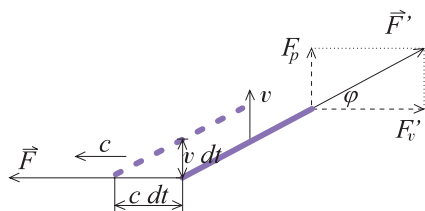
Slika 18.15 merjenje hitrosti motnje na vrvi

Podatke o hitrosti valov v različnih sredstvih lahko najdemo v priročnikih. Tako zvemo, da je hitrost zvoka v zraku okoli 340 m/s, hitrost zvoka v vodi okoli 1500 m/s, hitrost zvoka v kovinah do okoli 5000 m/s. Za hitrost svetlobe v vakuumu najdemo podatek, da je okoli 300.000 km/s, v vodi okoli 225.000 km/s in tako naprej.

Izmerimo hitrost transversalnega valovanja po vzmeti, s katero delamo poskuse, in ugotovimo, od česa je odvisna. Vzdolž vzmeti si izberimo dve mesti in izmerimo čas, ki ga potrebuje val za pot med njima. Že takoj uvidimo, da je čas kratek, in moramo zato poskrbeti za elektronsko merjenje. V primerni razdalji od vzmeti postavimo stikali, ki ju mimoidoči val stakne in s tem sam sproži ter ustavi uro. Na sliki 18.15 vidimo eno od možnih izvedb.

Dolga vzmet, s katero delamo poskuse, ima maso 0,76 kg. Najprej jo napnemo s silo 4 N, pri čemer je njena dolžina 4,81 m, nato pa jo napnemo s silo 6 N, pri čemer se podaljša na 7,03 m. V prvem primeru izmerimo hitrost vala 5,1 m/s, v drugem primeru pa 7,5 m/s. Če vzmet bolj napnemo, pri čemer se vzmet tudi razredči, se hitrost vala torej poveča. Obratno pa se hitrost vala zmanjša, če se zmanjša napetost vzmeti in se obenem vzmet tudi zgosti.

Poskusimo računsko določiti, od česa je odvisna hitrost vala. Slika 18.16 kaže čelo vala, ki se razširja na še mirujoči del vzmeti. Na sliki sta trenutni legi vzmeti ob času t in malo pozneje, ob času $t + dt$. Vmes, to je v času dt , se premakne čelo vala za $c dt$ naprej. Novo zajeti del vzmeti se, tako kakor vsi deli v čelu, giblje v prečni smeri s hitrostjo v . Zaradi lažjega razmišljanja smo narisali, kot da je meja med čelom vala in nemoteno vzmetjo ostra. Da bi bila slika preglednejša, smo tudi močno poudarili prečni premik vzmeti. Le-ta je v resnici veliko manjši od razdalje, za katero se medtem razširi čelo vala.



Slika 18.16 k določanju hitrosti motnje v palici

Zaradi vala se napetost vzmeti skoraj nič ne spremeni. Opazovani del vzmeti napenjata po velikosti enaki sili $\vec{F}$ in $\vec{F}'$. Dokler je nagib vzmeti majhen, imata sili rezultanto, katere komponenta vzdolž vzmeti je zanemarljivo majhna¹, prečna komponenta pa je

$$F_p = F \sin \varphi = F \frac{v}{c} .$$

Sunek te prečne sile, $F_p dt$, je tisti, ki podeli delu vzmeti z dolžino $c dt$ in z maso $\mu c dt$, ki ga v času dt zajame čelo vala, gibalno količino $(\mu c dt) v$ v prečni smeri. Po izreku o gibalni količini zapišemo

$$(F \frac{v}{c}) dt = (\mu c dt) v$$

in iz tega izračunamo hitrost

$$c = \sqrt{\frac{F}{\mu}} .$$

¹ Rezultanta sil na narisani odsek vzmeti ima komponento $F_v = F \cos \varphi = F$ vzdolž vzmeti in komponento $F_p = F \sin \varphi$ v prečni smeri. Dokler je hitrost v prečni smeri majhna v primerjavi s hitrostjo širjenja vala, je kot φ majhen, $\cos \varphi = 1$ in $\sin \varphi = v/c$.

Za hitrost vala v prvem primeru izračunamo 5,04 m/s, v drugem primeru pa 7,45 m/s. To se kar dobro ujema z izmerjenima vrednostima. Enako dobro kot hitrost transversalnega valovanja po dolgi vzmeti podaja formula tudi hitrost transversalnega valovanja po napeti vrvi ali po struni. Hitrost ni odvisna od oblike vala.

Z opisano merilno napravo lahko izmerimo tudi hitrost longitudinalnega vala na vzmeti. Za prvi primer izmerimo 4,8 m/s, za drugi primer pa 7,0 m/s. Tudi tu hitrost ni odvisna od oblike vala.

Podobno kakor se razširja longitudinalni val po vzmeti, se razširjajo longitudinalni valovi po prožnih palicah ali po kapljevinah in plinih.

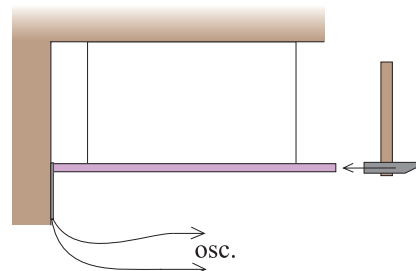
Hitrost valov po prožni palici lahko izmerimo s pripravo, ki jo kaže slika 18.17. Palico vpnemo tako, da se v vzdolžni smeri njeni deli neovirano gibljejo. Krajišče palice prislonimo ob togo steno, med palico in steno pa vstavimo merilni listič iz piezoelektrične snovi. Z osciloskopom opazujemo napetost na merilnem lističu. Ko s kladivom udarimo po prostem krajišču palice v vzdolžni smeri, nastane longitudinalni val, ki potuje po palici do drugega krajišča, kjer se deloma odbije nazaj proti prvemu krajišču, kjer se spet odbije, nato pa pride do odboja na krajiščih še večkrat. Na zaslonu osciloskopa dobimo ob vsakem odboju vala na krajišču z lističem sunek napetosti, ki nastane, ko palica pritisne na listič. Iz časa Δt med dvema zaporednima sunkoma določimo hitrost vala v palici, saj vemo, da v tem času prepotuje val ravno dvojno dolžino palice. Tipična hitrost longitudinalnega valovanja po kovinskih palicah je med 4000 in 6000 m/s. Podrobnejše podatke dobimo tabelirane v fizikalnih priročnikih.

Med longitudinalnimi valovi po kapljevinah in plinih je najbolj znan zvok. O njem bomo podrobneje govorili kasneje. Sedaj določimo le njegovo hitrost v zraku. To lahko napravimo brez posebnih priprav kar na domačem dvorišču, ko stopamo preprogo. Ob udarcu na preprogo se razširi v okolico zvočni val, ki se odbije od stavb v okolici. Odbiti zvok slišimo kot odmev. Hitrost zvoka lahko določimo iz časa med udarcem in odmevom in razdalje do stavb. Premislite, kako bi podrobno izvedli poskus! Hitrost zvoka v zraku je tako okoli 340 m/s.

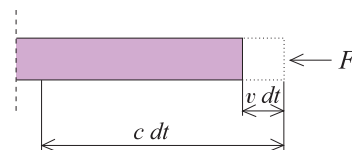
Zvok se širi tudi v vodi, kjer meri njegova hitrost okoli 1500 m/s.

* Na koncu hitrost longitudinalnega valovanja še izračunajmo. Zamislimo si dolgo in tanko prožno palico. Na kratko jo udarimo po krajišču tako, da v tem kratkem času deluje nanjo konstantna sila F . Slika 18.18 ponazarja palico v izbranem času dt po začetku delovanja sile. Krajišče palice se giblje s hitrostjo v in se je od začetka delovanja sile odmaknilo od ravnovesne lege za $v dt$. Z enako hitrostjo se gibljejo tudi vsi drugi deli palice, ki jih je zajel val, to je do razdalje $c dt$ od krajišča. Odmiki od ravnovesne lege se vzdolž palice zmanjšujejo in so na čelu vala nič. Gibalna količina gibajočega se dela palice je enaka sunku sile F :

$$(S c dt) \rho v = F dt . \quad (1)$$



Slika 18.17 merjenje hitrosti motnje v palici



Slika 18.18

Skrajšanje palice je po Hookovem zakonu povezano s silo F in z dolžino zmotenega dela cdt :

$$\frac{F}{S} = \frac{1}{E} \frac{v dt}{c dt} . \quad (2)$$

Ko iz enačb eliminiramo silo F , dobimo enačbo za hitrost

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} .$$

Enak premislek pomaga pri iskanju hitrosti longitudinalnega valovanja po kapljevinskem stolpcu ali po stolpcu plina. Namesto dolžine palice opazujemo prostornino stolpca. Spomnimo se, da so kapljevine in plini stisljivi, pri čemer je relativna sprememba prostornine sorazmerna s spremembo tlaka

$$\frac{|dV|}{V} = \chi |dp| ,$$

če je χ stisljivost. Za naš primer zapišemo $dV = S v dt$, $V = S c dt$ in $dp = F/S$, če je S prečni presek stolpca. Iz enačb (1) in (2) dobimo s tem za hitrost izraz

$$c = \frac{1}{\sqrt{\chi \rho}} .$$

Pri plinih lahko stisljivost χ izrazimo s tlakom. Pri tem moramo upoštevati, da se zrak v zgoščinah nekoliko segreje, v razredčinah pa nekoliko ohladi, kar je značilno za toplotno izoliran plin. Ko vstavimo v enačbo za hitrost ustrezno stisljivost

$$\chi = \frac{1}{\kappa \rho} ,$$

dobimo

$$c = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} ,$$

oziroma

$$c = \sqrt{\frac{\kappa R T}{M}} ,$$

ko upoštevamo še plinsko enačbo $p/\rho = RT/M$ (pomagajte si z učbenikom *Mehanika & toplota*).

? Izračunajte hitrost longitudinalnih valovanj v prožnih palicah, vodi in zraku in jih primerjajte s tabeliranimi.

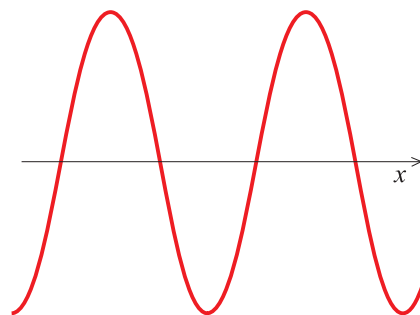
19. | POTUJOČE SINUSNO VALOVANJE

KRAJEVNA IN ČASOVNA SLIKA VALOVANJA

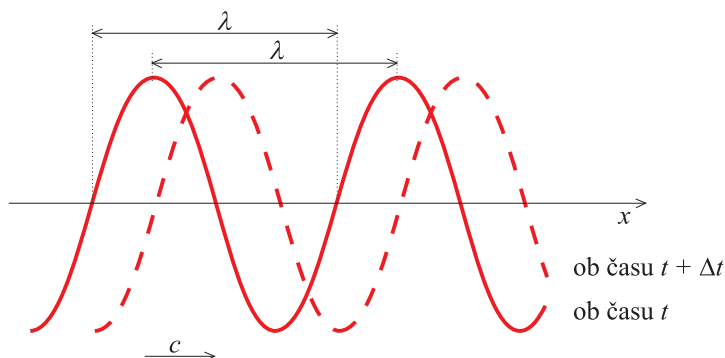
Ko krajišče vzmeti sinusno zanihavamo, se nihanje razširi po vsej vzmeti kot *sinusno valovanje*. Če poskrbimo, da na drugem krajišču vzmeti ni odboja, npr. tako, da ga na rahlo obložimo s krpami ali s papirjem, potujejo po vzmeti valovi, kakor da bi bila neomejena.

Opazujemo gibanje posameznih delov vzmeti. Najlažje bo, če jih nekako zaznamujemo. Vidimo, da vsi označeni deli sinusno nihajo z enako amplitudo in enako frekvenco kakor krajišče vzmeti, vendar nihanja v splošnem nimajo enake faze. Čim bolj je del vrvi oddaljen od izvira, tem bolj zaostaja za njim.

Fotografirajmo valujočo vzmet. Slika 19.1 kaže *trenutno sliko* dela vzmeti. Z več fotografij, ki jih posnamemo zapored v dovolj kratkih časovnih presledkih, lahko razberemo, kako se ti deli gibljejo. Slika 19.2 kaže dve zaporedni trenutni legi vzmeti, po kateri se širi valovanje od leve proti desni. S slike razberemo trenutne odmike in trenutne hitrosti delov vzmeti.



Slika 19.1 trenutna slika valujoče vrvi



Slika 19.2 zaporedni trenutni slike valujoče vrvi

Oblika valujoče vrvi je *sinusoida*, ki potuje v smeri širjenja valovanja. Značilni količini, s katerima opredelimo valovanje, sta *amplituda* in *valovna dolžina*. Amplituda valovanja je enaka amplitudi, s katero nihanja izvir valovanja, to je krajišče vzmeti. Valovna dolžina λ je razdalja med najbližjima deloma vzmeti, ki nihata z enako fazo. S slike razberemo, da je to razdalja med bližnjima deloma, ki imata največji odmik, ali med bližnjima deloma, ki sta v ravnovesni legi in se gibljeta v isti

smeri. Valovna dolžina je odvisna od frekvence izvira in od hitrosti valovanja. To je razdalja, ki jo prepotuje val v nihajnem času t_0 :

$$\lambda = c t_0 ,$$

izraženo s frekvenco

$$\lambda = \frac{c}{\nu} .$$

* Gibanje delov vzmeti v sinusnem valu lahko zapišemo tudi z enačbo, v kateri upoštevamo, da se valovanje razširja od izvira in zajame bolj oddaljene dele vzmeti kasneje kakor bližnje. Del vzmeti, ki je za x oddaljen od izvira valovanja, se zato ob času t giblje enako, kakor se je gibal izvir ob času $t - x/c$. Če izvir pri $x = 0$ sinusno niha po enačbi

$$s(t) = s_0 \sin \omega t ,$$

niha del vzmeti v razdalji x po enačbi

$$s(x, t) = s\left(t - \frac{x}{c}\right) = s_0 \sin \omega\left(t - \frac{x}{c}\right) .$$

Ko upoštevamo zvezo med valovno dolžino in frekvenco, lahko enačbo zapišemo še v obliki

$$s(x, t) = s_0 \sin \left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda}\right) ,$$

iz katere je razvidno, da se ob izbranem času krajevna slika vzmeti ponavlja s periodo valovne dolžine.

ENERGIJSKI TOK IN ENERGIJA SINUSNEGA VALOVANJA

Valovanje prenaša energijo od izvira v prostor, po katerem se širi, ali do ponora. Poglejmo, kolikšen energijski tok prenaša valovanje po dolgi vzmeti.

Naj se valovanje od izvira razširja na še mirujoče dele vzmeti. V času Δt se valovanje razširi po vzmeti za $c\Delta t$ naprej, kar pomeni, da prej mirujoči del vzmeti z maso $\Delta m = \mu c\Delta t$ sedaj sinusno niha z amplitudo s_0 in s krožno frekvenco ω . Temu delu vzmeti pripišemo energijo nihanja ΔW , ki jo lahko izrazimo z maksimalno kinetično energijo delov vzmeti:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \Delta m v_0^2 = \frac{1}{2} (\mu c \Delta t) \omega^2 s_0^2 = \left(\frac{1}{2} \mu \omega^2 s_0^2\right) c \Delta t .$$

Izraz v oklepaju predstavlja energijo na dolžinsko enoto valujoče vzmeti.

Energija, ki jo pridobi prej mirujoča vzmet, je posledica *energijskega toka* P , ki se od izvira prenaša po že valujočem delu vzmeti:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \left(\frac{1}{2} \mu \omega^2 s_0^2\right) c .$$

Izraz velja za vsa mehanična valovanja. Pri valovanjih, ki se širijo po prostoru, ponavadi izrazimo maso na dolžinsko enoto z gostoto snovi, ρ , in s ploščino okvira, S , skozi katerega se pretaka valovanje, postavljenega pravokotno na smer razširjanja:

$$\mu = \rho S .$$

Tako je energijski tok

$$P = \left(\frac{1}{2} \rho \omega^2 s_0^2 \right) c S ,$$

pri čemer predstavlja izraz v oklepaju *gostoto energije valovanja*:

$$w = \frac{1}{2} \rho \omega^2 s_0^2 .$$

Energijski tok je tedaj

$$P = w c S .$$

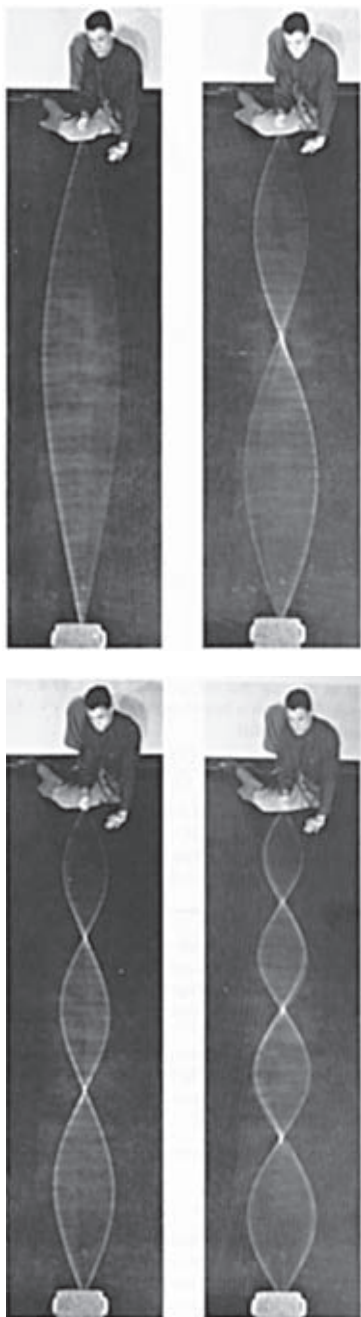
Vidimo, da je številsko enak energiji, ki je v kvadru z osnovno ploskvijo S in višino c .

Če je energijski tok po okviru enakomerno porazdeljen, lahko iz enačbe izračunamo še *gostoto energijskega toka* kot kvocient med energijskim tokom in ploščino okvira:

$$j = \frac{P}{S} = w c .$$

Gostota energijskega toka je med osnovnimi podatki o valovanjih, ki se razširjajo po prostoru. O njej bomo več govorili pri zvoku in svetlobi.

20. | STOJEČI VALOVI



Slika 20.1 stoječi valovi na vrvi

Pri poskusih s končno razsežno vzmetjo ali vrvjo se kaj lahko zgodi, da na njej namesto potujočih dobimo *stoječe valove*.

Slika 20.1 kaže nekaj možnih stojećih valov na gumijasti vrvi. Vrv je pritrjena na nihajočo kljuko, ki je skrita pod pokrovom na spodnjem delu slike. Opazovalec na zgornjem delu drži drugo krajišče in napenja vrv. V času, ko je bil zaklop fotoaparata odprt, je vrv nekajkrat zanihala. Zato je ostro vidna le vrv ob največjem odkliku iz ravnovesne lege, kjer je njena hitrost nič. Na sliki so lepo vidni *hrbti*, v katerih so odmiki delov vrvi največji, in *vozli*, kjer vrv ves čas miruje. Razdalja med zaporednima hrbtoma ali vozloma je polovica valovne dolžine. Pri opazovalcu krajišče vrvi miruje, zato je tam vselej vozle. Vozel je tudi v bližini drugega krajišča, če le kljuka niha z majhno amplitudo. Zato dobimo stoječe valove le, če je dolžina vrvi večkratnik polovične valovne dolžine valovanja, torej če je

$$l = N \frac{\lambda}{2}.$$

Možna so torej stoječa valovanja z valovno dolžino

$$\lambda = 2l, \quad l, \quad \frac{2}{3}l, \quad \frac{1}{2}l, \dots$$

ali v splošnem z valovno dolžino

$$\lambda = 2 \frac{l}{N},$$

kjer je N celo število. Stoječa valovanja na vrvi spominjajo na lastna nihanja velikega števila sklopljenih nihali. Zato jih imenujemo tudi *lastna nihanja*.

Poglejmo še, kolikšna je frekvenca, s katero nihajo deli vrvi pri lastnem nihanju. Iz zveze med valovno dolžino in nihajnim časom, $\lambda = ct_0$, izračunamo frekvenco, $\nu = 1/t_0 = c/\lambda$. Lastnim nihanjem torej ustrezajo frekvence:

$$\nu_0 = \frac{c}{2l}, \quad \nu_1 = 2 \frac{c}{2l} = 2\nu_0, \quad \nu_2 = 3 \frac{c}{2l} = 3\nu_0$$

in tako naprej. Frekvenco ν_0 imenujemo *osnovno lastno frekvenco*, ostale pa *harmonične lastne frekvence*.

Na vrvi lahko vzbudimo več lastnih valovanj hkrati. V tem primeru sta vozla le na krajiščih vrvi.

Dejavnost Stoječa valovanja dobimo tudi na vrvi, ki je na enem krajišču ali na obeh krajiščih prosta. S poskusom ugotovite, kateri stoječi valovi so možni v tem primeru, in določite njihove frekvence.

* Nastanek stoječih valov si razlagamo kot posledico interference dveh valovanj z enako amplitudo in enako frekvenco, ki se širita v nasprotnih smereh. Na neomejeni vrvi se taki valovanja vedno sestavita v stoječe valovanje. Zapišimo z enačbo

$$s_1 = s_0 \sin(\omega t - kx)$$

valovanje, ki se širi proti desni, in z enačbo

$$s_2 = s_0 \sin(\omega t + kx)$$

valovanje, ki se širi v nasprotno smer. Valovanji se sestavita v valovanje, za katero velja enačba

$$s = s_1 + s_2 = (2s_0 \cos kx) \sin \omega t,$$

ki izraža osnovne lastnosti stoječega valovanja: vsi deli vrvi nihajo z enako fazo – to izraža sinusni faktor v izrazu, največji odmik pa se spreminja s krajem – to izraža kosinusni faktor v izrazu. Slika 20.2 kaže nekaj zaporednih trenutnih slik stoječega valovanja.

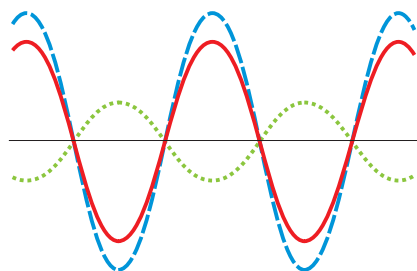
Na omejeni vrvi so mogoča le stoječa valovanja z eno od lastnih frekvenc. Stoječe valovanje nastane, ko interferirata dve valovanji, tisto, ki prihaja od izvira na enem krajišču vrvi, in tisto, ki se odbija na drugem krajišču. To lahko opazujemo na dolgi vzmeti, ki je na enem krajišču pritrjena. Prosto krajišče vzmeti zanihamo, da ustvarimo daljši paket valov (slika 20.3). Ko pridejo valovi do pritrjenega krajišča in se začno odbijati, se prihajajoče in odbito valovanje sestavita v stoječe valovanje.

Stoječa valovanja, ki smo jih opazovali na vrvi ali na dolgi vzmeti, so značilna za *strune*, ki so sestavni del nekaterih glasbil.

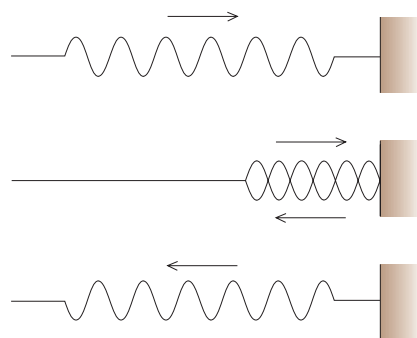
Dejavnost Opazujte lastna nihanja napete nitke in določite hitrost valovanja po njej. Krajišče nitke je treba privezati na jeziček brnača, ki niha s frekvenco 50 /s .

Brenknite po struni in pokažite, da vzbudite s tem več lastnih nihanj. S pritiskom na mesta, kjer naj bi bili vozli harmoničnih nihanj, zadušite vsa nihanja razen tistega, ki mu vozel pripada.

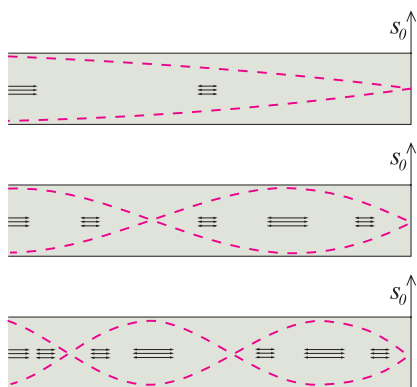
Opazujte še lastna nihanja vzmeti, ki jo zanihavate v vzdolžni smeri. Tudi tu uporabite brnač. Določite še hitrost valovanja na vzmeti.



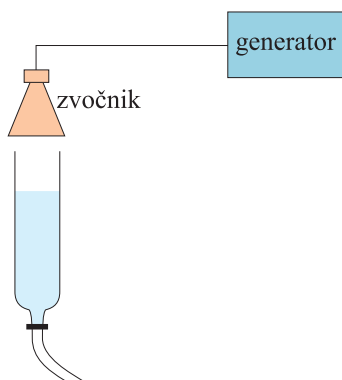
Slika 20.2 trenutne slike stoječih valov na vrvi



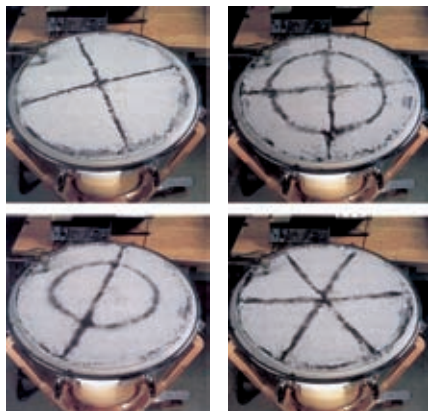
Slika 20.3 nastanek stoječega valovanja



Slika 20.4 stojče valovanje v piščali, ki je na enem krajišču zaprta



Slika 20.5



Slika 20.6 Nekaj osnovnih nihanj prožne opne na bobnu. Črn prah se je nabral na vozelnih črtah.

Stojče valovanje nastane tudi v stolpcu zraka v cevi. Če je frekvenca valovanja dovolj visoka, oddaja stolpec *slišen zvok*. Slika 20.4 ponazarja osnovno in nekaj harmoničnih lastnih nihanj zraka v cevi, ki je na enem krajišču zaprta. Puščice kažejo smer nihanja in amplitudo delcev zraka. Ob zaprtem krajišču cevi je vozle, saj tam nihanje delcev ovira stena. Ob odprtem krajišču je hrbet, saj je gibanje delcev tam neovirano. Poiščite zvezo med dolžino cevi in valovno dolžino stojčih valov. Določite tudi lastne frekvence.

Zračni stolpci nihajo v *piščalih, pihalih in trobilih*. K zvokom, ki jih oddajajo ti instrumenti, navadno prispeva več lastnih nihanj hkrati.

Dejavnost Nad odprto krajišče navpične steklene cevi, napolnjene z vodo (slika 20.5), postavimo zvočnik in ga priključimo na generator sinusne napetosti z znano frekvenco. Ko pustimo, da voda počasi izteka skozi cev na dnu, močno zadoni vsakič, ko se v zračnem stolpcu v cevi vzpostavi stojče valovanje. Dolžina nihajočega stolpca zraka je tedaj enaka četrtini valovne dolžine, trem četrtinam valovne dolžine in tako naprej. Pojav spominja na resonanco pri vsiljenem nihanju. Razlika je v tem, da vzbujamo zračni stolpec s stalno frekvenco, s povečevanjem dolžine pa spreminjamo lastno frekvenco. Do resonance pride vsakič, ko je frekvenca zvočnika enaka eni od lastnih frekvenc stolpca zraka. Med zaporednima resonancama se zračni stolpec podaljša za pol valovne dolžine zvoka, ki ga oddaja zvočnik. Premislite, kako bi s tem poskusom določili hitrost zvoka v zraku.

Stojča valovanja nastajajo povsod, kjer se seštevajo valovanja po odboju od meja sredstev, po katerih se širijo. Zaradi tega nastanejo stojča valovanja v vseh omejenih telesih. Tako dobimo stojča valovanja na prožnih opnah, na kovinskih ploščah, pa tudi v prostorih, kjer zaradi stojčih valovanj odmeva. Po potresih nastanejo stojča valovanja v Zemlji. Stojča valovanja so odkrili na Soncu. Stojče valove je mogoče ustvariti tudi z radijskimi valovi in celo s svetlobo. V *laserju*, ki oddaja enobarvno svetlobo z zelo ostro določeno valovno dolžino, je stojče svetlobno valovanje. Dolžina laserja je večkratnik polovične valovne dolžine svetlobe:

$$L = N \frac{\lambda}{2} .$$

Valovna dolžina svetlobe, ki jo oddaja He-Ne laser, je 632,8 nm, dolžina “svetlobne piščali” pa 36 cm. Koliko vozlov ali hrbtov je v njej?

21. VALOVANJE NA VODNI GLADINI

RAZŠIRJANJE VALOV NA VODNI GLADINI

Valove na vodni gladini dobro poznamo. Opazujemo jih ob morju, ob jezerih in mlakah. Ker se valovi razširjajo v dveh razsežnostih, najdemo pri njih nekatere pojave, ki jih pri valovih na vrveh ali na vzmeteh nismo mogli spoznati, drugi pa se pokažejo v veliko pestrejši obliki.

Vrzimo kamen v mirno vodo. Od mesta padca se na vse strani širijo *krožni valovi* (slika 21.2). Njihova amplituda postaja z razdaljo vse manjša, dokler se povsem ne izgubijo. Gibanje delov vode v valu lahko presojamo po gibanju drobnih predmetov, ki plavajo na površju, npr. drevesnih listov ali koščkom lesa. Vidimo, da ob prehodu vala ta telesa *zakrožijo*. To kaže, da krožijo tudi deli vode, ki jih obdajajo. Za te posebnosti valovanja na vodni gladini pa se v nadaljevanju ne bomo zanimali.

Oblika vala je odvisna od oblike izvira valovanja. *Krožne valove* dobimo, če je izvir valovanja krožen, kot npr. pri padcu drobnega kamna ali kaplje ali ko se dotaknemo gladine z okroglim predmetom. Če se dotaknemo gladine z dolgo deščico, so valovi v bližini *ravni*. Tudi majhen del krožnega vala je v veliki razdalji od izvira mogoče obravnavati tako, kakor da bi bil raven.

Če izvir valovanja enakomerno niha, se od njega širijo enakomerni valovi. Najlažje jih opazujemo v *valovni banji*. To je ploščata posoda s steklenim dnom, v katero natočimo za prst vode. Posodo od spodaj ali od zgoraj osvetljuje z drobno lučjo in na zaslonu opazujemo svetlobno sliko, ki jo oblikujejo valovi. *Valovni grebeni* svetlobo zbirajo, *valovne doline* pa jo razpršujejo. Svetle črte na zaslonu zato predstavljajo valovne grebene, vmes pa so valovne doline. Razmik med sosednjima svetlima črtama predstavlja valovno dolžino valovanja.

Tudi na skicah predstavimo valovanje na vodi podobno – z *valovnimi črtami*, ki si sledijo za valovno dolžino narazen. Domenimo se, da črte predstavljajo valovne grebene. Razdalja med sosednjima valovnima črtama predstavlja valovno dolžino.

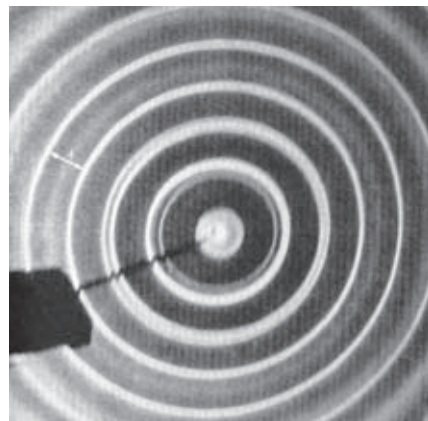
Sliki 21.3 in 21.4 kažeta trenutno sliko krožnih in ravnih valov v valovni banji. Sliko pogosto dopolnimo še z *žarki*, to je s črtami, ki



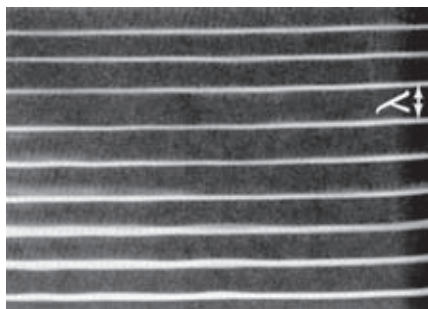
Slika 21.1 Na pobočjih velikih sipin ali snežnih zametov opazimo drobne valove, ki jih oblikuje veter, ko se vrtinči ob tleh.



Slika 21.2 krožni valovi na vodnem površju

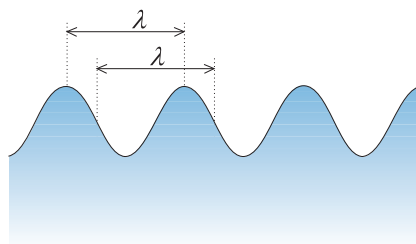


Slika 21.3 trenutna slika krožnih valov v valovni kadi

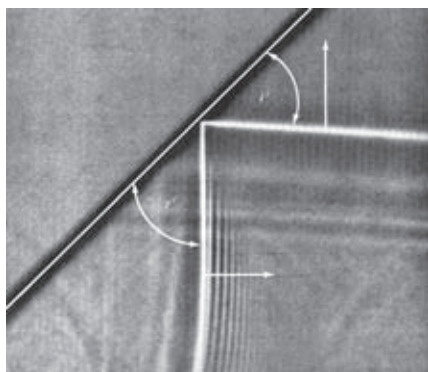


Slika 21.4 trenutna slika ravnih valov v valovni kadi

Slika 21.5 trenutna slika valov na vodnem površju vzdolž žarkov



ODBOJ VALOVANJA



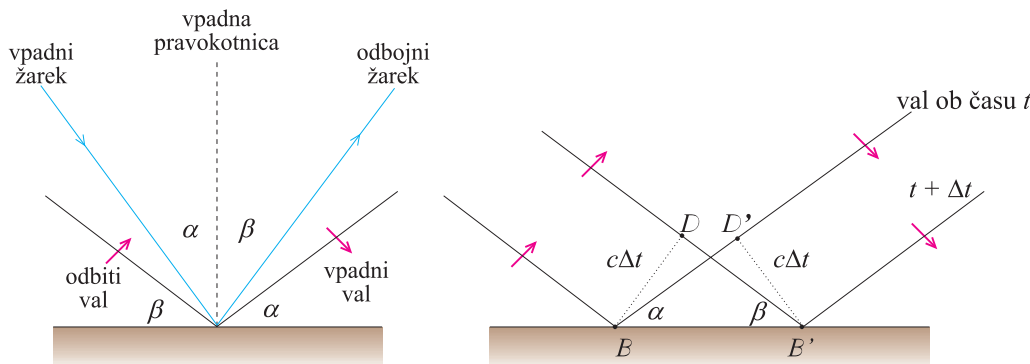
Slika 21.6 odboj ravnega valovanja

kažejo smer širjenja valovanja. Žarki so pravokotni na valovne črte. Pri krožnem valovanju so žarki premice, ki se širijo od izvira valovanja radialno navzven, pri ravnem valovanju pa so žarki vzporedne premice.

Zamislimo si presek valujoče vode z navpično ravnino, ki jo položimo po izbranem žarku (slika 21.5). Presek gladine z ravnino nas spominja na sliko valujoče vrvi. Pomaga nam bolj natančno opredeliti valovno dolžino. To je najmanjša razdalja med dvema delcema vzdolž žarka, ki sta enako oddaljena iz ravnovesne lege in imata enako hitrost.

V valovno banjo postavimo ravno oviro in se dotaknimo gladine z deščico, da ustvarimo raven val. Zanima nas smer gibanja vala po odboju od ovire. Domenimo se, da določimo smer gibanja vala glede na oviro s kotom, ki ga tvorita pravokotnica na oviro in žarek.

Slika 21.6 kaže trenutno sliko vala ob oviri. Puščici kažeta smer razširjanja. Prihajajoči ali *vpadni val* se giblje navzgor, odbiti pa proti desni. S slike razberemo, da sta kota med oviro in valovno črto pri vpadnem in pri odbitem valu enaka. S slike 21.7 razberemo, da sta ta kota enaka kotoma med ustreznima žarkoma in pravokotnico na oviro. Kot med žarkom vpadnega vala ali *vpadnim žarkom* in pravokotnico imenujemo *vpadni kot*, kot med žarkom odbitega vala ali *odbojnim žarkom* in pravokotnico pa *odbojni kot*.



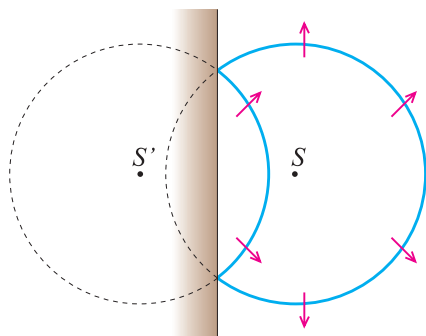
Slika 21.7 k izpeljavi odbojnega zakona

Odbojni zakon, kakor imenujemo s poskusom odkrito pravilo, lahko razumemo s pomočjo slike 21.7. Na njej sta legi vala ob času t in ma-

lo kasneje, ob času $t + \Delta t$. V vmesnem času Δt se vpadni val premakne vzdolž vpadnega žarka za daljico $D'B'$, odbiti val pa vzdolž odbojnega žarka za daljico BD . Ker je hitrost širjenja za vpadni in odbiti val enaka, sta tudi premika BD in $D'B'$ po velikosti enaka. Ker je

$$BD = BB' \sin \alpha, \quad D'B' = BB' \sin \beta,$$

sledi, da sta kota α in β enaka.



Odbojni zakon velja tudi, če ovira ali val nista ravna. Vpadni in s tem odbojni kot sta v tem primeru za vsak del vala ali ovire drugačna. Sliki 21.8, 21.9 kažeta odboj krožnega vala od ravne ovire. Val je tudi po odboju krožen, njegova oblika pa je taka, kakor da bi izhajal iz izvira, ki je zrcalna slika pravega izvira.

LOM VALOVANJA

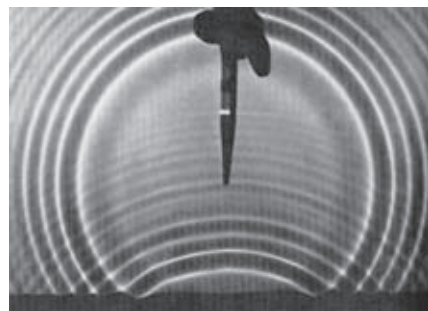
Hitrost valovanja na vodni gladini je odvisna od globine vode. Slika 21.10 kaže trenutno sliko valovanja, ki se širi pravokotno na mejo med globljim in plitvejšim delom valovne banje. Hitrost valovanja je večja v globlji vodi, zato je tam daljša valovna dolžina valovanja. Razmerje med valovnimi dolžinama je enako razmerju hitrosti :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{c_1 t_0}{c_2 t_0} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Spomnimo se namreč, da je valovna dolžina enaka poti, ki jo prepotuje val v času enega nihaja delcev v sredstvu ali v času enega nihaja izvira valovanja.

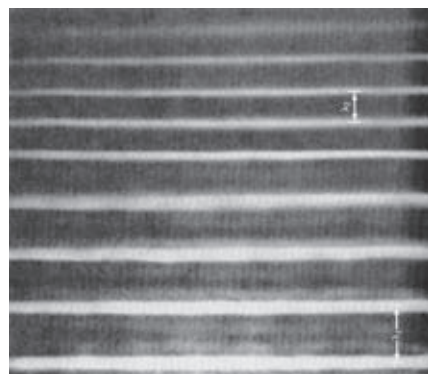
Sprememba hitrosti na meji dveh sredstev pa ima še eno zanimivo posledico, kadar vpada valovanje poševno na mejo. Slika 21.11 kaže trenutno sliko valovanja, ki vpada poševno na mejo s sredstvom, v katerem je hitrost valov manjša. Vidimo, da se spremeni smer razširjanja valovanja. Pravimo, da se valovanje *lomi*.

Smer vpadnega valovanja določimo z *vpadnim kotom*, to je kotom med pravokotnico na mejo in žarkom vpadnega valovanja ali vpadnim žarkom. To je hkrati kot med valovnimi črtami vpadnega valovanja in mejo. Smer lomljenega valovanja pa določimo s kotom med pravokotnico na mejo in žarkom lomljenega valovanja ali *lomnim kotom*. To je hkrati kot med valovnimi črtami lomljenega valovanja in mejo (slika 21.12).

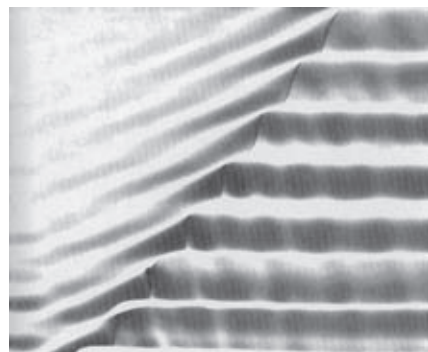


Slika 21.8 odboj krožnih valov

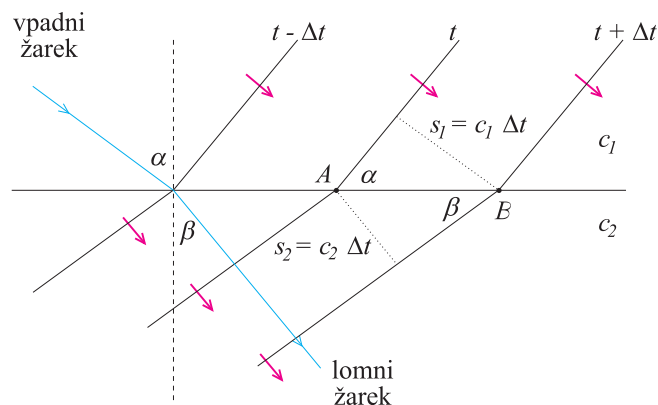
Slika 21.9 ponazoritev odboja krožnih valov



Slika 21.10 Sprememba valovne dolžine pri prehodu valovanja na vodi iz globoke v plitvejšo vodo. Valovne črte so vzporedne z mejo.



Slika 21.11 prehod valovanja na vodi iz globoke v plitvejšo vodo pri poševnem vpadu



Slika 21.12 k izpeljavi lomnega zakona

Poskusi kažejo, da se s spreminjanjem vpadnega kota spreminja tudi lomni kot. Poskusimo s premislekom poiskati povezavo. V pomoč naj bo slika 21.12, ki kaže zaporedni trenutki slike vala, ki vpada na mejo med sredstvoma pod kotom α in jo zapušča pod kotom β . Hitrost vala v prvem sredstvu je c_1 , hitrost v drugem sredstvu pa c_2 . S slike razberemo, da se v času med posnetkoma premakne val v prvem sredstvu za s_1 , v drugem sredstvu pa za s_2 . Pri tem mora biti

$$\frac{s_1}{c_1} = \frac{s_2}{c_2}.$$

Izrazimo s_1 in s_2 z daljico AB:

$$s_1 = AB \sin \alpha \quad s_2 = AB \sin \beta.$$

Tako dobimo enačbo

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_2},$$

oziroma enačbo

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2},$$

ki izražata *lomni zakon*.

Poskusi ga potrjujejo. Valovanje se lomi *stran od vpadne pravokotnice*, ko preide v sredstvo, v katerem je hitrost valovanja večja, in obratno, lomi se *k vpadni pravokotnici*, ko preide v sredstvo, kjer je hitrost valovanja manjša. Pri tem je razmerje sinusov vpadnega in lomnega kota enako razmerju hitrosti valovanj.

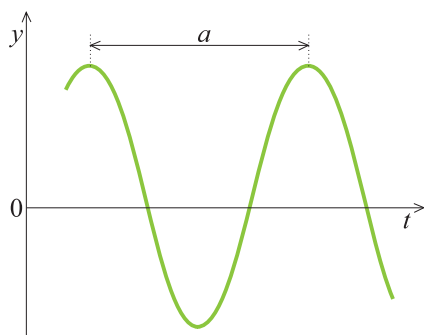
Odbojni in lomni zakon veljata za vsa valovanja. Najlažje ju preverimo pri svetlobi. Tam lahko z zaslonkami oblikujemo tanke curke, ki jih predstavimo kar z žarki. Pri tem se največkrat niti ne zavedamo, da imamo opraviti z valovanjem.

22. VPRAŠANJA IN NALOGE

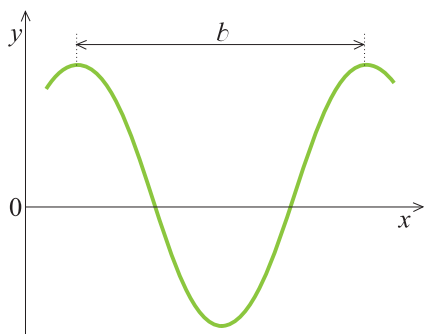
VPRAŠANJA

1. Neko potujoče valovanje predstavimo z naslednjima grafoma:

a) Odmik izbranega delca v odvisnosti od časa.



b) Odmik delcev v izbranem trenutku v odvisnosti od lege.



Kako imenujemo količino, ki je na grafu a) označena z a ?

Kako imenujemo količino, ki je na grafu b) označena z b ?

S katero od spodnjih enačb sta količini a in b povezani s hitrostjo valovanja c ?

$$c = a b$$

$$c = a/b$$

$$c = b/a$$

$$c = 1/(a b)$$

Odgovor utemeljite!

2. Katera lastnost valovanja povzroča odmev?

Odgovor: odboj zvočnega valovanja na razsežnih ovirah (zid, stena)

Odgovor: V plinih in kapljevinah ni strižnih sil.

Odgovor: Ne.

Odgovor: $c_2 = c_1 \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$

Odgovor: Če so razsežnosti prostorov premajhne, se v njih ne more vzpostaviti stoječe valovanje za zvoke z nizko frekvenco.

Odgovor: Resonančno nihanje zraka v skrinjici ojači oddajanje zvoka.

Odgovor: Instrumenti se razglasijo, ko se temperatura okolice spremeni, zato jih ponovno uglasijo.

Odgovor: Z ovito žico povečajo maso dolžinske enote strune in tako dosežejo nižjo frekvenco oddanega zvoka. Jedro takšne strune je žica, ki sama daje tudi srednje in višje tone.

Odgovor: Zvočni energijski tok se porazdeli po vedno večji ploskvi, tako da je gostota energijskega toka vedno manjša. Del zvočne energije se absorbira v zraku.

Odgovor: 3 m/s

Odgovor: 2 s^{-1}

Odgovor: 2,9 km stran

3. Zakaj se v plinih in kapljevinah transversalni valovi ne širijo?

4. Opišite poskus, s katerim bi na prostem izmerili hitrost zvoka v zraku. Kateri dejavniki vplivajo na dobljeni rezultat? Zakaj?

5. V filmih vidimo, kako prisloni igralec uho na železniški tir, da bi prej zaznal prihod vlaka. Ali je na ta način mogoče ugotoviti oddaljenost vlaka od opazovalca?

6. Valovna dolžina valovanja v prvem sredstvu je λ_1 , v drugem pa λ_2 . Kolikšna je hitrost valovanja c_2 v drugem področju, če se valovanje v prvem področju širi s hitrostjo c_1 ?

7. Zakaj majhni prostori niso primerni za poslušanje glasbenih posnetkov z visoko kvaliteto (hi-fi).

8. Zakaj so glasbene vilice pogosto pritrjene na resonančno skrinjico?

9. Pred koncertom glasbeniki uglasijo pihala in instrumente s strunami. Zakaj je to potrebno?

10. Zakaj so jeklene klavirske strune, ki oddajajo zvoke najnižjih frekvenc, ovite s tanko bakreno žico?

11. Kako bi z osciloskopom izmerili frekvenco zvoka, ki ga oddaja piščal? Kaj bi merili? Katere pripomočke potrebujete za to meritev?

12. Če se oddaljujemo od zvočila, zaznavamo vedno šibkejši zvok. Kaj se zgodi z energijo, ki jo prenaša zvočno valovanje?

NALOGE

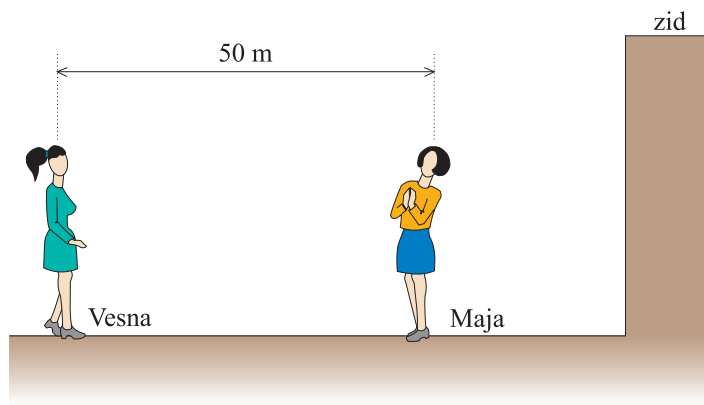
1. Ribič v zasidranem čolnu ugotovi, da potujejo mimo njega valovi v časovnih razmikih po 3,0 s. Razdalja med vrhovi valov je 9 m. Kolikšna je hitrost valov?

2. S kolikšno frekvenco moramo udarjati po napeti dolgi vrvi, da so vzbokline na njej razmaknjene za 30 cm? Vzbokline potujejo s hitrostjo 0,6 m/s.

3. Med oddaljeno nevihto zaslišimo grom 8,5 s po tem, ko se zabliška. Kako daleč od nas je udarila strela?

4. Maja stoji na travniku, ki ga na eni strani zapira visok zid. Njena prijateljica Vesna je od zida oddaljena še za 50 m več kakor Maja

(slika). Maja ploskne z rokama. Vesna sliši dva ploska v razmiku 0,6 s. Kako daleč od zidu stoji Maja, če je hitrost zvoka v zraku 340 m/s?



Odgovor: 102 m

5.] Ravno zvočno valovanje z valovno dolžino 0,6 m se razširja po zraku s hitrostjo 340 m/s. Valovanje preide iz zraka v vodo, kjer je hitrost razširjanja 1500 m/s. Kolikšna je valovna dolžina zvoka v vodi?

Odgovor: 2,65 m

6.] Valovi v valovni banji prehajajo iz plitvega področja v globlje pod vpadnim kotom 45° in se lomijo pod kotom 60° .

a) Kolikšno je razmerje hitrosti valovanja v obeh področjih?

b) Kolikšna je hitrost valovanja v plitvem področju, če potujejo valovi v globljem področju s hitrostjo 25 cm/s?

Odgovor: a) $\sqrt{2} : \sqrt{3} = 1 : 0,82$
b) 20 cm/s

7.] Struno z dolžino 60 cm in maso 30 g napnemo tako, da niha z osnovno frekvenco 30 Hz. Amplituda je 3,0 cm.

a) Kolikšna je hitrost širjenja valovanja na struni?

b) Kolikšna je sila, ki napenja žico?

Odgovor: a) 36 m/s
b) 65 N

8.] Kolikšna je valovna dolžina zvočnega valovanja s frekvenco 10 kHz v jeklu? Kolikšna bi bila valovna dolžina tega zvoka v zraku? Hitrost longitudinalnih valov v jeklu je 5100 m/s, v zraku pa 340 m/s.

Odgovor: 51 cm
3,4 cm

9.] Glasbene vilice nihajo s frekvenco 512 s^{-1} in oddajajo v okolico zvočno valovanje. Kolikšna je valovna dolžina valovanja v zraku, kjer je hitrost 345 m/s? Kolikšna je hitrost valovanja v vodi, kjer je valovna dolžina 2,93 m?

Odgovor: 0,674 m
1500 m/s

10.] Netopirji se orientirajo po prostoru tako, da oddajajo in sprejemajo ultrazvok s frekvenco $3,85 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Kolikšna je valovna dolžina tega zvoka. Hitrost je 345 m/s.

Odgovor: 9 mm

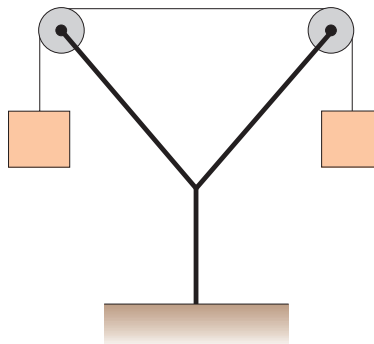
11.] Za ultrazvočno preiskavo še nerojenih otrok uporabljajo ultrazvok s frekvenco 2 MHz. Kolikšna je valovna dolžina tega ultrazvoka v krvi, če je tam njegova hitrost 1,5 km/s. Zakaj lahko rečemo, da je hitrost ultrazvoka v krvi drugačna od njegove hitrosti v mišici?

Odgovor: 0,75 mm. Na sliki je moč razlikovati med tkivom in ožiljem s krvjo.

12.] Globino morja merimo s sonarjem. Curek ultrazvočnega valovanja se vrne po 0,40 s. Kolikšna je na danem mestu globina morja, če je hitrost ultrazvoka v vodi 1500 m/s?

Odgovor: 300 m

13. Meter dolga žica je prek škripcev obtežena z enakima utežema po 10 kg. Kolikšna je masa žice, če je njena osnovna frekvenca $75,0 \text{ s}^{-1}$?



Odgovor: 4,4 g

Odgovor: 316 s^{-1}
31

14. Klavirska struna z maso 2,0 g je dolga 50 cm in napeta s silo 400 N. Kolikšna je njena osnovna frekvenca? Kateri najvišji harmonični ton še sliši človek, ki ima slušno mejo pri frekvenci 10000 s^{-1} ?

Odgovor: $F_1/F_2 = \sqrt{2}$

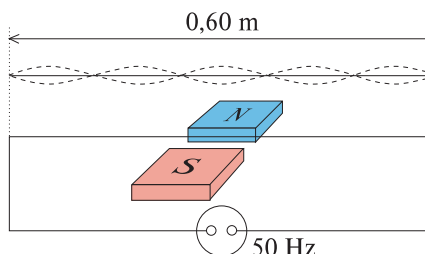
15. Enaki struni sta napeti z različnima silama. Kolikšno je razmerje med silama, če je osnovna lastna frekvenca prve strune enaka prvi harmonični frekvenci druge strune?

Odgovor: $n_1 : n_2 = 3 : 2$

16. Kolikšno je razmerje med osnovnima lastnima frekvencama dveh enako dolgih in enako napetih strun iz enake snovi, če sta njuna premera v razmerju 2 : 3?

17. Po napeti bakreni žici z dolžino 1,10 m in z dolžinsko gostoto 1,6 g/m teče izmenični tok s frekvenco 50 s^{-1} . Če je žica med poloma magneta, nastane na njej stoječe valovanje z vozlom na sredi, kakor kaže slika.

- V kateri ravnini niha žica?
- Kolikšna je valovna dolžina valovanja?
- Kolikšna je hitrost valovanja?
- S kolikšno silo je napeta žica?



Odgovor: a) Žica niha pravokotno na smer magnetnega polja

b) $l = 1,1 \text{ m}$

c) $c = 55 \text{ m/s}$

č) $F = 4,8 \text{ N}$

Odgovor: 42 cm/s

18. Majhen košček plute niha v valovni banji z amplitudo 5,0 mm, ko se po gladini vode širijo valovi z valovno dolžino 15 mm in hitrostjo 0,20 m/s. Kolikšna je največja hitrost, s katero se giblje pluta?

Odgovor: $\pi/2$

19. Valovi s frekvenco 450 Hz se v snovi širijo s hitrostjo 360 m/s. S kolikšno fazno razliko nihata točki na istem valovnem žarku, ki sta med seboj oddaljeni za 20 cm?

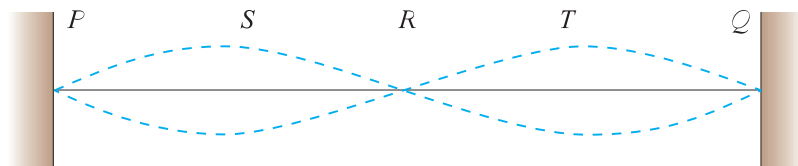
20. Prvi delec je 10 m, drugi delec pa 16 m od izvira valovanja, ki niha s frekvenco 25 s^{-1} . Kolikšna je fazna razlika med nihanjema delcev, če je hitrost valovanja 300 m/s ?

Odgovor: π

21. Opazujemo stoječe valovanje na vrvi. Točke, ki nihajo z amplitudo 3 cm, so oddaljene med seboj 3 cm in 7 cm. Določite valovno dolžino in amplitudo v sredini valovnega hrbta.

Odgovor: 20 cm
4,2 cm

22. Krajišči strune sta pripeti v točkah P in Q, kakor kaže slika. Na struni se vzpostavi stoječe valovanje z vozli v točkah P, Q in R. Kolikšni sta amplitudi in fazi nihanja delov strune v točkah S in T, ki sta enako oddaljeni od vozla v točki R?



Odgovor: Amplituda je enaka, dela strune nihata z nasprotno fazo.

23. Pri poskusu s stoječimi mikrovalovi je med prvim in n -tim vozlom razdalja 12 cm, med prvim in $(n+1)$ -vim vozlom pa 15 cm. Kolikšna je valovna dolžina mikrovalov?

Odgovor: 3 cm

24. Kolikšna je najmanjša frekvenca zvoka, ki povzroči nastanek stoječega zvočnega valovanja med 6,0 m oddaljenima vzporednima stenama? Hitrost zvoka v zraku je 345 m/s .

Odgovor: 28,8 Hz

25. Strune na kitari so dolge 0,630 m. Prva struna ima osnovno frekvenco 330 s^{-1} . Drugo struno skrajšamo na dolžino 0,470 m tako, da jo pritismo ob peti razdelek na vratu kitare. Tedaj imata obe struni enaki osnovni frekvenci. Kolikšna je osnovna frekvenca neskrajšane druge strune? Ob pritiskanju se napetost strune ne spremeni znatno.

Odgovor: 246 s^{-1}

26. Prve tri lastne frekvence orgelske piščali so $68,0\text{ s}^{-1}$, 204 s^{-1} in 340 s^{-1} . Ali gre za odprto ali za zaprto piščal? Kolikšna je njena dolžina? Kolikšna je valovna dolžina zvoka z osnovno lastno frekvenco?

Odgovor: Razmerje frekvenc je $1 : 3 : 5$, kar je značilno za piščali, ki so na enem krajišču odprte. Piščal je dolga 1,27 m, osnovni ton pa ima valovno dolžino 5,07 m.

27. Kolikšne so frekvence osnovnega tona in prvih štirih harmoničnih tonov pri 15 cm dolgi piščali, če je:

- a) na obeh krajiščih zaprta,
- b) na enem krajišču zaprta?

Odgovor: a) $\nu_0 = 1130\text{ s}^{-1}$, $\nu_n = n\nu_0$
b) $\nu_0 = 570\text{ s}^{-1}$, $\nu_n = (2n+1)\nu_0$

28. Sluhovod v ušesu odraslega človeka meri okoli 2,5 cm. Katera je osnovna frekvenca zračnega stolpča v sluhovodu? Na enem krajišču je sluhovod odprt proti uhlju, na drugem pa zaprt z bobničem.

Odgovor: 3400 s^{-1}

Odgovor: 630 s^{-1}

29.] Nad navpično cev, napolnjeno z vodo, postavimo zveneče glasbene vilice in počasi znižujemo gladino vode. Ko je razdalja od vilic do gladine $0,125\text{ m}$ oziroma $0,395\text{ m}$, zračni stolpec v cevi zazveni v resonanci. Kolikšna je frekvenca glasbenih vilic? Hitrost zvoka je 340 m/s .

Odgovor: 170 Hz , 510 Hz in 850 Hz

30.] Majhen zvočnik, ki ga priključimo na vir izmenične napetosti s spremenljivo frekvenco, postavimo pred odprti konec steklene cevi z dolžino 50 cm . Drugi konec cevi je zaprt. Frekvenco izmeničnega toka, ki teče skozi zvočnik, zvezno večamo od najnižje vrednosti do 1000 Hz . Pri katerih frekvencah slišimo ojačen zvok? Hitrost zvoka je 340 m/s .

Odgovor: za 2 nihaja na sekundo

31.] Uглаševalec klavirja skuša uglasti struno na frekvenco 440 s^{-1} , ki mu jo dajejo glasbene vilice. Ko zvenita struna in vilice hkrati, sliši utripe s frekvenco 2 s^{-1} . Za koliko se frekvenca strune še razlikuje od frekvence vilic?

23. | ODBOJ IN LOM SVETLOBE

ODBOJNI IN LOMNI ZAKON

Usmerimo ozek curek svetlobe pod vpadnim kotom α na mejo med zrakom in vodo (slika 23.1). Del svetlobe se odbije pod kotom α_1 , del preide v vodo pod kotom β . Pri tem je po odbojnem zakonu

$$\alpha = \alpha_1,$$

po lomnem pa

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2},$$

če je c_1 hitrost svetlobe v zraku, c_2 pa hitrost svetlobe v vodi. Vpadni žarek, odbojni in lomni žarek ter vpadna pravokotnica so v isti ravnini.

V navadi je, da namesto hitrosti svetlobe v snoveh navajamo *lomni kvocient*, to je razmerje med hitrostjo svetlobe v vakuumu, c_0 , in hitrostjo svetlobe v snovi, c ,

$$n = \frac{c_0}{c}.$$

Lomni kvocient vode je okoli $4/3 = 1,33$. Lomni kvocient zraka je 1,00027. Označimo z $n_1 = c_0/c_1$ lomni kvocient prve snovi, v našem primeru zraka, in z $n_2 = c_0/c_2$ lomni kvocient druge snovi, v našem primeru vode. Lomni zakon lahko s tem zapišemo v obliki

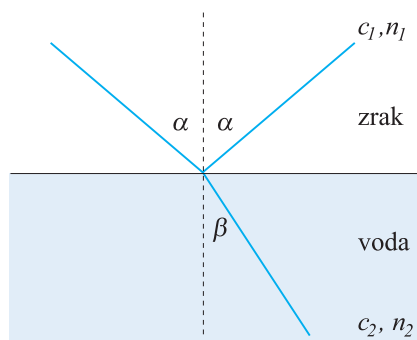
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

ali v obliki

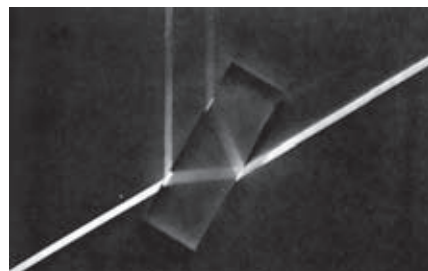
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

Enačba nas opozarja na enakovrednost vpadnega in lomnega kota ter na reverzibilnost pri lomu svetlobe. Enačbo slikovito potrjuje prehod curka svetlobe skozi *planparalelno* stekleno ploščo. Kot, pod katerim curek svetlobe izstopi iz plošče, je enak kotu, pod katerim vstopi v ploščo (slika 23.2). Planparalelna plošča ima ravni vzporedni mejni ploskvi.

Pri prehodu v sredstvo z večjim lomnim kvocientom – pogosto ga imenujemo *optično gostejše* – je lomni kot manjši od vpadnega, pri prehodu v nasprotni smeri pa večji. Opazujemo lom svetlobe pri prehodu iz vode ali stekla v zrak. Označimo z n_1 lomni kvocient stekla



Slika 23.1 odboj in lom curka pri prehodu iz zraka v vodo



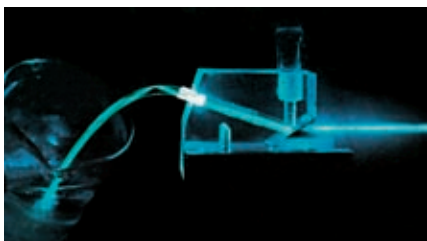
Slika 23.2 prehod curka svetlobe skozi plan-paralelno stekleno ploščo



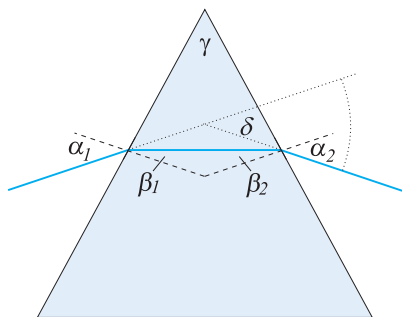
Slika 23.3 Lom svetlobe na stekleni prizmi. Na ploskev prizme vpadajo nekoliko razpršeni curki svetlobe. Na meji med steklom in zrakom se del curkov popolnoma odbije.

? Premislite, kako opazovalec pod površjem mirnega jezera vidi svet nad gladino! Kako pa opazovalec na površju vidi svet pod gladino?

Za koliko se curek svetlobe pri prehodu skozi planparalelno ploščo premakne glede na vstopni curek (gl. slika 23.2)?



Slika 23.4 Modra laserska svetloba stopa v curek vode. Zaradi totalnega odboja na površju ne more iz njega.



Sliki 23.5, 23.6 lom curka svetlobe na optični prizmi

ali vode in z α vpadni kot curka svetlobe na mejo z zrakom. Lomni kvocient zraka, n_2 , postavimo enak 1. Lomni kot je večji od vpadnega in pri dovolj velikem, *mejnem* vpadnem kotu α_m doseže 90° . Tedaj je

$$n_1 \sin \alpha_m = n_2 = 1.$$

Kaj se zgodi, če vpadni kot še povečamo? Lomni zakon o tem nič ne pove, naslonimo pa se na poskus. Vidimo, da se vpadni curek tedaj *popolnoma odbije* (slika 23.3). Mejni vpadni kot α_m zato imenujemo tudi *mejni kot popolnega ali totalnega odboja*.

Popolni odboj lahko lepo opazujemo pri zaviti stekleni palici. Curek svetlobe, ki vstopa v palico skozi krajišče, ne more skozi plašč in tako sledi palici, čeprav je zavita (slika 23.4). Izstopi lahko le skozi drugo krajišče. Tako lahko vodimo svetlobo po *svetlobnih vodnikih*. To so tanke prozorne niti, ki imajo sredico iz snovi z velikim lomnim kvocientom. Po njih lahko prenašajo telefonske pogovore, radijske in televizijske programe, z njimi so povezani tudi računalniki.

* Oglejmo si še prehod svetlobe skozi *optično prizmo* (slika 23.5). Vzemimo, da vпада curek svetlobe na stransko ploskev prizme iz zraka pod kotom α_1 proti pravokotnici in izstopa iz prizme v zrak na drugi stranski ploskvi pod kotom α_2 proti pravokotnici. Kota β_1 in β_2 med curkom svetlobe v prizmi in pravokotnicama na stranski ploskvi sta povezana s prejšnjima po lomnem zakonu

$$n \sin \beta_1 = \sin \alpha_1,$$

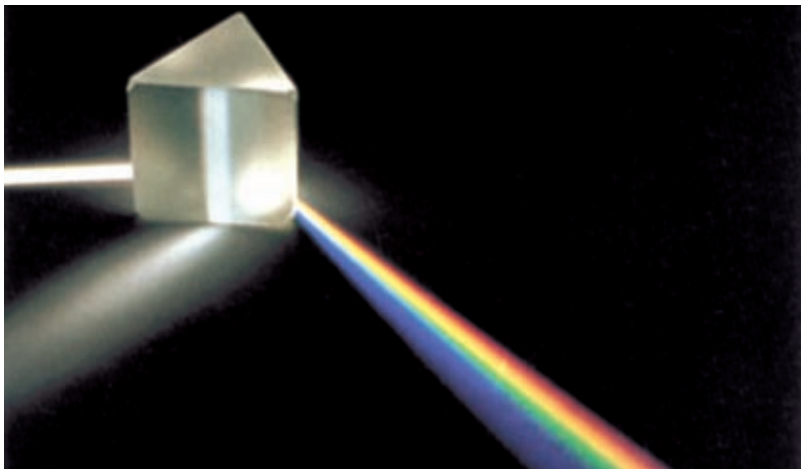
$$n \sin \beta_2 = \sin \alpha_2,$$

če je n lomni kvocient snovi, iz katere je prizma. S slike razberemo tudi, da je vsota kotov β_1 in β_2 enaka kotu γ ob vrhu prečnega preseka prizme ali *lomečemu kotu*:

$$\beta_1 + \beta_2 = \gamma.$$

Iz teh zvez lahko za vsak vpadni kot α_1 določimo kot δ , za katerega se pri prehodu skozi prizmo odkloni curek svetlobe od prvotne smeri, saj velja

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2).$$



Če sta lomeči kot prizme in vpadni kot majhna, so majhni tudi drugi koti. Tedaj dobimo iz lomnega zakona enačbi

$$\alpha_1 = n \beta_1 \quad \text{in} \quad \alpha_2 = n \beta_2$$

ter z njima odklon curka

$$\delta = (n - 1) \gamma.$$

Vidimo, da je odklon curka linearno odvisen od lomnega kvocienta stekla.

Poglejmo, za koliko se pri prehodu skozi prizmo odkloni curek rdeče in za koliko curek modre svetlobe, ki ju dobimo z ustreznima filtroma. Vidimo, da se curek rdeče svetlobe odkloni manj kakor curek modre, kar pomeni, da je lomni kvocient stekla za rdečo svetlobo manjši od lomnega kvocienta za modro svetlobo. Pojav imenujemo *disperzija*.

Na koncu pošljimo na prizmo curek bele svetlobe. Po prehodu skozi prizmo se na zaslonu pokaže mavrica. Kako si lahko to razložimo?

Odboj in lom svetlobe sta osnova za mnoge naprave, v katerih uporabljamo *zrcala* in *leče*.

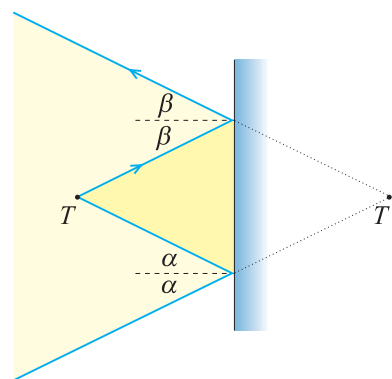
* | ZRCALA

Vsakomur je znano *ravno zrcalo*. V njem opazujemo *navidezne slike* predmetov, ki so pred zrcalom. Slika 23.7 ponazarja, kako nastane v zrcalu slika izbrane točke T. Iz točke izhaja svetloba, ki se odbije od zrcala, kakor da bi izhajala iz simetrične točke za zrcalom – iz navidezne slike. Po svetu pred zrcalom se na tak način oblikuje simetrični navidezni svet za zrcalom. Zrcalno podobo okolice lahko pogosto opazujemo na mirni vodni gladini (slika 23.8).

Pogosto srečujemo *ukrivljena zrcala*. *Konveksna* ali *izbočena* najdemo na nepreglednih ovinkih. V njih opazujemo *pomanjšano navidezno sliko* dela ceste za ovinkom. *Konkavna* ali *vbočena zrcala* pogosto uporabljamo v kozmetiki za podrobno opazovanje obraza, ker nam

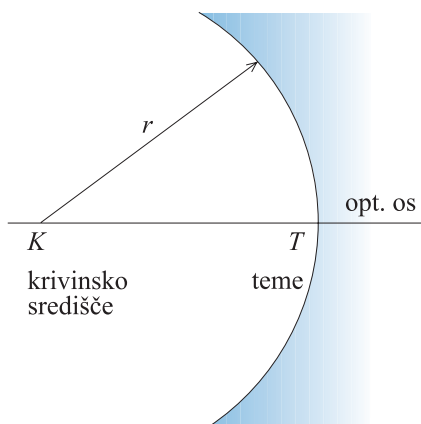


? Izračunajte kot δ v odvisnosti od vpadnega kota za prizmo iz stekla z lomnim kvocientom $n = 1,5$ in z lomečim kotom 60° . Prepričajte se, da je odklon najmanjši, ko je curek svetlobe v prizmi pravokoten na simetralo lomečega kota. Tedaj sta enaka tudi kota α_1 in α_2 oziroma β_1 in β_2 . Pravimo, da je prehod curka svetlobe skozi prizmo *simetričen*.



Slika 23.7 odboj snopa svetlobe na zrcalu

Slika 23.8 zrcalna slika na vodnem površju

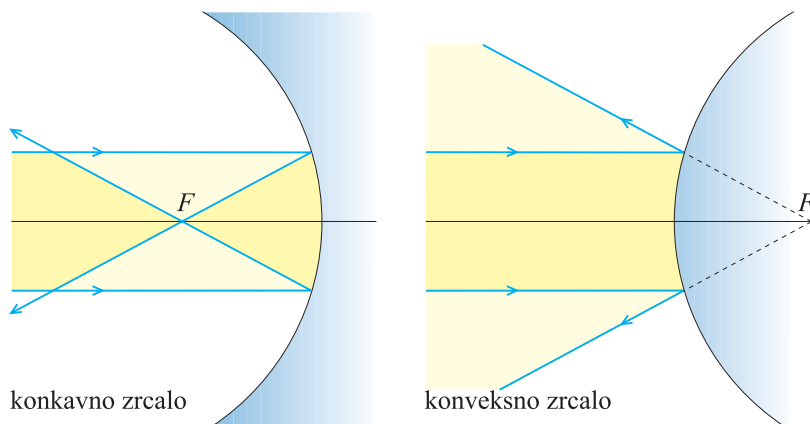


Slika 23.9 presek konkavnega zrcala

dajo *povečano navidezno sliko*. Prepričamo se lahko, da dajo ta zrcala tudi *prave* slike. Z njimi npr. lahko zberemo sončno svetlobo. V *gorišču*, kjer nastane slika sonca, lahko zažgemo papir ali kos lesa, če je zrcalo dovolj veliko, pa tudi kaj skuhamo ali spečemo. Konkavna zrcala uporabljajo tudi v *astronomskih daljnogledih*.

Navadno imajo ukrivljena zrcala obliko krogelne kapice. Kot taka so simetrična glede na *optično os*, ki povezuje *teme zrcala s krivinskim središčem* (slika 23.9).

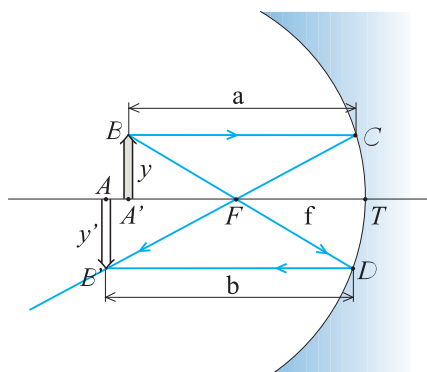
Osnovne lastnosti ukrivljenega zrcala spoznamo ob poskusih. Posvetimo nanj z ozkim snopom svetlobe, ki je vzporeden z optično osjo (slika 23.10). Konveksno zrcalo snop razprši – snop odbite svetlobe je tak, kakor da bi izhajal iz *navideznega gorišča* za zrcalom. Konkavno zrcalo pa snop zbere v *pravem gorišču* pred zrcalom. Razdaljo med goriščem in temenom zrcala imenujemo *goriščna razdalja*. Pri konkavnem zrcalu jo štejemo za pozitivno, pri konveksnem pa za negativno.



Slika 23.10 odboj z optično osjo vzporednega curka pri konkavnem in konveksnem zrcalu

Postavimo pred gorišče konkavnega zrcala gorečo svečo. Svetloba se po odboju na zrcalu zbere v *pravo sliko*. Poiščemo jo lahko z zaslonom ali pa jo opazujemo neposredno. Vidimo, da je slika glede na predmet obrnjena. Ko je sveča v veliki razdalji od zrcala, je slika blizu gorišča. Ko se sveča približuje zrcalu, se njena slika odmika. Ko postavimo svečo tako, da je plamen v bližini gorišča, se odmakne slika v zelo veliko razdaljo. Če plamen še približamo zrcalu, prave slike ni več, pač pa v zrcalu opazimo *navidezno sliko*, ki je za razliko od prave slike pokončna.

Pri konveksnem zrcalu je slika vselej *navidezna in pokončna*. Čim bolj je predmet oddaljen od zrcala, tem bližje je slika navideznemu gorišču. Predmeti tik pred zrcalom imajo sliko tik za zrcalom.



Slika 23.11 konstrukcija slike pri konkavnem zrcalu

Slika 23.11 kaže, kako lahko s preprosto geometrijsko konstrukcijo poiščemo lego slike pri konkavnem zrcalu. Predmet naj bo v bližini optične osi in naj bo majhen v primerjavi z zrcalom. Na sliki zato predstavimo zrcalo kot ravno. Na optični osi označimo še lego gorišča. Z izbrane točke predmeta usmerimo proti zrcalu dva označena žarka. Prvega usmerimo vzporedno z optično osjo, drugega pa skozi gorišče.

Po odboju gre prvi žarek skozi gorišče, drugi pa je vzporeden z optično osjo. Kjer se žarka sekata, je slika izbrane točke. Točke predmeta, ki je v ravnini, pravokotni na optično os, se preslikajo v točke slike, ki je tudi ravninska. Na sliki sta predmet in njegova slika označena s puščico. Vidimo, da je slika obrnjena.

S slike 23.11 lahko razberemo tudi zvezo med legama predmeta in slike glede na teme zrcala. Oglejmo si para trikotnikov $\triangle ABF$ in $\triangle TDF$ oziroma $\triangle A'B'F$ in $\triangle TCF$. Iz prvega para razberemo, da je

$$\frac{y}{a-f} = \frac{y'}{f},$$

iz drugega pa

$$\frac{y'}{b-f} = \frac{y}{f}.$$

Sledi, da je

$$(a-f)(b-f) = f^2,$$

oziroma po preureditvi

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

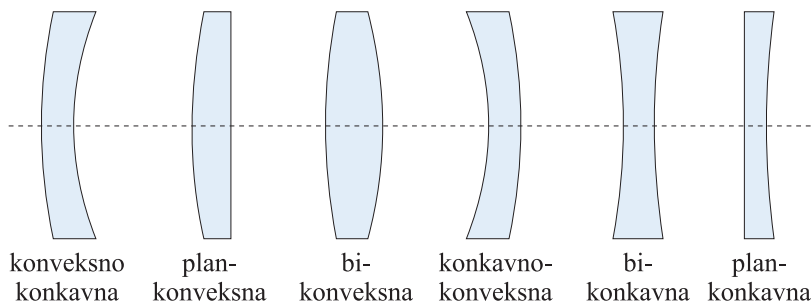
O preslikavah bomo podrobno govorili pri obravnavi leč. Tam bomo zgornjo enačbo srečali še enkrat in se podrobneje poučili o njeni uporabi.

? S konstrukcijo poiščite lego slike pri konkavnem in pri konveksnem zrcalu. Kako se lega slike spreminja z lego predmeta? Spomnite se poskusov!

LEČE

Pomembnejše kakor zrcala so z uporabnega stališča *leče*. Leče so osnovni del fotografskih aparatov, projekcijskih aparatov, filmskih in televizijskih kamer in drugih optičnih naprav. Leča je sestavni del očesa ljudi in nekaterih živali.

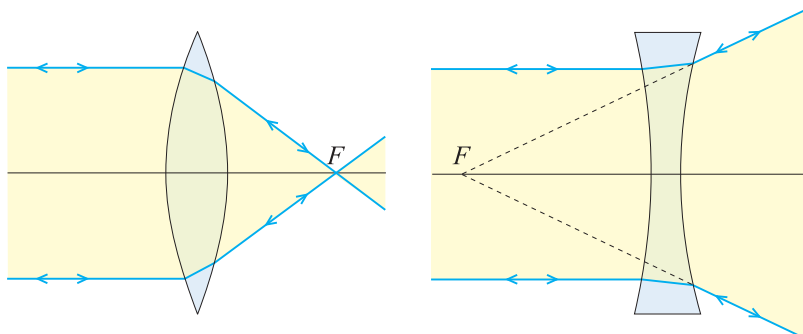
Leča je narejena iz prozorne snovi, navadno iz stekla ali kake prozorne plastike. Omejujeta jo dve krogelni kapici. Simetrijsko os leče, ki povezuje temeni krogelnih kapic in njuni krivinski središči, imenujemo *optična os*.



Slika 23.12 oblike krogelnih leč

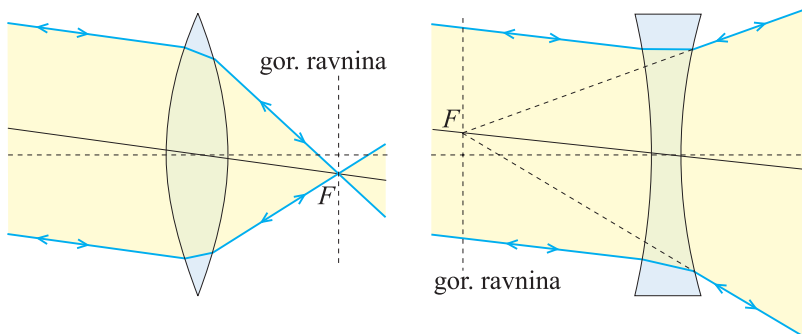
Slika 23.12 kaže nekaj leč v preseku. Ob njih je zapisano, kako jih po navadi imenujemo. V splošnem delimo leče na *zbiralne* in *razpršilne*. Ločimo jih lahko že kar po obliki. Zbiralne leče so v sredini debelejše kakor na robu, razpršilne pa so na sredini tanjše kakor na robu.

Naredimo nekaj poskusov, s katerimi bomo spoznali lastnosti *tankih leč*, to je takih, pri katerih je razdalja med temenoma majhna v primerjavi s premerom. Namesto krogelnih bomo večkrat uporabili *valjaste leče*, ki jih omejujeta valjasti ploskvi. Z njimi ponazorimo prehod svetlobe v ravninah, ki gredo skozi optično os krogelne leče.



Slika 23.13 gorišče pri zbiralni in razpršilni leči

Usmerimo na lečo ozek snop svetlobe, vzporeden z optično osjo (slika 23.13). Zbiralna leča zbere snop v *pravem gorišču* na drugi strani leče. Razpršilna leča snop razprši, tako da izgleda, kakor da bi izvirala iz *navideznega gorišča* na strani, iz katere prihaja snop svetlobe. Snop svetlobe lahko vpada na lečo z ene ali z druge strani. Na vsaki strani leče je zato po eno gorišče. Razdalja med lečo in goriščem je na obeh straneh enaka – imenujemo jo *goriščna razdalja*. Domenjeno je, da je goriščna razdalja zbiralne leče pozitivna, goriščna razdalja razpršilne leče pa negativna.



Slika 23.14 lom vzporednih curkov svetlobe pri zbiralni in razpršilni leči

Usmerimo proti zbiralni leči še vzporeden snop svetlobe pod majhnim kotom proti optični osi. Snop se zbere za lečo v točki *goriščne ravnine*, ki gre skozi gorišče in je pravokotna na optično os. Podobno izhajajo po lomu na razpršilni leči prej vzporedni snopi svetlobe navidez iz točk goriščne ravnine (slika 23.14). Lego točke v goriščni ravnini določa žarek skozi središče leče, ki je pri prehodu neodklonjen.

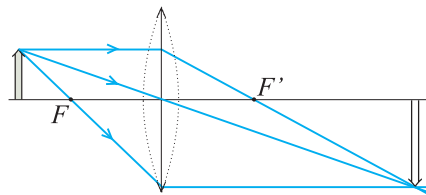
Prehod svetlobe skozi lečo je *reverzibilen*. Svetloba, ki bi izhajala iz svetlečih točk v goriščni ravnini, bi dajala po lomu na zbiralni leči vzporedne snope svetlobe. Tudi svetloba, ki bi se stekala proti točkam v goriščni ravnini razpršilne leče, bi po lomu dajala vzporedne curke.

Pred lečo v veliki razdalji postavimo gorečo svečo tako, da je plamen v bližini optične osi in z zaslonom na drugi strani leče, in poiščimo *pravo* sliko plamena. Najdemo jo v bližini gorišča. Obrnjena je in pomanjšana. Ko se sveča približuje leči, se slika odmika, hkrati pa se po-

večuje. Ko postavimo svečo tako, da je plamen v bližini gorišča, uide slika zelo daleč, pravimo, da kar v neskončnost. Iz leče izhajajo vzporedni snopi svetlobe. Ko svečo še približamo, slike ne moremo več ujeti na zaslon. Iz leče izhajajo sedaj razpršeni snopi svetlobe. Skozi lečo lahko opazujemo *navidezno* sliko sveče, ki je sedaj pokončna.

Razpršilna leča da vedno le navidezno sliko predmetov. Svetlobo, ki jo oddajajo točke predmeta, leča še dodatno razprši. Slika predmeta, iz katere razpršena svetloba navidez izhaja, je leči bližja kakor predmet in manjša od predmeta.

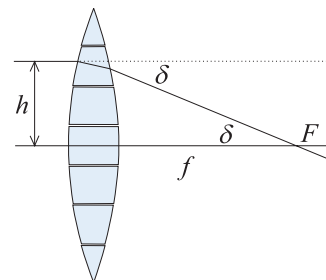
Nastanek slike si lahko ponazorimo podobno kakor pri zrcalu. Izberimo si predmet v bližini optične osi v ravnini, ki gre skozi optično os. Na slikah predstavimo predmet s puščico, ki je pravokotna na optično os, lečo pa z daljico, ki predstavlja ravnino skozi sredo leče. Iz izbrane točke na predmetu pošljemo proti leči dva žarka (slika 23.15), prvega vzporedno z optično osjo in drugega skozi gorišče. Prvi od teh žarkov je po lomu usmerjen proti gorišču, drugi pa je vzporeden z optično osjo. Prava slika točke je tam, kjer se žarka sekata. Če se žarka po lomu razhajata, prave slike ni, je pa navidezna slika tam, kjer se sekata podaljška žarkov. Konstrukcijo še dopolnimo z žarkom skozi središče leče. Ta neodklonjen povezuje točko predmeta s točko slike.



Slika 23.15 konstrukcija slike pri zbiralni leči

? Konstruirajte sliko pri konveksni in pri konkavni leči za različne oddaljene predmete.

* Slika 23.16 kaže, da lahko tanko lečo predstavimo z množico tankih prizem z majhnim lomečim kotom. Kot je največji pri robu leče in se zmanjšuje proti sredini leče. Pri osrednjem delu leče je kot nič. Spreminjanje lomečega kota je takšno, da vsi žarki, ki padajo na prizme vzporedno z optično osjo, sekajo optično os v isti točki – v gorišču. Pomeni, da mora biti odklon žarkov, ki vpadajo na izbrano prizmo, sorazmeren z razdaljo prizme od optične osi. Za žarke blizu optične osi je odklon majhen, tako da lahko zanj zapišemo



Slika 23.16 Lečo si predstavljamo razrezano na prizme.

$$\delta = \frac{h}{f} ,$$

če je f goriščna razdalja. Od prej vemo, da je odklon žarkov, ki vpadajo na ozko prizmo pod majhnim kotom, odvisen le od lomečega kota

$$\delta = (n - 1) \gamma ,$$

tako da mora za lomeči kot veljati enačba

$$\frac{h}{f} = (n - 1) \gamma(h) .$$

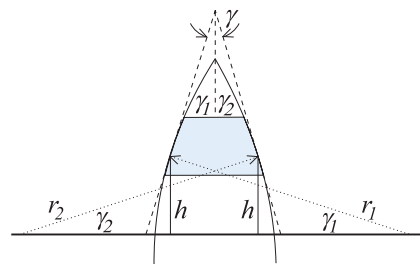
Lomeči kot lahko izrazimo s krivinskima radijema ploskev leče (slika 23.17) :

$$\gamma(h) = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{h}{r_1} + \frac{h}{r_2} .$$

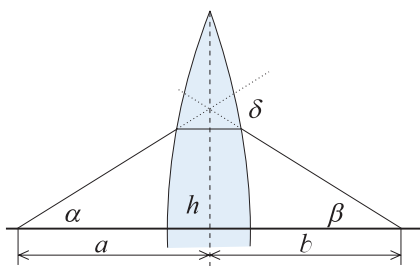
Vidimo, da je lomeči kot res sorazmeren z razdaljo od optične osi. S tem dobimo za goriščno razdaljo izraz

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) .$$

Po dogovoru je krivinski radij pozitiven za konveksno in negativen za konkavno ploskev.



Slika 23.17 Lomeči kot označene prizme lahko izrazimo s krivinskima radijema leče.



Slika 23.18 k izpeljavi enačbe leče

* Poiščimo še medsebojno odvisnost razdalje predmeta in razdalje slike od tanke zbiralne leče. Za predmet vzemimo točko na optični osi leče v razdalji a od sredine leče. Slika točke nastane v razdalji b od sredine leče na drugi strani. Opazujemo žarek, ki zadene lečo v razdalji h od optične osi (slika 23.18). Odklon žarka od vpadne smeri ni odvisen od vpadnega kota, temveč le od lomečega kota tega dela leče. Zato lahko kakor v prejšnjem zgledu postavimo:

$$\delta = h / f .$$

S slike vidimo, da je odklon enak vsoti kotov med žarkoma in optično osjo

$$\delta = \alpha + \beta .$$

Ko kota izrazimo z razdaljami h , a in b

$$\alpha = \frac{h}{a} , \quad \beta = \frac{h}{b} , \quad \delta = \frac{h}{f} ,$$

dobimo enačbo

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} ,$$

ki povezuje razdaljo predmeta in razdaljo slike od leče. Imenujemo jo tudi *enačba tanke leče* ali, kratko, *enačba leče*.

Pri zgledu, ki nas je pripeljal do enačbe, je slika predmeta prava. S konstrukcijo se lahko prepričate, da dobimo pravi rezultat tudi v primeru, ko je slika navidezna, le razdalja slike je tedaj negativna. Enačbo leče lahko uporabljamo nasploh v vseh primerih, le držati se moramo nekaterih dogovorov. Na kratko se glasijo takole:

1. Goriščna razdalja zbiralne leče je pozitivna, goriščna razdalja razpršilne leče pa negativna.
2. Svetloba naj se širi z leve proti desni. Tedaj je:
 - a) razdalja med predmetom in lečo pozitivna, če je leča desno od predmeta; govorimo o *pravem predmetu*,
 - b) razdalja med sliko in lečo pozitivna, če je slika desno od leče; govorimo o *pravi sliki*.

NAPAKE LEČ

Priznati moramo, da smo obravnavali preslikavo z lečami zelo poenostavljeno. Kar smo ugotovili, velja za preslikavo s središčnim delom leče, in sicer za predmete, ki so blizu optične osi. S poskusom, pri katerem zunanje dele leče prekrijemo z zaslonko, se prepričamo, da tedaj res dobimo ostre slike predmetov. Če pa pri preslikavi uporabimo bolj odprto lečo, slika ni več ostra, pa še mavrično je obrobljena. To pripišemo *napakam leč*, ki nastanejo zaradi loma svetlobe na krogelnih površjih leč in disperzije.

Napake lahko odpravijo s kombinacijami leč. V novejšem času so zgradili lečja, ki preslikujejo tako ostro, kakor to dovoljuje narava svetlobe.

? Enačbo dobimo tudi iz podobnosti trikotnikov, ki jih najdemo pri geometrijski konstrukciji na sliki 23.15. Poskusite priti do enačbe še po tej poti!

? Preizkusite enačbo leče v različnih primerih in preverite račun s konstrukcijo. Zamislite si tudi preslikavo z več zaporednimi lečami.

Dejavnost Pri izbrani zbiralni leči določite goriščno razdaljo posebej za središčni del leče in posebej za obrobni del leče. Z vsakim delom posebej opazujte tudi preslikavo primernege svetlega predmeta ob optični osi. Kje je slika najostrejša, če uporabite pri preslikavi celo lečo? Razlike v goriščni razdalji oziroma v razdalji slike za središčni in obrobni del leče pripišemo *sferični napaki* leč. Kako bi si jo razložili? Poskusite ugotoviti, kako je sferična napaka odvisna od oblike leče! Pomagajte si s podrobno konstrukcijo žarkov pri prehodu skozi različno oblikovane leče z enako goriščno razdaljo!

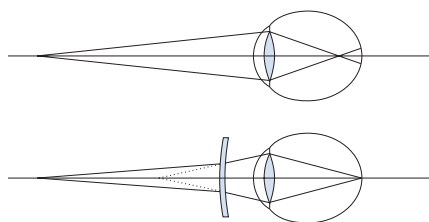
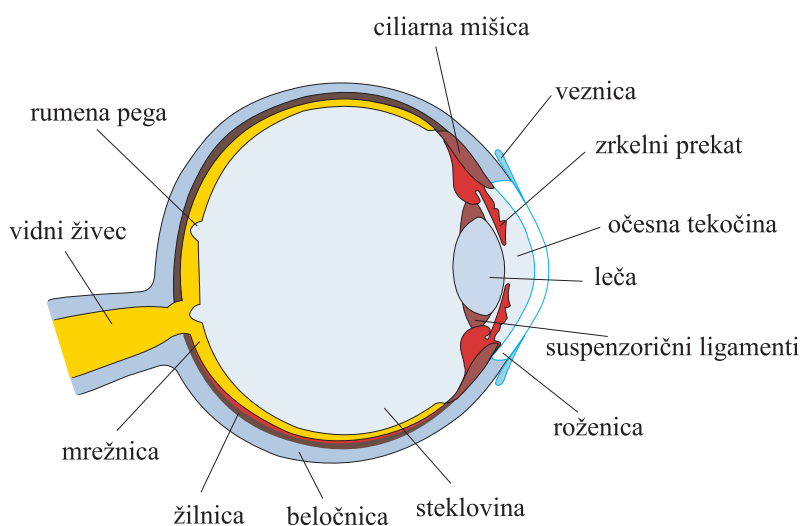
Opazujte še goriščno razdaljo izbrane leče za rdečo in za modro svetlobo ter lego slike izbranega predmeta v rdeči in v modri svetlobi. Opazujte robove slike pri preslikavi z belo svetlobo. Razlike v goriščni razdalji in obarvanost robov slike so posledica disperzije svetlobe. Zaradi nje govorimo pri lečah o *barvni napaki*.

Opazujte še preslikavo predmetov, ki so izven optične osi, in pogledjte, kako vplivajo na sliko zaslonke, ki jih daste pred lečo ali za njo. Popačenja, ki jih boste opazili, pripišemo napakam, ki se imenujejo *koma*, *astigmatizem* in *popačenje slike*. O podrobnostih se lahko poučite v kakem učbeniku optike.

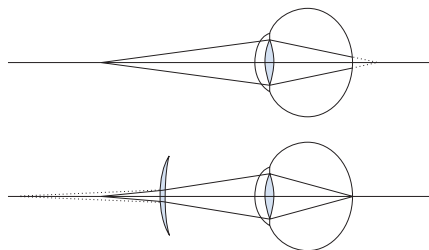
24. | OPTIČNE NAPRAVE

* OKO

Slika 24.1 prerez očesa



Slika 24.2 Pri kratkovidnem očesu nastane slika oddaljenih predmetov pred mrežnico. Z dodatno razpršilno lečo, ki tvori navidezno sliko predmeta bližje očesu, se vid popravi.



Slika 24.3 Pri daljnovidnem očesu nastane slika bližnjih predmetov za mrežnico. Z dodatno zbiralno lečo, ki tvori navidezno sliko predmetov dalj od očesa, se vid popravi.

Slika 24.1 kaže človeško oko v preseku. Roženica in leča z vmesno plastjo tekočine predstavljata *lečje*, ki oblikuje na *mrežnici* pravo, obrnjeno sliko opazovane okolice. V mrežnici je okoli sto milijonov za svetlobo občutljivih *čepkov* in *paličic*, ki so z živčnimi vlakni povezani med seboj in posredujejo sliko v možgane.

Očesna leča je z mišicami pritrjena na steno očesa. Zaradi delovanja mišic se leča tanjša ali debeli tako, da je slika na mrežnici vedno ostra. V mladosti lahko normalno oko vidi ostro predmete od nekaj centimetrov pred očesom pa do zelo velikih razdalj, recimo do neskončnosti. Navadno gledamo bližnje predmete z *normalne zorne razdalje*, to je 25 cm. S starostjo se oko vse težje prilagaja gledanju od blizu, zato se meja ostrega vida odmika. Napako imenujemo *starostna daljnovidnost* in prizadene skoraj vsakogar.

Če je očesno zrklo, ki je pri normalnem očesu približno kroglasto, sploščeno ali podolgasto, je oster vid omejen na manjše območje. Sploščeno oko lahko vidi ostro le oddaljene predmete, in sicer do meje, pri kateri jih lahko roženica in maksimalno zdebena leča še ostro upodobita na premalo oddaljeno mrežnico. Pravimo, da je oko

daljnovidno. Podolgasto oko vidi ostro le bližnje predmete, in sicer do razdalje, pri kateri jih lahko roženica in maksimalno stanjšana leča še ostro upodobita na preveč oddaljeno mrežnico. Pravimo, da je oko *kratkovidno*.

Napake vida popravljamo z dodatnimi lečami. Dodatna zbiralna leča pomaga daljnovidnemu očesu gledati od blizu, dodatna razpršilna leča pa kratkovidnemu očesu gledati na daleč. Slika 24.2 in slika 24.3 ponazarjata vlogo dodatnih leč.

? Določite goriščno razdaljo dodatne leče za kratkovidno oko, ki vidi ostro do razdalje 0,5 m. Kaj pa bi pomagalo daljnovidnemu očesu, ki vidi ostro šele od 0,5 m naprej?

* FOTOGRAFSKA KAMERA, PROJEKCIJSKI APARAT



Slika 24.4 Fotografije so bile posnete z objektivni z goriščnimi razdaljami 300, 105, 28 mm.

Fotografsko kamero, filmsko kamero ali video kamero gotovo poznate. Najvažnejši del, ki oblikuje sliko okolice na film ali na slikovni sprejemnik, je *objektiv*. To je lečje iz treh ali več leč, ki so izbrane tako, da so njihove napake čim bolj izravnane. Navadno ima goriščno razdaljo okoli 5 cm. Mnogokrat pa fotografi uporabljajo tudi *teleobjektive*, ki imajo goriščno razdaljo meter ali več. Ves obseg pokrijejo objektivni s spremenljivo goriščno razdaljo – *zoomi*. V objektiv je vgrajena tudi *zaslonka*, s katero naravnavamo *osvetljenost* filma.

Sodobni fotoaparati so skoraj v celoti avtomatizirani. Poučite se o delovanju takega fotoaparata. Oglejte si objektiv in si pojasnite oznake na njem. Kako deluje zoom? Kako deluje iskalo? Kako se določa razdalja do predmeta?

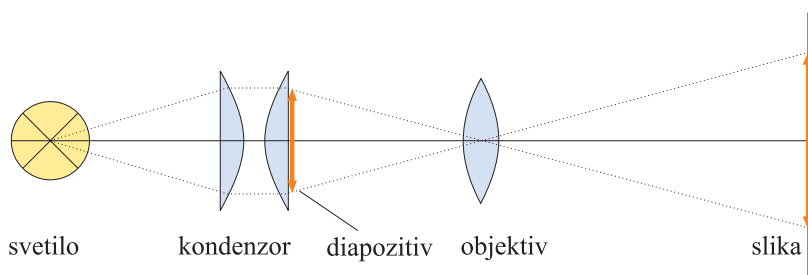
Tudi *projekcijski aparat* nam je znan. V takšni ali drugačni različici ga uporabljamo za projiciranje diapozitivov, filmov ali folij. Poleg objektiva, ki je ponavadi sestavljen iz več leč, sta skupna vsem aparatom še *svetilo* in *kondenzor* (slika 24.6). Kondenzor usmeri vso svetlobo, ki gre skozi predmet – diapozitiv ali film – v objektiv, da je slika na zaslonu enakomerno svetla.

? Fotografiranje in filmanje sta razširjena konjička. Ob njima se lahko naučimo tudi veliko fizike. Poiščite nekaj zanimivih vprašanj in poskusite odgovoriti nanje. Pri tem naj vam bodo v pomoč učbeniki in priročniki.



Slika 24.5 grafoskop

? Oglejte si zgradbo različnih projekcijskih aparatov in poiščite glavne dele. Kje je kondenzor pri grafoskopu?



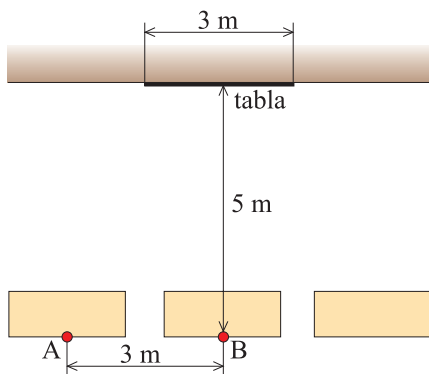
Slika 24.6 shema projekcijskega aparata

Za prepoznavanje predmetov in podrobnosti na njih je odločilen *zorni kot*, pod katerim vidimo predmet ali njegove dele. To je kot, ki ga ob vstopu v oko tvorijo žarki s točk opazovanega predmeta oziroma kot med smermi od očesa proti tem točkam. Najmanjši zorni kot, pri katerem še ločimo dve točki na predmetu, je okoli 1 kotna minuta.



Slika 24.7 lupa

? Pod kolikšnim zornim kotom vidi 3 m široko tablo dijak, ki sedi v vrsti klopi 5 m pred tablo v točki A, pod kolikšnim pa dijak, ki sedi v isti vrsti klopi v točki B (slika 24.8)? Kolikšne podrobnosti na sredini table dijaka še ločita?



Slika 24.8

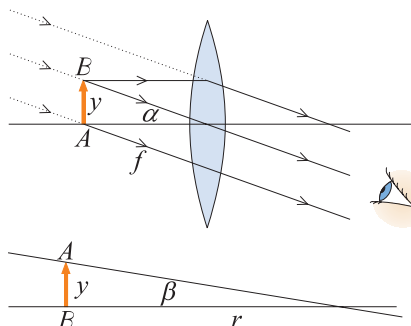
Čim drobnejši je predmet, tem bolj ga skušamo približati očem, da bi ga bolje videli. Do normalne zorne razdalje 25 cm gre brez težav. Če pa moramo opazovati še bolj od blizu, si pomagamo z zbiralno lečo z majhno goriščno razdaljo.

Navadno postavimo predmet v goriščno ravnino leče (slika 24.9). Po lomu skozi lečo se svetloba, ki jo oddaja predmet, razširja tako, kakor da prihaja iz zelo velike razdalje. Zorni kot, pod katerim vidimo skozi lečo dve izbrani točki, npr. točki A in B na sliki, je odvisen od razdalje med točkama in od goriščne razdalje leče in je večji, kakor bi bil v normalni zorni razdalji, če je le goriščna razdalja leče manjša od te razdalje. Dodatna prednost pri opazovanju skozi lečo je v tem, da je oko naravnano na neskončnost, kar ga najmanj utruja. Tako uporabljeno lečo imenujemo *lupa*.

Povečavo lupe definiramo kot razmerje med tangensoma zornih kotov pri gledanju skozi lupo in pri gledanju v normalni zorni razdalji r :

$$M = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{\frac{y}{f}}{\frac{y}{r}} = \frac{r}{f}.$$

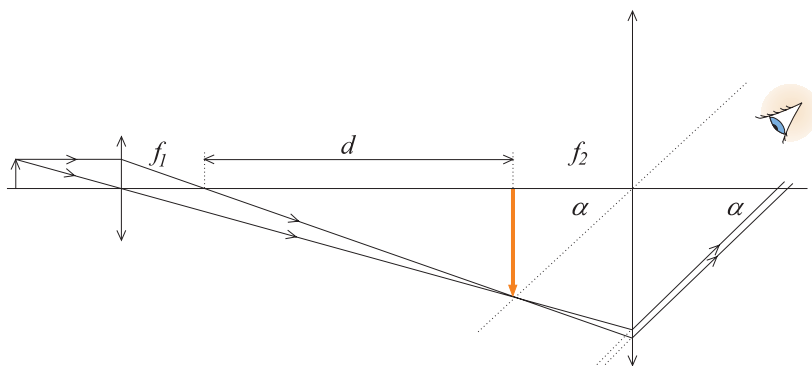
Lupa, ki jo imenujemo tudi *očesna leča* ali *okular*, je sestavni del *mikroskopa* in *dalnogleda*. Navadno je okular sestavljen iz več leč.



Slika 24.9 Lupa omogoči opazovanje iz razdalje, ki je manjša kot normalna zorna razdalja.

* MIKROSKOP

Z lupo lahko povečamo zorni kot do okoli 10-krat, kar pa je premalo za opazovanje zelo drobnih stvari, kot so npr. rastlinske in živalske celice. Uporabiti moramo *mikroskop*.



Slika 24.10 potek svetlobe skozi mikroskop

Droben predmet postavimo tik pred gorišče *objektiva* in z lupo – *okularjem* – opazujemo njegovo povečano sliko (slika 24.10).

Povečavo mikroskopa opredelimo enako kakor pri lupi – kot razmerje med tangensom zornega kota pri opazovanju skozi mikroskop in tangensom zornega kota pri opazovanju v normalni zorni razdalji r . Prepričamo se lahko, da je povečava

$$M = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{r d}{f_1 f_2},$$

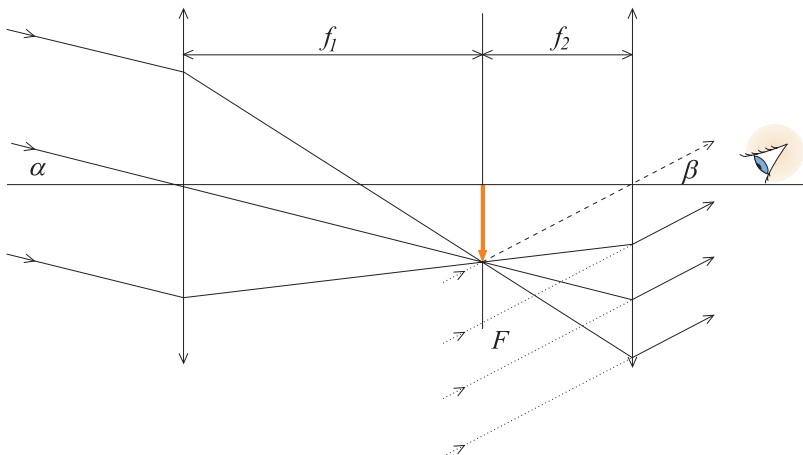
če je d razdalja med notranjima goriščema okularja in objektiva.

? Podrobneje si oglejte laboratorijski mikroskop in se poučite o njegovi uporabi. Kako lahko še izboljšamo njegovo povečavo? Kolikšne najmanjše podrobnosti še lahko ločimo z mikroskopom? Kje so omejitve?

* DALJNOGLED

Tudi pri opazovanju oddaljenih predmetov nas omejuje zorni kot. Povečamo si ga z *daljnogledom*.

Objektiv preslika oddaljeni predmet v svojo goriščno ravnino. Sliko opazujemo skozi okular, ki ga uporabimo kot lupo (slika 24.11). Premislite, kako je, če predmet ni zelo daleč.



Slika 24.11 potek svetlobe skozi daljnogled



Slika 24.12 300-metrski radioteleskop v Arecibu, Porto Rico

? V kaki astronomski ali naravoslovni enciklopediji si oglejte podrobnosti o konstrukciji astronomskih daljnogledov, o astronomskih opazovanjih in o njihovih omejitvah. O mnogih novostih poročajo tudi naravoslovne revije.

Povečavo daljnogleda opredelimo kot razmerje med tangensom zornega kota, pod katerim gledamo sliko predmeta skozi okular, in tangensom zornega kota, pod katerim gledamo predmet s prostim očesom. Prepričajte se, da je povečava

$$M = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{f_1}{f_2}.$$

Povečava je torej tem večja, čim večja je goriščna razdalja objektiva, saj goriščna razdalja okularja ne more biti dosti manjša od centimetra.

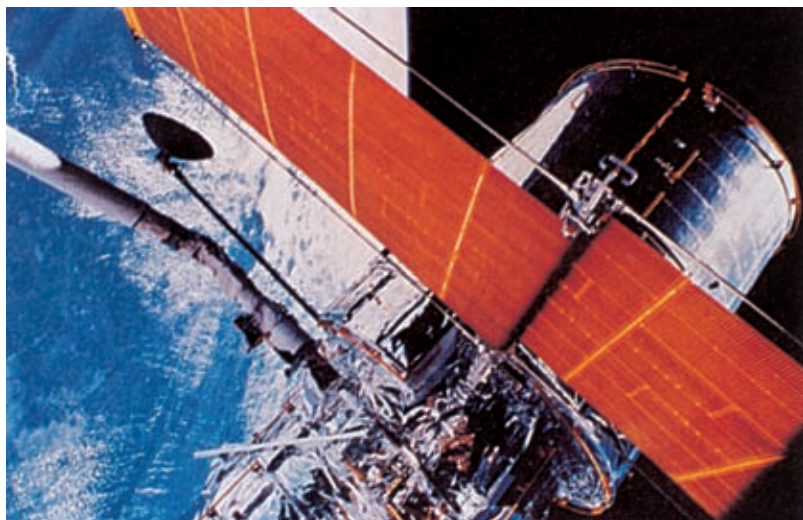
Preprost daljnogled, ki ga kaže slika 24.11, daje obrnjeno sliko. To bi motilo pri opazovanju na Zemlji, zato z dodatno lečo ali z optičnimi prizmami dosežejo obrat slike.

Namesto leče lahko za objektiv uporabimo konkavno zrcalo. To je v rabi zlasti pri astronomskih daljnogledih. Največji daljnogledi imajo zrcala s premerom nekaj metrov in z goriščno razdaljo nekaj 10 m. Slike, ki nastanejo v goriščni ravnini zrcala, snemajo s *fotografskimi ploščami* ali pa s *slikovnimi ojačevalniki*. S takimi daljnogledi lahko opazujejo nebesna telesa, ki so v razdalji do nekaj milijard svetlobnih let.

****** Po formuli, s katero smo izračunali povečavo daljnogleda, bi sodili, da je povečava lahko poljubno velika, če le dovolj povečamo goriščno razdaljo objektiva. Žal pa povečanje povečave še ne pomeni povečanja *ločljivosti* daljnogleda. V goriščni ravnini daljnogleda slike točkastih teles namreč niso točke, temveč drobni krožci, katerih premer je obratno sorazmeren s premerom objektiva. Tega si ne moremo razložiti z odbojnimi ali z lomnim zakonom – je namreč posledica tega, da je svetloba valovanje. Pri daljnogledu, ki ima objektiv s premerom D in z goriščno razdaljo f , je premer krožca v goriščni ravnini, ki predstavlja sliko oddaljenega točkastega svetila, enak

$$\frac{0,6 \lambda}{D} f,$$

če je λ valovna dolžina svetlobe – okoli 600 nm. Če še tako natančno opazujemo sliko, ne moremo ločiti dveh svetil, če sta središči njunih slik za manj kakor toliko narazen.



Slika 24.13 Vesoljski teleskop Hubble so vtirili aprila 1990. Astronomi dobivajo z njim ostrejšje slike in vidijo dlje v vesolje, saj svetlobe ne moti nemirna atmosfera kakor pri teleskopih na površju Zemlje.

25. | UKLON

V valovno kad postavimo zaslon, v katerem pustimo drobno režo. Naj vpada na zaslon z ene strani ravno valovanje v pravokotni smeri. Skozi režo se na drugo stran zaslona razširja *krožno valovanje*. Ko režo razširimo, postane slika valovanja na drugi strani zaslona bolj zapletena. Ko je reža nekajkrat širša od valovne dolžine valovanja, lahko razločimo curke valov, ki se razširjajo po gladini. Pojav pripišemo *uklonu* valovanja.

Uklon opazimo tudi ob ovirah, na katere naletijo valovi. Pričakovali bi, da na območju *geometrijske sence*, to je v prostoru za oviro, ki ga omejujeta žarka vpadnega valovanja ob robovih ovire, valovanja ni. Vendar že v razdalji nekaj valovnih dolžin v smeri razširjanja valovanja opazimo, da se valovanje širi tudi na območje za oviro (slika 25.1). Ovire, ki so manjše od valovne dolžine, valovi skoraj nemoteno preidejo. V razdalji, ki je velika v primerjavi z oviro, pa valovanje prekrije območje geometrijske sence, tudi če so ovire večje od valovne dolžine.

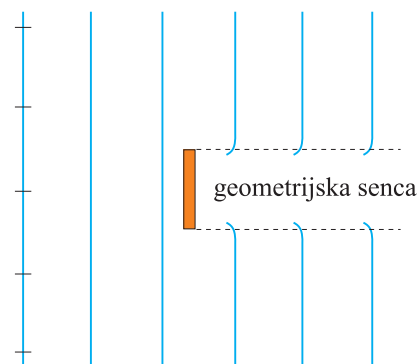
S spreminjanjem velikosti rež ali ovir in valovne dolžine vidimo, da so uklonski pojavi izraziti, če so reže ali ovire manjše ali največ nekajkrat večje od valovne dolžine valovanja. Tako je npr. kot, za katerega se razširi curek valovanja, ki prodre skozi režo, enak razmerju

$$\frac{\lambda}{\frac{1}{2}D}$$

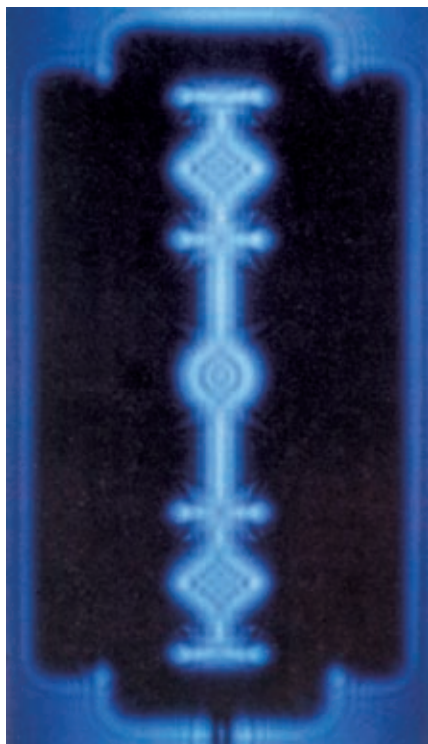
med valovno dolžino, λ , in polovično širino reže, $\frac{1}{2}D$.

Uklonski pojavi spremljajo vsa valovanja. Pri zvoku npr. slišimo zvočnik, čeprav ga za debelim drevesom ali vogalom ne vidimo. Prav tako lahko sprejemamo srednje dolge radijske valove, čeprav je postaja za hribom, ne moremo pa sprejemati UKV ali televizijskih valov. Z *mikrovalovi*, ki jih naredimo s šolsko napravo, opazujemo vse pojave, ki smo jih videli pri valovih na vodi. Potrdimo lahko, da je širina pahljače, v katero se razširijo mikrovalovi po prehodu skozi režo, odvisna od širine reže. Iz razširitve curka ocenimo, da je valovna dolžina mikrovalov okoli 3 cm.

Pri svetlobi prvi hip ne opazimo uklonskih pojavov. Pa naredimo v kuhinjsko aluminijevo folijo drobno luknjico in skozi njo pogledimo proti oddaljeni svetilki. Namesto svetle točke vidimo svetel krožec, ki ga obrobja več mavrično obarvanih svetlih in temnih kolobarjev.



Slika 25.1 Valovanje se razširja v področje geometrijske sence.



Slika 25.2 uklon svetlobe na britvici

Še zanimivejši je pogled na oddaljeno luč skozi gosto zaveso ali gosto blago dežnika. Slika je posledica uklona svetlobe, ki mora skozi drobne luknjice.

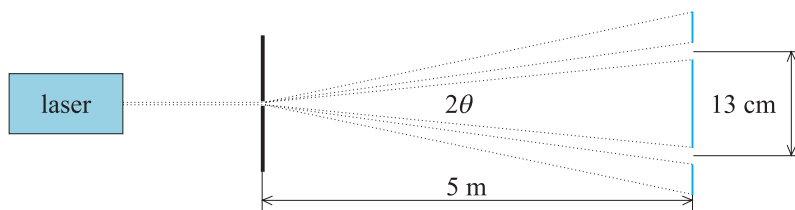
Kolikšna je valovna dolžina svetlobe, lahko ocenimo s poskusom, ki ga kaže slika 25.3. Z *laserjem* posvetimo skozi okoli pet stotin milimetra široko režo in opazujemo sled curka svetlobe na zaslonu okoli 5 m stran. Do zaslona se curek razširi v okoli 13 cm široko liso. Širino curka opredelimo s kotom pri vrhu curka. V našem primeru je kot, izražen v ločnih enotah, enak

$$\theta = 13 \text{ cm} : 500 \text{ cm} = 2,6 \cdot 10^{-2}.$$

Kakor smo že omenili, je ta kot enak razmerju med valovno dolžino in polovično širino reže. Iz te zveze dobimo za valovno dolžino

$$\lambda = \frac{1}{2} \theta D = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}.$$

Dobljeni rezultat bomo kasneje lahko potrdili z bolj natančnim merjenjem. Že sedaj pa razumemo, zakaj pojave, ki so povezani z valovnimi lastnostmi svetlobe, zlahka spregledamo.



Slika 25.3 uklon svetlobe na reži

Dejavnost Ocenite valovno dolžino svetlobe še iz opazovanj oddaljene luči skozi luknjico. Premislite, kako bi izmerili potrebne podatke!

* Uklon si razlagamo s *Huygens-Fresnelovim načelom*, po katerem je vsak delec valujočega sredstva izvir *elementarnih valov*. Pri valovanju na gladini vode so ti valovi krožni, pri valovanju v prostoru pa krogelni. Ti elementarni valovi se sestavljajo in dajejo nove valove, ki se širijo naprej. Ko valovanje naleti na oviro, se elementarni valovi, ki jih oddajajo deli vala pred oviro, ne morejo širiti naprej, zato je neposredno za oviro senca. Elementarni valovi z meje sence pa se lahko razširjajo na območje sence in ga v večji razdalji za oviro prekrijejo z valovi. Podobno si razlagamo prodiranje valovanja skozi reže v zaslonih. Valovanje povzročajo elementarna valovanja iz reže. Če je širina reže majhna v primerjavi z valovno dolžino, je izvirov malo in se njihova valovanja sestavijo v krožno valovanje. S širjenjem reže se število izvirov veča, elementarna valovanja pa se sestavljajo v vse bolj prepoznaven curek, ki pa se še vedno širi tudi na območje geometrijske sence.

26. | INTERFERENCA

Vrzimo v vodo pest kamenčkov. Na gladini opazimo množico krožnih valov, ki se razširjajo drug skozi drugega, ne da bi se motili med seboj. Delci ob vodni gladini sledijo vsem valovanjem hkrati. Kjer vsi valovi odmikajo vodo v isto smer, je odmik gladine iz ravnovesja velik, kjer so odmiki zaradi različnih valov nasprotni, pa ostane gladina v ravnovesni legi. Pojav pripišemo *interferenci* valovanj.

Slika gladine, ki so jo vzvalovili v vodo padajoči kamenčki, je značilna za valovanja, ki jih povzroča množica med seboj neusklajenih ali, kakor pravimo, *nekoherentnih* izvirov. Med prostorskimi valovanji je temu podobno zvočno valovanje, ki ga oddaja množica med seboj neusklajenih zvočil. Tudi svetlobo, ki jo oddajajo navadna svetila, si lahko predstavljamo podobno, saj svetila sestavlja množica med seboj neusklajenih izvirov.

Zanimivejši so pojavi, ko se širijo po gladini vode ali po prostoru valovi iz *koherentnih* izvirov, to je iz takih, ki nihajo s stalno fazno razliko.

Pri poskusih si pomagamo z valovno kadjo. Gladine se dotaknimo z dvema paličicama ali z dvema kroglicama, ki nihata z enako fazo. Slika 26.2 je fotografija valujoče gladine. Vidimo, da se na njej oblikujejo *curki valovanja*, med njimi pa so pasovi z mirno gladino.

Pojava ni težko razumeti. Po gladini potujeta dve krožni valovanji. Na izbranem mestu je odmik gladine iz ravnovesja vsota odmikov posameznih valovanj. Kjer imata oba odmika isto smer, je odmik velik, kjer sta si nasprotna, pa se gladina ne odmakne. Ker nihata izvira z enako fazo, je njun vpliv na izbranem mestu ves čas enak. Valovanje je izrazito vzdolž simetrale izvirov, pa tudi povsod tam, kjer je razlika med razdaljama do izvirov večkratnik valovne dolžine:

$$r_2 - r_1 = N \lambda .$$

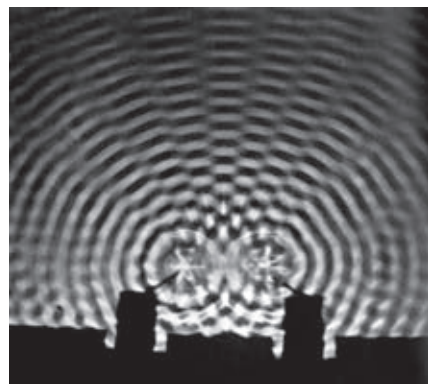
Levo ali desno od takega mesta, kjer je razlika razdalj za pol valovne dolžine večja ali manjša, tako da je

$$r_2 - r_1 = N \lambda \pm \frac{1}{2} \lambda ,$$

valovanja ni, saj sta si tam nihanji, ki ju povzročata izvira, nasprotni. Mesta z enako razliko razdalj ležijo na *hiperbolah*. V veliki razdalji od izvirov, kjer so hiperbole ravne, dobimo izrazite curke valov, med katerimi so območja z mirno gladino.

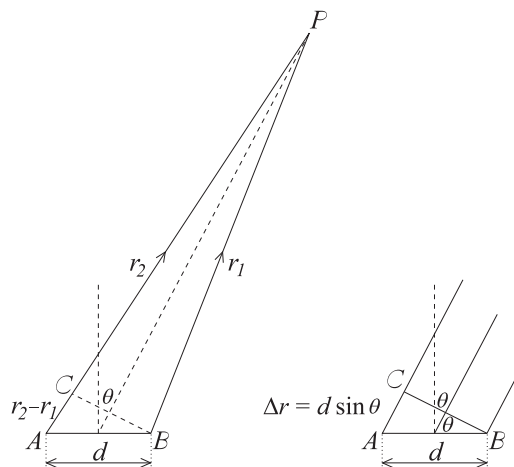


Slika 26.1 uklon morskih valov na porušnem pomolu



Slika 26.2 interferenca valov na vodni gladini

Slika 26.3 O valovanju v točki P odloča razlika razdalj od izvirov. Če je razdalja velika v primerjavi z razdaljo med izviroma, sta zveznici s točko skoraj vzporedni.



Trenutno sliko sestavljenega valovanja dobimo, če si predstavljamo prekrito trenutni sliki krožnih valovanj iz dveh izvirov, ki nihata z enako fazo. Kjer se valovni grebeni naložijo drug na drugega, je valovanje izrazito, kjer se valovni grebeni naložijo na doline, pa valovanja ni.

Smer, v kateri se oblikuje curek valovanja, opredelimo s kotom θ med smerjo curka in simetralo zveznice med izviroma. S slike 26.3 razberemo, da lahko s tem kotom in z razdaljo med izviroma izrazimo razliko razdalj od izbranega mesta v curku in izviroma. Ker je izbrano mesto v razdalji, ki je velika v primerjavi z razdaljo med izviroma, je trikotnik ABC pravokoten, razlika razdalj pa kateta v tem trikotniku. Dobimo, da je

$$r_2 - r_1 = \Delta r = d \sin \theta ,$$

če je d razdalja med izviroma. Sinusi kotov, pod katerimi se širijo curki valov, so tedaj

$$\sin \theta = N \frac{\lambda}{d} ,$$

kjer je $N=0, 1, 2, \dots$ red curka. Curki nastanejo na obeh straneh simetrale med izviroma.

Iz enačbe razberemo število curkov na eni strani simetrale. Ker je lahko sinus največ ena, je število curkov na eni strani simetrale kar enako maksimalnemu redu curka

$$N_{maks} = \text{celi del } \frac{d}{\lambda} .$$

S preštevanjem curkov lahko na hitro ocenimo razdaljo med izviroma ali pa valovno dolžino.

Podoben poskus lahko naredimo tudi z dvema zvočnikoma, ki ju napajamo z istim izvirom izmenične napetosti. V nekaterih smereh je zvok ojačen, v drugih pa oslabljen.

Naredimo še tale poskus. V oviro na vodni gladini naredimo dve reži in nanjo v pravokotni smeri usmerimo ravno valovanje. Na drugi strani

? Kako bi izgledala interferenčna slika, če bi nihala izvira z nasprotno fazo? Kaj bi opazili daleč od izvirov, če bi se faza med nihanjema izvirov počasi spreminjala?

Kakšna bi bila interferenčna slika, če bi se frekvenci izvirov malo razlikovali?

ovire opazimo interferenčno sliko, ki je prav taka kakor pri dveh izviroh, če sta le reži dovolj ozki. Iz rež se tedaj širijo krožni valovi, ki se sestavljajo enako, kakor so se prej krožni valovi iz izvirov, ki sta nihala z enako fazo. Če oviro nagnemo proti prihajajočemu valovanju, se eno od krožnih valovanj zakasni. Pri zakasnitvi za pol nihaja se v interferenčni sliki zamenjajo curki in predeli z mirujočo vodo.

Interferenčni poskus z dvema bližnjima režama lahko naredimo tudi s svetlobo. V kuhinjsko aluminijevo folijo naredimo blizu skupaj dve drobni luknjici. Ko pogledamo skoznju proti oddaljeni luči, opazimo na uklonski sliki, ki jo poznamo od prej, svetle in temne proge, postavljene pravokotno na zveznico luknjic. To je slika curkov svetlobe, ki nastanejo z interferenco po uklonu na luknjicah. Ta poskus imenujemo po Thomasu Youngu *Youngov poskus*.

Youngov poskus je prepričljivejši, če ga naredimo z laserjem. Slika 26.4 kaže interferenčno sliko, ki jo dobimo na zaslonu po uklonu svetlobe na dveh režah s širino 0,05 mm, ki sta 0,1 mm narazen. Svetle pege na zaslonu so sledi interferenčnih curkov. Na zaslonu v razdalji 5 m od rež je razmik med sredino prvega curka in simetralo okoli 32 mm. Prepričate se lahko, da to ustreza valovni dolžini svetlobe laserja.

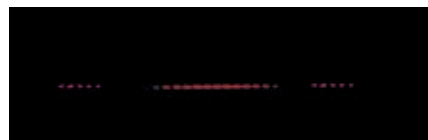
Poskus lahko ponovimo tudi z več režami v enakih razmiki. Smeri ojačenih curkov se zaradi tega nič ne spremenijo, curki postanejo ožji in svetlejši, med njimi pa je vse manj svetlobe.

Za merjenje valovne dolžine svetlobe uporabljajo *uklonske mrežice* z zelo velikim številom zelo ozkih rež. Običajne so mrežice s 100 do 300 režami na milimeter. Pri mrežici s 100 režami na milimeter osvetljuje laserski curek s premerom 2 mm okoli 200 rež hkrati. Ojačene curke dobimo v isti smeri kakor pri dveh režah, torej pri kotih, za katere je razlika poti iz bližnjih rež enaka večkratniku valovne dolžine (slika 26.5)

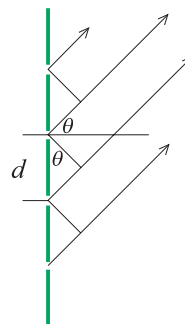
$$d \sin \theta = N \lambda$$

Tudi sedaj N označuje red curka. Zaradi velikega števila rež je vsa svetloba v curkih, ki so enako široki kakor curek vpadne svetlobe, v drugih smereh pa ni svetlobe. Pri poskusu je na 5 m oddaljenem zaslonu razdalja med simetralo in curkom 1. reda 31,6 cm. Iz tega podatka izračunamo, da meri valovna dolžina rdeče svetlobe iz laserja okoli 633 nm.

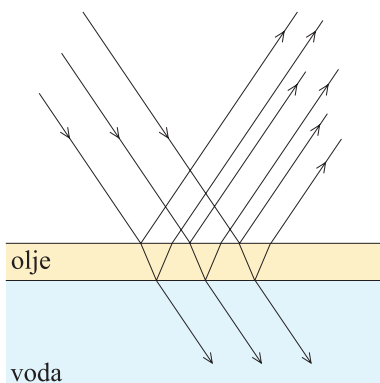
Dejavnost Posvetimo na mrežico z ozkim curkom bele svetlobe, ki jo dobimo iz projekcijskega aparata, če za diapozitiv uporabimo zaslonko s tanko režo. Na oddaljenem zaslonu vidimo, da se curek bele svetlobe razkloni v pahljačo barvnih curkov. V curkih 1. in 2. reda, ki ju običajno še ločimo med seboj, si sledijo od simetrle navzven barve od vijolične do rdeče v *mavričnem* zaporedju. Curki višjih redov so pomešani med seboj.



Slika 26.4 interferenčna slika iz dveh vzporednih rež, ki jo osvetljuje laserski curkom



Slika 26.5 uklonska mrežica



Slika 26.6 nastanek interference na tanki plasti olja na vodi



Slika 26.7 z belo svetlobo osvetljena tanka plast olja

Pravimo, da mavrica kaže *spekter* bele svetlobe. Pojav kaže, da je bela svetloba sestavina valovanj z različnimi valovnimi dolžinami. Vsaki od mavričnih barv pripada svoja valovna dolžina.

Dejavnost Izmerite značilno valovno dolžino modrega, zelenega in rdečega dela v mavrici! Spomnite se poskusov z optično prizmo!

* Do interference svetlobe prihaja tudi pri *odboju od tankih plasti*. Slika 26.6 kaže tanko plast olja na vodi. Vpadla svetloba se delno odbije na meji med zrakom in oljem, delno pa na meji med oljem in vodo. Tudi znotraj plasti pride do odbojev na zgornji in na spodnji meji. Svetloba izhaja iz plasti v enaki smeri kakor svetloba, ki se odbije na meji med oljem in zrakom. Zaradi fazne razlike, ki je posledica različno dolgih poti, se odbita curka lahko ojačita ali pa oslabita. Pri enakomerno debeli plasti sta ojačitev ali oslabitev odvisni od kota, pod katerim vpada svetloba na plast, sicer pa tudi od debeline plasti. Na plasti olja, ki jo z vseh strani osvetljuje bela svetloba, opazimo barvne kolobarje. Poskusite razložiti pojav!

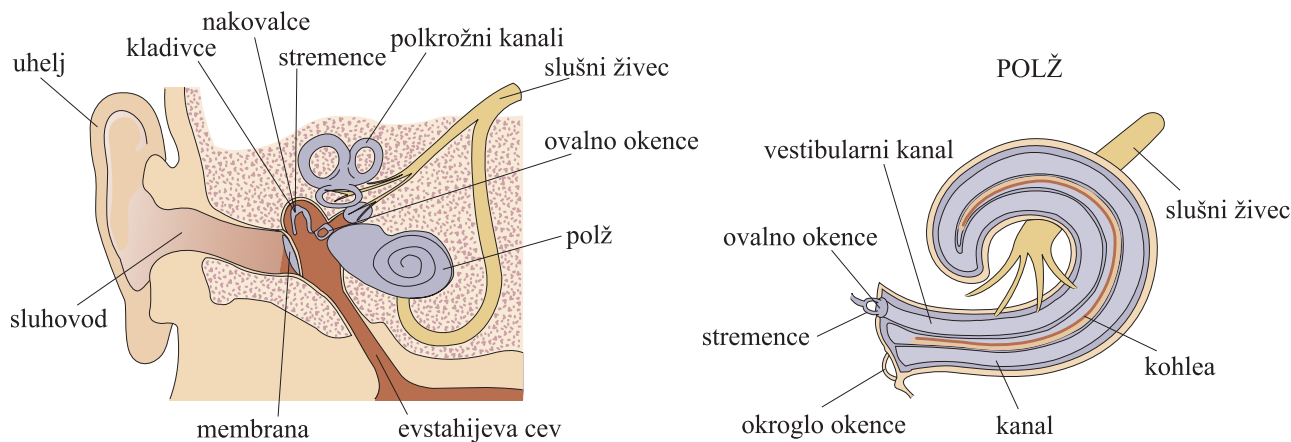
Da bi zmanjšali odboj svetlobe, prekrijejo površja leč z *antirefleksno* plastjo. Debelino in lomni kvocient plasti izberejo tako, da zmanjšajo odboj predvsem v rumenozelenem delu spektra vidne svetlobe. Plast še vedno odbija del rdeče in modre svetlobe, zato imajo leče purpurni lesk.

Interferenčnim pojavom pri odboju gre pripisati tudi barve kril pri nekaterih hroščih in metuljih ali barve perja pri nekaterih pticah. Barve so izrazito bleščeče, ker gre za odboj na celi skladovnici tankih plasti.

NASTANEK IN SPREJEM ZVOKA

Zvok imenujemo *slušna longitudinalna valovanja*, ki se razširjajo po zraku od različnih teles, ki nihajo z dovolj veliko frekvenco. Človek zaznava zvočna valovanja z *ušesi*. Poleg svetlobe je zvok najpomembnejši posrednik med človekom in okolico, zato je prav, da nekatere pojave, značilne za zvok, posebej obravnavamo.

Nastanek in sprejem zvoka si nazorno ponazorimo s temle poskusom. Na okviru napnemo prožni opni in ju postavimo nekaj decimetrov narazen. Ko po prvi opni udarimo s tolkalcem ali z roko, odskoči drobna kroglica stiropora, ki jo privežemo z vrvico tako, da se dotika druge opne. Ko zaradi udarca zaniha prva opna, se v zraku med opnoma oblikuje niz zgoščin in razredčin, ki potujejo po zraku in zatresejo drugo opno.



Slika 27.1 zgradba ušesa

Udarec ob opno zaznamo tudi z ušesi (slika 27.1). Zgoščine in razredčine zatresejo *bobnič*, to tresenje pa se prek *slušnih koščic* v srednjem ušesu prenaša v notranje uho, kjer ga zaznajo sprejemniki zvoka. Po živcih se signali iz sprejemnikov prenašajo v možgane, kjer se oblikuje *slušni vtis*.

Umetni detektorji zvoka, *mikrofoni*, delujejo podobno kakor uho. Osnovni del mikrofona je membrana, ki vsiljeno niha, ko jo zadevajo zgoščine in razredčine v zvočnem valovanju. Iz mikrofona dobimo nihajočo električno napetost, ki jo lahko naprej ojačujemo. To omogoča

zapis zvoka na magnetne trakove ali plošče oziroma ojačevanje zvoka prek zvočnikov.

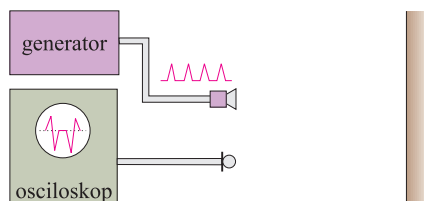
Dejavnost Poučite se o podrobni zgradbi in delovanju ušesa! V kaki enciklopediji ali priročniku za hi-fi tehniko si oglejte še zgradbo in delovanje mikrofонов.

Da se zvok res širi po zraku, se prepričamo, če zrak odstranimo iz okolice izvira. Pod poveznik vakuumске črpalke namestimo električni zvo-nec ali zvočnik, ki ju napajamo z elektriko, da oddajata zvok. Ko izčr-pamo zrak izpod poveznika, zvoka ni več slišati, ko poveznik ponovno napolnimo z zrakom, pa se zvok spet pojavi.

Spoznali smo že, da izračunamo hitrost zvoka v zraku po formuli

$$c = \sqrt{\frac{\kappa R T}{M}},$$

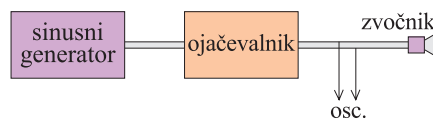
in videli, kako jo lahko preprosto izmerimo (gl. poglavje o hitrosti valovanja).



Slika 27.2 merjenje hitrosti zvoka v laboratoriju

Hitrost zvoka pa lahko izmerimo tudi v razredu. Pripravo kaže slika 27.2. Zvočnik napajamo s kratkotrajnimi električnimi sunki. Membrana pri tem oddaja kratke poka, ki jih zaznavamo z mikrofonom poleg zvočnika. Mikrofon poleg poka, ki ga odda zvočnik, zazna še pok, ki se odbije od stene ali od zaslona. Z zaslonu osciloskopa odberemo čas med pokoma in izračunamo hitrost zvoka, ko izmerimo še razdaljo do zaslona.

* Lahko pa napajamo zvočnik s sinusno napetostjo in z osciloskopom primerjamo časovni potek nihanja, ki ga da mikrofon, s časovnim potekom nihanja napajalne napetosti. Mikrofon odmikamo od zvočnika in poiščemo dve bližnji mesti, na katerih sta nihanji v fazi. Vemo, da sta taki mesti za valovno dolžino narazen.



Slika 27.3 naprava za preskus slušnega območja

Človeško uho zaznava zvok s frekvenco od 20 s^{-1} do 20.000 s^{-1} . Z leti se frekvenčni obseg oži. Svoje slišno območje preizkusimo s poskusom, ki ga kaže slika 27.3. Z generatorjem sinusne napetosti prek ojačevalnika napajamo zvočnik in poslušamo. Z osciloskopom opazujemo napetost na zvočniku. S spreminjanjem frekvence in amplitude sinusne napetosti ugotovimo meje, znotraj katerih še slišimo.

Uho je najbolj občutljivo pri frekvenci okoli 1000 s^{-1} . Pri tej frekvenci je *meja slišnosti*, to je gostota energijskega toka v najšibkejšem še slišnem zvoku, okoli 10^{-12} W/m^2 . Iz izraza za *gostoto energijskega toka*, ki ga prenaša valovanje

$$j = \frac{1}{2} \rho \omega^2 s_0^2 c$$

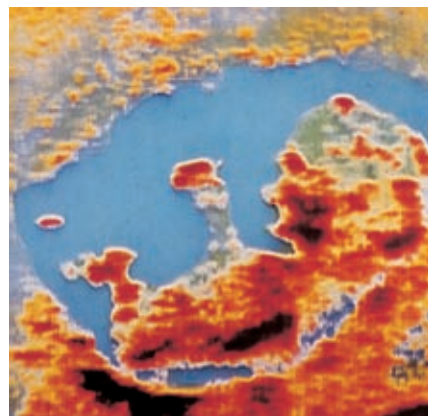
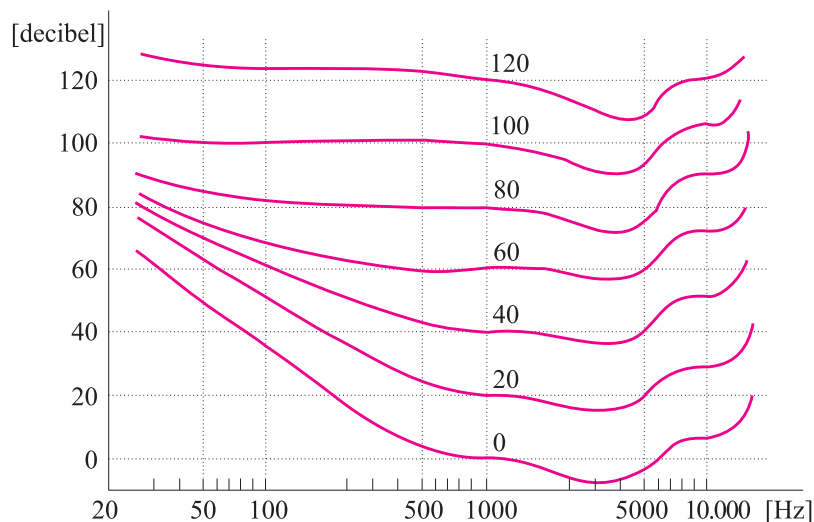
izračunamo, da nihajo delci zraka v tem primeru z amplitudo okoli 10^{-11} m , kar je manj kakor desetina premera atoma. Drobnno nihanje delcev zraka ustvarja razredčine in zgoščine, zaradi katerih na izbranem mestu niha tlak. Nihanje tlaka pa pozibava membrano ušesa. V zvočnem valu pri meji slišnosti pri frekvenci 1000 s^{-1} niha tlak z amplitudo okoli $3 \cdot 10^{-5}\text{ barov}$.

Pri drugačnih frekvencah je meja slišnosti višja. Kako se spreminja, kaže graf na sliki 27.6. Na isti sliki je posebej označena še *meja bolečine*, to je gostota energijskega toka v najglasnejšem zvoku, ki ga še prenesemo brez bolečine. Ta meja je skoraj v vsem slišnem območju okoli 1 W/m^2 .

* Gostoto energijskega toka v zvočnem valovanju ali, kakor to radi imenujemo, *jakost zvoka*, pogosto izražamo v *decibelski* skali. Jakost zvoka j z gostoto energijskega toka j_0 izrazimo po formuli

$$\text{jakost} = 10 \log (j / j_0) \text{ decibelov (db) } ,$$

kjer je $j_0 = 10^{-12}\text{ W/m}^2$. Fiziološkim občutkom je prilagojena *fonska skala*. Z njo izražamo *glasnost zvoka*. Po tej skali je glasnost zvoka pri frekvenci 1000 s^{-1} enaka jakosti v decibelih. Enako glasnost imajo tudi zvoki pri drugih frekvencah, ki se nam zdijo enako glasni. Tako vsem zvokom na meji slišnosti pripišemo glasnost 0 fonov. Na meji bolečine je glasnost 120 fonov. S slike 27.6 lahko razberemo tudi glasnost zvokov med tema mejama.



Slika 27.4 Zvok s frekvenco nad $20\,000\text{ s}^{-1}$ imenujemo ultrazvok. Ker prodira tudi v človeško telo, ga lahko uporabimo za medicinske preiskave. Na sliki je ultrazvočni posnetek zarodka v maternici.

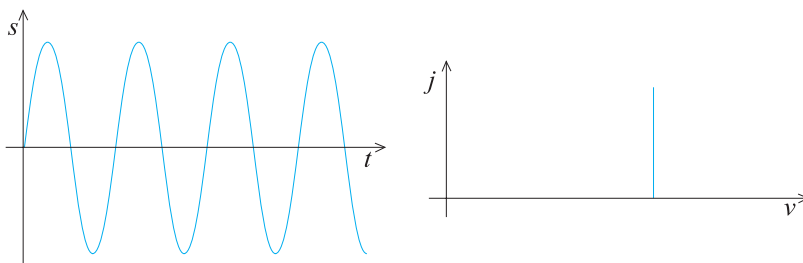


Slika 27.5 Preiskovalna sonda ultrazvočnega defektoskopa oddaja impulze ultrazvočnega valovanja. Ti potujejo skozi preiskovanec in se delno odbijejo na mejah med različnimi materiali in na napakah. Odbite impulze sprejema sonda, elektronska naprava pa jih obdela in prikaže na zaslonu. Čas med oddanim in prejetim impulzom je merilo za lego napak (npr. razpok) v materialu in za debelino merjenca.

Slika 27.6 občutljivost ušesa

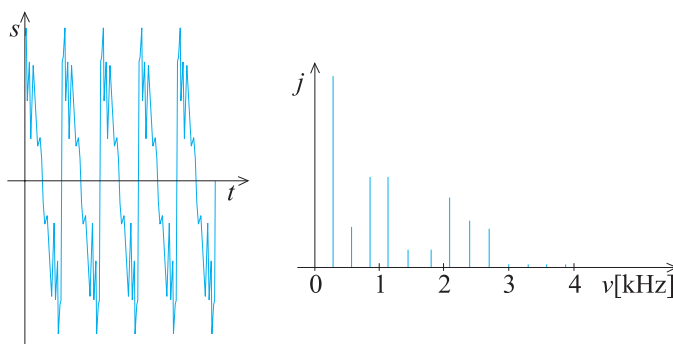
VRSTE ZVOKOV IN NJIHOV SPEKTER

Zvoke razdelimo na tri glavne skupine, na *tone*, *glasbene tone* ali *zvene* in *šume*.



Slika 27.7 časovni potek nihanja zraka pri tonu in spekter tona

Ton oddajajo *glasbene vilice*, pa tudi zvočnik, ki ga napajamo s sinusnim izmeničnim tokom. Zvočno valovanje je tedaj *sinusno*. To pomeni, da je trenutna slika vala sinusoida. Tudi iz mikrofona, ki kaže nihanje zvočnega tlaka v takem valu, dobimo sinusno napetost. Za ton značilna podatka sta frekvenca in jakost oziroma gostota energijskega toka. Ta dva podatka opredeljujeta *spekter* tona. Spekter prikazemo na grafu, ki ga kaže slika 27.7. Na abscisni osi so frekvence, na ordinatni osi pa jakost ali gostota energijskega toka. Ton je predstavljen s črto pri njegovi frekvenci, pri čemer višina črte predstavlja jakost. Pravimo, da je spekter tona *črtast* in da je v njem ena sama črta.



Slika 27.8 časovni potek nihanja zraka pri zvenu in spekter zvena

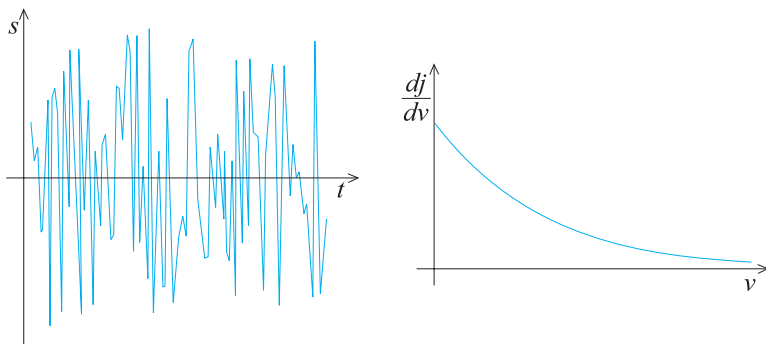
Glasbene tone ali *zvene* oddajajo glasbeni instrumenti. Slika 27.8 kaže časovni potek zvena, ki ga oddaja violina, ko vlečemo z lokom enakomerno po struni *a*. Zvok, ki ga oddaja instrument, je periodičen, ni pa sinusen. Na sliki je tudi spekter tega zvena. Vidimo, da je tudi spekter zvena *črtast*. Črte predstavljajo *osnovni ton* s frekvenco, ki je enaka frekvenci zvena, in *harmonične tone* s frekvencami, ki so večkratniki osnovne.

Glasbeniki razločujejo zvene po *višini* in *barvi*. Višino določa predvsem frekvenca osnovnega tona v zvenu, barvo, po kateri ločimo zvene z isto višino med seboj, pa harmonični toni.

Šumi so neperiodični zvoki. Slika 27.9 kaže značilen časovni potek šuma in njegov spekter. Vidimo, da je spekter *zvezen*, kar pomeni, da

? Kako lahko izbrani zven razstavimo na sinusne komponente, ga lahko iz sinusnih komponent tudi sestavimo. V ta namen imajo elektronske *sintetizatorje*. Morda veste, kako delujejo? Z njimi poskušajo moderni skladatelji povečati možnosti za glasbeno izražanje.

? Kako so urejeni glasbeni toni v glasbenih lestvicah? Kakšna je zveza med višino glasbenih tonov in frekvenco? V kakšnem razmerju so frekvence tonov, ki se razlikujejo po višini za oktavo, kvinto, terco itd.? Poglejte v kak učbenik glasbene akustike. Če igrate kak instrument, lahko stvari tudi sami preizkusite.



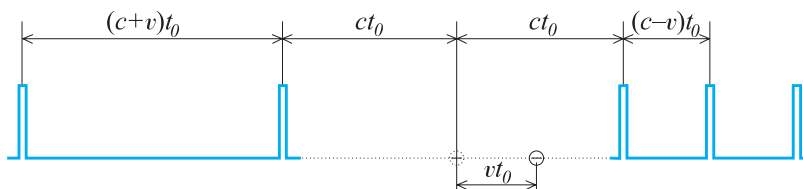
Slika 27.9 časovni potek nihanja zraka pri šumu in spekter šuma

lahko predstavimo šum kot zvezno množico sinusnih valovanj, katerih frekvence se prelivajo druga v drugo. Spekter opredelimo tako, da za vsako frekvenco navedemo, kolikšna je pri njej gostota energijskega toka na enoto frekvenčnega intervala.

* DOPPLERJEV POJAV

Stojimo ob progi, po kateri vozi vlak. Če pozorno poslušamo, se nam zdi zvočni signal vlaka med približevanjem višji kakor med oddaljevanjem. Morda ste tudi opazili, da je frekvenca zvoka večja, ko se sami približujete zvočilu, in manjša, ko se od njega oddaljujete. Morda ste že doživeli prelet nadzvočnega letala. Oglušujoč zvočni val vas je zadel po tem, ko vas je letalo že preletelo. Vsi ti pojavi so posledica tega, da ima zvočno valovanje končno hitrost. Podobne pojave srečujemo tudi pri drugih valovanjih. Po odkritelju jih imenujemo *Dopplerjeve*.

Dopplerjev pojav lahko opazujemo tudi v razredu. Vzemimo glasbene vilice ali sinusno nihajoč zvočnik in ga približujemo in oddaljujmo od stene. Zaslišimo *utripe*, ki kažejo, da prihajata do nas dve sinusni valovanji z rahlo različnima frekvencama, čeprav oddaja zvočilo sinusno valovanje.



Slika 27.10 K razumevanju Dopplerjevega pojava. Izvir, ki se giblje proti desni, oddaja kratke zvočne signale.

Razložimo si pojav! Mislimo si, da gibajoče se zvočilo namesto sinusnega zvoka enakomerno oddaja kratke zvočne sunke s frekvenco ν_0 (slika 27.10). Med dvema sunkoma, v času $t_0 = 1/\nu_0$, se sunki razširijo v vse smeri za ct_0 , zvočilo pa se premakne za vt_0 v smeri svoje hitrosti. V smeri gibanja zvočila si zato sledijo sunki v razmiku $(c - v)t_0$, v nasprotni smeri pa v razmiku $(c + v)t_0$. Ker se gibljejo sunki s

? Premislite, kolikšno frekvenco sunkov bi zaznal sprejemnik, ki bi se sam gibal glede na zrak, v katerem se širijo sunki.

hitrostjo zvoka c , jih mirujoči sprejemnik, ki se mu zvočilo približuje, v enoti časa zazna

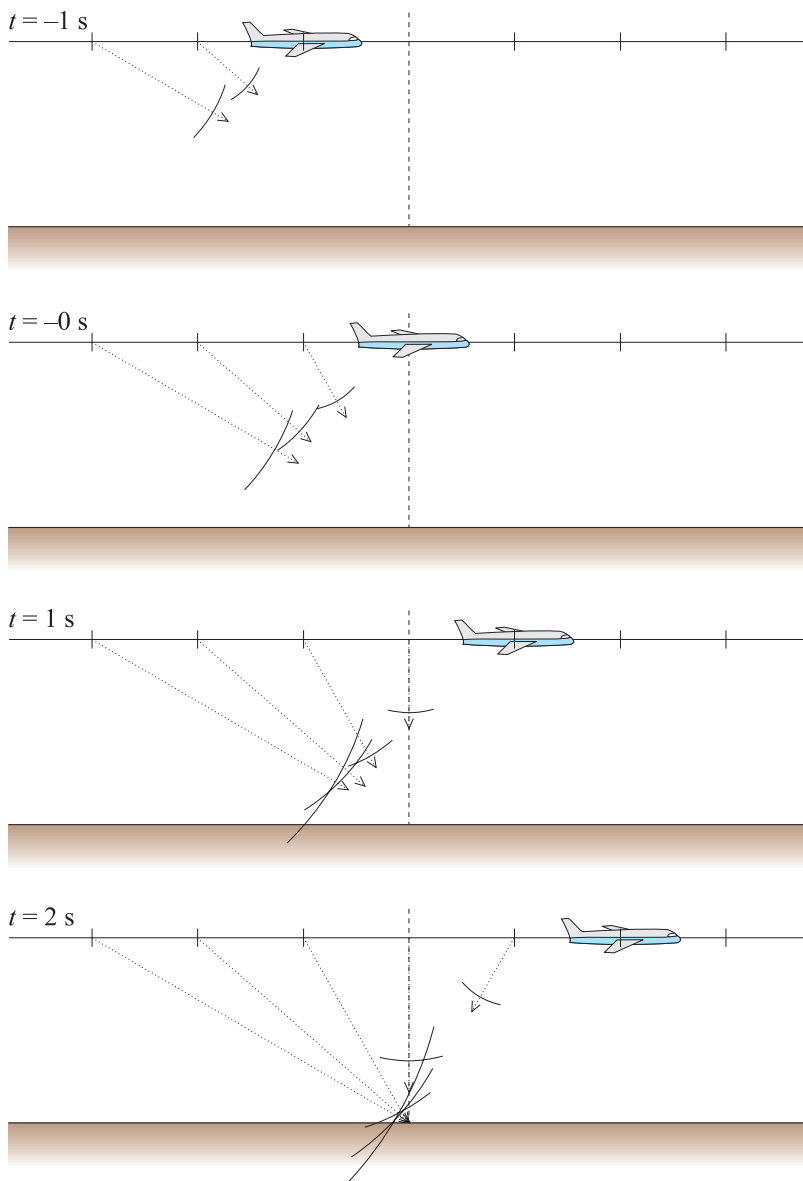
$$v_1 = \frac{c}{(c-v)} t_0 = v_0 \frac{c}{c-v},$$

sprejemnik, od katerega se zvočilo oddaljuje, pa

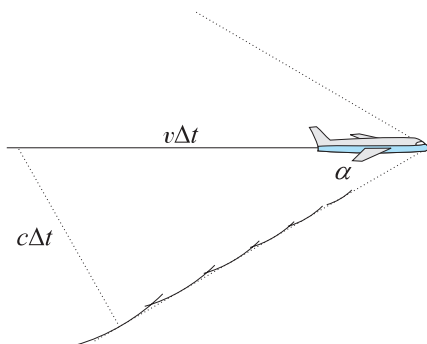
$$v_2 = \frac{c}{(c+v)} t_0 = v_0 \frac{c}{c+v}.$$

To sta ravno frekvenci sprejetih sunkov. Enak rezultat velja za frekvenci tonov, ki ju zaznata sprejemnika, če oddaja oddajnik ton s frekvenco v_0 .

Poglejmo še, kaj se zgodi, če je izvir hitrejši od zvoka. Za zgled vzemimo nadzvočno letalo, ki se giblje s hitrostjo 500 m/s v višini 1000 m nad tlemi. Letalo enakomerno oddaja kratkotrajne zvočne signale, ki



Slika 27.11 Nastanek poka pri preletu nadzvočnega letala. Opazovalca na tleh zadene zgoščen greben valov, ki jih je letalo oddajalo pred preletom opazovalca. Čas ob preletu opazovalca smo postavili enak 0.



? Izračunajte, v kolikšnem času po preletu nadzvočnega letala zadene opazovalca na tleh zgoščeni val. S podatki v zgornjem zgledu preverite pravilnost prejšnjega razmišljanja!

Slika 27.12 trenutna slika stožca, ki se vleče za letalom

se razširjajo v zraku s hitrostjo 330 m/s. Slika 27.11 kaže lege letala in zvočnih signalov, ki se širijo v smeri proti opazovalcu pred preletom in po njem.

Razberemo, da zadenejo opazovalca nekaj čez 2 s po preletu letala deli zvočnih signalov, ki jih je letalo oddajajalo v času od okoli 3 s do okoli 1 s pred preletom. Ker so signali zgoščeni, zasliši opazovalec močan pok.

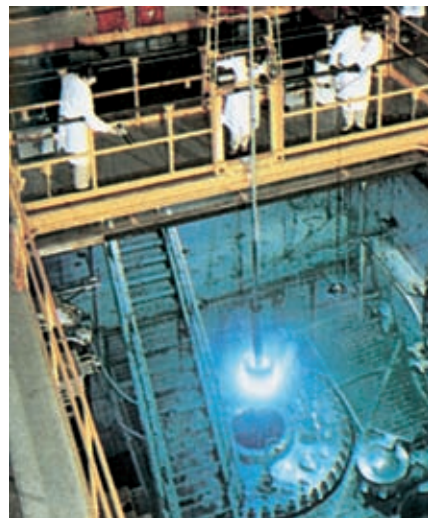
Na pojav lahko gledamo tudi drugače. Slika 27.12 kaže trenutno lego letala in lego kroglinskih valovanj, ki jih je oddalo letalo kratek čas pred tem, v preseku. Vidimo, da oblikujejo krogelna valovanja *stožčast val*, ki ga vleče letalo za seboj. S slike razberemo tudi sinus kota ob vrhu stožca

$$\sin \alpha = \frac{c}{v}.$$

Pojav lahko opazujemo tudi na vodni gladini. Za plovili, ki se gibljejo hitreje od hitrosti valov na gladini, se vleče *trikoten val*. Stožčaste valove svetlobe vlečejo za seboj tudi elektroni, ki se lahko gibljejo v snoveh z večjo hitrostjo kakor svetloba. Sredica jedrskega reaktorja, potopljena v vodo, zaradi tega modrikasto sveti (slika 27.14). Pojav imenujemo po Čerenkovu.



Slika 27.13 Okoli nadzvočnega letala na sliki je dobro vidno področje stisnjenega zraka v udarnem stožcu.



Slika 27.14 svetloba Čerenkova v jedrskem reaktorju

Slika 27.15 Machov val za čolnom na morski gladini

28. | VPRAŠANJA IN NALOGE

VPRAŠANJA

1. Ko se ogledujete v ravnem zrcalu, je del telesa, ki ga lahko vidite, neodvisen od razdalje do zrcala. Kako bi to pojasnili? Kako visoko bi moralo biti zrcalo, da bi se videli celi?
2. Ko se ogledujemo v ravnem zrcalu, vidimo svojo zrcalno podobo, na kateri sta zamenjani leva in desna stran. Zakaj nista zamenjani tudi zgornja in spodnja stran? Pokažite, da ne pride do zamenjave desne in leve strani pri sliki v zrcalu, ki ga sestavljata dva pravokotno postavljena dela, če je predmet postavljen simetrično glede na zrcali.
3. Kako se spreminja velikost slike, ki jo daje konkavno zrcalo, ko premikamo predmet iz zelo velike razdalje proti temenu? Ali je slika vselej obrnjena?
4. Ko gledamo z roba bazena v vodo, se nam zdi plitvejša, kakor je v resnici. Podobno se nam zdijo noge v vodi čudno krajše. Kako bi to pojasnili? Ali je to kaj povezano s tem, da se nam zdi palica, ki sega poševno v vodo, ob gladini zlomljena?
5. Prave slike lahko ujamemo na zaslon. Ali lahko ujamemo navidezne slike? Ali lahko ene in druge fotografiramo?
6. Ko gledamo pod vodo brez maske, je slika nejasna. Ko nadenemo masko, pa vidimo tako ostro kakor v zraku. Kako bi to pojasnili?
7. S tanko nesimetrično lečo ustvarimo na zaslonu sliko bližnjega predmeta. Ali se lega slike kaj spremeni, če lečo na istem mestu obrnemo?
8. Zbiralno lečo iz snovi z lomnim kvocientom 1,30 potopimo v vodo z lomnim kvocientom 1,33. Kaj se zgodi z “zbiralnostjo” leče?
9. S konkavnim zrcalom lahko zberemo sončno svetlobo v gorišču in z njo osmodimo papir. Ali bi lahko naredili ta poskus tudi v vodi? Kako pa bi bilo pri enakem poskusu z zbiralno lečo?
10. Ravno zrcalo lahko obravnavamo kot konkavno zrcalo z zelo veliko goriščno razdaljo. Ali se izkušnje skladajo s tem?
- 11*. Ali bi lahko razpršilna leča oblikovala pravo sliko? Pri odgovoru si pomagajte s konstrukcijo z nasprotne smeri – od slike proti predmetu.

12.] Pri prehodu skozi optično prizmo se curek bele svetlobe razkloni v mavrico. Zakaj tega pojava ni opaziti pri prehodu skozi šipo?

13.] Kako bi naredili uklonsko mrežico za zvočno valovanje s frekvenco 5000 s^{-1} ? Kolikšna naj bi bila širina rež in kolikšna razdalja med njimi?

14.] Kaj je globinska ostrina in s čim jo naravnavamo pri fotografskem aparatu?

15.] Po čem bi lahko zaključili, da hitrost zvoka v zraku ni odvisna od frekvence?

16.] Človek, ki namesto običajne mešanice kisika in dušika vdihuje mešanico kisika in helija, ima povišan glas. Kako bi to razložili?

17.] Vzemimo, da se zvočilo giblje pravokotno na zveznico s poslušalcem. Kakšno frekvenco zvoka sliši poslušalec?

NALOGE

1.] V razdalji 1 m od ravnega zrcala želite s fotoaparatom posneti svojo sliko v zrcalu. Na katero razdaljo morate naravnati objektiv?

Odgovor: 2 m

2.] Goriščna razdalja ukrivljenega zrcala je odvisna od krivinskega radija. Kolikšna je goriščna razdalja konkavnega zrcala s krivinskim radijem 50 cm? Kolikšna bi bila ta goriščna razdalja v vodi?

Odgovor: 25 cm
enaka

3.] Sončna svetloba vpada na vodoravno dno bazena pod kotom 25° proti navpičnici. Pod kolikšnim kotom vpada svetloba na površje vode? Lomni kvocient vode je 1,33.

Odgovor: $34,20^\circ$

4.] Točkasto svetilo, ki oddaja svetlobo v vseh smereh, je na dnu 2 m globokega bazena. Kolikšen je premer kroga na gladini vode, iz katerega svetloba izhaja v zrak?

Odgovor: 4,56 m

5*.] Na stransko ploskev optične prizme z lomečim kotom 60° vpada pod kotom 30° proti pravokotnici curek bele svetlobe. Za kolikšen kot se po lomu na prizmi razlikujeta smeri, v katerih se širita rdeča svetloba z valovno dolžino 700 nm oziroma modra svetloba z valovno dolžino 450 nm. Lomni kvocient za rdečo svetlobo je 1,4742, za modro pa 1,4820.

Odgovor: $1,38^\circ$

6.] Za koliko odstotkov se razlikujeta goriščni razdalji za rdečo in modro svetlobo pri leči, ki je narejena iz istega stekla kakor prizma iz prejšnje naloge?

Odgovor: $\frac{f_1 - f_2}{\frac{1}{2}(f_1 + f_2)} = 0,02$

7.] Prava slika predmeta nastane v razdalji 58,0 mm za zbiralno lečo z goriščno razdaljo 50,0 mm. V kolikšni razdalji pred lečo je predmet?

Odgovor: 36,3 cm

8.] S kolikšne najmanjše razdalje moramo fotografirati 1,75 m visokega moža, da bo ves na fotografiji, ki je visoka 36 mm? Goriščna razdalja objektiva je 50,0 mm.

Odgovor: 2,48 m

Odgovor: v goriščni ravnini 20 cm od optične osi

Odgovor: $2r = 0,14$ cm

Odgovor: V prvem primeru je slika v ravnini razpršilne leče, v drugem primeru pa 2,4 cm za zbiralno lečo.

Odgovor: razpršilna z goriščno razdaljo $-0,5$ m

Odgovor: Diapozitiv moramo postaviti 10,2 cm pred objektiv, projicirana slika ima velikost 1,2 m x 1,8 m.

Odgovor: $2,33^\circ$

Odgovor: 3,2 cm

Odgovor: 34 cm

Odgovor: 696 nm

Odgovor: v rumenozeleni (600 nm)

Odgovor: $f/2$

Odgovor: 0,02 mm

Odgovor: 5,8 km

9. Vzporeden curek svetlobe vpada pod kotom 20° proti optični osi na zbiralno lečo z goriščno razdaljo 55 cm. Kje za lečo se zbere curek?

10. V kolikšno pego zbere sončno svetlobo leča z goriščno razdaljo 15,0 cm? Sonce ima premer $1,4 \cdot 10^6$ km in je $1,5 \cdot 10^8$ km daleč.

11*. S konstrukcijo poiščite sliko predmeta, ki ga oblikujeta zbiralna leča z goriščno razdaljo 5,0 cm in razpršilna leča z goriščno razdaljo $-10,0$ cm, ki sta 10,0 cm narazen. Predmet je v prvem primeru 10,0 cm pred zbiralno, v drugem primeru pa 10,0 cm pred razpršilno lečo. Rezultat preverite še z računom. Najprej pogledajte, kam preslika predmet prva leča, nato pa še, kam to sliko preslika druga leča.

12*. Kratkoviden človek vidi ostro le predmete, ki niso oddaljeni več kot 0,5 m od očesa. Kakšna očala okulist predpiše človeku, da vidi ostro tudi zelo oddaljene predmete, in kolikšna je njihova goriščna razdalja?

13. S projekcijskim aparatom, ki ima objektiv z goriščno razdaljo 10,0 cm, projiciramo na 5,0 m oddaljeno steno. Kam moramo postaviti diapozitiv z dimenzijama 25 mm x 36 mm, da je slika ostrá? Kako velika je projicirana slika?

14. Curek enobarvne svetlobe z valovno dolžino 550 nm vpada pravokotno na režo s širino 0,0270 mm. Kolikšna je po prehodu skozi režo kotna širina curka?

15. Curek enobarvne svetlobe z valovno dolžino 633 nm vpada na dve tanki reži v razdalji 0,060 mm. Kolikšna je razdalja med sledmi neuklonjenega curka in ojačenega curka 1. reda na 3,0 m oddaljenem zaslonu?

16. Na uklonsko mrežico s 500 režami na milimeter vpada pravokotno curek bele svetlobe z valovnimi dolžinami od 400 nm do 700 nm. Kako široka je mavrica 1. reda na 2 m oddaljenem zaslonu?

17. Curek rumene svetlobe z valovno dolžino 589 nm vpada na uklonsko mrežico. Na uklonski sliki, ki jo opazujemo na 3,5 m oddaljenem zaslonu, je sled uklonskega curka 1. reda 32,2 cm od sledi neodklonjenega curka. Kolikšna je valovna dolžina svetlobe, katere uklonski curek 1. reda zadene zaslon 38,1 cm stran od neodklonjenega curka?

18*. Plast olja na vodi je debela 240 nm. V kakšni barvi vidimo plast v pravokotni smeri? Lomni kvocient olja je 1,25.

19. Z zaslonko $f/16$ dobimo pravilno osvetljeno fotografijo v času $1/125$ s. Katero zaslonko bi morali uporabiti pri času $1/1000$ s?

20. Žuželko, ki meri 2,3 mm, opazujemo z lupo z goriščno razdaljo 7,0 cm. Kolikšne podrobnosti še lahko opazimo na žuželki?

21. Z daljnogledom, ki ima objektiv z goriščno razdaljo 60 cm in okular z goriščno razdaljo 3,1 cm, opazujemo Luno. Kolikšne podrobnosti še lahko opazimo na njej. Razdalja do Lune je 385 000 km.

22.] Mikroskop ima objektiv z goriščno razdaljo 0,90 cm in okular z goriščno razdaljo 2,0 cm. Z njim opazujemo predmet, ki ga postavimo 1,0 mm pred gorišče objektiva. Kako moramo naravnati mikroskop, da bomo opazovali sliko predmeta v neskončnosti? Kolikšne podrobnosti še lahko vidimo?

Odgovor: 6,5 mm

23.] Kolikšna je jakost zvoka v decibelih, če je gostota zvočnega energijskega toka $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$?

Odgovor: 50 db

24.] Potniško letalo oddaja ob vzletu zvočni tok $3,0 \cdot 10^5 \text{ W}$. Kolikšna je jakost zvoka na tleh, ko je letalo 100 m daleč?

Odgovor: $2,4 \text{ W/m}^2 = 124 \text{ db}$

25.] Sluhovod v ušesu odraslega človeka meri okoli 2,5 cm. Katera je osnovna frekvenca zračnega stolpča v sluhovodu? Na enem krajišču je sluhovod odprt proti uhlju, na drugem pa zaprt z bobničem.

Odgovor: 3400 s^{-1}

26.] Nad navpično cev, napolnjeno z vodo, postavimo zvoneče glasbene vilice in počasi znižujemo gladino vode. Ko je razdalja od vilic do gladine 0,125 m oziroma 0,395 m, zračni stolpec v cevi zazveni v resonanci. Kolikšna je frekvenca glasbenih vilic? Hitrost zvoka je 340 m/s .

Odgovor: 630 s^{-1}

27.] Uглаševalec klavirja skuša uglasti struno na frekvenco 440 s^{-1} , ki mu jo dajejo glasbene vilice. Ko zvenita struna in vilice hkrati, sliši utripe s frekvenco 2 s^{-1} . Za koliko se frekvenca strune še razlikuje od frekvence vilic?

Odgovor: za dva nihaja na sekundo

28.] Zvočnika, ki nihata z enako fazo, sta 2,5 m narazen. V razdalji 3,0 m od prvega in 3,5 m od drugega zvočnika je zvok oslavljen. Kolikšna je najmanjša frekvenca zvočnika, pri kateri se to zgodi?

Odgovor: 340 s^{-1}

29.] Policijski avto ima sireno, ki oddaja zvok s frekvenco 1800 s^{-1} . Kolikšno frekvenco zazna opazovalec, ki se mu avto približuje s hitrostjo 30 m/s ? Kolikšno frekvenco pa zazna voznik v avtu, ki vozi za policijskim z enako hitrostjo? Hitrost zvoka je 340 m/s .

Odgovor: 1970 s^{-1}
 800 s^{-1}

30.] Pri ultrazvočnih preiskavah nosečnic določijo hitrost gibanja delov zarodka iz spremembe frekvence odbitega zvoka. Kolikšna je sprememba frekvence signala, ki se odbije od prsnega koša, ki se giblje s hitrostjo $0,10 \text{ m/s}$? Hitrost ultrazvoka v tkivu je 1540 m/s , frekvenca pa je $1,0 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$.

Odgovor: $64,9 \text{ s}^{-1}$

31.] Tovarniška sirena oddaja zvok s frekvenco 650 s^{-1} . Kolikšno frekvenco slišijo okoliški prebivalci v času, ko piha sever s hitrostjo $12,0 \text{ m/s}$ in je hitrost zvoka 340 m/s ?

Odgovor: Prebivalci na južni strani slišijo sireno s frekvenco 628 s^{-1} , prebivalci na severni strani pa s frekvenco 674 s^{-1} .

32.] Letalo leti v višini 6500 m v vodoravni smeri s hitrostjo, ki je 2,3-krat tolikšna kakor zvočna hitrost, 310 m/s . Koliko časa po preletu letala opazovalec na tleh zasliši značilni pok?

Odgovor: 18,9 s

33.] Za čolnom, ki se giblje po vodi s hitrostjo $8,2 \text{ m/s}$, se vleče trikotni val s polovičnim kotom 18° pri vrhu. Kolikšna je hitrost valov na vodi?

Odgovor: $2,53 \text{ m/s}$

29. | ELEKTROMAGNETNI VALOVI

ELEKTRIČNO IN MAGNETNO POLJE V OKOLICI NIIHAJNEGA KROGA

Frekvenca električnega nihajnega kroga je odvisna od induktivnosti tuljave in od kapacitete kondenzatorja. Doslej smo spoznali električni nihajni krog, ki niha s frekvenco do nekaj tisoč nihajev na sekundo. Sestavljata ga papirni kondenzator s kapaciteto okoli $1\mu\text{F}$ in tuljava s feritnim jedrom z induktivnostjo okoli $0,1$ henry. Med nihanjem je električno polje skoraj v celoti znotraj kondenzatorja, magnetno polje pa skoraj v celoti znotraj tuljave. Lahko pa zgradimo nihajni krog, ki niha z večjo frekvenco. Vzamemo npr. prazno tuljavo z majhnim številom ovojjev in ploščat kondenzator z majhnima ploščama v velikem razmiku. Nihajni krog s pozitivno povratno vezjo povežemo v oscilator, da dobimo stalno nihanje.

V žičnem ovoju z žarnico, ki ga namestimo vrh tuljave, se ob nihanju inducirata napetost in tok, da žarnica sveti. Ko nihajnemu krogu približamo enak nihajni krog in ga z vrtilnim kondenzatorjem še dodatno uglasimo, zažari v tuljavo vključena žarnica. V bližini nihajočega nihajnega kroga je očitno nihajoče magnetno polje. To polje z indukcijo povzroči nihanje v bližnjem nihajnem krogu, ki ima enako lastno frekvenco in je zato v resonanci s prvim krogom.

Naredimo še en korak k višjim frekvencam. Nihajni krog naj predstavlja en sam žični ovoj. Z enakim žičnim ovajem, v katerega vgradimo majhno žarnico, se prepričamo, da krog res niha in je v njegovi bližini nihajoče polje, ki vzbudi nihanje v enakem krogu v bližini. Nihanje kroga lahko odkrijemo tudi s primerno dolgo ravno kovinsko palico – *dipolno anteno*. Žarnica, ki jo zvežemo v sredino med dva dela okoli meter dolge antene, sveti, ko se z njo približamo oscilatorju. Namestimo enako dolgo dipolno anteno brez žarnice v bližino oscilatorja. Z vzporedno sprejemno anteno z vgrajeno žarnico lahko ugotovimo, da sega sedaj polje dalj v okolico. Če namesto žarnice priključimo med dela antene primeren instrument, bo zaznali polje antene še daleč stran.

Antena je prevzela vlogo nihajnega kroga. V nihajnem krogu se pretaka naboj z ene plošče kondenzatorja na drugo skozi tuljavo. V anteni se pretaka naboj med krajiščema palic, ki nadomeščata plošči kondenzatorja, po srednjem delu, ki nadomešča tuljavo. Ko sta krajišči anten nabiti, je med njima električno polje, ki se razteza v okolico antene.



Slika 29.1 Novinar televizijske družbe CNN v Bagdadu pred prenosnim oddajnikom, ki oddaja informacije satelitu.

Ko se naboj pretaka po vmesnem delu antene, obkroža anteno magnetno polje, ki prav tako sega v okolico. Električno polje je v ravnini antene, magnetno polje pa je v ravnini, ki je pravokotna na anteno. Električno polje antene povzroča nihanje električnega toka v enako dolgi anteni, ki jo postavimo vzporedno s prvo. Magnetno polje povzroči nihanje električnega toka v žični zanki, ki jo postavimo v ravnino antene. Tako v prvem kakor v drugem primeru lahko tok zaznamo z vključeno žarnico ali z vključenim instrumentom.

Zdi se, da bi bilo električno polje antene lahko podobno električnemu polju v okolici električnega dipola, to je dvojice točkastih nabojev – pozitivnega in negativnega – ki mirujeta ločena drug od drugega. Prav tako bi bilo magnetno polje antene lahko podobno magnetnemu polju v okolici vodnika, po katerem teče električni tok. Za obe polji vemo, da se raztezata neomejeno daleč. Ker pa je v anteni izmenični tok, ki niha z veliko frekvenco, se moramo vprašati, kako polje sledi naglim spremembam v anteni. Ali se razširjajo polja in njihove spremembe z neomejeno ali s končno hitrostjo? V prvem primeru polje v vsem prostoru okoli antene sledi spremembam v anteni brez zakasnitve, v drugem primeru pa polje v večji razdalji bolj kasni za anteno kakor v manjši razdalji. Opraviti imamo z *valovanjem*.

Odgovor poiščemo s poskusom. Nekaj metrov stran od oddajne antene z oscilatorjem postavimo vzporedno z njo velik kovinski zaslon. Z drugo anteno preiščemo prostor med oddajno anteno in zaslonom.

Vidimo, da se med anteno in zaslonom vzpostavi *stoječe valovanje električnega polja*. Spremlja ga tudi *stoječe valovanje magnetnega polja*, vendar ga ne moremo zaznati s preprostimi šolskimi napravami. Tako ugotovimo, da se električno in magnetno polje razširjata s končno hitrostjo. Od antene, v kateri niha električni tok z veliko frekvenco, se razširjata v prostor valovanji električnega in magnetnega polja.

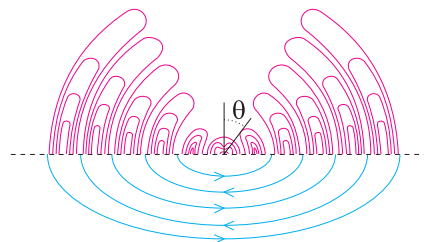
S poskusom določimo tudi hitrost, s katero se razširjata polji po prostoru. Če uporabimo oscilator, ki niha s frekvenco $1,5 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$, je razmik med zaporednima vozloma električnega polja okoli 1,0 m. Valovna dolžina valovanja je tedaj okoli 2,0 m, hitrost valovanja pa

$$c = \lambda \nu = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

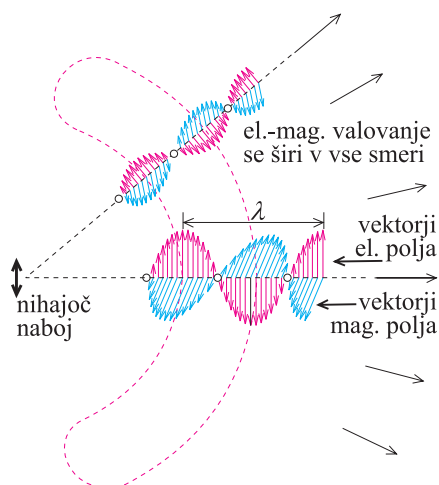
To je *hitrost svetlobe*.

RAZŠIRJANJE ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA

Električno in magnetno polje ne valujeta neodvisno. Slika 29.2 kaže trenutno sliko električnega in magnetnega polja v veliki razdalji od dipolne antene. Električno polje predstavimo s silnicami, ki so v ravnini antene. Vidimo, da so sklenjene. Prostorsko gledano spominja oblika električnega polja na čebulne liste. Antena je v njihovi osi. Magnetno polje predstavimo s koncentričnimi krožnimi silnicami, katerih središče je v osi antene in ki so v ravninah pravokotno na anteno.



Slika 29.2 silnice električnega in magnetnega polja v veliki razdalji okoli dipolne antene



Slika 29.3 trenutna slika električnega in magnetnega polja okoli dipolne antene v izbranih smereh

Slika 29.3 kaže trenutno sliko električnega in magnetnega polja vzdolž smeri, v kateri se širi valovanje. Vidimo, da nihata električno in magnetno polje v valovanju z isto fazo, da sta pravokotni drugo na drugo in pravokotni na smer razširjanja. Valovanje je torej transverzalno. Ker nihata električno in magnetno polje v stalnih ravninah, pravimo, da je valovanje tudi *linearno polarizirano*. Brez dokaza zapišimo, da sta velikosti jakosti električnega polja in gostote magnetnega polja v valovanju sorazmerni in da velja zveza

$$E = c B .$$

Z antenami ponavadi zaznavamo električno polje, ne pa magnetnega.

Ostane nam še odgovor na vprašanje, kako se električno in magnetno polje razširjata po prostoru.

Spomnimo se valov na vodni gladini, ki se razširjajo od mesta, kamor smo vrgli droben kamen. Gladina v veliki razdalji še vedno valuje, medtem ko na mestu izvira že davno miruje. Pojav smo si razlagali s *Huygens-Fresnelovim* načelom. Po njem predstavlja vsak del valujoče gladine nov izvir valovanja. Valovanja iz množice izvirov se sestavljajo v novo valovanje, ki se tako širi naprej neodvisno od izvira.

Ali si tudi razširjanje električnega in magnetnega polja lahko razlagamo podobno?

Zakoni električnega in magnetnega polja povedo, da polji za svoje neodvisno razširjanje potrebujeta le drugo drugega. Spomnimo se indukcijskega zakona. Ob njem smo spoznali, da spremembe magnetnega pretoka v sklenjenem krogu povzročijo inducirano napetost. Le-ta je posledica električnega polja, ki nastane v spremenljivem magnetnem polju. V spremenljivem električnem polju pa nastane magnetno polje. O tem pojavu doslej nismo govorili. Pokažemo pa ga lahko z naslednjim poskusom.

S tuljavo z nekaj ovoji in s ploščatim kondenzatorjem sestavimo nihajni krog, ki niha v resonanci z oscilatorjem iz prejšnjega poskusa. S tuljavo, ki je zvita v svitek, objemimo vodnik, ki povezuje tuljavo in kondenzator. Zaznamo inducirano napetost, ki je posledica nihajočega magnetnega polja okoli vodnika, po katerem teče izmenični tok. Vtaknimo tuljavo še med plošči kondenzatorja. Tudi sedaj izmerimo inducirano napetost, kljub temu da tuljava ne objema toka. Objema pa spreminjajoče se električno polje. Inducirana napetost je posledica magnetnega polja, ki ga povzroča nihajoče električno polje med ploščama kondenzatorja.

Spremenljivo električno in magnetno polje generirata drugo drugega in se tako razširjata v prostor. Zaradi povezanosti valujočih polj govorimo o *elektromagnetnem valovanju* (okrajšano, EM valovanje).

ENERGIJA ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA

Kakor vsako valovanje, tudi EM valovanje prenaša energijo. Gostoto energijskega toka, j , izrazimo kot produkt povprečne gostote energije in hitrosti valovanja, c :

$$j = \overline{w} c .$$

H gostoti energije prispevata z enakima deležema tako električno kakor magnetno polje. Ponavadi izrazimo povprečno gostoto energije s povprečnim kvadratom jakosti električnega polja:

$$\overline{w} = \varepsilon_0 \overline{E^2} .$$

Če je valovanje sinusno, je povprečni kvadrat jakosti električnega polja enak polovici kvadrata amplitudne jakosti

$$\overline{E^2} = \frac{1}{2} E_0^2 ,$$

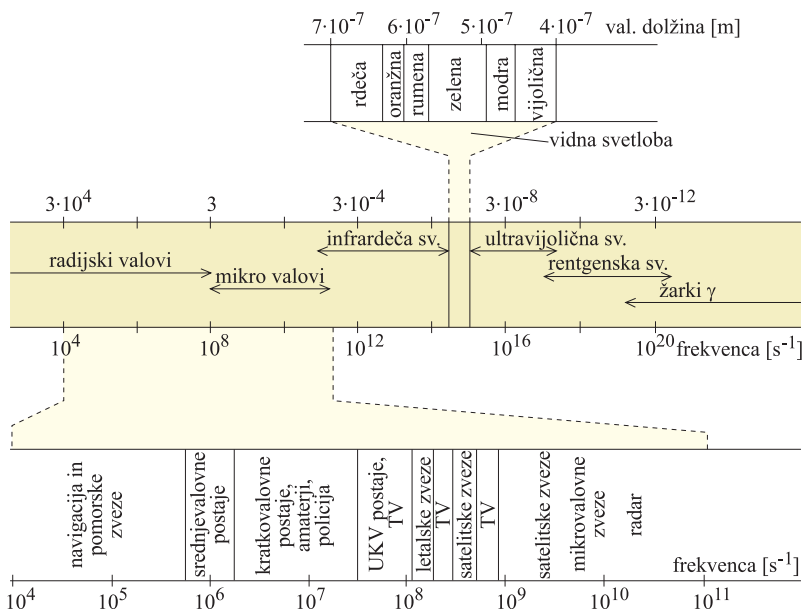
tako da je gostota energijskega toka

$$j = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2 c .$$

? Izrazite gostoto energijskega toka EM valovanja tudi z amplitudo gostote magnetnega polja v valovanju.

Kolikšna je jakost električnega polja v valovanju, pri katerem je gostota energijskega toka 1 kW/m^2 . Kolikšna pa je amplituda gostote magnetnega polja?

VRSTE ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA

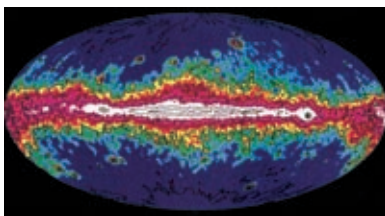


Slika 29.4 spekter elektromagnetnega valovanja

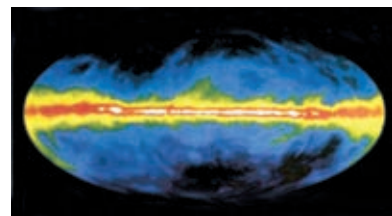
Elektromagnetna valovanja so med najbolj raznolikimi valovanji v naravi. Slika 29.4 kaže valovne dolžine in frekvence znanih elektromagnetnih valov. Najdaljše so valovne dolžine *radijskih valov*, sledi jim *toplotno sevanje* ali *infrardeča svetloba*, pa *vidna svetloba*, *ultravijolična svetloba* in *rentgenska svetloba*. Vsem valovanjem je skupno, da se razširjajo po praznem prostoru s hitrostjo 300.000 km/s in da nastajajo pri nihanju nabitih delcev. O radijskih valovih in njihovi uporabi bomo govorili v tem poglavju, o svetlobi pa v naslednjih.

Slika 29.5a) Slika Rimske ceste v rentgenski svetlobi. Najsvetlejša področja kažejo najgostejša območja plina.

b) Slika Rimske ceste v radijskem delu elektromagnetnega spektra. V tej valovni dolžini proučujejo porazdelitev nevtralnega vodika. Kakor kaže slika, je osredotočen v ravnini Rimske ceste.

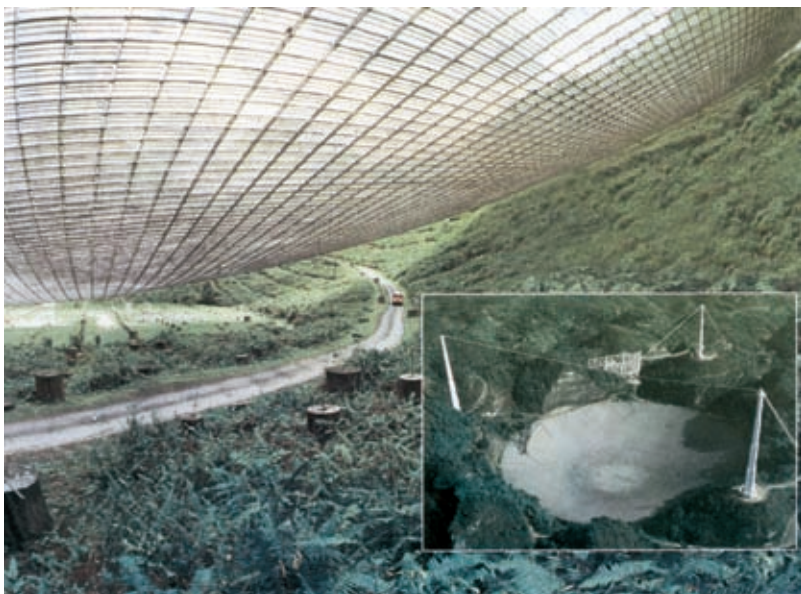


a)



b)

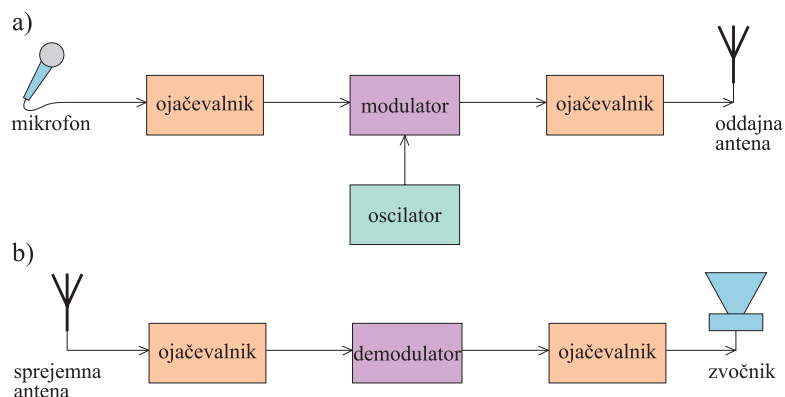
Radijski valovi, ki jih generira šolski oddajnik, imajo valovno dolžino okoli 2 m. To je v območju *ultrakratkih radijskih valov* (UKV). Take valove oddajajo krajevne radijske postaje. Nacionalne radijske postaje navadno oddajajo *srednje dolge radijske valove* z valovno dolžino od nekaj 100 do 1000 m. Pomorske radijske zveze potekajo z dolgimi radijskimi valovi z valovno dolžino do nekaj 10000 m. Televizijske postaje oddajajo valovanje z valovno dolžino nekaj decimetrov. Radarske postaje pa oddajajo *mikrovalove* z valovno dolžino nekaj centimetrov in manj.



Slika 29.6 Največja radijska antena na svetu je blizu kraja Areciba v Porto Ricu. Postavljena je v kraški vrtači.

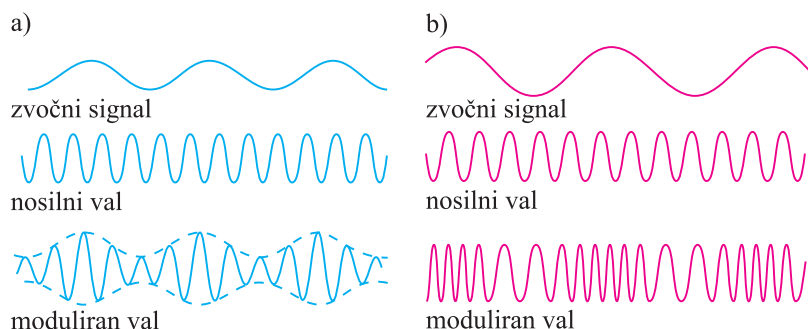
Osrednji del radijskih oddajnikov je *oscilator*, ki napaja oddajno anteno z visokofrekvenčnim izmeničnim tokom. Dolžina in oblika antene sta prilagojeni valovni dolžini valovanja. V anteni pride do močnega nihanja toka, če je njena dolžina enaka polovici valovne dolžine valovanja. Električni naboj v anteni niha tedaj podobno kakor zrak v piščali, ki je zaprta na obeh koncih. Pri radijskih postajah, ki oddajajo srednje in dolge valove, je dolžina antene četrta valovne dolžine valovanja. Nihanje naboja v anteni je enako nihanju zraka v piščali, ki je na enem koncu odprta, na drugem pa zaprta.

Valove sprejemamo z anteno, ki je vzporedna z oddajno anteno. Z električnim tokom iz antene napajamo *nihajni krog*, ki mu lahko z vrtljivim kondenzatorjem spreminjamo lastno frekvenco in tako dosežemo, da je krog v resonanci z oddajno postajo.



Slika 29.7 shema radijskega oddajnika (a) in sprejemnika (b)

Radijsko valovanje v prvi vrsti uporabljamo za prenašanje sporočil. Slika 29.7 shematično kaže oddajanje in sprejemanje sporočil pri radiu. Sporočilo vgradimo v *nosilno radijsko valovanje* z *moduliranjem* in ga izluščimo iz njega z *demoduliranjem*. Slika 29.8 kaže spremembo nosilnega valovanja pri *amplitudnem* in *frekvenčnem moduliranju*. Pri prvem se v ritmu sporočila spreminja amplituda, pri drugem pa frekvenca nosilnega valovanja.

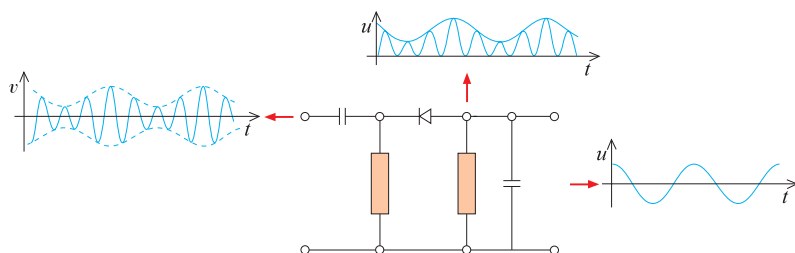


Slika 29.8 amplitudno (a) in frekvenčno (b) modulirano radijsko valovanje

Slika 29.9 shematično kaže spremembe sprejetega amplitudno moduliranega signala pri demoduliranju.

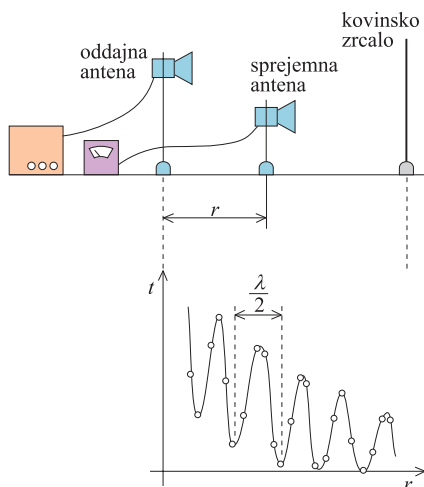
Zaradi moduliranja valovanje ni več sinusno. Namesto ene *nosilne* frekvenca, ki bi bila enaka frekvenci oscilatorja v oddajniku, je v spektru okoli nosilne frekvenca cel *frekvenčni pas*. Da se zaradi tega radijske postaje med seboj ne bi motile, morajo biti njihove nosilne frekvenca dovolj daleč vsaksebi.

? Poučite se o tehniki radijskega sprejemanja in oddajanja. Če se sami ukvarjate z radioamaterstvom, pripravite o svojem delu referat in z njim seznanite sošolce.



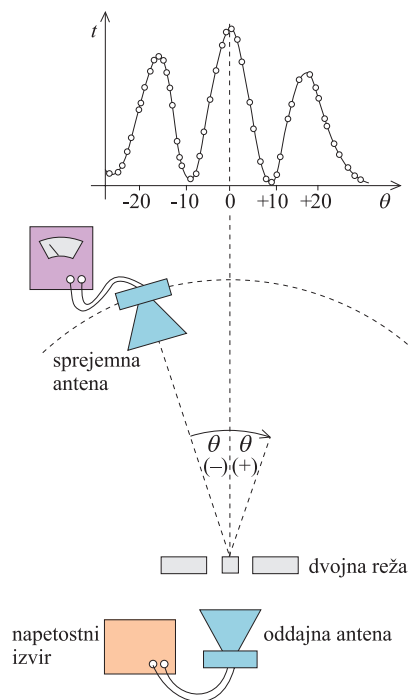
Slika 29.9 demoduliranje amplitudno moduliranega radijskega valovanja

? V kolikšni razdalji naj radioamater postavi dipole pri anteni za valovanje z valovno dolžino 2 m, da bo najbolje oddajal in sprejemal v smeri, ki je pravokotna na ravnino antene, nič pa v ravnini antene?



Slika 29.10 nastanek stoječih mikrovalov

Slika 29.11 uklon mikrovalov na dvojni reži



Elektromagnetni valovi kažejo vse valovne lastnosti, ki jih poznamo pri drugih valovanjih. Z radijskimi valovi iz šolskega oddajnika smo že oblikovali stoječe valove, ki so posledica interference. Interferenco radijskih valov dobro poznajo tudi radioamaterji. Pogosto gradijo antene z več vzporednimi dipoli. S pravo izbiro razdalj med njimi dosežejo, da lahko sprejemajo in oddajajo le v izbrani smeri.

Tudi z mikrovalovi smo že naredili nekaj poskusov. Slika 29.11 kaže poskus, s katerim prikažemo uklon in interferenco mikrovalov, slika 29.10 pa poskus, ki kaže nastanek stoječega valovanja. Pri tem poskusu izmerimo, da je valovna dolžina valovanja 2,8 cm. Frekvenca je torej okoli 10^{10} s^{-1} .

30. SVETLOBA

Infrardečo svetlobo, vidno svetlobo in ultravijolično svetlobo oddajajo razna svetila. Predstavljamo si, da oddajajo svetlobo elektroni, ki z veliko frekvenco nihajo v snoveh. Svetlobo dobimo tudi od elektronov, ki krožijo s skoraj svetlobno hitrostjo v obroču velikega pospeševalnika – *sinhrotrona*, ali pa v *shranjevalnih obročih* (slika 30.2). Za oddajanje svetlobe je enako kakor za oddajanje EM valovanja nasploh odločilen pospešek nabitega delca – v tem primeru elektrona. Od velikosti pospeška je odvisna valovna dolžina oddane svetlobe. Pri dovolj velikih pospeških nastaja tudi *rentgenska svetloba*.

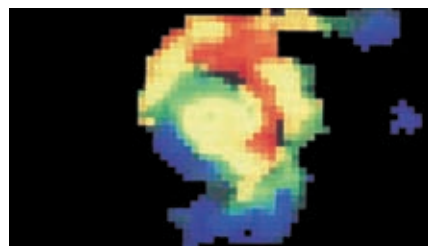


V tem poglavju bomo govorili predvsem o vidni svetlobi. Ta prihaja na Zemljo s Sonca in zvezd, oddajajo pa jo tudi različna druga svetila. S svetlobo s Sonca dobiva Zemlja energijo, ki omogoča življenje.

SVETLOBNI TOK

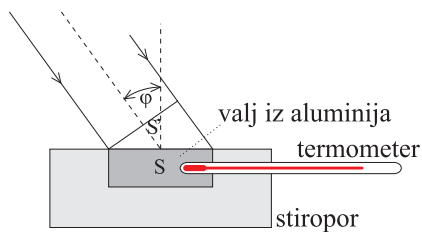
Da prinaša svetloba energijo, vemo iz lastne izkušnje, saj čutimo, kako nas greje na soncu, v bližini ognja ali močne žarnice. Za energijski tok svetlobe velja, kar smo spoznali že pri obravnavanju energijskega toka v elektromagnetnem valovanju. Zaradi pomembnosti in nekaterih posebnosti energijski tok svetlobe ali *svetlobni tok*, kakor ga navadno imenujemo, posebej obravnavamo.

Določimo svetlobni tok sončne svetlobe. V šolski zbirki poiščemo aluminijast valj, ga vtisnemo v kos stiropora in počrnimo po odkriti ploskvi. Svetloba, ki vpada na počrnjeno ploskev, se skoraj vsa *vpije* ali *absorbira*. Na odprtem počakamo, da se temperatura valja ustali, nato pa ga za nekaj minut izpostavimo sončni svetlobi. Za kasnejše razmišlja-



Slika 30.1 Rimska cesta v infrardeči svetlobi

Slika 30.2 a) sinhrotron ELETTRA na Bazonvici pri Trstu med gradnjo
b) shema obroča s pospeševalnimi celicami, magneti in merilnimi postajami



Slika 30.3 merjenje svetlobnega toka

nje določimo še kot, pod katerim vpada svetloba na počrtno ploskev valja (slika 30.3). Pri našem poskusu je imel valj maso 300 g in počrtno osnovno ploskev s ploščino 50 cm^2 . Ko je nanj v pravokotni smeri vpadala sončna svetloba, se je v 5 minutah segrel za 3,4 K. Sklepamo, da se je notranja energija valja povečala za energijo, ki jo je prinesla svetloba. Iz enačbe, v kateri postavimo, da je sprememba notranje energije valja, $m c_p \Delta T$, enaka sprejeti svetlobni energiji $P \Delta t$:

$$m c_p \Delta T = P \Delta t ,$$

izračunamo svetlobni tok P , ki ga je prejemal valj. Dobimo, da je P okoli 3 W. Ker je bila pri poskusu počrtna ploskev valja pravokotna na smer razširjanja svetlobe, predstavlja ta podatek svetlobni tok v curku svetlobe, katerega prečni presek je enak osnovni ploskvi valja. Ker je svetlobni tok po vsem preseku enakomeren, lahko določimo še *gostoto svetlobnega toka*:

$$j = \frac{P}{S} = 600 \text{ W/m}^2 .$$

* Če bi bila ploskev valja nagnjena proti vpadajoči svetlobi, bi bil sprejeti svetlobni tok manjši. Enak bi bil svetlobnemu toku v curku svetlobe, ki bi imel za prečni presek projekcijo počrtnene ploskve valja na ravnino, pravokotno na smer curka. S slike 30.3 razberemo, da je svetlobni tok v tem primeru

$$P' = j S' = j S \cos \varphi ,$$

če je φ kot med smerjo vpadne svetlobe in pravokotnico na ploskev. O pravilnosti enačbe se lahko prepričamo z merjenjem. Kvocient med svetlobnim tokom in velikostjo osvetljene ploskve,

$$j' = \frac{P'}{S} = j \cos \varphi ,$$

imenujemo *osvetljenost*.

Dobljeni rezultat je blizu vrednosti za gostoto sončnega svetlobnega toka v naših krajih. Gostota sončnega svetlobnega toka ob vstopu v atmosfero je okoli $1,4 \text{ kW/m}^2$. Do tal pride torej le okoli polovica vpadlega toka.

Izsevani svetlobni tok je med pomembnimi podatki o lastnostih svetil. Imenujemo ga tudi *svetlobna moč* ali *izsev*, označujemo pa z znakom P^* . Pri točkastem svetilu, ki oddaja svetlobo na vse strani enakomerno, je svetlobni tok v razdalji r enakomerno porazdeljen po krogli s svetilom v središču. Izsev P^* je tedaj kar

$$P^* = 4\pi r^2 j ,$$

če je j gostota svetlobnega toka v tej razdalji. Za zgled izračunajmo izsev Sonca. Iz podatka o gostoti svetlobnega toka ob vstopu v zemeljsko atmosfero in upoštevajoč, da je razdalja do Sonca okoli 150 milijonov kilometrov, dobimo

$$P^* = 4,0 \cdot 10^{26} \text{ W} .$$

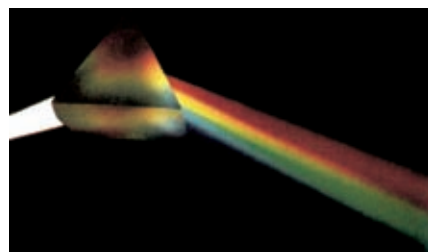
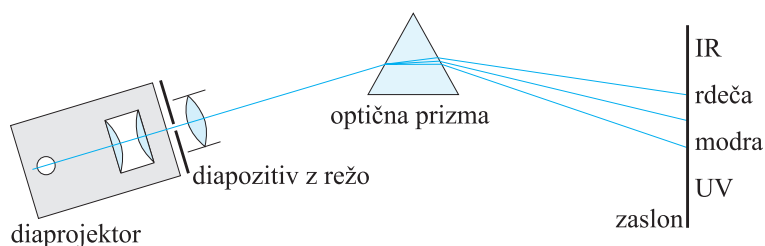
Izsev žarnic je približno enak električni moči, saj žarnica odda skoraj vso prejeto električno moč s svetlobo. Kolikšen delež izsevanega svetlobnega toka pa je uporaben za razsvetljavo, je odvisno od *spektra* svetlobe.

SPEKTER SVETLOBE

Raziščimo spekter svetlobe, ki jo oddaja žarnica v projekcijskem aparatu. Namesto diapozitiva vtaknemo v projektor ploščico s tanko režo in preslikamo režo na zaslon. V curek svetlobe vtaknemo uklonsko mrežico s sto ali več režami na milimeter. Na zaslonu se bela svetloba luči razkloni v *mavrico*, v kateri se mavrične barve od rdeče do modre zvezno prelivajo druga v drugo. Podobno sliko dobimo, ko z mrežico razklonimo ozek curek sončne svetlobe.

Pri uklonski mrežici se iz curka svetlobe z eno valovno dolžino oblikuje več redov uklonskih curkov. Koti, pod katerimi nastanejo, so odvisni od razmerja med razmikom med sosednjima režama in valovno dolžino svetlobe. Če dobimo sedaj iz curka bele svetlobe v vsakem uklonskem redu pahljačo barv, pomeni, da je bela svetloba sestavljena. Različnim barvam ustrezajo sestavine z različno valovno dolžino. Mavrica predstavlja *spekter* žarnice. Ker prehajajo barve v njej zvezno druga v drugo, pravimo, da je spekter *zvezen*.

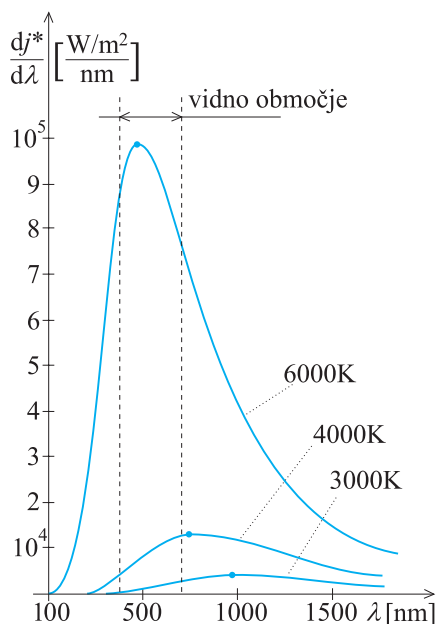
Mavrico omejujeta modra in rdeča svetloba. Za modro svetlobo določimo valovno dolžino okoli 400 nm, za rdečo pa okoli 700 nm. Med njima so valovne dolžine preostalih mavričnih barv.



Slika 30.4 prikaz spektra svetlobe iz žarnice s spektrometrom na prizmo

Svetilo pa oddaja svetlobo tudi zunaj teh meja. Vzemimo namesto mrežice optično prizmo (slika 30.4). Mavrica na zaslonu je sedaj ožja in svetlejša. S počrnjenim termočlenom odkrijemo na območju valovnih dolžin, ki so daljše od valovne dolžine rdeče svetlobe, to je na območju infrardeče svetlobe, veliko večji svetlobni tok kakor v vidnem delu. Manjši del svetlobnega toka pripada tudi ultravijolični svetlobi, ki ima valovno dolžino manjšo od tiste, ki jo ima modra svetloba. Fluorescenčni zaslon, ki ga postavimo na to območje, se zelenkasto sveti.

Raziščimo še svetlobo, ki jo oddaja *fluorescenčna žarnica*, v kateri svetijo pare živega srebra. Na mavrico so naložene ostre črte, ki kažejo, da so deleži nekaterih valovnih dolžin posebej izraziti. Pare živega srebra oddajajo samo svetlobo nekaj valovnih dolžin – pravimo, da je njihov spekter *črtast*. Zlasti izrazite so črte na območju modre in ul-



Slika 30.5 spekter svetlobe črnega telesa pri različnih temperaturah

travijolične svetlobe. Pretežni del ultravijolične svetlobe absorbira fluorescenčni premaz, ki namesto nje oddaja svetlobo z zveznim spektrom in z daljšimi valovnimi dolžinami. Nekaj ultravijolične svetlobe pa kljub vsemu prodre skozi premaz in skozi steklo. Fluorescenčni zaslon pokaže dve očem sicer nevidni črti.

* Spekter svetlobe prikažemo na enak način kakor spekter zvoka. Pri črtastem spektru moramo poleg valovnih dolžin navesti še pripadajoči svetlobni tok ali gostoto svetlobnega toka. Pri zveznem spektru pa moramo poleg valovnih dolžin navesti svetlobni tok ali njegovo gostoto na enoto intervala valovnih dolžin.

Izmed svetil, ki oddajajo svetlobo z zveznim spektrom, je zlasti pomembno črno telo, o katerem smo že govorili. Spoznali smo, da je po Stefanovem zakonu gostota izsevanega svetlobnega toka sorazmerna s četrto potenco absolutne temperature (glej učbenik Mehanika in toplota). Od absolutne temperature je odvisen tudi spekter izsevane svetlobe. Nekaj spektrov za različne temperature kaže slika 30.5.

Spekter svetlobe črnega telesa obravnavata Planckov in Wienov zakon. Prvi podaja obliko spektra, drugi pa povezuje temperaturo in valovno dolžino, pri kateri ima spekter maksimum. Po Wienovem zakonu je produkt valovne dolžine pri maksimu spektra in temperature za vsa črna telesa konstanten. Iz podatkov za Sonce, ki ima pri površinski temperaturi 5700 K maksimum spektra pri 505 nm, izračunamo, da je

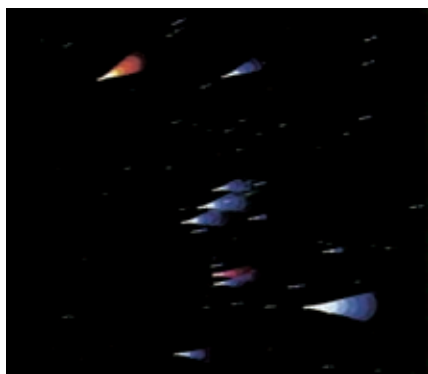
$$\lambda_m T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m K} .$$

To vrednost imenujemo Wienova konstanta. Iz zgornje enačbe izračunamo, da ima npr. spekter žarnice, ki ima nitko s temperaturo 3000 K, maksimum pri 970 nm, spekter sveče, ki ima plamen s temperaturo okoli 1000 K, pa pri 2900 nm in tako naprej. Pri izbiri svetil za razsvetljavo pazimo, da ima njihova svetloba spekter, ki je čim bolj podoben spektru sončne svetlobe.

Spektri svetlobe, ki jo oddajajo različne snovi, so pomembni pri raziskavah zgradbe snovi, zlasti atomov. Spektri svetlobe, ki jih sevajo plini iz prostih atomov, so črtasti in značilni za vsak element. Pomagali so pri razvozlavanju zgradbe atomov in molekul. Omogočajo pa tudi hitro analizo spojin. Svetloba zvezd in drugih teles ali sistemov teles v vesolju je astronomom in astrofizikom osnova za raziskovanje vesolja. Iz spektra svetlobe določajo sestav, temperaturo, hitrost teles in njihovih delov in mnoge druge podatke. Z njimi preverjajo pravilnosti modelov, ki ponazarjajo razvoj zvezd, zvezdnih sistemov in vesolja.

Svetlobo oddajajo tudi osvetljena telesa. Zaznavamo jih prav zaradi svetlobe, ki jo odbijajo ali razpršujejo. Spekter te svetlobe je odvisen od spektra vpadle svetlobe in od odbojnosti teles.

Spekter svetlobe, ki se odbija od belega papirja, je enak spektru vpadle svetlobe. Papir je npr. bel, če ga osvetljuje sončna svetloba, rdeč, če ga osvetljuje rdeča svetloba, in tako naprej. To je zato, ker odbija vso



Slika 30.6 različne barve svetlih zvezd ozvezdja Orion

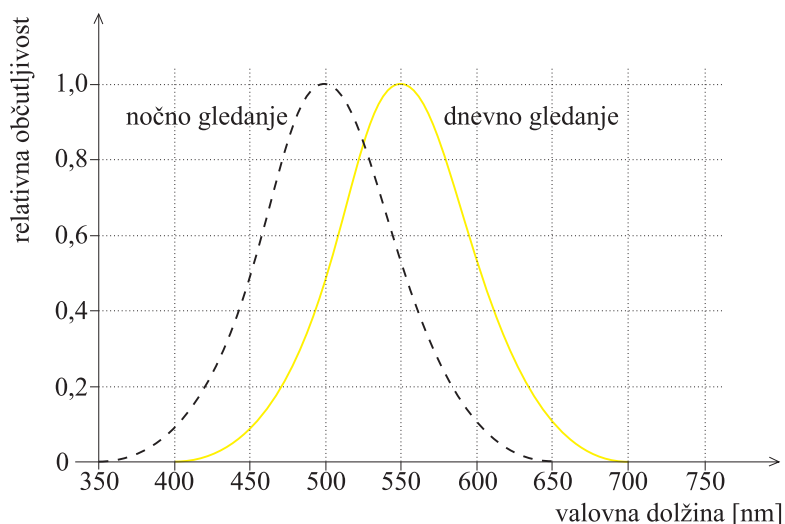
vidno svetlobo enako. Tudi spekter svetlobe, ki se odbija od *sivih teles*, je enak spektru vpadle svetlobe. Le delež odbite svetlobe je manjši kakor pri belem papirju.

Drugače je pri obarvanih telesih. Ta odbijajo svetlobo z izbranimi valovnimi dolžinami močneje kakor drugo. Rdeč papir odbija rdečo svetlobo, ne odbija pa zelene ali modre. Če ga osvetlimo z belo svetlobo, vpija vse dele spektra, razen rdečega, ki ga odbije. Če pa ga osvetlimo z zeleno svetlobo, ni odboja in papir se nam zdi črn. Kako predmeti odbijajo svetlobo z različnimi valovnimi dolžinami, lahko hitro vidimo, če jih osvetlimo z mavrico. Deli predmeta, s katerih ni odboja, so videti temnejši.

* OKO IN BARVE

Spomnimo se sestave človeškega očesa. Roženica in očesna leča zbereta svetlobo, ki prihaja od predmetov v okolici, na mrežnico, ki je občutljiva za svetlobo. Na njej je kakih 100 milijonov za svetlobo občutljivih *čepkov* in *paličic*, ki so prek živčnih končičev povezani med seboj in z možgani. Paličice, ki so občutljivejše, omogočajo predvsem gledanje v mraku, čepki pa omogočajo zaznavanje barv. Odkrili so tri vrste čepkov, od katerih je ena občutljiva predvsem za rdečo svetlobo, druga predvsem za zeleno in tretja predvsem za modro.

Oko zaznava svetlobo z valovno dolžino od okoli 400 nm do okoli 700 nm. Najobčutljivejše je pri valovni dolžini 555 nm v rumenozelenem delu spektra, to je v bližini maksima v spektru svetlobe s Sonca. Pri tej valovni dolžini zazna oko še svetlobni tok z gostoto 10^{-12} W/m^2 . Relativno občutljivost očesa kaže graf na sliki 30.7.



Slika 30.7 relativna občutljivost človeškega očesa

Sončno svetlobo oko zaznava kot belo. Tudi po tem, ko s prizmo ali kako drugače razklonimo sončno svetlobo v mavrico, oko sporoči, da je svetloba bela, če gledamo na zaslon pod tolikšnim kotom, da se

? V kaki enciklopediji si preberite podrobnosti o barvah in barvnem gledanju. Kako deluje barvni televizor? Kako pa kamera za barvno snemanje? Kako nastane barvna fotografija? Kako mešajo barve slikarji?

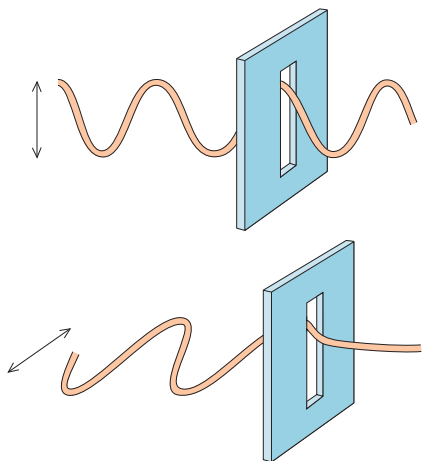
mavrica zoži v tanko progo. Vtis bele svetlobe dobimo torej takrat, ko na isti del mrežnice vpada vsa mavrica vidnih barv hkrati.

Vtis, da je svetloba bela, pa lahko dobimo tudi, če je spekter svetlobe drugačen. Posreči se že s primerno mešanico modre, zelene in rdeče svetlobe. Z istimi komponentami v drugačnem razmerju pa lahko ustvarimo skoraj poljuben barvni vtis. To izkorišča barvna televizija. Pod povečevalnim steklom vidimo, da je zaslon barvnega televizorja sestavljen iz rdečih, zelenih in modrih pik, ki so pri različnih barvah različno svetle. Iz razdalje, v kateri navadno gledamo na zaslon, pik ne ločimo med seboj, zato dajejo enoten barvni vtis.

* | POLARIZACIJA PRI SVETLOBI

Videli smo, da je EM valovanje transverzalno in da antene oddajajo linearno polarizirano valovanje, v katerem niha električno polje v ravnini antene, magnetno polje pravokotno nanjo, obe pa pravokotno na smer razširjanja. Električno polje v valovanju lahko odkrijemo z anteno, ki je vzporedna z oddajno.

Preučimo nekoliko podrobneje, kako je s polarizacijo pri mikrovalovih, ki so za poskuse najprimernejši! Usmerimo curek mikrovalov od oddajnika proti sprejemniku in vrtimo trobljo sprejemnika okoli vzdolžne osi. Pri tem se okoli iste osi vrtili tudi drobna sprejemna dipolna antena v sprejemniku. Tok po anteni se spreminja. Po prejšnjem sklepamo, da je sprejemna antena vzporedna z električnim poljem, ko je tok največji, in da je nanj pravokotna, ko toka ni. Tako lahko s sprejemno anteno odkrijemo ravnino, v kateri niha električno polje v mikrovalovih. Ob mikrovalovih pa spoznamo še en način za odkrivanje polarizacije. Postavimo v curek valov med oddajnik in sprejemnik kovinsko rešetko, ki jo sestavljajo vzporedne žice, napete kak centimeter narazen. Hitro uvidimo, da prepušča rešetka mikrovalove, pri katerih niha električno polje pravokotno na žice, ne prepušča pa mikrovalov, pri katerih niha električno polje vzporedno z žicami. Tedaj namreč povzroči električno polje v žicah nihajoč električni tok, zaradi česar se vpadlo valovanje deloma absorbira, deloma odbije. Če je nihajna ravnina električnega polja v vpadnem valovanju nagnjena proti žicam, prepušča rešetka le komponento električnega polja, ki je pravokotna na žice. S sprejemno anteno se lahko prepričamo, da je prepuščeno valovanje linearno polarizirano, pri čemer je ravnina, v kateri niha električno polje, res pravokotna na žice v rešetki. Pravimo, da je rešetka *polarizator* za mikrovalove.



Slika 30.8 Polarizacija pri valovanju na vrvi. Skozi režo gre lahko le valovanje, v katerem nihajo delci vzporedno z režo.

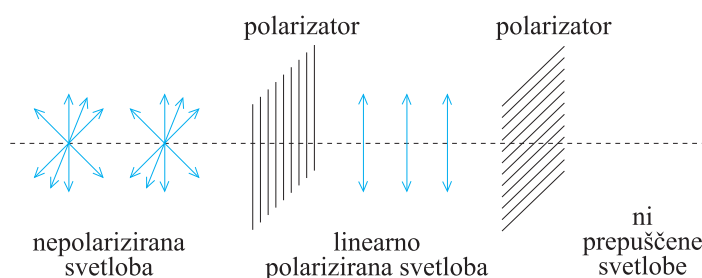
Polarizatorje s podobnim učinkom si lahko zamislimo tudi pri drugih transverzalnih valovanjih. Slika 30.8 ponazarja delovanje polarizatorja za valovanja na vrvi. Vrv napeljemo skozi režo med vzporednima palicama. Ker lahko nihajo deli vrvi le vzdolž reže, je prepuščeno valovanje linearno polarizirano v smeri reže.

Tudi svetlobo lahko polariziramo. Polarizatorji za svetlobo so poleg nekaterih kristalov, ki jih najdemo v naravi, tudi folije polivinilalko-

hola, prepojene z jodom. Uporabljajo jih za izdelavo sončnih očal. Delujejo podobno kakor rešetka za mikrovalove. Električno polje v prepuščeni svetlobi niha v ravnini, ki je pravokotna na smer, v kateri so v foliji poravnane molekule polivinilalkohola.

Polarizator preizkusimo s svetlobo laserja, ki je velikokrat že linearno polarizirana. Polarizator postavimo pravokotno v curek svetlobe in opazujemo pego na zaslonu ali merimo svetlobni tok s fotocelico. Ko sučemo polarizator okoli osi, ki je vzporedna s curkom, se spreminjata svetlost pege na zaslonu ali tok skozi fotocelico. Podobno kakor pri poskusih z mikrovalovi določimo ravnino nihanja električnega polja v curku.

Ko usmerimo na polarizator curek svetlobe iz žarnice ali iz drugih podobnih svetil, se s sukanjem polarizatorja svetlobni tok v prepuščeni svetlobi nič ne spreminja. To kaže, da svetloba ni polarizirana. Svetilo namreč sestavlja nepregledna množica neodvisnih oddajnikov. Vsak od njih oddaja krajše ali daljše svetlobne bliske, od katerih je vsak polariziran v svoji smeri. Vsa ta mešanica vpadla na polarizator kot *nepolarizirana* svetloba. Prepuščena svetloba je linearno polarizirana, o čemer se lahko prepričamo z drugim polarizatorjem (slika 30.10).

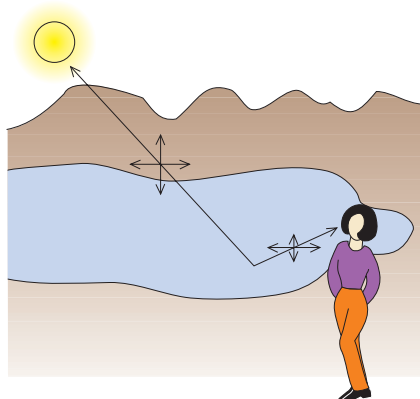


Slika 30.9 polarizacijska očala

Slika 30.10 Polarizacija pri svetlobi. Polarizator prepusti le polovico svetlobnega toka nepolarizirane svetlobe. Da je prepuščena svetloba polarizirana, se prepričamo z drugim polarizatorjem.

Zanimivo je, da pride do polarizacije svetlobe tudi v naravi. Delno ali popolnoma linearno polarizirana je svetloba po odboju od nekovinskih zrcal, npr. vodne gladine, steklene šipe ali lakiranih površin. Prav tako je linearno polarizirana svetloba, ki se siplje z neba.

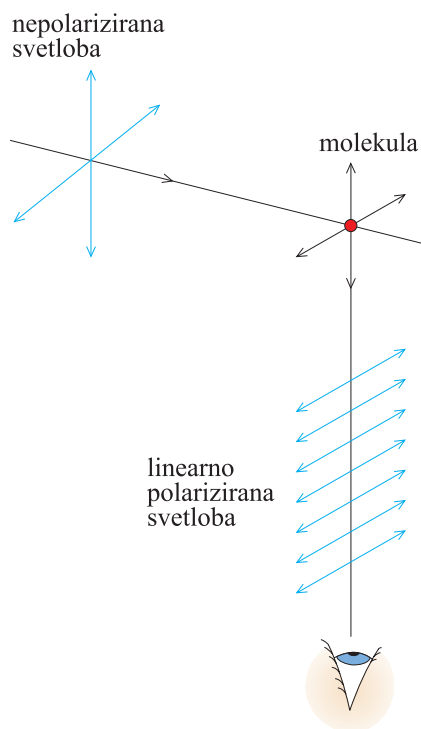
Slika 30.11 ponazarja, da je v svetlobi, ki se odbije od gladine jezera, delež svetlobe, ki je polarizirana vzporedno z gladino, večji kakor v nepolarizirani vpadni svetlobi. Če hočemo pri fotografiranju prikazati



Slika 30.11 Pri odboju od vodne gladine je svetloba delno polarizirana.



Slika 30.12 Na fotografiji na desni, ki je bila posneta z uporabo polarizatorja, lahko razberemo podrobnosti z rečnega dna. Na levi fotografiji, ki je bila posneta brez polarizatorja, moti svetloba, odbita od gladine.



Slika 30.13 k razlagi polarizacije pri sipanju svetlobe

tudi svet pod gladino vode, se moramo svetlobe z gladine znebiti. Fotografiji na sliki 30.12 kažeta, da lahko to naredimo z uporabo polarizatorja. Premislite, kako je treba zasukati polarizator, da pri fotografiranju ne moti svetloba, odbita od gladine.

Polarizacijo svetlobe pri sipanju si ponazorimo s poskusom. V stekleno kad natočimo vodo in vanjo kanemo nekaj kapelj “alpskega” mleka ali alkoholne raztopine kolofonije. S tem vnesemo v vodo dovolj drobnih delcev, ki sipajo svetlobo. Ko v kad usmerimo ozek curek svetlobe, je v vodi dobro vidna modrikasta sled. S polarizatorjem se prepričamo, da je svetloba, ki se siplje iz curka v pravokotni smeri, polarizirana v ravnini, ki je pravokotna na curek. V drugih smereh je svetloba delno polarizirana.

* Slika 30.13 pojasnjuje pojav. Sipano svetlobo oddajajo elektroni, ki jih v delcih zanihava električno polje vpadne svetlobe. Ker je to pravokotno na smer razširjanja svetlobe, nihajo elektroni v ravnini, ki je pravokotna na curek. Vsak nihajoč elektron pa je drobna antena, ki oddaja valovanje v svojo okolico. To je prav sipana svetloba, zaradi katere vidimo curek v vodi. Ker nihajo elektroni v ravnini, ki je pravokotna na curek svetlobe, je v tej ravnini polarizirana tudi sipana svetloba. Pojav lahko še bolje ponazorimo, če vpadno svetlobo polariziramo pred vstopom v kad. Sled curka je sedaj dobro vidna v smeri, ki je pravokotna na polarizacijsko ravnino, in komaj vidna v smeri, ki je vzporedna z njo. Poskusite si to razložiti sami!

Spomnimo se še, da je sled curka ob vstopu v posodo nekoliko modrikasta, nato pa vse bolj rumenkasta in rdečkasta. Drobni delci namreč bolj sipajo kratkovalovno, to je modro, kakor dolgovalovno, to je rdečo svetlobo. V curku je zato vse manj modre svetlobe, kar ima za posledico opisano spremembo barve.

Sipanja svetlobe je mnogo tudi v naravi. Zaradi sipanja sončne svetlobe na molekulah plinov v atmosferi je nebo modro. S polarizatorjem se lahko tudi prepričamo, da je svetloba z neba polarizirana. Ob sončnih zahodih, ko je Sonce nizko nad obzorjem, pot svetlobe po atmosferi pa dolga, prihaja do nas le še rdeči del sončne svetlobe. To pričara rdeče sončne zahode, ki so zlasti slikoviti, ko je delno oblačno.

31. | HITROST SVETLOBE

Hitrost svetlobe v vakuumu je ena najvažnejših in najbolj natančno določenih naravnih konstant. Njena vrednost

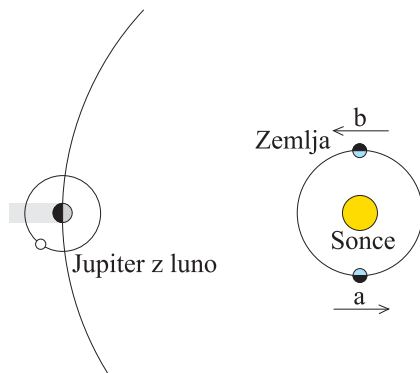
$$c = 299\,729\,458 \text{ m/s}$$

nam rabi za definicijo metra. Po dogovoru je meter razdalja, ki jo prepotuje svetloba po vakuumu v $1/299\,792\,458$ delu sekunde. Ta hitrost je nedosegljiva za materialne delce.

MERJENJE HITROSTI SVETLOBE

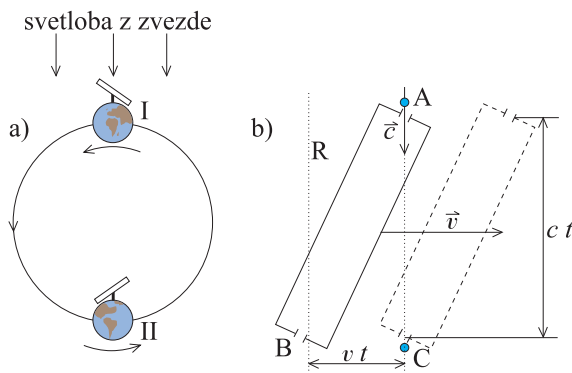
Da se svetloba ne razširja hipoma, je slutil že Galileo Galilei. O tem je pisal v svojem delu *O dveh znanostih*. Merjenje svetlobne hitrosti si je zamislil takole. Na sosednja griča je postavil moža s svetilkama. Dogovorjena sta, da prvi odkrije svetilko in požene uro. V odgovor drugi mož odkrije svojo. Ko prvi mož opazi oddaljeno svetilko, ustavi uro. Iz znane razdalje in izmerjenega časa bi bilo mogoče izračunati hitrost svetlobe. Okoli leta 1607 je Galilei menda res poskušal tako izmeriti hitrost svetlobe. Meritev se seveda ni mogla posrečiti, čeprav je bila zamisel dobra. Hitrost svetlobe je prevelika, da bi se jo dalo določiti na zamišljeni način.

Prvo pravo določitev so dala astronomska opazovanja. Danski astronom O. Roemer je opazil, da je obhodni čas Jupitrovega satelita Io krajši, ko se Zemlja približuje Jupiterju, in daljši, ko se Zemlja oddaljuje od Jupiterja (slika 31.1). Sklepal je, da je to posledica končne hitrosti svetlobe. Leta 1676 je na osnovi tedaj znanih podatkov o premeru Zemljinega tira pri kroženju okoli Sonca določil za svetlobo hitrost $228\,000 \text{ km/s}$.



Slika 31.1 K Roemerjevi določitvi svetlobne hitrosti. Razmerja razdalj na sliki niso prava.

Slika 31.2 K Bradleyevi določitvi svetlobne hitrosti. Nagib daljnogleda je močno pretiran.

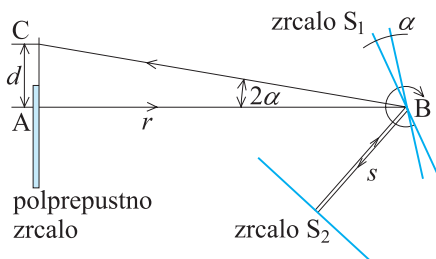


Kakih 50 let kasneje so dala astronomska opazovanja nov podatek o hitrosti svetlobe. Angleški astronom J. Bradley je izluščil svetlobno hitrost iz *zvezdne aberacije*. Znano je bilo, da se navidezna lega zvezd stalnic med letom spreminja. Smer, v kateri npr. opazujemo zvezdo, ki je v ravnini ekliptike, se med letom spreminja za $40,5''$. Srednjo lego ima zvezda, ko se giblje Zemlja proti njej ali stran od nje. Odklon v eno ali drugo stran je največji, to je polovica tega kota, ko se giblje Zemlja pravokotno na srednjo smer proti zvezdi (slika 31.2a). Bradley je pojav razložil kot posledico gibanja Zemlje in končne hitrosti svetlobe. Razlago ponazarja slika 31.2b. Če hočemo z gibajoče se Zemlje loviti svetlobo zvezde, moramo opazovalno napravo nagniti v smeri gibanja Zemlje. Kot nagiba je določen z razmerjem med hitrostjo Zemlje in hitrostjo svetlobe. S slike razberemo, da je

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{c},$$

kjer je v hitrost Zemlje na tiru okoli Sonca, to je 30 km/s. Iz enačbe dobimo za hitrost svetlobe vrednost 300 000 km/s.

Prva laboratorijska določitev hitrosti svetlobe se je posrečila šele l. 1849. Francoski znanstvenik H. Fizeau je sestavil pripravo, ki jo kaže slika 31.3. Curek svetlobe iz svetila je usmeril skozi polprepustno zrcalo in skozi obod vrtečega se zobatega kolesa s 720 zobmi do 8,63 km oddaljenega zrcala. Po odboju od zrcala se je curek po prehodu skozi obod kolesa odbil od polprepustnega zrcala proti opazovalcu. Zobje vrtečega se kolesa so prekinjali curek svetlobe. Opazovalec je v zrcalu videl sliko svetila le, če se je kolo v času, ki ga je potrebovala svetloba za pot od kolesa do zrcala in nazaj, kolo zasukalo za en zob. Iz poročila o eksperimentu razberemo, da se je kolo tedaj vrtelo s frekvenco $12,6 \text{ s}^{-1}$. Lahko izračunate, da je dobil Fizeau za svetlobno hitrost okoli 313 000 km/s.



Slika 31.4 Skica Foucaultovega poskusa. Ozek curek svetlobe, ki ga prepušča reža pri A, se pri B odbije od vrtečega se zrcala S_1 proti oddaljenemu zrcalu S_2 . Med potovanjem do S_2 in nazaj se zrcalo S_1 zasuka za majhen kot α , zato se curek odbije proti točki C. Iz razmika med A in C, znanih razdalj in znane kotne hitrosti zrcala lahko določimo svetlobno hitrost.

Hitrost svetlobe so določali mnogi raziskovalci. Znana so merjenja z vrtečimi se zrcali, ki sta jih opravila L. Foucault (1862) in A.A. Michelson (1879). V novejšem času določajo hitrost svetlobe z natančnim merjenjem valovne dolžine in frekvence.

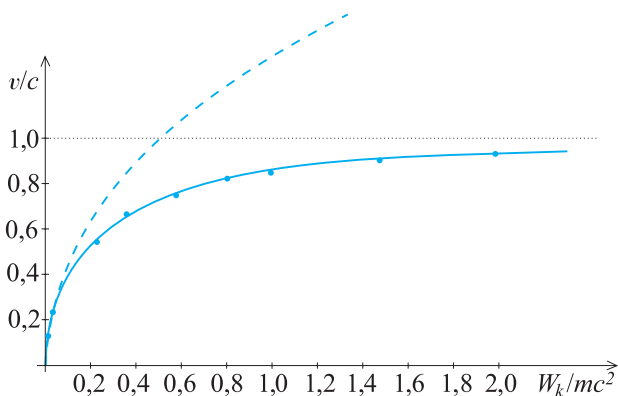
Po metodi z vrtečim se zrcalom, ki jo je uporabil Foucault, določajo hitrost svetlobe v študentskih laboratorijih in na šolah. Ponazarja jo slika 31.4. Curek svetlobe iz primerne svetilke se odbije od vrtečega

se zrcala proti oddaljenemu zrcalu. V času, ki ga porabi svetloba za pot do zrcala in nazaj, se vrteče zrcalo nekoliko zasučje in odbije curk v drugo smer. Premislite, katere podatke moramo imeti, da lahko iz zasuka curka določimo hitrost svetlobe.

HITROST IN ENERGIJA ELEKTRONOV

V rentgenskih ceveh pridobijo elektroni kinetično energijo do nekaj 100 keV, v velikih pospeševalnikih pa do nekaj 1000 MeV. Pri energiji 100 eV je hitrost elektronov enaka 5930 km/s. Kolikšna je hitrost elektronov s kinetično energijo, ki je tisočkrat ali milijonkrat večja od te?

V raven odsek cevi v pospeševalniku, po katerem se enakomerno gibljejo elektroni, so v razdalji nekaj metrov vgradili merilni elektrodi (slika 31.5) in merili čas, ki ga je za pot od prve do druge potreboval "paket elektronov". Iz časa so določili hitrost.



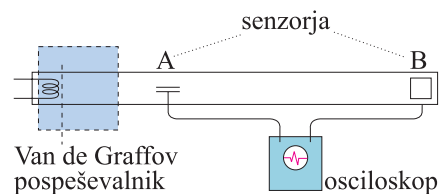
Izmerke kaže slika 31.6. Vidimo, da je hitrost elektronov navzgor omejena – vedno je manjša od svetlobne hitrosti v vakuumu.

To nas preseneča, saj bi pričakovali veliko večje hitrosti. Tako, kakor je neomejena kinetična energija, bi po dosedanjih izkušnjah pričakovali, da je neomejena tudi hitrost. S črtkano črto je na diagramu prikazan pričakovani potek hitrosti elektronov. Že pri kinetični energiji 260 keV bi hitrost elektronov presegla svetlobno hitrost.

Razhajanje med pričakovanji in izidi eksperimentov je pojasnila posebna teorija relativnosti (A. Einstein, 1905). V tej novi teoriji prostora in časa ima svetlobna hitrost v vakuumu posebno mesto. To je hitrost, s katero se prenašajo sporočila med opazovalci v različnih inercialnih opazovalnih sistemih, pa tudi med opazovalci v istem opazovalnem sistemu. Novo gledanje na prostor in čas zahteva tudi spremembo zakonov mehanike. Mehanika, ki smo se je učili doslej, namreč ne bi veljala za vse opazovalce enako, kar pa je v nasprotju z načelom o splošni veljavnosti naravnih zakonov.

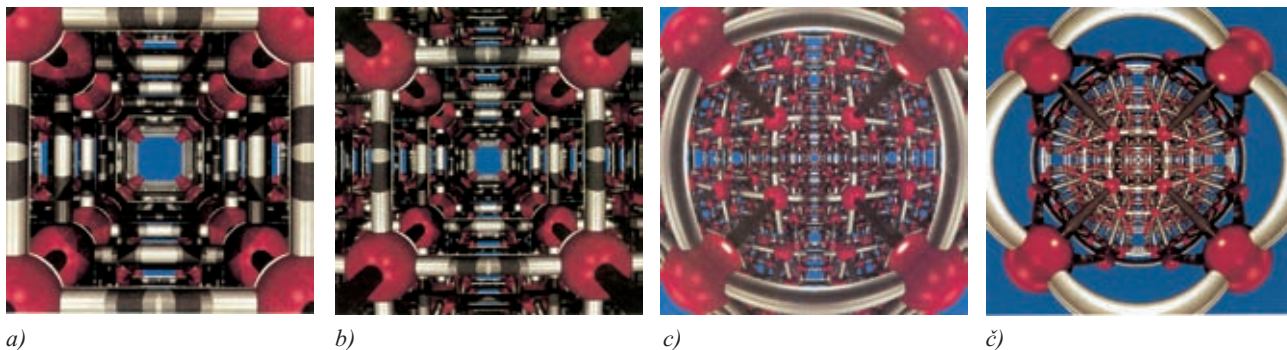
Pomembno spremembo je posebna teorija relativnosti prinesla pri obravnavanju energije in mase teles. Po novi teoriji masa in energija nista

Povezava Gibanje elektronov v električnem in magnetnem polju, kinetična energija elektronov.



Slika 31.5 določevanje hitrosti elektronov iz pospeševalnika

Slika 31.6 Hitrost elektronov v odvisnosti od kinetične energije. Točke kažejo izmerjene vrednosti, polna črta je izračunana po enačbi, ki jo da teorija relativnosti, črtkana črta pa po klasični enačbi.



Slika 31.7 Z računalnikom narisana prostorska rešetka iz palic in krogel. Opazovalec leti skozi rešetko z različnimi hitrostmi:

- a) oba mirujeta,
 b) opazovalec se giblje s hitrostjo $0,5 c$,
 c) pri hitrosti $0,95 c$ vidi opazovalec palice ukrivljene,
 č) slika je močno popačena pri hitrosti $0,99 c$.

neodvisni. Sprememba energije telesa je premo sorazmerna s spremembo mase. Sorazmernostni koeficient med spremembama je kvadrat svetlobne hitrosti:

$$\Delta W = \Delta m c^2 .$$

Einstein je predstavil to zvezo v enem od člankov l.1905. Že tedaj je predlagal, da bi preverili veljavnost enačbe pri *radioaktivnem razpadu radija*, kjer so spremembe energije tolikšne, da bi bile ustrezne spremembe mase merljive. Kasneje so potrdili veljavnost enačbe prav pri radioaktivnem razpadu in drugih spremembah v atomskih jedrih.

Pri energijskih spremembah, ki jih poznamo iz vsakdanjega okolja, je sprememba mase tudi z najobčutljivejšimi merilnimi metodami nemerljiva. Izračunajmo npr. spremembo mase kilograma vode, ko jo segrejemo za 100 K :

$$\Delta m = \frac{m c_p \Delta T}{c^2} = 4,7 \cdot 10^{-12} \text{ kg} .$$

Tudi za najnatančnejšimi tehtnicami težko izmerimo kilogramsko maso na 1 mg natančno.

Poglejmo, kaj pove nova mehanika o kinetični energiji teles in o povezavi med kinetično energijo in hitrostjo. Kinetično energijo točkastega telesa z maso m in s hitrostjo v po novi mehaniki izračunamo kot

$$W_k = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - m c^2 , \quad (1)$$

kjer je c hitrost svetlobe v vakuumu, m pa masa mirujočega telesa. Zaradi krajšega zapisa mnogokrat uporabljamo oznako

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} .$$

Člena v izrazu (1) razumemo takole:

prvi člen,

$$\frac{m c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \gamma m c^2 = W , \quad (2)$$

predstavlja energijo gibajočega se telesa, drugi člen,

$$m c^2 = W_0 , \quad (3)$$

pa energijo, ki jo ima telo, ko miruje. Prvo pogosto imenujemo tudi *polna energija*, s čimer želimo poudariti, da vključuje vse energijske

oblike s kinetično energijo vred, drugo pa *lastna energija*. Kinetična energija je razlika med obema, torej

$$W_k = W - W_0 = (\gamma - 1) m c^2 . \quad (4)$$

Hitrost telesa, ki jo izračunamo iz enačbe

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + W_k/m c^2)^2}} , \quad (5)$$

se ujema z izmerjenimi vrednostmi. Vidimo, da telo tudi takrat, ko je kinetična energija velikokrat večja od lastne, ne doseže svetlobne hitrosti v vakuumu.

? Izračunajte za zgled, kolikšna je hitrost, ki jo imajo elektroni s kinetično energijo 1 MeV, 10 MeV, 100 MeV ali 1000 MeV. Lastna energija elektronov je 0,5 MeV.

Izračunajmo kinetično energijo za še primer, ko je hitrost telesa majhna v primerjavi s svetlobno hitrostjo. V enačbi (1) nadomestimo izraz $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ s prvimi nekaj členi v vrsti, ki predstavlja ta izraz za majhne vrednosti v/c :

$$\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \frac{3}{8} \left(\frac{v}{c}\right)^4 + \dots ,$$

in dobimo enačbo

$$W = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \frac{1}{2} m v^2 + \dots ,$$

v kateri je prvi člen znani izraz za kinetično energijo. Drugi in naslednji členi v vrsti so zanemarljivi, če je le hitrost majhna v primerjavi s svetlobno hitrostjo. Polno energijo telesa tedaj zapišemo kot

$$W = W_0 + W_k = m c^2 + \frac{1}{2} m v^2 .$$

Izraz

$$m' = \gamma m = \frac{W}{c^2}$$

predstavlja maso telesa, ki se s hitrostjo v giblje glede na opazovalca. S to maso opazovalec izrazi tudi gibalno količino telesa:

$$p = m' v = \gamma m v = \frac{Wv}{c^2} . \quad (6)$$

Po dogovoru jo označujemo s simbolom p , ki nas opomni, da smo v novi mehaniki. Tako določena gibalna količina ima enake lastnosti kakor gibalna količina, ki smo jo spoznali v stari mehaniki. Pomeni, da velja tudi zanjo izrek o gibalni količini, ki pravi, da je sprememba gibalne količine enaka skupnemu sunku zunanjih sil

$$\Delta p = F \Delta t$$

oziroma

$$dp = F dt , \quad (7)$$

če je sunek kratkotrajen.

* Izraz (2) za polno energijo gibajočega se telesa lahko še nekoliko predelamo. S kvadriranjem in z množenjem z $1 - (v/c)^2$ dobimo enačbo

$$W^2 \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) = (m c)^2$$

in enačbo

$$W^2 - \left(\frac{vW}{c^2}\right)^2 c^2 = (mc^2)^2.$$

Oklepaj v drugem členu na desni strani enačbe prepoznamo kot gibalno količino telesa, p . Enačba (8), ki se s to oznako glasi

$$W^2 - p^2 c^2 = (m c^2)^2, \quad (8)$$

nam pomaga pri primerjanju opazovanj v različnih inercialnih sistemih. Razlika med kvadratom polne energije in kvadratom produkta med gibalno količino in svetlobno hitrostjo je v vseh opazovalnih sistemih enaka kvadratu lastne energije telesa.

ZAKON O ENERGIJI IN MASI

Povezava med energijo in maso zahteva vnovičen razmislek o energijskem zakonu in o zakonu o ohranitvi mase. Vsa z okolico izmenjana energija se po novi mehaniki odraža na polni energiji sistema. Velja torej, da je sprememba polne energije sistema, ΔW , enaka

$$\Delta W = Q,$$

pri čemer naj predstavlja Q skupno izmenjano energijo. V primerih, ki nas bodo zanimali, poteka izmenjava predvsem s svetlobo.

Videli smo, da je polna energija sistema W vsota lastne energije $W_0 = mc^2$ in kinetične energije W_k . V lastno energijo je v tem primeru vključena tudi notranja energija. Energijski zakon s tem zapišemo v obliki

$$\Delta(W_0 + W_k) = Q.$$

Za zgled si oglejmo energijske spremembe, do katerih pride, ko jedro atoma ogljika ^{12}C po absorpciji 17,6 MeV svetlobne energije razpade na tri helijeva jedra ^4He . Razpad so opazovali v jedrski fotografski emulziji. Helijeva jedra, ki po razpadu jedra ogljika odletijo z veliko hitrostjo poškodujejo vzdolž svoje, nekaj mikrometrov dolge poti, drobna zrnca srebrovega bromida v emulziji. Po fotografskem razvijanju postane sled vidna z mikroskopom. Iz dolžine sledi je mogoče določiti začetno kinetično energijo helijevih jeder. Tako so pri nekem poskusu namerili sledi z dolžino 10,9 μm , 11,7 μm in 13,8 μm , ki ustrezajo začetni kinetični energiji 3,2 MeV, 3,4 MeV in 3,7 MeV. Sprememba polne energije sistema, ki ga v začetnem stanju sestavlja jedro atoma ^{12}C z maso 12,0000 u, v končnem stanju pa tri helijeva jedra ^4He z maso po 4,0026 u in s skupno kinetično energijo 10,3 MeV, je tedaj

$$\Delta W = 3 m(^4\text{He}) c^2 + W_k - m(^{12}\text{C}) c^2 = 17,6 \text{ MeV},$$

to je ravno enako absorbirani svetlobni energiji. V računu smo uporabili podatek, da je $u c^2$, to je lastna energija atomske enote mase u , enaka 931,4 MeV.

Polna energija sistema, ki je ločen od okolice, je konstantna:

$$W = W_0 + W_k = \text{konst.}$$

Opazujemo npr. razpad jedra pri atomu radioaktivnega radija ^{226}Ra , ki ga je omenjal Einstein. Jedro ^{226}Ra , ki naj pred razpadom miruje, odda delec α , to je jedro helija ^4He , in se spremeni v jedro radona ^{222}Rn . Določimo kinetično energijo nastalih delcev.

Mirujoči atom radija ima lastno energijo $m_{\text{Ra}}c^2$, atoma radona in helija pa imata poleg lastne energije $m_{\text{Rn}}c^2$ in $m_{\text{He}}c^2$ še kinetično energijo W_k . Zaradi ohranitve polne energije je

$$m_{\text{Ra}}c^2 = m_{\text{Rn}}c^2 + m_{\text{He}}c^2 + W_k.$$

Od tod izračunamo, da je kinetična energija

$$W_k = [m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\text{He}}]c^2.$$

V tabelah preberemo, da so mase atomov radija, radona in helija po vrsti 226,0254 u, 222,0175 u in 4,0026 u. S temi vrednostmi dobimo za kinetično energijo po razpadu

$$W_k = 0,0053 \text{ u } c^2 = 4,9 \text{ MeV}.$$

Z merjenji so pokazali, da je res tako.

? Iz sredice jedrskega reaktorja v Krškem odnaša v stacionarnem stanju hladilna voda toplotni tok 1880 MW. Toplotni tok je posledica jedrske reakcije v reaktorju, pri kateri se razcepljajo jedra urana ^{235}U . Za koliko se na dan zmanjša masa reaktorske sredice? Za koliko se na dan zmanjša masa urana ^{235}U ? Pri vsakem razcepu jedra ^{235}U se masa zmanjša za 0,21 u.

Sončni izsev je okoli $3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Za koliko se zaradi izsevane svetlobe na dan zmanjša masa Sonca? Kolikšna je dnevna poraba vodika, ki se zliva v helij, če se pri zlitju štirih protonov v jedro helija sprosti 26,8 MeV energije?

32. | VPRAŠANJA IN NALOGE

VPRAŠANJA

1. Električno polje v ravnem EM valovanju, ki se širi proti severu, niha v smeri vzhod – zahod. V kateri smeri niha magnetno polje?
2. Kako bi opredelili glavne razlike med zvočnim in elektromagnetnim valovanjem?
3. Televizijska antena ima vodoraven sprejemni dipol. V kateri smeri niha električno polje v televizijskem valovanju? Kako bi ocenili valovno dolžino nosilnega televizijskega valovanja?
4. Pojasnite vlogo posameznih delov televizijske sprejemne antene!
5. Kako bi po višini oddajnega stolpa v Domžalah ocenili valovno dolžino, na kateri oddaja Radio Slovenija?
6. Poučite se, kako deluje mobilni telefon!
7. Curek nepolarizirane svetlobe vpada na zaporedno postavljena polarizatorja, ki sta zasukana drug proti drugemu za 45° . Kako je polarizirana svetloba, ki izstopa iz prvega, in kako svetloba, ki izstopa iz drugega polarizatorja?

NALOGE

Odgovor: $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ T}$

Odgovor: $1,12 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$
 $3,7 \cdot 10^{-15} \text{ J/m}^3$

Odgovor: $1,34 \cdot 10^3 \text{ V/m}$
 $4,46 \cdot 10^{-6} \text{ T}$

Odgovor: $1,02 \cdot 10^3 \text{ V/m}$
 $3,39 \cdot 10^{-6} \text{ T}$

1. Amplituda jakosti električnega polja v EM valovanju je $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ V/m}$. Kolikšna je amplituda gostote magnetnega polja?

2. Efektivna jakost električnega polja v EM valovanju je $20,5 \text{ mV/m}$. Kolikšna je gostota energijskega toka v tem valovanju? Kolikšna je gostota energije?

3. Laser oddaja svetlobni tok 15 mW v curku s premerom 2 mm . Kolikšni sta efektivna jakost električnega polja in efektivna gostota magnetnega polja v curku?

4. Gostota sončnega svetlobnega toka na vrhu atmosfere je $1,38 \text{ kW/m}^2$. Kolikšni sta v sončni svetlobi amplituda jakosti električnega polja in gostote magnetnega polja?

5.] Radijska postaja oddaja pri 102,1 MHz. Kolikšna je valovna dolžina valovanja?

Odgovor: 2,94 m

6.] Ko uglasimo radijski aparat na frekvenco 550 kHz, ima vrtljivi kondenzator v aparatu kapaciteto 1800 pF. Kolikšna je kapaciteta, ko uglasimo aparat na 1550 kHz?

Odgovor: 230 pF.

7.] Z 1,4 m dolgo sprejemno anteno raziskujemo električno polje v okolici dipolne antene. Kolikšna je na danem mestu efektivna jakost električnega polja, če je efektivna napetost med krajiščema sprejemne antene 1,5 mV? Kolikšna je tam gostota energijskega toka?

Odgovor: 1,1 mV/m
 $3,1 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2$

8.] Radijska postaja z močjo 50 kW oddaja radijsko valovanje enakomerno v polprostor. Kolikšni sta gostota energijskega toka in jakost električnega polja v razdalji 200 m od oddajnika? Kolikšni pa sta v razdalji 2000 m?

Odgovor: 0,20 W/m²
12,2 V/m
 $1,99 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2$
1,22 V/m.

9.] Sončni kolektor s površino 1 m² je obrnjen proti jugu tako, da vpada opoldne nanj sončna svetloba pravokotno. Za koliko se segreje voda, ki teče po kolektorju s tokom 0,5 l/min, če vpada na kolektor svetlobni tok z gostoto 600 W/m² in je izkoristek 60 %?

Odgovor: 10,3 K

10.] Na polarizator vpada curek polarizirane svetlobe, v katerem niha električno polje v smeri, ki je za 45° nagnjena proti prepustni smeri polarizatorja. Kolikšen del svetlobnega toka prepušča polarizator?

Odgovor: 1/2

11.] Dva polarizatorja sta zasukana drug proti drugemu za 45°. Na prvega vpada curek nepolarizirane svetlobe. Kolikšen del vpadlega svetlobnega toka prepuščata? Kako pa je, če je v vrsti več polarizatorjev, ki so za enako zasukani drug proti drugemu?

Odgovor: 1/4
 $(1/2)^n$

12.] Počrnjen umetni satelit v obliki diska kroži okoli Zemlje, tako da kaže njegova geometrijska os ves čas proti Soncu. Do kolikšne temperature se lahko segreje? Računajte, kakor da v ravnovesju satelit ves sprejeti svetlobni tok spet izseva. Gostota sončnega svetlobnega toka je 1,38 kW/m².

Odgovor: 330 K

13.] S spektrometrom so določili, da ima spekter svetlobe, ki prihaja na Zemljo z neke rdečkaste zvezde, maksimum pri 700 nm. Kolikšna je površinska temperatura zvezde?

Odgovor: 4140 K

14.] Kolikšna je kinetična energija elektrona, če izmerimo, da je njegova masa trikrat tolikšna kakor v mirovanju?

Odgovor: 1,02 MeV

15.] Kolikšna sta kinetična energija in gibalna količina protona, ki se giblje s hitrostjo $9,2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$?

Odgovor: 47 MeV
 $14,5 \text{ MeV}/c = 1,61 \cdot 10^{-19} \text{ kgms}^{-1}$

16.] Kolikšna je hitrost elektrona s kinetično energijo 1 MeV? Masa elektrona je enakovredna energiji 0,51 MeV.

Odgovor: $0,94 c_0$

Odgovor: $1,4 \cdot 10^{-13}$ m/s

Odgovor: Vsak pion ima po 110 MeV

Odgovor: 19 900 MeV

Odgovor: 1060 MeV
1770 MeV/c

17.] Protoni, ki prihajajo v zemeljsko atmosfero iz vesolja kot *kozmični žarki*, imajo kinetično energijo do 50 J. Za koliko m/s se hitrost protonov z največjo energijo razlikuje od hitrosti svetlobe? Lastna energija protona je 940 MeV.

18.] Mirujoč kaon K^0 razpade v piona π^+ in π^- . Kolikšna je kinetična energija pionov, če je masa kaona $8,87 \cdot 10^{-28}$ kg, masi pionov pa sta po $2,48 \cdot 10^{-28}$ kg?

19.] Hitrost elektrona je za $3,3 \cdot 10^{-10}$ del manjša od svetlobne hitrosti. Kolikšna je njegova kinetična energija?

20.] Polna energija protona je 2000 MeV. Kolikšni sta njegova kinetična energija in gibalna količina? Lastna energija protona je 940 MeV.

33. | IZMENJAVA

ENERGIJE MED SVETLOBO

IN SNOVJO

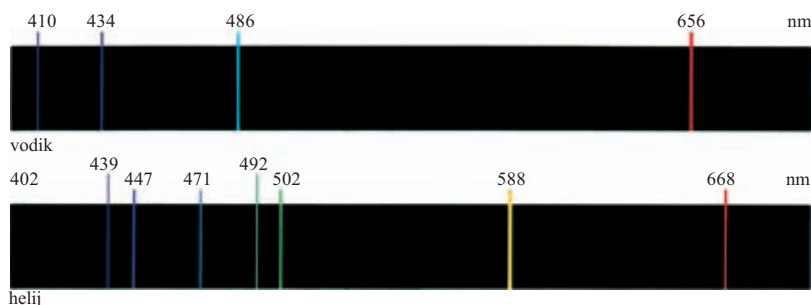
Antena, v kateri oscilator vzbuja nihajoč električni tok, oddaja elektromagnetne valove. Ti valovi pa vzbujajo nihajoč električni tok v sprejemni anteni, ki je uglasena s prvo in je z njo vzporedna. Elektromagnetno valovanje tako prenaša energijo med antenama. Podobno vlogo ima tudi svetloba.

Oddajanje svetlobe je največkrat povezano z nihanjem elektronov v atomih ali v molekulah. Za razliko od radijskih anten, kjer s stalnim dovajanjem sproti nadomeščamo izsevano energijo in je zato tok radijskih valov stalen, pa atomi oddajajo svetlobo v kratkotrajnih sunkih. Navadno je atom v *osnovnem stanju*, v katerem je energija najmanjša. Iz tega stanja lahko ob trkih ali z absorpcijo svetlobe preide v *vzbujeno stanje*. Iz njega v razmeroma kratkem času spet preide v osnovno stanje, največkrat z oddajanjem ali emisijo svetlobe. Med kratkotrajnim oddajanjem ali sprejemanjem svetlobe si lahko atome predstavljamo kot drobne antene, v katerih niha električni naboj.

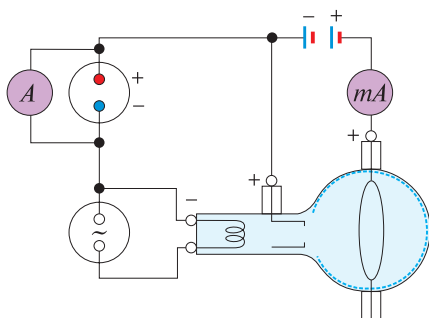
Govorimo, da so atomi in svetloba v stalni *interakciji*. Preučevanje te interakcije daje pomembne podatke o zgradbi atomov in molekul, pa tudi o lastnostih svetlobe. Lahko jih izluščimo iz *emisijskih* in *absorpcijskih* spektrov svetlobe. Raziskovalci jih zbirajo in osmišljajo v okviru različnih *spektroskopij*, od mikrovalovne do rentgenske.

V tem poglavju bomo spoznali posebnosti interakcije med svetlobo in snovjo in povezavo med spektri svetlobe in zgradbo atomov oziroma snovi.

SPEKTRI SVETLOBE IN ENERGIJA ATOMA



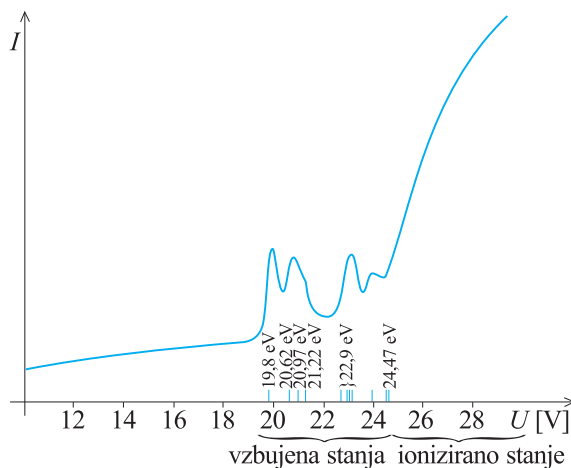
Slika 33.1 Spekter svetlobe, ki jo oddajata vodik in helij, ko teče po njima električni tok.



Slika 33.2 shema poskusa, pri katerem opazujemo trke elektronov z atomi helija

Slika 33.1 kaže spekter svetlobe, ki jo oddajata vodik in helij, ko po njima teče električni tok. Ob trkih z elektroni prehajajo atomi iz osnovnega v vzbujena stanja in iz njih z emisijo svetlobe nazaj v osnovno stanje. Pri tem se med atomi in okolico neprestano izmenjuje energija. Pri trku z elektronom se poveča notranja energija atoma. Ob emisiji svetlobe se notranja energija spet zmanjša. Upravičeno domnevamo, da je spekter oddane svetlobe povezan s spremembami notranje energije atomov.

Z dodatnim poskusom si oglejmo spremembe notranje energije atomov helija pri trku z elektroni. V buči, ki jo kaže slika 33.2, je helij z majhnim tlakom. Vanj je usmerjen ozek curek elektronov, ki jih z električno napetostjo med anodo in katodo pospešimo do izbrane kinetične energije. Curek poteka po osi obročaste zbiralne elektrode, ki je prek občutljivega merilnika toka in baterije zvezana z anodo. Z baterijo dosežemo, da je potencial zbiralne elektrode nekaj višji od potenciala anode. Elektroda zato s svojim električnim poljem polovi elektrone, ki se jim ob trkih z atomi zmanjša hitrost in se odklonijo iz curka. Slika 33.3 kaže tok, ki ga izmerimo, ko počasi spreminjamo pospeševalno napetost na anodi. Do napetosti malo pod 20 V se tok enakomerno povečuje, nato pa nas presenetijo izrazita povečanja in zmanjšanja toka. Pri napetosti malo manj kakor 25 V se tok še zadnjikrat močno poveča in se ne zmanjša več.



Slika 33.3 tok na zbiralni elektrodi v odvisnosti od pospeševalne napetosti

Povečanja toka kažejo, da se pri izbranih energijah močno poveča število elektronov, ki jih lahko posrka zbiralna elektroda s svojim električnim poljem. Pomeni, da elektroni tedaj izgubijo pri trkih z atomi velik del, če ne kar vse kinetične energije. Pri drugih vrednostih kinetične energije je delež elektronov, ki jih posrka elektroda, majhen in se le počasi spreminja z energijo. Pomeni, da se tedaj pri trkih kinetična energija elektronov ne spremeni, delež elektronov, ki jih zaradi spremembe v smeri gibanja posrka zbiralna elektroda, pa je približno konstanten.

Pojav si razlagamo takole. Razen pri nekaj vrednostih kinetične energije elektronov se dogajajo med elektroni in atomi prožni trki.

Ker je masa atomov mnogokrat večja od mase elektronov, ostane pri trku nespremenjena kinetična energija elektronov, spremeni pa se lahko smer gibanja. Elektrone, ki pri tem zaidejo v njeno bližino, posrka obročasta elektroda. Tok, ki ga posrka elektroda, se z večanjem pospeševalne napetosti enakomerno povečuje, ker se povečuje tok v curku, ki prihaja skozi luknjico v anodi. Pri izbranih energijah elektronov pa so možni med elektroni in atomi tudi neprožni trki. Ob njih izgubijo elektroni skoraj vso kinetično energijo, poveča pa se notranja energija atoma.

Poskus pokaže, da pride do neprožnih trkov pri energijah okoli 20 eV, 21 eV in 23 eV in pri energijah, ki so večje od 24,5 eV. Pomeni, da se lahko poveča notranja energija atoma helija v osnovnem stanju le za te vrednosti energije. Če postavimo, da je notranja energija atoma v osnovnem stanju enaka nič, predstavljajo dobljeni rezultati mogoče vrednosti notranje energije atoma helija. Podrobnejši poskus bi pokazal še več takih vrednosti notranje energije. Ponavadi jih predstavimo z *energijsko lestvico*.

Slika 33.4 kaže poenostavljeno energijsko lestvico atoma helija. Na njej so označena tudi stanja, ki smo jih odkrili pri našem poskusu. Lestvica vzbujenih stanj se zgošča proti *ioniziranemu stanju*. Pri trkih z elektroni, ki imajo energijo večjo od 24,5 eV, se namreč od nevtralnega atoma odcepi elektron, ki si skupaj z vpadlim elektronom in s pozitivnim ionom porazdeli preostalo kinetično energijo.

Iz vzbujenih stanj lahko preide atom v osnovno stanje ob trkih z nevzbujenimi atomi, najpogosteje pa z oddajo svetlobe. Pri tem lahko preide v osnovno stanje naravnost ali prek vmesnih vzbujenih stanj. Energija, ki jo odda s svetlobo, mora biti tedaj enaka energijski razliki med stanjema. Iz vzbujenega stanja z energijo 23 eV npr. lahko atom preide najprej v stanje z energijo 21 eV, iz tega v stanje z energijo 20 eV in od tod v osnovno stanje. Lahko pa preide naravnost v stanje z energijo 20 eV in nato v osnovno stanje, ali pa naravnost v osnovno stanje.

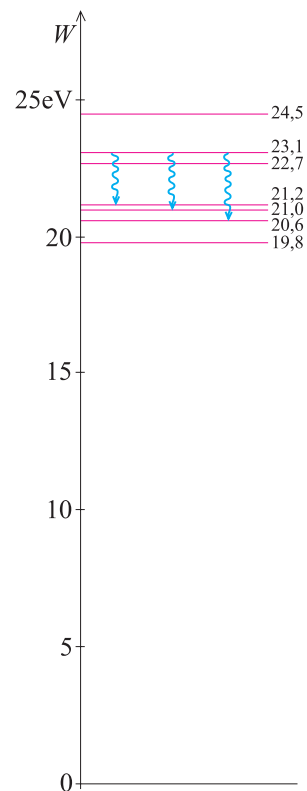
Kako se različni prehodi kažejo v spektru svetlobe?

Stvar razložimo, če predpostavimo, da je *frekvenca svetlobe sorazmerna z izsevano energijo*. Pri prehodu iz vzbujenega stanja z energijo W_2 v vzbujeno stanje z energijo W_1 izseva atom svetlobo s frekvenco ν , za katero velja

$$W_2 - W_1 = h \nu ,$$

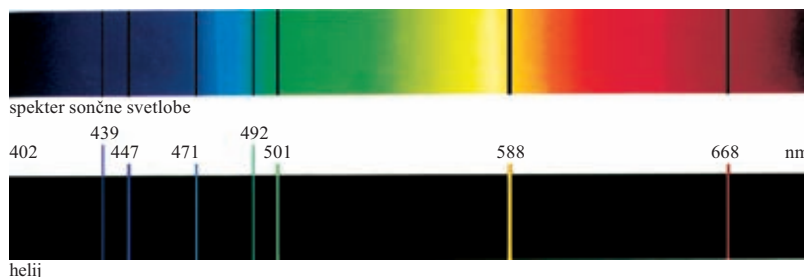
kjer je $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js} = 4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ *Planckova konstanta*. Predpostavka je ena od osnov kvantne fizike. Z njo se srečamo vselej, ko obravnavamo interakcijo med svetlobo in snovjo.

Na sliki 33.1, ki kaže spekter vidne svetlobe svetlečega helija, je poleg valovnih dolžin ob črtah zapisana energija, ki jo odda atom ob emisiji ustrezne svetlobe. Ta energija ustreza energijski razliki med začetnim in končnim stanjem atoma. Na lestvici stanj na sliki 33.4 lahko

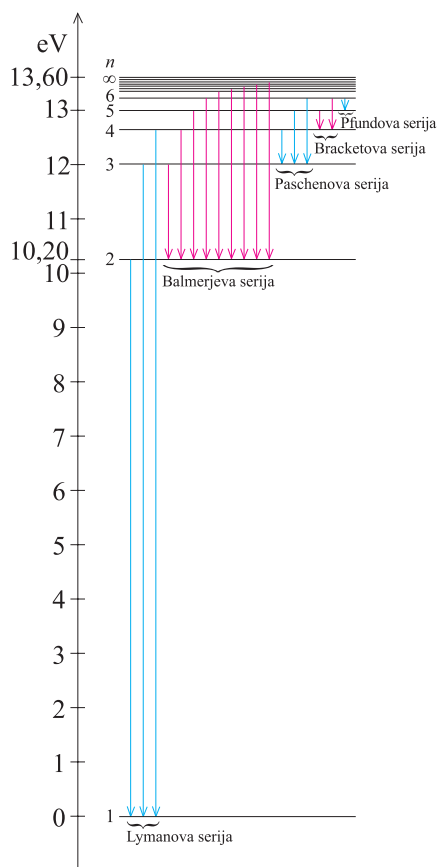


Slika 33.4 energijska lestvica stanj atoma helija

preberemo, da odda svetlobo z valovno dolžino 667,8 nm atom pri prehodu iz stanja z energijo 23,08 eV v stanje z energijo 22,21 eV. Tudi svetlobo z valovno dolžino 587,5 nm oziroma svetlobo z valovno dolžino 501,5 nm odda pri prehodu iz stanja z energijo 23,08 eV. Ob tem ima končno stanje energijo 20,97 eV oziroma 20,62 eV. Druge valovne dolžine ustrezajo prehodom med stanji, ki niso označena na lestvici. V ultravijoličnem delu helijevega spektra najdemo črti, ki ustrezata svetlobi z valovno dolžino 53,7 nm oziroma 58,4 nm, ki jo odda atom helija pri prehodu iz vzbujenega stanja z energijo 23,09 eV oziroma 21,23 eV naravnost v osnovno stanje.



Slika 33.5 Absorpcijske črte v sončnem spektru. Nekatere izmed njih imajo enako valovno dolžino kakor emisijske črte v spektru helija.



Slika 33.6 energijska lestvica stanj atoma vodika

Svetlobo, ki jo oddaja, lahko atom tudi absorbira. V spektru sončne svetlobe so *absorpcijske črte*, ki so posledica absorpcije svetlobe v sončni atmosferi. Črte, ki ustrezajo absorpciji helija v sončni atmosferi, imajo enake valovne dolžine kakor črte v emisijskem spektru helija (slika 33.5). Absorpcijska črta pri valovni dolžini 53,7 nm je posledica absorpcije svetlobe, pri kateri preide atom helija iz osnovnega stanja v vzbujeno stanje z energijo 23,09 eV. Podobno je absorpcijska črta pri valovni dolžini 667,8 nm posledica absorpcije svetlobe, pri kateri preide atom iz vzbujenega stanja z energijo 22,21 eV v vzbujeno stanje z energijo 23,08 eV.

Emisija in absorpcija svetlobe kažeta, da poteka izmenjava energije med svetlobo in atomi v obrokih, katerih energija je sorazmerna s frekvenco svetlobe. Udomačilo se je, da te obroke imenujemo *fotone*. Energija fotonov

$$W = h \nu ,$$

ki jih atomi absorbirajo ali izsevajo pri prehodih med različnimi stanji, je enaka energijski razliki med temi stanji. Te ugotovitve potrjujejo tudi drugi pojavi.

Poučna je primerjava med spektrom vodika in energijsko lestvico vodikovih stanj (slika 33.6). Energijo vodikovih stanj zapišemo z enačbo

$$W_n = 13,6 \text{ eV} (1 - 1/n^2) ,$$

kjer zavzame n zaporedna cela števila od 1 naprej. Energijo osnovnega stanja dobimo, ko v enačbo postavimo $n = 1$, energijo vzbujenih stanj pa, ko postavimo n enak 2, 3, ... Energija vzbujenih stanj se z večja

njem n približuje energiji ioniziranega stanja $W_i = 13,6$ eV. Mnogo-krat postavimo energijo ioniziranega stanja enako nič. Na tej lestvici je energija osnovnega stanja enaka $-13,6$ eV, energija vzbujenih stanj pa

$$W_n = -13,6 \text{ eV}/n^2.$$

V spektru vodika prepoznamo več *spektralnih serij*, ki predstavljajo svetlobo, ki jo izsevajo atomi vodika pri prehodu iz različnih začetnih vzbujenih stanj v isto končno stanje. Tako najdemo v ultravijoličnem območju *Lymanovo serijo* črt, ki nastane pri prehodu atoma iz vzbujenih stanj v osnovno stanje. Fotoni svetlobe iz te serije imajo največjo energijo 13,6 eV. Atom bi jo izseval pri prehodu iz ioniziranega stanja v osnovno stanje. V vidnem območju je *Balmerjeva serija*, ki nastane pri prehodu atoma vodika iz vzbujenih stanj v prvo vzbujeno stanje z energijo 10,2 eV. Serije črt, ki nastanejo pri prehodih v višja vzbujena stanja, so v infrardečem ali mikrovalovnem področju. Emisijskim črtam ustrezne črte najdemo tudi v absorpcijskem spektru vodika. Na sliki 33.8, ki kaže absorpcijske črte v spektru sončne svetlobe, so označene tudi najmočnejše črte Balmerjeve serije.



Slika 33.7 meglica Konjska glava. Rdečo svetlobo je oddaja vodik.

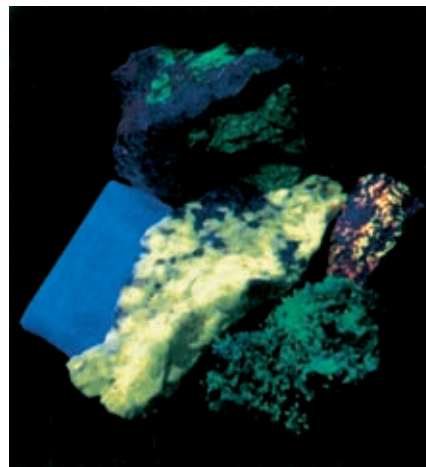
Slika 33.8 absorpcijske črte vodika

* FLUORESCENCA

Posvetimo s curkom rumene natrijeve svetlobe v posodo, v kateri so segrete natrijeve pare. V posodi opazimo rumeno sled, kakor v megli. Ko osvetlimo posodo z belo svetlobo, je videti povsem prozorna.

Razlaga pojava je na dlani. Značilno rumeno svetlobo z valovno dolžino 589 nm sevajo atomi natrija pri prehodu iz vzbujenega stanja z energijo 2,11 eV v osnovno stanje. Ko s to svetlobo obsevamo natrijeve pare, v katerih so atomi v osnovnem stanju, jo atomi absorbirajo, nato pa ob vnovičnem prehodu v osnovno stanje izsevajo nazaj. Pri tem oddajajo svetlobo v vseh smereh, zato se zdi, da se svetloba iz curka sipa kakor na kapljicah megle.

Emisijo svetlobe, do katere pride po absorpciji svetlobe, imenujemo *fluorescenca*. Pri drugih atomih je lahko pojav veliko slikovitejši kakor pri poskusu z natrijem. Z absorpcijo svetlobe lahko preidejo atomi iz osnovnega v kako višje vzbujeno stanje, iz vzbujenih stanj pa v več korakih v osnovno stanje. Pri vsakem koraku atomi oddajo značilno svetlobo. Fluorescenca v različnih spektralnih območjih uporabljajo za kemijske analize.

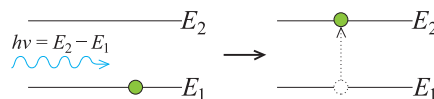


Slika 33.9 Z ultravijolično svetlobo so osvetlili različne kamnine, ki so nato fluorescirale v vidni svetlobi.

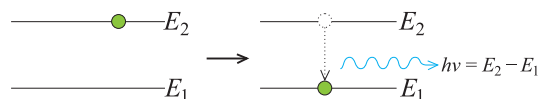
* | STIMULIRANA EMISIJA - LASER

Vzemimo plin, v katerem vzbujamo atome z električnim tokom. Vzburjeni atomi po kratkem času, okoli 10^{-8} s, sami od sebe ali, kakor pravimo, *spontano*, preidejo v osnovno stanje z emisijo enega ali več fotonov svetlobe. Preden pride izsevana svetloba iz plina, jo lahko okoliški atomi še večkrat absorbirajo in spet izsevajo. Lahko pa ta svetloba atome, ki so v vzbujenem stanju, vzpodbudi k hitrejšemu izsevanju. Govorimo o *stimulirani emisiji* svetlobe. Izsevana svetloba je tedaj v fazi s svetlobo, ki sevanje vzpodbuja ali stimulira. Različne pojave pri interakciji med atomi in svetlobo, ki ustreza prehodom med izbranimi nivojema, kaže slika 33.10.

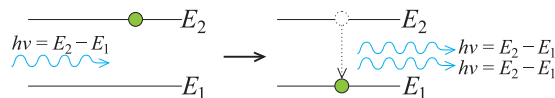
a) absorpcija



b) spontana emisija

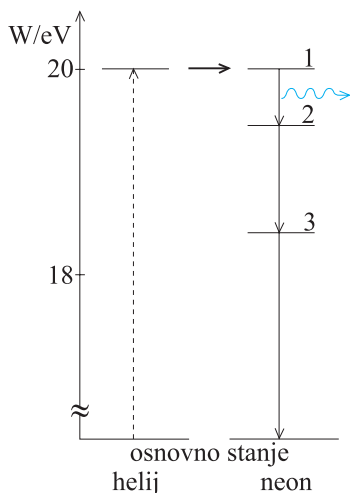


c) stimulirana emisija



Slika 33.10 ponazoritev absorpcije, spontane emisije in stimulirane emisije svetlobe pri prehodu atoma med dvema nivojema

Če dosežemo, da je gostota svetlobnega toka v plinu dovolj velika in je tudi delež vzbujenih atomov v stanju z višjo energijo večji od deleža vzbujenih atomov v stanju z nižjo energijo, postane stimulirana emisija prevladujoč pojav. Takšno je stanje v *laserjih*.



Slika 33.11 energijski prehodi atomov helija in neona v He-Ne laserju

Vsi poznate *helijev-neonov plinski laser*, ki oddaja ozek curek enobarvne rdeče svetlobe z valovno dolžino 632,8 nm. Po ozki cevi, v kateri je mešanica helija in neona, napelujemo električni tok, ki vzbudi mešanico k svetlenju. Cev je postavljena med vzporedni zrcali, od katerih je eno polprepustno. V prostoru med zrcali se zaradi zaporednih odbojev vzpostavi stoječe svetlobno valovanje z valovno dolžino, ki je značilna za laser. To valovanje stimulira vzbujene atome neona k emisiji svetlobe. V stacionarnem stanju se s stimulirano emisijo sproti nadomešča svetlobni tok, ki ga odnaša curek svetlobe.

Shema na sliki 33.11 kaže pojave, ki privedejo do vzbuditve atomov neona v stanje, ki ga zapišejo s stimulirano emisijo. V električnem toku vzbujeni atomi helija ob trkih predajo svojo energijo atomom neona. Iz tako doseženega vzbujenega stanja 1 preidejo atomi neona s stimulirano emisijo v nižje vzbujeno stanje 2. Iz tega stanja preidejo spontano v nižje vzbujeno stanje 3 in iz njega naprej v osnovno stanje. Ker ostajajo atomi neona v vzbujenih stanjih 2 in 3 v povprečju manj

časa kakor v vzbujenem stanju 1, je delež atomov v vzbujenem stanju 1 večji od deleža atomov v vzbujenem stanju 2. S tem je poskrbljeno, da pri prehodu med stanjema 1 in 2 stimulirana emisija prevlada nad absorpcijo.

FOTOEFEKT

V prejšnjih primerih smo spoznali, da lahko preidejo atomi iz osnovnega stanja v vzbujeno stanje z absorpcijo svetlobe z ustrezno valovno dolžino. Ko osvetljuje atome v osnovnem stanju svetloba, pri kateri je energija fotonov večja od energije *ioniziranega stanja* ali *ionizacijske energije*

$$h \nu > W_i ,$$

se pri absorpciji trgajo elektroni od atomov. Pojav imenujemo *fotoefekt*.

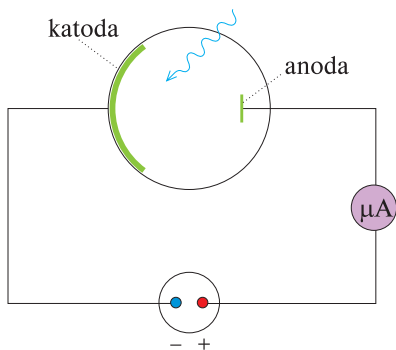
Pri heliju, kjer je ionizacijska energija 20,46 eV, lahko opazujemo fotoefekt, če osvetljuje helij svetloba, ki ima valovno dolžino manjšo od 60,6 nm. Pri vodiku, ki ima ionizacijsko energijo 13,6 eV, opazujemo fotoefekt, če je valovna dolžina svetlobe manjša od 91,2 nm. V obeh primerih je svetloba na ultravijoličnem območju. Fotoefekt bi lahko opazovali tako, da bi merili električno prevodnost plinov. Ob pojavu fotoefekta bi prej neprevoden plin začel prevajati elektriko.

V mejnem primeru, ko je energija fotonov ravno enaka ionizacijski energiji, sta pozitivni ion in elektron po fotoefektu brez energije. Ko je energija fotona večja od ionizacijske energije, imata po fotoefektu elektron in ion kinetično energijo. Vendar je kinetična energija iona zanemarljiva, zato govorimo le o kinetični energiji elektrona. Le-ta je enaka razliki med energijo fotona in ionizacijsko energijo atoma:

$$W_k = h \nu - W_i .$$

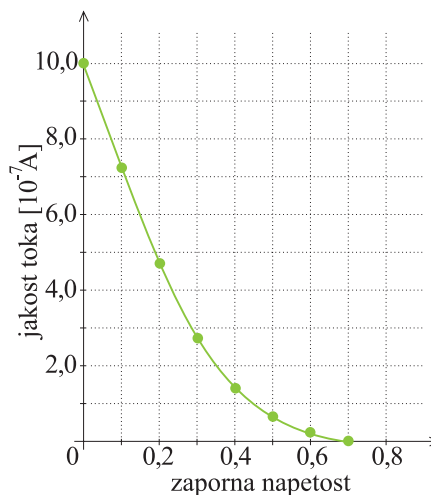
Fotoefekt pa ni značilen le za interakcijo svetlobe z atomi. Naredimo naslednji poskus. Na elektroskop namestimo dobro očiščeno ploščico cinka in ga nabijmo z negativnim nabojem. Posvetimo na ploščico s sončno svetlobo ali s svetlobo iz živosrebrne luči. Opazimo, da se elektroskop hitro razelektri. Razelektrevanje preneha, če ploščico zaslonimo z stekleno šipo. Pri drugem poskusu, pri katerem nabijemo ploščico s pozitivnim nabojem, pa razelektrevanja ni.

Pojav si razložimo takole. Svetloba povzroči izstopanje elektronov iz cinkove ploščice. Ker je njihov naboj negativen, lahko izbiti elektroni uhajajo iz negativno nabite ploščice, ne morejo pa uiti iz pozitivno nabite ploščice. Drugi del poskusa kaže, da lahko pride do emisije elektronov le, če je valovna dolžina svetlobe dovolj majhna. Steklена šipa namreč absorbira kratkovalovni del svetlobe v sončnem spektru ali v spektru živosrebrne luči. To pa je ravno tisti del vpadle svetlobe, ki povzroča fotoefekt.



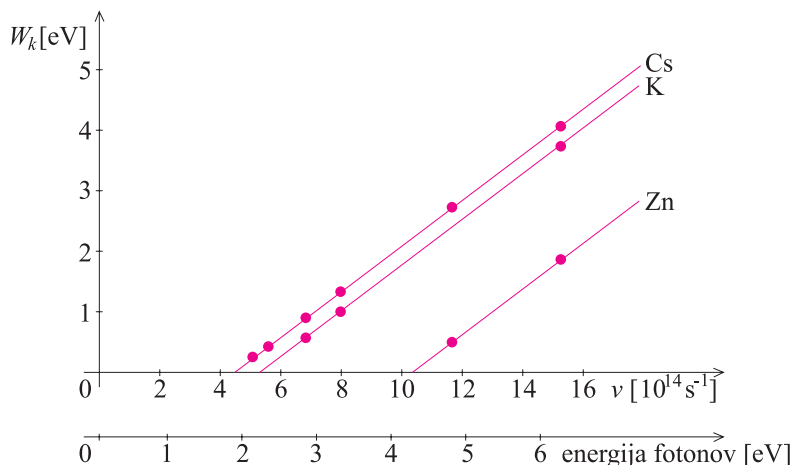
Slika 33.12 opazovanje fotoefekta v fotocelici

Slika 33.13 pojevanje toka po fotocelici z večanjem zaporne napetosti



Za podrobnejši poskus uporabimo *vakuumsko fotocelico*. V njej sta za svetlobo občutljiva katoda in kovinska anoda. Fotocelico zvežemo v električni krog, kakor kaže slika 33.12. Ko priključimo anodo na pozitivni pol vira napetosti in katodo osvetlimo z enobarvno svetlobo, steče po krogu tok, ki je sorazmeren s svetlobnim tokom, ki vpada na katodo. Tudi če vira napetosti ni, teče po krogu majhen tok zaradi elektronov, ki izstopajo iz katode s tolikšno energijo, da dosežejo anodo. Prav energijo teh elektronov bi radi določili. Zamenjajmo pola napetosti. Sedaj električno polje med anodo in katodo zavira gibanje elektronov. Slika 33.13 kaže, kako se spreminja tok, ko s potenciometrom povečujemo zaviralno napetost. Pri napetosti U_0 tok preneha teči. Tedaj lahko trdimo, da je delo zaviralne električne sile, ki deluje na elektrone na poti od katode do anode, enako kinetični energiji, s katero izstopajo iz katode najhitrejši elektroni:

$$A_e = e_0 U_0 = W_k .$$



Slika 33.14 maksimalna kinetična energija elektronov pri fotoefektu v odvisnosti od frekvence svetlobe

Ponovimo poskus pri več valovnih dolžinah. Graf na sliki 33.14 kaže rezultat takega poskusa pri fotocelicah z različnimi katodami. Na abscisi je nanesena energija fotonov, na ordinati pa maksimalna

energija izstopajočih elektronov. Razberemo lahko, da je kinetična energija elektronov linearna funkcija energije fotonov:

$$W_k = h \nu - W_i .$$

W_i je *izstopna energija* elektronov, to je energija, ki jo elektron porabi pri izstopu iz kovine. Elektroni so namreč v kovini vezani podobno kakor elektroni v atomu. Če naj elektron zapusti kovino, mu moramo dovesti vsaj izstopno energijo. Iz tega sklepamo, da je pri mejni frekvenci svetlobe, ν_0 , pri kateri je fotoefekt še mogoč, energija fotona enaka izstopni energiji:

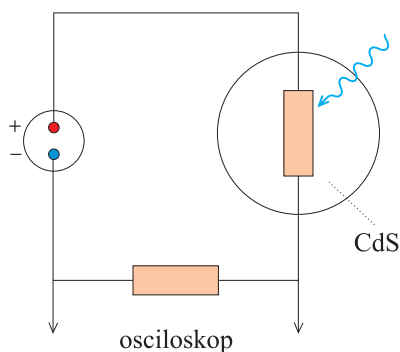
$$h \nu_0 = W_i .$$

Mejna valovna dolžina je tedaj

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{h c}{W_i} .$$

Fotoefekt na kovinah je prvi razložil Einstein. Prav on je predpostavil, da poteka izmenjava energije med svetlobo in snovjo v fotonih.

* | NOTRANJI FOTOEFEKT

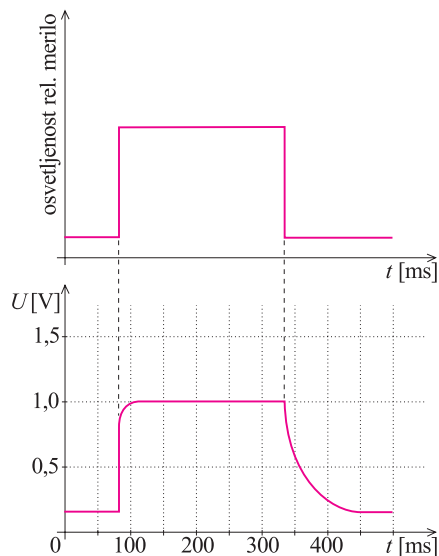


Na upornik iz kadmijevega sulfida, CdS, ki ga povežemo zaporedno z izvirom enosmerne napetosti in upornikom, posvetimo s prekinjajočim se curkom svetlobe in z osciloskopom opazujemo napetost na uporniku (slika 33.15). Sled na osciloskopu (slika 33.16) pokaže, da postane sicer slabo prevodni CdS prevoden, ko ga osvetlimo.

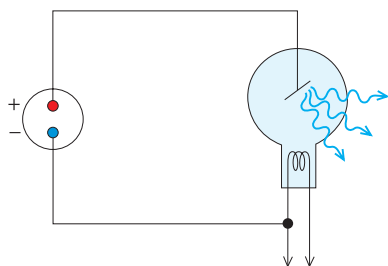
Pojav pojasnimo takole. Vpadla svetloba vzbuja elektrone v uporniku CdS iz vezanih stanj, kjer so negibljivi, v prosta stanja, kjer so gibljivi in jih električno polje lahko požene v tok. Pojav imenujemo *notranji fotoefekt*. Bolje ga bomo razumeli kasneje. Podobno kakor pri kovinah lahko tudi v tem primeru povzroči fotoefekt le svetloba z dovolj majhno valovno dolžino.

Notranji fotoefekt je pomemben pri delovanju sončnih celic ter fotodiod in drugih detektorjev svetlobe.

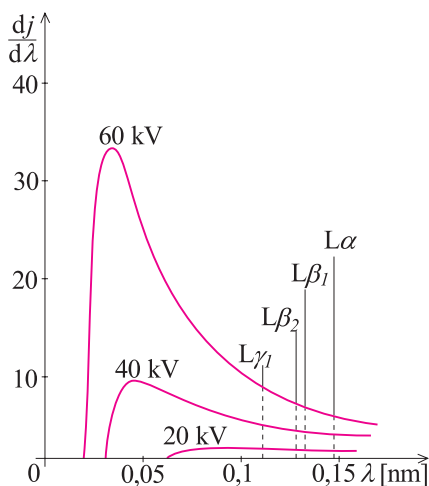
Slika 33.15 vezava fotoupornika v električni krog



Slika 33.16 časovni potek napetosti na uporniku pri osvetljevanju fotoupornika



Slika 33.17 shema rentgenske cevi in njena povezava v električni krog



Slika 33.18 Spektar sevanja iz rentgenske cevi z anodo iz volframa pri nekaj napetostih. S spektrom je razvidna kratkovalovna meja.

Omenili smo že, da nastaja *rentgenska svetloba* ali *rentgensko sevanje* ob trkih hitrih elektronov z atomi v anodi *rentgenske cevi*. Slika 33.17 shematično kaže rentgensko cev. Elektroni, ki izhlapevajo iz katode, se gibljejo pospešeno v električnem polju med katodo in anodo in zadevajo v anodo s kinetično energijo

$$W_k = e_0 U ,$$

če je U napetost na cevi. Večina elektronov preda kinetično energijo anodi, ki se zaradi tega greje, le majhen del pa jo izseva kot rentgensko svetlobo. Slika 33.18 kaže spekter rentgenske svetlobe iz cevi z anodo iz volframa pri nekaj pospeševalnih napetostih.

Spekter sestavlja dva značilna dela. Prvi del je *zvezni*, drugi pa *črtasti* spekter. Oblika zveznega spektra je odvisna predvsem od napetosti med anodo in katodo, črtasti spekter pa je značilen za material, iz katerega je narejena anoda.

Obliko zveznega spektra razložimo, če si predstavljamo, da elektroni ob trkih v anodi predajajo svojo kinetično energijo svetlobi v fotonih. Elektronu s kinetično energijo W_k se ob oddaji fotona z energijo $h\nu$ zmanjša kinetična energija na $W_{k'}$, pri čemer je

$$W_k - W_{k'} = h\nu .$$

Energija fotona je največja, če elektron vso kinetično energijo, ki jo je pridobil na poti od katode do anode, odda z enim samim fotonom. Največja frekvenca svetlobe v spektru iz cevi, ν_0 , je torej določena s pospeševalno napetostjo:

$$h\nu_0 = e_0 U .$$

S tem je določena tudi *kratkovalovna meja* v spektru

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{hc}{e_0 U} ,$$

ki je lepo razvidna na sliki 33.18.

Črtasti del spektra predstavlja svetlobo, ki jo sevajo atomi pri prehodih med vzbujenimi stanji, pri katerih manjka atomu elektron v eni od notranjih lupin. Elektroni namreč lahko ionizirajo atome v anodi podobno kakor v heliju pri poskusu s helijevo bučo. Če imajo vpadni elektroni kinetično energijo, ki je večja od vezavne energije elektronov v kateri od notranjih lupin, lahko ionizirajo to lupino. Nastalo vrzel v zelo kratkem času zapolni elektron iz višje ležeče lupine. S tem se zmanjša energija atoma, energijsko razliko pa odnese izsevani foton.

Da bi črtasti spekter dobrega razumeli, se moramo spomniti na elektronsko zgradbo atoma.

Rentgenska svetloba je zelo prodorna – zanjo so vse snovi prosojne. Pri prehodu curka rentgenske svetlobe skozi snov se zaradi interakcije med svetlobo in snovjo – v glavnem zaradi fotoefekta – zmanjšuje

? Ponovite, kako je zgrajen atom! Po-
brskajte po spominu in po kemijskem
učbeniku!

energijski tok v curku. Naj vpada curek rentgenske svetlobe z energijskim tokom I_0 pravokotno na plast snovi z debelino d . Po prehodu skozi plast je curek oslavljen, prepušteni energijski tok I je

$$I = I_0 e^{-\mu d},$$

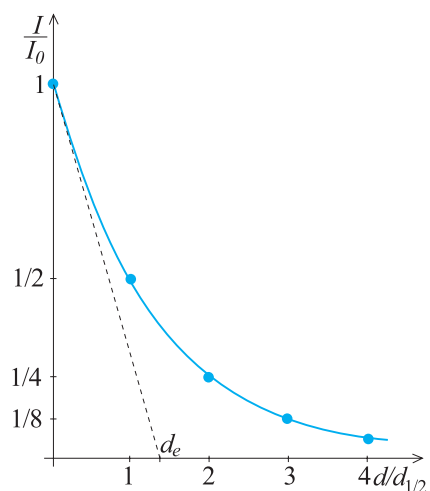
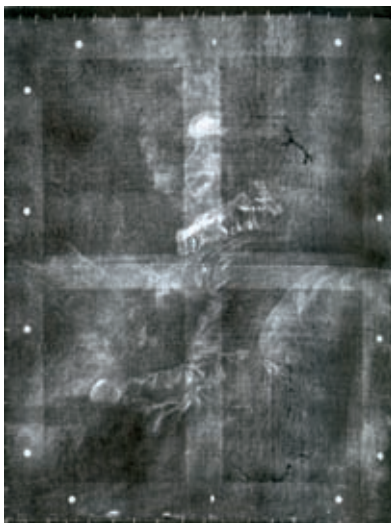
kjer je μ absorpcijski koeficient. Graf na sliki 33.19 kaže potek prepuščenega curka pri spreminjanju debeline plasti. Na sliki je označena značilna debelina $d_e = 1/\mu$, pri kateri se energijski tok v curku zmanjša za faktor e ($e = 2,72$ – osnova naravnih logaritmov). Pogosto raje opredelimo *razpolovno debelino*, to je debelino $d_{1/2}$, v kateri se energijski tok zmanjša na polovico. S to značilno količino zapišemo energijski tok v prepuščenem curku z enačbo

$$I = I_0 2^{-\frac{d}{d_{1/2}}}.$$

Absorpcijski koeficient μ je odvisen od snovi. Hitro narašča z atomskim številom. To omogoča preiskovanje notranje zgradbe teles z rentgenskim sevanjem. Slika 33.20 kaže rentgensko sliko poškodovanega sklepa.

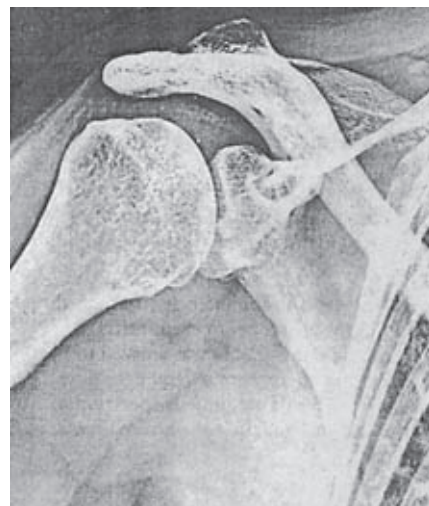
Elektroni, ki jih izseva atom ob absorpciji fotona rentgenske svetlobe, med ustavljanjem ionizirajo atome ali molekule v okolici svoje poti ali jih vzbujajo v vzbujena stanja. V živem tkivu to povzroča poškodbe, ki so toliko resnejše, kolikor večja je *absorbirana energija* ali, kakor pravimo, *doza*. Enota za dozo je *gray* (Gy), ki predstavlja absorpcijo energije 1 J na kilogram snovi:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}.$$



Slika 33.19 pojemanje toka rentgenske svetlobe pri prehodu skozi plast snovi

? S primerjavo enačb poiščite zvezo med absorpcijskim koeficientom in razpolovno debelino!



Slika 33.20 rentgenska slika poškodovanega sklepa

Slika 33.21 Slika je delo slikarja Fragonarda iz leta 1776. Rentgenski žarki so pod njo odkrili sliko mladeniča.

* Navadno navajajo tako imenovano *ekvivalentno dozo*, ki jo izražajo v enoti *sievert* (Sv). Tudi tu velja

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}.$$

Enota je primerna tudi za izražanje doze drugih sevanj. Doza 1 Sv kateregakoli sevanja je ekvivalentna dozi 1 Gy rentgenskega sevanja. Ljudje naj bi v prvih 30 letih življenja v povprečju ne prejeli več kakor 0,05 Sv.

? Poučite se o nevarnostih sevanja in o varstvu pred njim.

Vemo že, da atom sestavljajo jedro in elektroni. V nevtralnem atomu je število elektronov enako vrstnemu številu elementa. Njihov negativni naboj, $-Ze_p$, uravnovesi enako velik pozitivni naboj, ki ga nosi jedro. Če atom tako ali drugače pridobi ali izgubi kak elektron, nastane iz nevtralnega atoma *negativni* ali *pozitivni ion*.

Ob stalnih interakcijah atoma s svetlobo se notranja energija atoma seli po lestvici energijskih stanj. Hkrati se spreminja tudi notranja zgradba atoma. Ob absorpciji ali ob emisiji fotona svetlobe se največkrat spremeni stanje enemu od elektronov v atomu. Pri tem prehaja elektron med *enoelektronskimi stanji*, ki jih ima na razpolago v atomu.

Enoelektronska stanja v atomu si v približku sledijo kakor stanja v atomu vodika. Kakor v atomu vodika *glavno kvantno število* n opredeljuje energijo atoma kot celote, tako v atomu z več elektroni glavno kvantno število opredeljuje energijo *enoelektronskih stanj*. V atomu z vrstnim številom Z lahko za energijo enoelektronskega stanja z glavnim kvantnim številom n v prvem približku zapišemo

$$W_n = -13,6 \text{ eV } \frac{Z^2}{n^2}.$$

Glavno kvantno število n je skupno za $2n^2$ enoelektronskih stanj. Vsa stanja s skupnim glavnim kvantnim številom tvorijo *lupino stanj*.

Elektroni v atomu v osnovnem stanju se razporedijo po enoelektronskih stanjih tako, da je skupna energija atoma najmanjša. To pomeni, da so v nevzbujenem atomu zasedena enoelektronska stanja z najnižjo energijo. Naravni zakon, ki ga poznamo kot *Paulijevo* ali *izključitveno načelo*, ne dovoljuje, da bi kako enoelektronsko stanje zasedel več kakor en elektron.

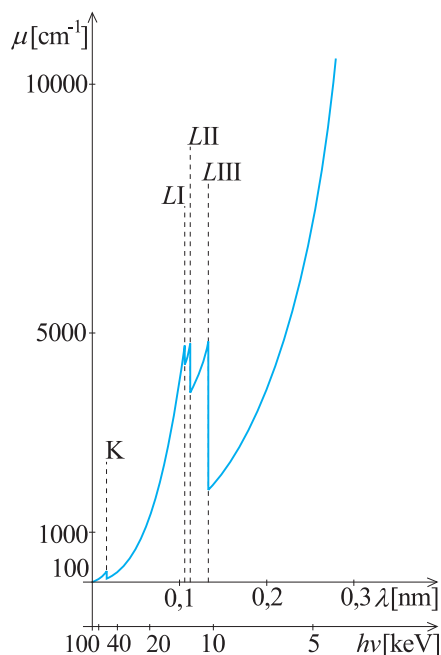
Mislimo si, da oblikujemo atom tako, da vanj vgrajujemo elektron za elektronom. Prva dva elektrona vgradimo v prvo lupino z glavnim kvantnim številom $n = 1$ ali, kakor jo imenujemo, v *lupino K*, naslednjih osem pa v drugo lupino z glavnim kvantnim številom $n = 2$ ali *lupino L*, in tako naprej. Pri tem pa se zgodi še nekaj zanimivega. Vgrajeni elektroni s svojim nabojem senčijo električno polje jedra. Zaradi tega se zmanjšuje efektivni naboj jedra za nove elektrone, poleg tega pa se nekoliko spremenijo energije enoelektronskih stanj v lupinah. Lupine se razcepijo na *podlupine*. Tako se lupina z glavnim kvantnim številom $n = 2$ razcepi na dve podlupini: na podlupino s , ki ima dve enoelektronski stanji, in na podlupino p , ki jih ima šest. Pri tem imajo stanja v podlupini p nekaj višjo energijo kakor stanja v podlupini s . Podobno se razcepijo tudi lupine z večjim glavnim kvantnim številom.

Od razporeditve elektronov po najvišjih še zasedenih enoelektronskih stanjih so odvisne kemijske lastnosti atomov. Elementi z enako zasedbo zunanjih podlupin istega tipa imajo podobne kemijske lastnosti. O tem se lahko prepričate ob pogledu na periodni sistem elementov, kjer je pri elementih navedena tudi elektronska struktura

atomov. Za orientacijo si radi izberemo žlahtne pline, ki jih odlikuje kemijska inertnost, ki je posledica tega, da imajo zasedene zunanje podlupine tipa p . Elementi pred žlahtnimi plini ali za njimi, to so halogeni in alkalni elementi, pa se odlikujejo po veliki kemijski aktivnosti.

? Ob periodnem sistemu primerjajte kemijske lastnosti in elektronsko zgradbo zunanjih podlupin.

** O lupinski zgradbi atoma nas neposredno prepriča *absorpcija rentgenskega sevanja*. Ta je namreč v prvi vrsti posledica fotoefekta v notranjih lupinah atoma. Pri absorpciji rentgenske svetlobe se lahko iztrga iz atoma elektron iz lupin, v katerih je izstopna energija manjša od energije fotona. Razliko med energijo fotona in izstopno energijo odnese elektron kot kinetično energijo.



Slika 33.22 absorpcijski koeficient volframa za rentgensko svetlobo

Na sliki 33.22 je absorpcijski koeficient volframa v odvisnosti od valovne dolžine rentgenske svetlobe oziroma od energije fotonov. Svetloba, pri kateri je energija fotonov velika v primerjavi z vezavno energijo elektronov v atomih, ima majhen absorpcijski koeficient. Absorpcijski koeficient se povečuje, ko se energija fotonov zmanjšuje in približuje vezavni energiji elektronov v lupini K . Ko pa se energija fotonov zmanjša pod vezavno energijo v lupini K , se absorpcijski koeficient močno zmanjša. Z nadaljnjim zmanjševanjem energije fotonov se absorpcijski koeficient spet povečuje, nato pa se skokovito zmanjša pri vezavni energiji v podlupini LI , nato v podlupini LII in na koncu v podlupini $LIII$. Nato se pojav ponovi pri podlupinah M .

+ **Dodatno čtivo** J. Strnad: Mala kvantna fizika

34. ELEKTRONI V TRDNI SNOVI

ELEKTRIČNE IN OPTIČNE LASTNOSTI TRDNIH SNOVI

Pri spoznavanju električnega toka smo snovi grobo ločevali na *prevodnike* in *izolatorje*. Prepoznavali smo jih po specifičnem upor ali upornosti.

Med prevodnike smo brez pomislekov uvrstili *kovine*. Odlikuje jih zelo majhna upornost. Ko pogledamo poglobljeno, vidimo, da lahko tudi kovine razvrstimo v kar široko pahljačo dobrih in slabih prevodnikov. O tem se lahko prepričamo ob podatkih v različnih priročnikih s tabelami.

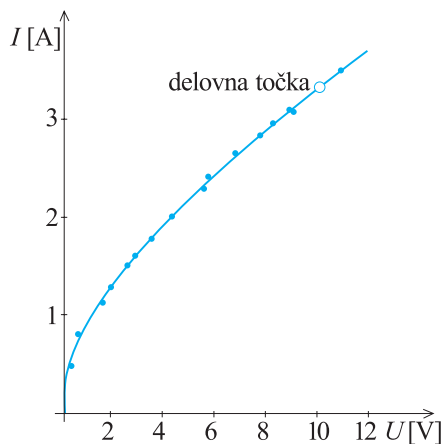
Pomembno je tudi spoznanje, da se upornost kovin povečuje s temperaturo. O tem se lahko prepričamo na različne načine. Ob vključitvi električnih grelcev je jakost električnega toka večja kakor kasneje, ko so grelci že vroči. Karakteristika žarnice, ki kaže tok po žarnici v odvisnosti od napetosti, je pri majhnih napetostih strmejša kakor pri delovni napetosti (slika 34.1). Z merilnikom upora lahko tudi neposredno namerimo, da je upor vroče nitke v žarnici večji kakor upor hladne nitke.

Med izolatorje uvrstimo snovi, kot so polivinil, pleksi, steklo, pa tudi kristalizirane snovi, kot so kuhinjska sol ali silicijev oksid ali diamant. Odlikuje jih velika upornost, ki je skoraj pri vseh odvisna še od temperature. Pri steklu in naštetih kristaliziranih snoveh se upornost zmanjšuje s povečevanjem temperature. O tem se lahko prepričamo pri steklu s poskusom, ki ga kaže slika 34.2. Stekleno cevko iz mehkega stekla natakemo na dva žeblja in vse skupaj povežemo v električni krog s primerno žarnico in virom napetosti. Ko cevko segrejemo do rumelega žara, žarnica zasveti, močno pa zažari tudi steklo.

Med obe skupini snovi se vrivajo *polprevodniki*. Njihova predstavnika sta v prvi vrsti *germanij* in *silicij*. Večinoma so polprevodniki kristalni.

Upornost *čistih polprevodnikov* je med upornostjo kovin in izolatorjev. S povečanjem temperature se hitro zmanjša. Uporniki iz polprevodnikov (*termistorji*) nam zato rabijo za merjenje temperature. Slika 34.3 kaže električni krog, v katerem sta termistor in upornik. Napetost

? V fizikalnem priročniku poiščite upornost različnih kovin in zlitin in jih razvrstite po velikosti.



Slika 34.1 karakteristika žarnice z volframsko nitko

? V fizikalnem priročniku poiščite podatke o izolatorjih in jih razvrstite po upornosti.

na uporniku se poveča, ko se zaradi povečanja temperature zmanjša upor termistorja.

Že z majhnim dodatkom primesi se upornost polprevodnikov močno zmanjša.

Značilne za različne snovi so tudi njihove *optične lastnosti*.

Na kovinah se deloma odbije, deloma absorbira svetloba vseh valovnih dolžin, od infrardeče do vijolične. Zaradi tega imajo kovine značilni *kovinski sijaj*. Zanimiva je primerjava sijajnosti kovin z njihovo električno prevodnostjo. Čim boljši prevodnik je kovina, tem izrazitejši sijaj ima.

Optične lastnosti izolatorjev so bolj raznolike. Kuhinjska sol je npr. prozorna za vidno in infrardečo, absorbira pa ultravijolično svetlobo. Podobne lastnosti imajo tudi drugi kristalni izolatorji. Steklo je za razliko prozorno za vidno svetlobo, absorbira pa poleg ultravijolične tudi infrardečo svetlobo.

Polprevodniki, npr. silicij, so neprozorni za vidno svetlobo, dobro pa prepuščajo infrardečo svetlobo. Spomnimo se, da se zmanjša upor polprevodnika, ki ga osvetlimo s svetlobo z dovolj majhno valovno dolžino.

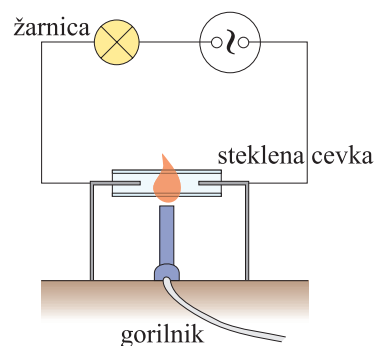
* ENERGIJSKI PASOVI

Električne in optične lastnosti snovi si razlagamo z notranjo zgradbo snovi, zlasti z vezavo elektronov. Vemo, da večino trdnih snovi sestavljajo kristali, za katere je značilna *urejenost dolgega dosega*. Atomi so v njih nanizani po prostorski rešetki, ki ima lahko makroskopske razsežnosti. Večinoma pa so kristali majhni in vidni le pod mikroskopom, npr. pri kovinah.

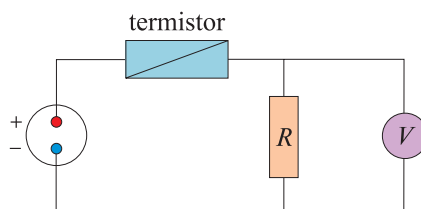
V prostih atomih, ki so daleč vsaksebi, so elektroni vezani in le ob trkih ali ob absorpciji svetlobe lahko zapustijo svoj atom. V trdni snovi pa se atomi tiščijo. Lahko si izmenjujejo *valenčne elektrone*, ki se tako selijo z atoma na atom, ne da bi se stanje kaj spremenilo. Ti elektroni tako ne pripadajo več posameznemu atomu, ampak kristalu kot celoti.

Pri vezavi atomov v kristal se spremeni energija valenčnih elektronov. V atomih imajo, kakor smo videli, vsi elektroni ostro določene energije. V kristalu pa se zaradi medsebojnih vplivov zlasti stanja, ki jih zasedajo valenčni elektroni, razširijo v *energijske pasove*, v katerih je toliko stanj, kolikor je atomov v kristalu. Pri nekaterih snoveh se pasovi med seboj prekrivajo. Tako kakor v atomih lahko vsako stanje zasedeta največ dva elektrona. V osnovnem stanju so vsi elektroni v pasovih z najmanjšo energijo.

Ob električnem toku po snoveh se zaradi dela električnih sil neznatno poveča energija elektronov, ki prenašajo električni tok, ali *prevodniš-*



Slika 34.2 Poskus, s katerim pokažemo, da je upor stekla odvisen od temperature.



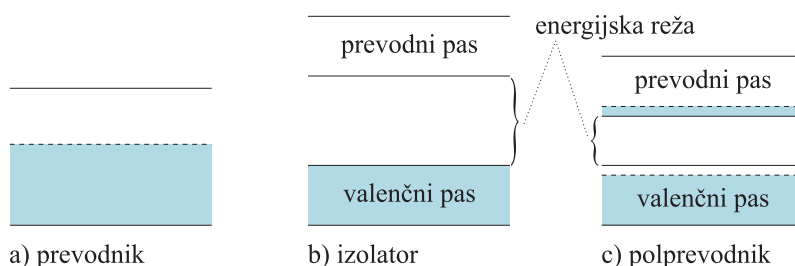
Slika 43.3 vezava termistorja v električni krog

Ponovitev Po učbeniku kemije ponovite značilnosti povezovanja atomov v različne kristale. Katere so glavne lastnosti kovalentne, ionske in kovinske vezi?

kih elektronov. Zato teče električni tok le v snoveh, kjer je dovolj prostih stanj, na katera lahko preidejo ti elektroni.

Dobra električna prevodnost kovin tedaj kaže, da imajo elektroni v njih na voljo veliko prostih stanj, na katera lahko preidejo že ob majhnem povečanju energije v električnem polju. Na množico prostih stanj tik nad osnovnim stanjem kaže tudi absorpcija infrardeče svetlobe. Fotoni infrardeče svetlobe imajo namreč le nekaj stotink eV. Absorpcija vidne svetlobe v kovinah kaže, da je veliko prostih stanj tudi pri večji energiji, prav do vezavne energije elektronov. Če je energija fotona večja od vezavne energije elektronov, pa pride, kakor smo videli, do fotoefekta, pri katerem elektron izstopi iz kovine.

Slika 34.4 energijski pasovi z največjo energijo a) v kovinah, b) izolatorjih in c) polprevodnikih



Vsi ti pojavi se skladajo s sliko energijskih pasov za valenčne elektrone pri kovinah. Kaže jo slika 34.4a. Valenčni pas se prekriva s pasovi vzbujenih stanj tako, da imajo valenčni elektroni na voljo en sam pas, to je *prevodni pas*, ki je le delno zaseden. V neposredni bližini najvišje ležečih zasedenih stanj je tako dovolj prostih stanj, na katera preidejo elektroni ob prevajanju električnega toka ali ob absorpciji fotonov infrardeče svetlobe.

? Kako lahko s slike prevodnega pasu pri kovinah oziroma njegove zasedenosti z elektroni razberemo mejno valovno dolžino za fotoefekt? Kako bi razložili termično emisijo?

Majhna električna prevodnost izolatorjev in polprevodnikov ter njihova prozornost za infrardečo svetlobo kažeta, da pri njih v neposredni bližini osnovnega stanja ni prostih stanj, na katera bi lahko prešli elektroni pri majhnih energijskih spremembah. To potrjuje slika energijskih pasov za valenčne elektrone v izolatorjih na sliki 34.4b. Valenčni pas je povsem zaseden z elektroni in v njem ni prostih stanj. Najdemo jih šele v pasu vzbujenih stanj, ki je ločen od valenčnega pasu s široko *energijsko režo*. Elektroni jo lahko dosežejo šele pri dovolj veliki energijski spremembi. Do nje pride npr. ob absorpciji fotonov ultravijolične svetlobe. V pasu vzbujenih stanj pa je dovolj prostih stanj, da lahko elektroni, ki preidejo vanj, prevajajo električni tok. Pas vzbujenih stanj zato imenujemo tudi *prevodni pas*.

Enaka je slika energijskih pasov pri *polprevodnikih* (slika 34.4c). Razlika je v širini energijske reže. Pri izolatorjih je ta zelo velika v primerjavi s povprečno termično energijo pri sobni temperaturi. Pri polprevodnikih je reža toliko ožja, da je vedno del elektronov v prevodnem pasu. Tudi v valenčnem pasu so zaradi tega prosta stanja. Delež elektronov v prevodnem pasu in delež prostih stanj v valenčnem pasu se povečujeta s temperaturo. K prevajanju električnega toka prispevajo tako elektroni v prevodnem pasu, kakor elektroni v valenčnem pasu. Iz valenčnega prehajajo elektroni v prevodni pas tudi z absorp-

cijo fotonov vidne svetlobe. Ta pojav smo opazovali pri kadmijevem sulfidu CdS in ga imenovali notranji fotoefekt. Pri CdS ali pri siliciju je energijska reža preširoka, da bi jo lahko elektroni prešli z absorpcijo fotonov infrardeče svetlobe.

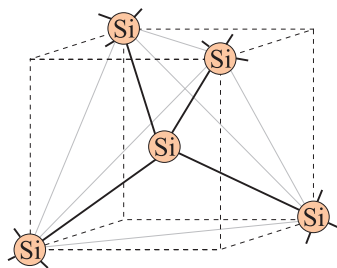
POLPREVODNIKI

Izmed naštetih snovi – kovin, izolatorjev in polprevodnikov – imajo zadnji prav gotovo najbolj zanimive lastnosti. Z dodajanjem primesi jim je mogoče skoraj poljubno spreminjati električne lastnosti. V enem samem kristalu je mogoče narediti dele z različnimi lastnostmi in tako izdelovati elektronska vezja s skoraj nepredstavljivo gostoto in z veliko hitrostjo delovanja. Prav to je omogočilo izdelovanje hitrih računalnikov in razvoj informatike. Električne lastnosti polprevodnikov so tudi zelo občutljive na zunanje okoliščine in jih zato uporabljajo v merilnikih različnih fizikalnih količin kot *senzorje*.

V tem poglavju bomo spoznali nekatere osnovne električne lastnosti čistih polprevodnikov in polprevodnikov s primesmi ter skušali razumeti njihovo uporabo.

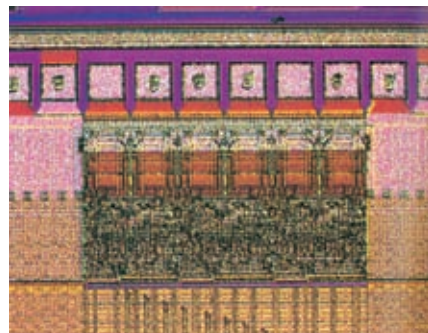
ČISTI POLPREVODNIKI

Nekoliko podrobneje si oglejmo silicij, ki je med najbolj uporabljanimi polprevodniki.

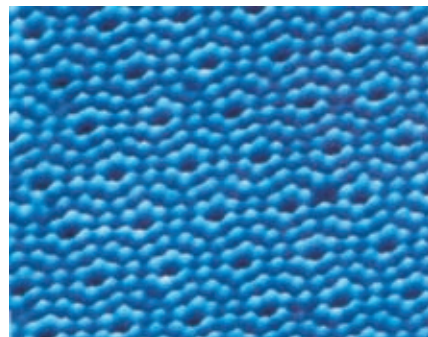


Iz periodnega sistema razberemo, da je silicij v skupini 4b skupaj z ogljikom, germanijem, kositrom in svincem. Atom silicija ima v zunanji lupini štiri za kemijsko vez pomembne elektrone, ki omogočajo izredno raznolikost silicijevih spojin. V kristalu silicija je atom vezan na štiri sosedne s kovalentnimi vezmi – v vsaki sodeluje po en elektron. Od atoma, ki si ga mislimo v središču tetraedra, so kovalentne vezi usmerjene proti ogliščem tetraedra, kjer so središča sosednjih atomov (slika 34.7).

V skicah predstavimo kristal silicija v ravnini (slika 34.8). Vsak atom je obdan s po štirimi sosedi, s katerimi je povezan s štirimi zunanjimi elektroni. V kristalu čistega silicija pri temperaturi 0 K so vsi elektroni vezani v kemijskih vezeh, kristal je izolator.

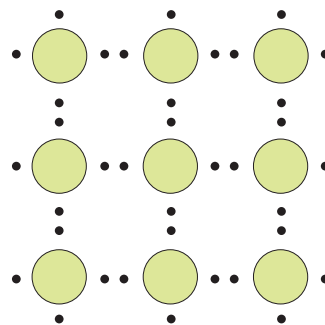


Slika 34.5 povečana slika vezja



Slika 34.6 atomska struktura površine silicijevega kristala

Slika 34.7 vezava atoma silicija v kristalu



Slika 34.8 predstavitev kristala silicija v ravnini

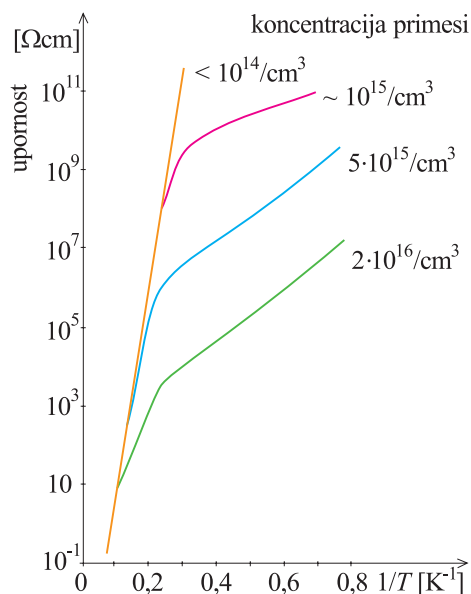
Pri višjih temperaturah se zaradi nihanja mreže atomov tu in tam kak elektron odtrga iz vezi in odtava po kristalu. Pa tudi nepopolna kemijska vez, ki ostane za odtrganim elektronom, ne miruje na mestu. Manjkajoči elektron nadomesti elektron iz sosednje vezi, tega spet njegov sosed in tako naprej. Tako se tudi vrzel v kemijski vezi ali, kratko, *vrzel*, seli po kristalu. Zaradi termičnega gibanja v kristalu neprestano nastajajo prosti elektroni in vrzeli. Hkrati se tudi *rekombinirajo* – ko se tavajoča elektron in vrzel srečata, elektron zapolni vrzel.

V takem dinamičnem ravnovesju je število elektronov in vrzeli v povprečju konstantno, močno pa je odvisno od temperature. To je razumljivo, saj je nastanek parov elektron – vrzel posledica termičnega nihanja kristalne mreže.

Ko priključimo kristal na vir napetosti, električno polje povzroči usmerjeno gibanje tavajočih elektronov in vrzeli. Elektroni se gibljejo v smeri, ki je nasprotna smeri električnega polja, vrzeli pa se gibljejo v smeri električnega polja. Navada je, da zato vrzeli obravnavamo kot delce s pozitivnim nabojem. Električne lastnosti polprevodnikov kažejo, da se elektroni in vrzeli gibljejo, kakor da bi bili prosti, le trke doživljajo med seboj ali pa z nihajočo mrežo atomov.

Kakor število parov elektron – vrzel sta tudi električna prevodnost ali upornost odvisna od temperature. Kakor smo že omenili, uporabljajo upornike iz polprevodnikov (*termistorje*) za merjenje temperature. Graf na sliki 34.9 kaže, kako se s temperaturo spreminja upornost germanija. Pri temperaturi v bližini absolutne ničle postane prevodnost zelo odvisna od primesi v vzorcu. Tudi v čistih vzorcih je primesi od 10^{10} do 10^{14} v cm^3 .

Dejavnost Sestavite vezje s slike 34.3 in umerite termistor za temperaturo od 10°C do 30°C !

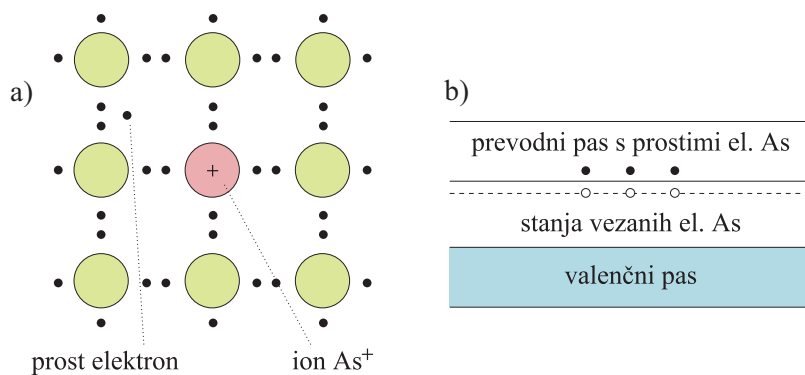


Slika 34.9 temperaturna odvisnost upora za germanij

POLPREVODNIKI S PRIMESMI

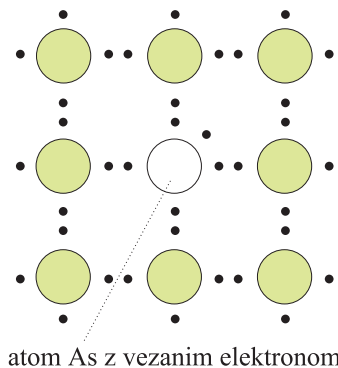
Z dodatki lahko močno spremenimo upornost polprevodnikov. Upornost čistega silicija, ki je pri sobni temperaturi okoli $2,6 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$, se zmanjša okoli 1000-krat, če dodamo siliciju po en *trivalentni* ali *petvalentni* atom iz sosednjih skupin v periodnem sistemu na 10^5 atomov silicija. Kot dodatke največkrat uporabljajo trivalentne elemente bor, galij in indij ali petvalentna fosfor in arzen. Z dodatki postane upornost silicija skoraj neodvisna od temperature.

Oglejmo si kristal silicija z atomi arzena. Atomi arzena se vgradijo na mesta, ki jih sicer zasedajo atomi silicija. S štirimi od petih razpoložljivih valenčnih elektronov se vežejo na sosednje atome silicija. Peti elektron, ki so pri taki vgradnji odveč, ostanejo pri zelo nizki temperaturi še rahlo vezani na matične atome arzena (slika 34.10). Že pri temperaturi, ki je precej nižja od sobne, pa dobijo ob termičnem nihanju kristalne mreže tolikšno energijo, da se odtrgajo in odtavajo po kristalu. Ker oddajajo elektrone, imenujemo atome arzena *donorske atome* ali *donorje*. Elektroni preidejo iz stanja, v katerem so vezani na sredice matičnih donorskih atomov, v prevodni pas kristala, in so glavni nosilci električnega toka. Sredice arzenovih atomov, ki so s tem ionizirani, kažejo glede na sredice silicijevih atomov v mreži pozitivni naboj.



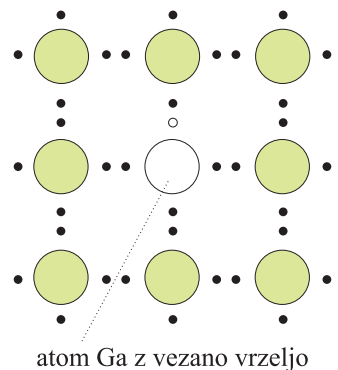
Silicij s petvalentnimi primesmi označimo kot tip *n*, saj so glavni nosilci električnega toka v njem elektroni, ki imajo negativni naboj. Slika 34.11a ponazarja kristal silicija z ioniziranimi atomi arzena in s prostimi elektroni. Slika 34.11b ponazarja zasedbo energijskih pasov za ta primer.

Oglejmo si še kristal silicija z atomi galija. Tudi atomi galija se vgradijo v kristal na mesta silicijevih atomov. S po tremi razpoložljivimi valenčnimi elektroni se vežejo na sosednje atome silicija. Zaradi manjkajočega elektrona so vezi nepopolne, pravimo, da so v njih vrzeli (slika 34.12). Vrzeli so vezane na matične atome galija le pri zelo nizki temperaturi, že pri temperaturi, ki je precej nižja od sobne, pa se zapolnijo z elektroni iz popolnih vezi med atomi silicija. Elektroni ostanejo vezani na atome galija, katerih sredice kažejo zaradi tega negativni naboj glede na sredice atomov silicija. Ker sprejemajo elektrone, imenujemo atome galija tudi *akceptorske atome* ali



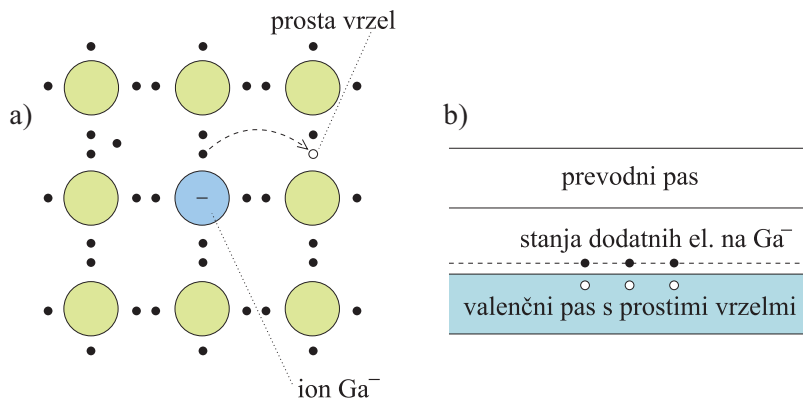
Slika 34.10 kristal silicija z vgrajenim atomom arzena pri nizki temperaturi

Slika 34.11 kristal silicija z ioniziranimi atomi arzena (a) in zasedba energijskih pasov v tem primeru (b)



Slika 34.12 kristal silicija z vgrajenim atomom galija pri nizki temperaturi

akceptorje. Nastale vrzeli v vezeh med atomi silicija se lahko prosto selijo po kristalu. Pravimo, da preidejo vrzeli iz vezanih stanj v okolici atomov galija v valenčni pas, kjer so prosto gibljive in tako lahko prenašajo električni tok. Ker se gibljejo vrzeli v električnem toku kakor delci s pozitivnim nabojem, imenujemo kristal silicija s trivalentnimi primesmi tip *p*.



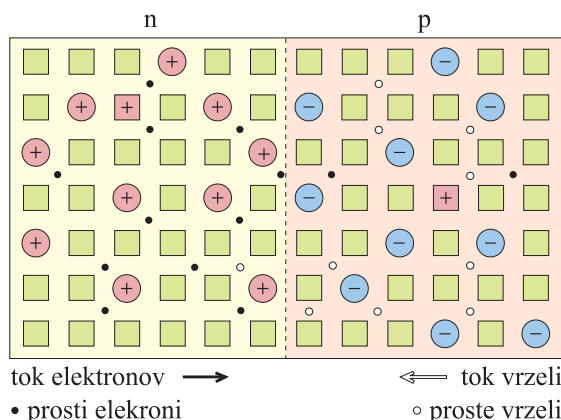
Slika 34.13 kristal silicija z ioniziranimi atomi galija (a) in zasedba energijskih nivojev v tem primeru (b)

Slika 34.13a ponazarja kristal silicija s trivalentnimi primesmi in prostimi vrzelmi. Slika 34.13b kaže zasedbo energijskih pasov za tak primer.

Kristale tipa *n* ali tipa *p* dobijo tako, da dodajo ustrezne primesi talini čistega silicija. Z difuzijo pri temperaturi malo pod tališčem silicija pa lahko električne lastnosti naknadno spremenijo. Iz kristala tipa *p* lahko z difuzijo primesi tipa *n* nastane kristal tipa *n* in nasprotno. Navadno spremeni difuzija le tanko površinsko plast osnovnega kristala. Stik tipov *p* in *n* ali, kratko, stik *pn* je osnova za skoraj vso uporabo polprevodnikov v elektroniki.

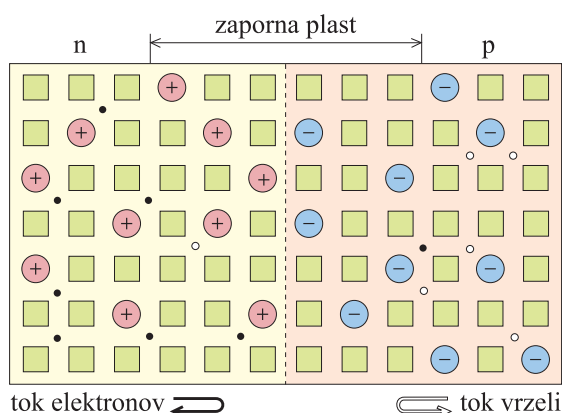
**** | STIK *pn***

Oglejmo si stik med območjema *p* in *n* v kristalu silicija ali germanija bolj podrobno (slika 34.14). Ob stiku se začne difuzija elektronov s območja *n*, kjer jih je veliko, na območje *p*, kjer jih je malo, hkrati pa



Slika 34.14 difuzija elektronov in vrzeli čez stik *pn* pred ravnovesjem

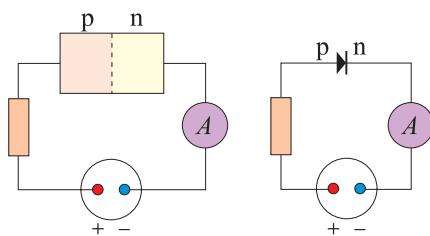
difuzija vrzeli s območja p , kjer jih je veliko, na območje n , kjer jih je malo. V bližini meje med območjema elektroni zapolnijo vrzeli. To ima za posledico, da ostane na območju n plast pozitivno nabitih sredič donorskih atomov, na območju p pa plast negativno nabitih sredič akceptorskih atomov. Med plastema nastane električno polje, ki zaustavi nadaljnji tok vrzeli in elektronov. V plasti, ki je debela nekaj mikrometrov, je električno polje z jakostjo okoli 10^6 V/m. Plast imenujemo tudi *zaporna plast*.



Slika 34.15 stik pn v ravnovesju

Slika 34.15 kaže ravnovesno stanje staknjenih polprevodnikov tipa n in tipa p . Moramo se zavedati, da je slika statična in ne more ponazoriti vsega dogajanja. Zaradi difuzije namreč v območje stika neprestano prodirajo elektroni z območja n in vrzeli z območja p . Električno polje zavrača tako elektrone kakor vrzeli nazaj na njuni območji. Med območjema se lahko brez težav pretakajo le prosti elektroni, ki se zaradi termičnega gibanja rojevajo na območju p , in proste vrzeli, ki se zaradi termičnega gibanja rojevajo na območju n . Videli smo že, da ti predstavljajo le majhen del celotnega števila.

Stik pn je vgrajen v polprevodniške *diode*. Povežimo diodo zaporedno z upornikom za nekaj $100\ \Omega$ v električni krog z baterijo za nekaj voltov (slika 34.16). Ugotovimo, da dioda prevaja, če je območje p priključeno na pozitivni priključek baterije, in ne prevaja, če je priključeno na negativni priključek baterije. Prevodno smer diode nakazuje tudi simbol za diodo – dioda prevaja v smeri puščice, ne pa v nasprotni smeri.

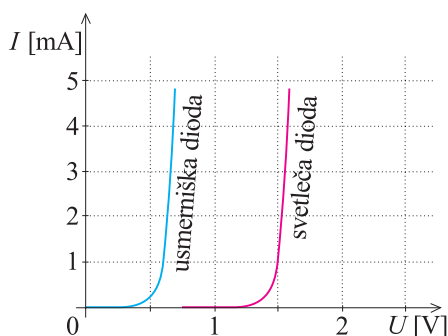


Slika 34.16 vezava polprevodniške diode

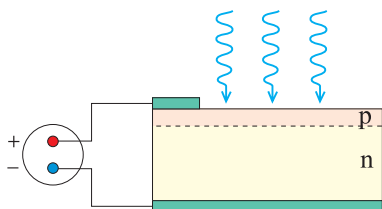
Razložimo delovanje diode s tem, kar vemo o stiku pn . Naj bo priključena dioda z območjem n na pozitivni priključek baterije. Električno polje, ki ga ustvari baterija, ima isto smer kakor električno polje v zaporni plasti. Zaradi tega se zaporna plast še razširi, kar še bolj zapira difuzijske tokove med plastema. Teče lahko le majhen tok elektronov z območja p in vrzeli z območja n . V drugem primeru obrnemo priključka baterije. Sedaj se električno polje v zaporni plasti zmanjša. Ker se s tem zmanjša ovira za difuzijo, začno elektroni in vrzeli prodirati prek stika na nasprotni območji. Bolj ko se električno polje na stiku zmanjšuje, hitreje se povečuje tok skozi stik. O tem



Slika 34.17 z elektronskim mikroskopom posneta vrsta IR diod



Slika 34.18 karakteristika usmerniške in svetleče diode



Slika 34.19 shema sončne celice

nas prepriča karakteristika diode (slika 34.18). Ko je stik odprt, je električni tok skoraj v celoti odvisen le od upora v zunanjem krogu in od napetosti vira.

Pri prehodu prek stika se elektroni in vrzeli *rekombinirajo*. Energijo, ki se pri tem sprosti, največkrat prevzame kristalna mreža – ob tem se dioda segreje. Lahko pa dioda oddaja tudi svetlobo. *Svetleče diode*, narejene na osnovi galijevega ali indijevega arsenida, oddajajo vidno svetlobo in jih uporabljamo za signalne lučke.

V *fotoelementih* – *fotodiodah* in *sončnih celicah* – uporabljamo obratni pojav. Ob absorpciji fotonov svetlobe se v zaporni plasti rodijo pari elektronov in vrzeli. Električno polje v plasti povzroči, da se elektroni in vrzeli ločijo – elektroni odtečejo na območje *n*, vrzeli pa na območje *p*. V sklenjenem električnem krogu steče tok. Slika 34.19 kaže zgradbo sončne celice iz silicija. Pri polni sončni svetlobi lahko daje 1 cm² sončne celice tok od 20 do 30 mA.

Dejavnost Povežite sončno celico v primeren električni krog in merite tok in napetost na njej. Odgovorite na naslednji vprašanji: Kako sta tok, ki ga daje sončna celica, in napetost na njej odvisna od osvetljenosti? Kako naj bo obremenjena sončna celica, da bo oddajala največjo moč?

** TRANZISTOR

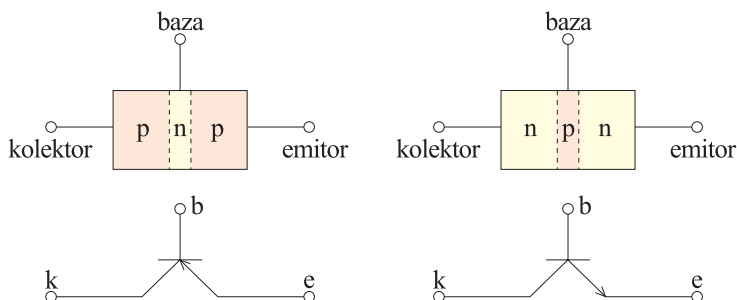


Slika 34.20 prvi tranzistor iz leta 1947

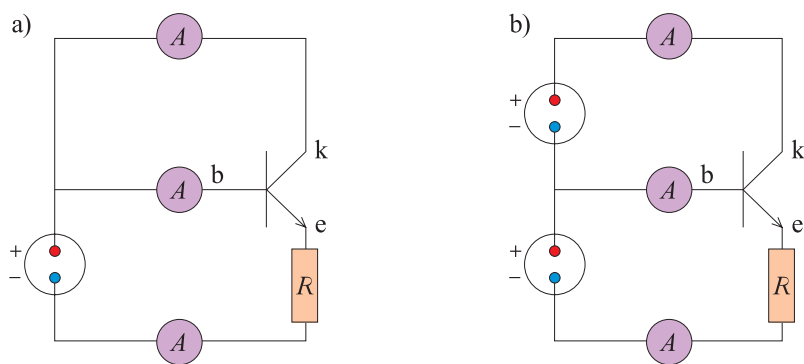
Najvažnejši polprevodniški element je prav gotovo *tranzistor*. Sestavljajo ga tri plasti polprevodnikov, ki si sledijo v zaporedju *p-n-p* ali *n-p-n*. Zaradi vloge, ki jo imajo, imenujemo plasti po vrsti *kolektor*, *baza* in *emitor*. Slika 34.21 kaže zgradbo obeh tipov tranzistorjev in njuna simbola.

Za delovanje tranzistorja sta pomembna z vsega nekaj mikrometrov debelo bazo ločena stika *pn* med kolektorjem in bazo oziroma med bazo in emitorjem.

Tranzistor vključimo v električni krog tako, da je stik med kolektorjem in bazo priključen v zaporni smeri, stik med emitorjem in bazo pa v prevodni smeri. Naredimo eksperiment, ki ga kaže slika 34.22a. V električni kroga med emitorjem in bazo ter med kolektorjem in bazo



Slika 34.21 zgradba tranzistorjev pnp in npn in njuna simbola



Slika 34.22 določanje tokov po tranzistorju brez (a) in z dodatnim virom napetosti v kolektorskem krogu (b)

sta za naš namen priključena ampermetra. Ampermeter je priključen tudi v vodu, ki vodi v bazo.

Tok, ki ga pokažeta ampermetra v kolektorskem in v emitorskem krogu, je enak, le zelo majhen del teče tudi v bazo. Ta tok je odvisen od napetosti izvira med kolektorjem in bazo, U , in od upora R v tem krogu.

Dogajanje si razložimo takole: skozi "odprti" stik n - p med emitorjem in bazo difundirajo elektroni iz emitorja v bazo. Ker je baza zelo tanka, jih pretežni del posrka zaporno električno polje na stiku p - n med bazo in kolektorjem, le majhen del jih odteče po električnem krogu med bazo in emitorjem. Z dodatnim virom napetosti (slika 34.22b) povečamo napetost med bazo in kolektorjem in razširimo zaporno plast. Električno polje tedaj posrka še večji delež pritekljivih elektronov.

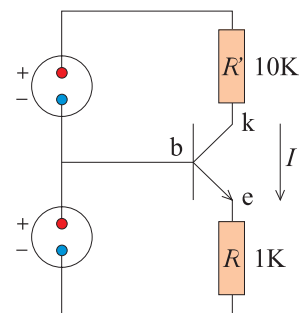
Ta pojav omogoča, da uporabimo tranzistor za ojačevanje. Videli smo, da je tok I , ki teče med kolektorjem in emitorjem, odvisen le od napetosti U med bazo in emitorjem in od upora R . Na uporniku z uporom R' , ki ga vključimo v kolektorsko vejo kroga (slika 34.23), se zaradi tega toka vzpostavi napetost IR' , ki je večja od napetosti U , če je upor R' večji od upora R in če z dodatnim virom napetosti zagotovimo, da se zaradi tega ne spremeni zaporno polje na stiku p - n med kolektorjem in bazo. Napetostno ojačenje je tedaj

$$\frac{U'}{U} = \frac{R'}{R}.$$

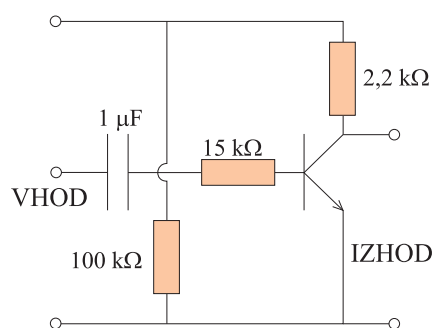
Slika 34.24 kaže kako navadno vežemo tranzistor, ko ga uporabimo za ojačevanje napetosti. Prednost te vezave pred prejšnjo je ta, da skozi vir ojačevane napetosti, ki je priključen na bazo, teče le zelo majhen tok. Tok med kolektorjem in emitorjem, ki je tudi do stokrat večji, poganja napajalni vir.

Dejavnost Sestavite vezje na sliki 34.24 in določite ojačenje.

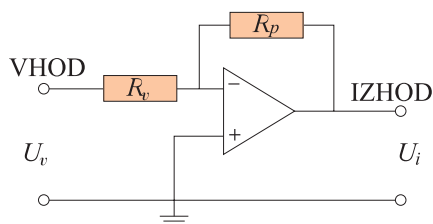
V sodobnih elektronskih napravah je tranzistor del *integriranih elektronskih vezij*. Eno od takih vezij je *operacijski ojačevalnik*, ki rabi med drugim tudi za ojačevanje električnih napetosti. Z njim pa lahko napetosti tudi seštevamo, delimo, integriramo ali odvajamo.



Slika 34.23 ojačevanje s tranzistorjem



Slika 34.24



Slika 34.25 shema operacijskega ojačevalnika z negativno povratno zvezo

Shema na sliki 34.25 kaže, kako uporabimo operacijski ojačevalnik za ojačevanje napetosti. Vhodno napetost U_v prek vhodnega upornika z uporom R_v priključimo na negativni vhod ojačevalnika, pozitivni priključek ojačevalnika pa priključimo na skupni ozemljeni vod. Prek upornika z uporom R_p povežemo negativni vhod ojačevalnika z izhodom. S tem ustvarimo *povratno zvezo*. Z voltmetrom merimo napetost U_i med izhodom ojačevalnika in ozemljenim vodom.

Ojačevalnik ojačuje napetostno razliko med pozitivnim in negativnim vhodom za faktor 10^4 do 10^5 ali več. To pa pomeni, da je napetostna razlika med vhomoma vselej zelo majhna, saj izhodna napetost ne more preseči napajalne napetosti 10 – 12 V. Ker smo ozemljili enega od vhodov, je tudi napetost na drugem ves čas okoli nič. Ojačevalnik ima tudi zelo velik notranji upor, tako da lahko računamo, kakor da vanj ne teče noben tok.

Zaradi vhodne napetosti teče po vhodnem uporniku tok

$$I = \frac{U_v}{R_v}.$$

Enako velik tok

$$I = \frac{U_i}{R_p}$$

teče tudi po uporniku v povratni zvezi. Iz enakosti dobimo enačbo, ki povezuje izhodno napetost z vhodno. Upoštevajmo še, da imata napetosti glede na skupni ozemljeni vod nasproten znak, pa dobimo

$$U = -\frac{R_p}{R_v} U_v.$$

Dejavnost Določite ojačenje operacijskega ojačevalnika z uporovno povratno zvezo. Kako bi seštevali napetosti? Kako bi jih integrirali ali odvajali?

35. | SVET MIKRODELCEV

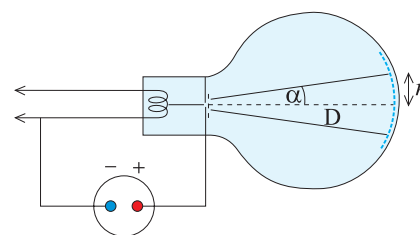
Ob obravnavi interakcije med svetlobo in atomi smo spoznali, da notranja energija atomov zavzema le vrednosti, ki jih najdemo na lestvici stanj. Pri spremembah prehajajo elektroni med enoelektronskimi stanji, ki jih med drugim opredeljujejo izbrane vrednosti energije. Tudi elektroni v trdni snovi zasedajo enoelektronska stanja z opredeljeno energijo, le da so tam ta stanja nanizana zelo na gosto in zbrana v pasovih.

Atomi in elektroni v njih se razlikujejo od teles, ki smo jih spoznavali doslej. Diskretne vrednosti energije, ki jih edine lahko imajo, kažejo na njihovo *kvantno naravo*. To zahteva, da jih obravnavamo na drugačen način kakor drobna telesa iz vsakdanjega sveta. Vendar pa se kvantna narava delcev ne kaže v vseh okoliščinah enako. Elektrone v curku, ki riše po zaslonu televizorja, lahko obravnavamo kakor navadne delce, elektronov v atomu pa tako ne moremo obravnavati.

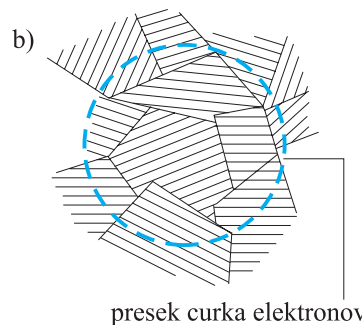
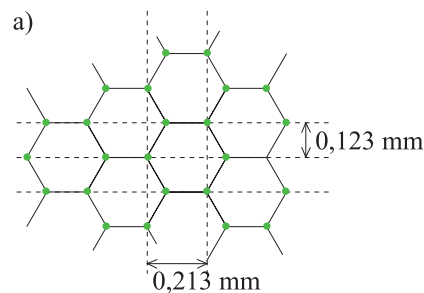
Oglejmo si tale poskus. V evakuirani buči z elektronskim topom ustvarimo curek elektronov in ga usmerimo skozi tanko plast grafita. Na fluorescenčnem zaslonu na steni cevi opazujemo sled, ki jo tam pušča curek po prehodu skozi plast (slika 35.1).

Pričakovali bi, da se bo curek pri prehodu skozi plast grafita nekoliko razpršil, podobno kakor se razprši curek vode, ki vpada na gosto mrežo. Presenečeni opazimo na zaslonu izrazita kolobarja, ki nas spominjata na interferenčno sliko pri prehodu curka svetlobe skozi vrteče se sito ali pa skozi mrežico, ki jo sestavljajo drug proti drugemu za različne kote zasukani deli takega sita. Brž tudi ugotovimo, da sta radija interferenčnih kolobarjev odvisna od pospeševalne napetosti – ko napetost povečujemo, se radija zmanjšujeta.

Slika 35.2a kaže razporeditev atomov ogljika v kristalu grafita. Vidimo, da so razporejeni na ogliščih pravilnega šestkotnika. Nizi atomov tvorijo pravokotno mrežico, ki ima v eni smeri mrežno razdaljo 0,213 nm, v pravokotni smeri pa 0,123 nm. V plasti, skozi katero prodira curek elektronov, je množica mikrokristalčkov grafita, ki so zasukani drug proti drugemu (slika 35.2b). Vsak mikrokristalček daje svojo interferenčno sliko, ki je nekoliko zasukana proti slikam drugih mikro-kristalčkov. Vse slike skupaj se zlijejo v dva interferenčna kolobarja. Radij prvega kolobarja je določen s prvo, radij drugega kolobarja pa z drugo mrežno razdaljo.



Slika 35.1 shema poskusa s curkom elektronov pri prehodu skozi grafitno mrežico



Slika 35.2 (a) ploskovna mrežica atomov ogljika v kristalku grafita, (b) mikrokristalčki grafita, na katere vpada curek elektronov pri poskusu s slike 35.1.

Izračunajmo valovno dolžino valovanja, ki bi dajalo tako interferenčno sliko. Kota α_1 in α_2 , pod katerima sta ojačena interferenčna kolobarja, določimo z radijema kolobarjev r_1 in r_2 in s premerom bučke D (slika 35.1):

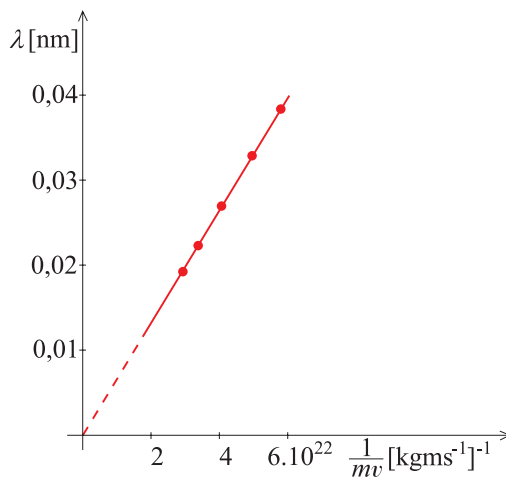
$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{r_1}{D} = \alpha_1, \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{r_2}{D} = \alpha_2.$$

Iz interferenčnega pogoja

$$d \sin \alpha = d \alpha = \lambda$$

tako izračunamo valovno dolžino

$$\lambda = d_1 \frac{r_1}{D} = d_2 \frac{r_2}{D}.$$



Slika 35.3 valovna dolžina elektronov v odvisnosti od obratne vrednosti gibalne količine, kakor jo določimo pri poskusu s slike 35.1

Interferenčna slika pri napetosti 2000 V da valovno dolžino 0,027 nm, pri napetosti 3000 V valovno dolžino 0,022 nm, pri 4000 V valovno dolžino 0,019 nm in tako naprej. Graf na sliki 35.3 kaže, da je valovna dolžina obratno sorazmerna z gibalno količino elektronov. Z grafa lahko razberemo tudi sorazmernostni koeficient – Planckovo konstanto h . Z enačbo zapisano je valovna dolžina

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Valovno dolžino valovanja, ki daje enako interferenčno sliko, kakor jo dobimo z elektroni z izbrano gibalno količino, imenujemo *de Brogliejeva valovna dolžina*.

Tudi poskusi z drugačnimi delci, npr. protoni, nevtroni, atomi ali molekulami, bi dali podobne izide. Vsakič bi pri prehodu curkov skozi drobne ovire opazovali interferenčno sliko, ki je podobna tisti, ki bi jo dalo valovanje z de Brogliejevo valovno dolžino. To ne pomeni, da so se delci spremenili v valove, le pri prehodu skozi ovire se tako vedejo.

* Prehod elektronov skozi plast grafita lahko obravnavamo še drugače. Curek vpada pravokotno na mrežico – taka je tudi smer gibalne količine elektronov. Po prehodu skozi mrežico pa imajo elektroni, ki tvorijo interferenčna kolobarja, prečno komponento gibalne količine

ΔG , ki je pravokotna na prvotno. S slike 35.4 razberemo, da je ta komponenta

$$\Delta G = G \alpha = \frac{h}{d},$$

če je d mrežna razdalja. Produkt prečne komponente gibalne količine ΔG in mrežne razdalje d je enak Planckovi konstanti

$$\Delta G d = h.$$

Enačba izraža posebno obliko *zakona o nedoločljivosti*. Pri prehodu skozi mrežico je na mrežno razdaljo natančno določena prečna lega elektrona v curku. Določanje samo pa povzroči spremembo prečne gibalne količine elektrona. V splošnem primeru zakon o nedoločljivosti izraža dejstvo, da pri hkratnem določevanju lege delca in ustrezne komponente gibalne količine produkt nedoločenosti Δx in ΔG ne more biti manjši od kvocienta $h/2\pi$ ali napisano z enačbo

$$\Delta x \Delta G \geq \frac{h}{2\pi}.$$

Zakon pa ne omejuje le naših možnosti pri določevanju tirov delcev, ampak opredeljuje tudi gibanje delcev. Čimbolj je gibanje delcev prostorsko omejeno, tembolj je živahno, saj prostorska omejitev povečuje negotovost v gibalni količini, s tem pa tudi gibalno količino samo in z njo povezano kinetično energijo.

**** Z nedoločljivostjo gibanja delcev sta povezani velikosti atomov in atomskih jeder.** Vzemimo za zgled atom vodika. V njem je na atomsko jedro – proton – vezan en sam elektron. V osnovnem stanju meri radij atoma vodika okoli 0,053 nm. Vzemimo, da je taka tudi nedoločenost v legi elektrona. Po zakonu o nedoločljivosti je tedaj nedoločenost v gibalni količini

$$\Delta G = \frac{h}{2\pi r} = 1,98 \cdot 10^{-24} \text{ kg m/s}.$$

Izenačimo to kar s celo gibalno količino G in izračunajmo kinetično energijo elektrona

$$W_k = \frac{G^2}{2m} = 13,5 \text{ eV}.$$

Izračunajmo še potencialno energijo elektrona v razdalji, ki je enaka radiju atoma

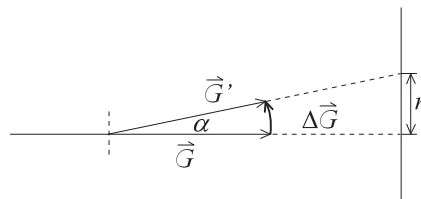
$$W_p = -\frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r} = -27,0 \text{ eV}.$$

Skupna notranja energija atoma je tedaj

$$W = W_k + W_p = -13,5 \text{ eV},$$

kar že poznamo kot energijo atoma vodika v osnovnem stanju.

Poskusi z uklonom elektronov pri prehodu skozi grafitno ploščico in mnogi podobni poskusi, tako z elektroni kakor z drugimi delci, in z njimi potrjen zakon o nedoločljivosti so podlaga za drugačno obravnavanje kvantnih delcev. V *kvantni mehaniki* njihovo stanje opredelimo z *valovno funkcijo*, ki vsebuje koordinate delca in čas, in iščemo zakone, ki – kakor Newtonov zakon za navadne delce – opredeljujejo spremembe stanja in gibanje.



Slika 35.4 sprememba gibalne količine elektronov pri prehodu skozi mrežico grafita

36. | VPRAŠANJA IN NALOGE

VPRAŠANJA

1. Curek UV svetlobe usmerimo na ploščico cinka, ki je zvezana z občutljivim elektroskopom. Kaj po vašem mnenju pokaže elektroskop?
2. Pri poskusu nabijemo elektroskop s cinkovo ploščico enkrat pozitivno, drugič pa negativno. Kako to vpliva na gibanje elektronov, ki izstopajo iz ploščice zaradi fotoefekta? Kaj pokaže elektroskop v prvem in kaj v drugem primeru?
3. Z grafa na sliki 33.13 ocenite, koliko je elektronov, ki izstopijo iz katode s kinetično energijo, večjo od 0,4 eV! Koliko je takih, ki imajo kinetično energijo večjo od 0,35 eV? Koliko pa je takih, ki imajo kinetično energijo med obema mejama?

NALOGE

Odgovor: 3,10 eV
1,77 eV

Odgovor: 335 nm

Odgovor: 509 nm

Odgovor: 0,28 eV

Odgovor: 2,16 eV

Odgovor: 280

Odgovor: 0,05 nm

1. Kolikšna je energija fotonov svetlobe z valovno dolžino 400 nm oziroma 700 nm? Ti dve valovni dolžini predstavljata meji vidnega dela EM spektra.
2. Fotoni imajo energijo 3,7 eV. Kolikšna je valovna dolžina ustrezne svetlobe?
3. Kolikšna je mejna valovna dolžina za fotoefekt pri kovini, ki ima izstopno energijo $3,9 \cdot 10^{-19}$ J?
4. Kovinski barij ima izstopno energijo 2,48 eV. Kolikšna je največja kinetična energija izstopajočih elektronov, ko osvetljuje barij curek svetlobe z valovno dolžino 450 nm?
5. Ko osvetljujemo kovinsko katodo v fotocelici s svetlobo z valovno dolžino 380 nm, izstopajo iz nje elektroni z maksimalno kinetično energijo 1,1 eV. Kolikšna je izstopna energija za elektrone v kovini?
6. Najmanjši svetlobni tok rumenozelene svetlobe z valovno dolžino 560 nm, ki ga zaznava človeško oko, je okoli 10^{-16} W. Koliko fotonov na sekundo je to?
7. V rentgenski cevi je napetost med anodo in katodo 25 kV. Kolikšna je mejna valovna dolžina v spektru rentgenske svetlobe iz te cevi?

8.] V rentgenski cevi pospešimo elektrone do polovice svetlobne hitrosti. Kolikšna je najmanjša valovna dolžina v spektru rentgenske svetlobe, ki nastane, ko se curek ustavi ob anodi?

Odgovor: 0,016 nm

9.] V slikovni cevi barvnega televizorja udarjajo elektroni v zaslon s kinetično energijo 30 keV. Pri tem nastaja tudi rentgenska svetloba. Kolikšna je najmanjša valovna dolžina v spektru? Zakaj televizijski zasloni navzven ne sevajo rentgenske svetlobe?

Odgovor: 0,041 nm; nastala rentgenska svetloba se absorbira v debeli stekleni steni cevi.

10.] Rentgenska cev obratuje pri napetosti 100 kV in pri toku 20 mA. Skoraj vsa kinetična energija elektronov pri vpadu na anodo gre za gretje anode. Za koliko se segreje hladilna voda, ki teče skozi anodo s tokom 5 l/min?

Odgovor: 5,7 K

11.] Atom vodika je v vzbujenem stanju z glavnim kvantnim številom $n = 3$. Kolikšno energijo mu moramo še dovesti, da preide v ionizirano stanje?

Odgovor: 1,51 eV

12.] Kolikšna je valovna dolžina svetlobe, ki jo odda atom vodika pri prehodu iz stanja z glavnim kvantnim številom $n = 4$ v stanje z glavnim kvantnim številom $n = 2$? Kolikšna je najmanjša valovna dolžina svetlobe, ki jo lahko izseva atom pri prehodu iz stanja z glavnim kvantnim številom $n = 4$?

Odgovor: 486 nm
97,3 nm

13.] Rumeno svetlobo natrija sestavljata dve črti z valovnima dolžinama 589,0 nm in 589,6 nm, ki nastaneta pri prehodu atoma iz bližnjih vzbujenih stanj v osnovno stanje. Za koliko eV se razlikujeta energiji vzbujenih stanj?

Odgovor: 0,0021 eV.

14.] V absorpcijskem spektru sončne svetlobe določimo absorpcijsko črto pri valovni dolžini 656 nm, ki jo pripišemo absorpciji v atomskem vodiku v sončni atmosferi. V katerem stanju so atomi vodika, ki lahko absorbirajo svetlobo z valovno dolžino 656 nm?

Odgovor: Atomi so v stanju z $n = 2$ in preidejo v stanje z $n = 3$.

15.] Katere od naslednjih elektronskih konfiguracij ne morejo nastati v atomu: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^3$, $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 4p^2$, $1s^2 2s^2 2p^8 3s^1$? Zgornji indeks pri oznaki podlupine označuje število elektronov v podlupini.

Odgovor: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^3$, $1s^2 2s^2 2p^8 3s^1$.

16.] Ionizacijska energija neona ($Z = 10$) je 21,6 eV, ionizacijska energija natrija ($Z = 11$) pa 5,1 eV. Kako bi razložili tako veliko razliko?

Odgovor: Neon ima zaključeno lupino L ($2s, 2p$) z 8 elektroni, natrij pa ima dodaten elektron $3s$ izven te lupine.

17.] Rentgensko svetlobo v spektralni črti $K_{\alpha 1}$ odda atom bakra pri prehodu med stanjema z energijo 8,980 keV in 0,953 keV. Kolikšna je valovna dolžina rentgenske svetlobe, ki pripada tej črti? Kolikšna je energija fotona te svetlobe?

Odgovor: 0,154 nm
8030 eV

18.] Kristal kuhinjske soli je prozoren za infrardečo in vidno svetlobo, neprozoren pa za ultravijolično svetlobo, ki ima valovno dolžino krajšo od 210 nm. Kolikšna je energijska reža med valenčnim in prevodnim pasom za elektrone v kristalu kuhinjske soli?

Odgovor: 5,90 eV

19.] Silicij ima med valenčnim in prevodnim pasom energijsko režo 1,1 eV. Kolikšna sme biti največ valovna dolžina svetlobe, s katero

Odgovor: 1130 nm

osvetljujemo kristal silicija, da pride do prehodov elektronov iz valenčnega v prevodni pas?

Odgovor: 1720 nm

20.] V germaniju meri energijska reža med valenčnim in prevodnim pasom 0,72 eV. Pri kateri valovni dolžini svetlobe je meja za notranji fotoefekt?

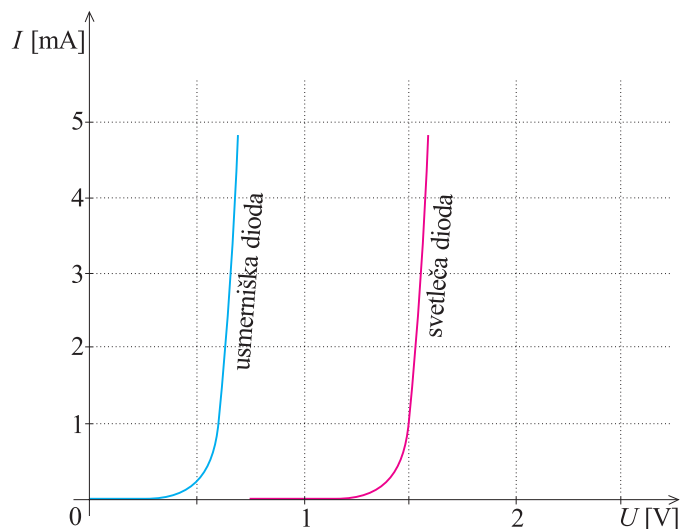
Odgovor: $5 \cdot 10^6$

21.] V kristal silicija z difuzijo vnesemo atome petvalentnega fosfora, približno po en atom na 10^6 atomov silicija. Pri sobni temperaturi so vsi atomi fosfora ionizirani – od vsakega atoma preide po en elektron v prevodni pas. Za kolikokrat se zaradi tega poveča gostota elektronov v prevodnem pasu? V čistem siliciju pri sobni temperaturi je gostota elektronov v prevodnem pasu okoli 10^{16} m^{-3} . Gostota silicija je 2330 kg/m^3 .

22.] Usmerniško diodo, katere karakteristiko kaže slika, povežemo zaporedno z upornikom za 1000Ω in priključimo na izvir napetosti za 12 V. Kolikšen tok teče po krogu?

Odgovor: Ko dioda prevaja, je napetost na njej skoraj neodvisna od toka. S slike razberemo, da je napetost na diodi, U_d , okoli 0,6V. Po Ohmovem zakonu je tedaj tok enak

$$I = (U_0 - U_d)/R = 11,4 \text{ mA} .$$



Odgovor: $4,6 \cdot 10^4 \text{ m/s}$

23.] Lego elektrona lahko določimo na $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ natančno. S kolikšno natančnostjo lahko določimo njegovo hitrost?

Odgovor: $3,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

24.] Proton se giblje s hitrostjo $(8,880 \pm 0,012) \cdot 10^5 \text{ m/s}$. S kolikšno natančnostjo lahko določimo njegovo lego?

Odgovor: 10 MeV

25.*] Ocenite najmanjšo kinetično energijo nevtrona v atomskem jedru z radijem $4,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$!

Odgovor: Gibalno količino dobimo iz načela nedoločljivosti kot $p = \Delta p = h/(2r) = 7,4 \cdot 10^{-20} \text{ kgm/s}$. Elektroni s tolikšno gibalno količino imajo skoraj svetlobno hitrost. Njihova energija je skoraj v celoti kinetična $W = pc = 140 \text{ MeV}$.

26.*] Kolikšna bi bila kinetična energija elektrona, ki bi bil vezan v atomskem jedru z radijem $4,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$? Prav podobna ocena je pripomogla k spoznanju, da elektroni ne morejo biti vezani v atomskem jedru.

27.* Curek nevtronov s kinetično energijo $(1/40)$ eV usmerimo pravokotno na zaslon, v katerem sta dve tanki reži $1\text{ }\mu\text{m}$ narazen. V kolikšni medsebojni razdalji izmerimo interferenčne maksime s števcem, ki je 10 m stran od zaslona?

28.* V elektronskem mikroskopu preiskujejo vzorce z elektroni s kinetično energijo 100 keV . Ocenite, kolikšne najmanjše podrobnosti lahko odkrijejo!

Odgovor: Valovna dolžina, ki jo pripišemo nevtronom, je

$$\lambda = h/(m v) = 7,8\text{ nm} .$$

Interferenčne maksime opazimo v smereh, za katere velja, da je

$$d \sin \theta = N \lambda .$$

Z 1 m oddaljenim števcem odkrijemo curke $7,8\text{ cm}$ narazen.

Odgovor: Podrobnosti so istega reda velikosti kakor valovna dolžina, to je $4 \cdot 10^{-12}\text{ m}$.

37. | ATOMSKO JEDRO

SESTAV, MASA IN VELIKOST ATOMSKEGA JEDRA

Atom elementa z vrstnim številom Z sestavlja Z elektronov s skupnim nabojem $-Ze_0$ in jedro s pozitivnim nabojem Ze_0 , ki uravnovesi naboj elektronov. Pozitivni naboj v jedru je vezan na Z protonov, od katerih ima vsak naboj $+e_0$. Atom je navzven električno nevtralen.

Maso atoma razberemo iz podatkov v periodnem sistemu. Tam je navedena povprečna relativna atomska masa M . Povprečna masa atoma je tedaj

$$m = M u ,$$

če je u atomska masna enota

$$u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} .$$

Maso atoma sestavljata masa elektronov in masa jedra. Masa elektronov,

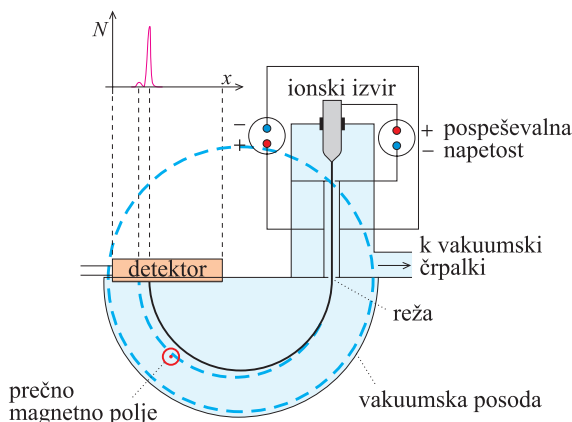
$$m' = Z m_e = Z \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} ,$$

je majhna v primerjavi z maso atoma. O tem se lahko prepričamo s kratkim računom.

Maso atoma vodika, 1,00783 u, npr. sestavljata masa protona, 1,00729 u, in masa elektrona, $(1/1825) u = 0,00054 u$. Masa jedra je torej 99,95 % mase atoma vodika. Podobno je razmerje pri drugih atomih.

Atomi izbranega elementa se razlikujejo po masah, čeprav so po kemijskih lastnostih enaki. Pravimo, da sestavljajo element različni *izotopi*.

Slika 37.1 Shema masnega spektrografa. Ione, ki jih v ionskem izvoru pridobimo iz izbranega vzorca, pospešujemo s pospeševalno napetostjo, nato pa usmerimo skozi plošči kondenzatorja, med katerima sta hkrati električno in magnetno polje, pravokotni drugo na drugo. Skozi vstopno in izstopno režo preidejo le ioni z izbrano hitrostjo. Ti vstopajo v prečno magnetno polje, kjer se curek razkloni v pahljačo curkov, v katerih so ioni z različnimi masami.



Mase izotopov določajo v *masnih spektrografih*. Slika 37.1 shematično kaže masni spektrograf, v katerem ione z izbrano hitrostjo s prečnim magnetnim poljem razklonijo v *masni spekter*. Za detekcijo ionov so v začetku uporabljali *fotografske plošče*, sedaj pa uporabljajo različne *števce*. Podrobnejšo razlago si preberite ob sliki. Da boste delovanje bolje razumeli, ponovite poglavje o gibanju nabitih delcev po električnem in magnetnem polju v učbeniku za elektriko. V kaki fizikalni enciklopediji si lahko ogledate še drugačne tipe masnih spektrografov ali *spektrometrov*, kakor se tudi imenujejo.

Jedra različnih izotopov se med seboj razlikujejo po številu *nevtronov*.

Nevtron, delec z maso 1,00867 u in brez naboja, je drugi sestavni del atomskih jeder. Skupaj s protonom ga imenujemo *nukleon* – jedrski delec. Jedro opredelimo z vrstnim številom elementa *Z*, ki pove število protonov, in z *nukleonskim* ali tudi *masnim številom* *A*, ki pove skupno število nukleonov v jedru. Iz teh dveh podatkov sledi za število nevtronov *N*:

$$N = A - Z .$$

Po dogovoru označujemo izotope s kemijskim simbolom, pred katerim stoji kot spodnji indeks atomsko število, kot zgornji indeks pa masno število:

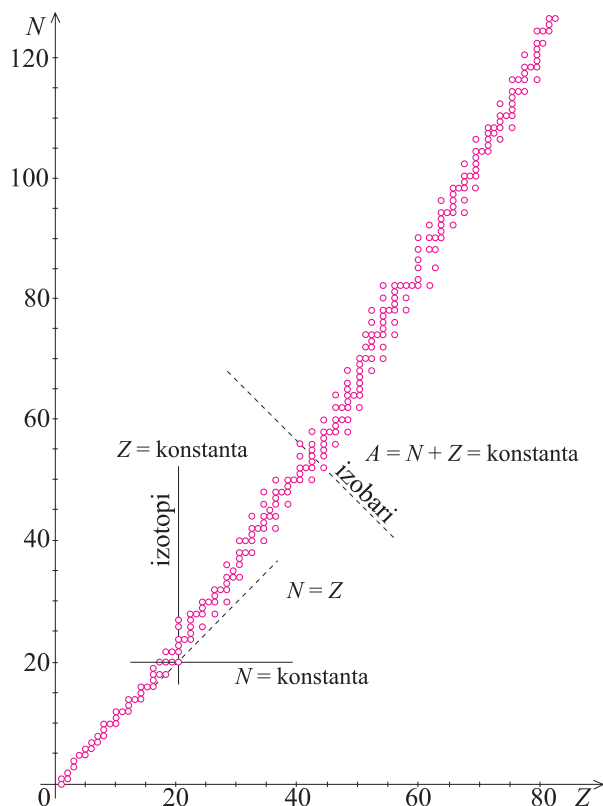


Tako npr. simbol označuje izotop kisika z masnim številom 16, simbol pa izotop urana z masnim številom 238. Pogosto opuščamo spodnji indeks, ki označuje atomsko število.

V spodnji tabeli najdemo izotope nekaj elementov z začetka periodnega sistema in njihove mase.

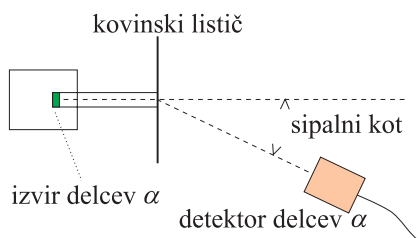
Element	Vrstno število	Nukleonsko število	Atomska masa [u]	Delež v naravni mešanici [%]
H	1	1	1,00783	99,98
	1	2	2,01410	0,02
He	2	3	3,01603	3·10 ⁻⁴
	2	4	4,00260	100
Li	3	6	6,01513	7,52
	3	7	7,01601	92,48
Be	4	9	9,01218	100
B	5	10	10,01294	20
	5	11	11,00931	80
C	6	12	12,00000	98,9
	6	13	13,00335	1,1
N	7	14	14,00307	99,6
	7	15	15,00011	0,37
O	8	16	15,99491	99,76
	8	17	16,99913	0,04
	8	18	17,99916	0,20

Slika 37.2 število nevtronov in protonov v jedrih atomov, ki jih najdemo v naravi



Graf na sliki 37.2 kaže število nevtronov in število protonov v jedrih atomov, ki jih najdemo v naravi. Pri atomih z majhnim vrstnim številom je število nevtronov enako številu protonov. Z naraščajočim vrstnim številom, to je z naraščajočim številom protonov, se število nevtronov vse hitreje povečuje in je pri največjih jedrih, ki jih najdemo v naravi, približno za polovico večje kakor število protonov.

Atomsko jedro je v primerjavi z atomom zelo drobno – polmer jedra meri nekaj desetstisočin polmera atoma. Do predstave o tem, kako malo je to, si pomagamo s temle zgledom. Mislimo si, da bi atom vodika, ki ima polmer okoli 0,05 nm, napihnili do velikosti jabolka s polmerom 5 cm. Jedro bi imelo tedaj polmer okoli 1 μm . Podobna so razmerja pri drugih atomih.



Slika 37.3 shema poskusa, pri katerem so opazovali sipanje delcev alfa v foliji zlata

Slika 37.3 kaže shemo poskusa, s katerim so ugotovili obstoj atomskega jedra. V tanko folijo zlata so usmerili curek *delcev alfa*, to je helijeveh jeder, ki jih oddajajo nekatere naravne radioaktivne snovi. Močno električno polje v okolici jedra zlata spremeni smer gibanja delcev alfa, ki se jedru dovolj približajo. Pravimo, da se delci *sipajo*. Da je jedro zelo drobno, so spoznali po tem, da se le majhen del vpadlih delcev alfa sipa iz prvotne smeri za zelo velike kote – do 180° . Natančneje so določili premer jedra pri opazovanju sipanja delcev alfa, ki so jih pospešili v pospeševalniku do tolikšne energije, da so lahko prodrli do samega jedra. Dobljene podatke so potrdila tudi druga merjenja.

Polmer jedra je odvisen od masnega števila A , to je od števila nukleonov. Poskusi kažejo, da velja zveza:

$$r = r_0 \sqrt[3]{A} ,$$

pri čemer je $r_0 = 1,1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Iz tega razberemo, da je prostornina jedra sorazmerna s številom nukleonov. Kaže, da se nukleoni zlagajo v jedro kakor nestisljive kroglice, podobno kakor molekule v kapljevini. Jedrsko snov zato pogosto obravnavamo kot nestisljivo kapljevino. Iz podatkov o masah in polmerih jeder se lahko hitro prepričamo, da je povprečna gostota jedrske snovi v vseh jedrih približno konstantna.

Za zgled vzemimo jedro železa ^{56}Fe in jedro urana ^{238}U . Masa atoma železa ^{56}Fe je 55,9394 u. K temu prispevajo elektroni 26,0,00054 u = 0,0140 u, tako da preostane jedru 55,9254 u. Radij jedra železa ^{56}Fe je

$$r = 1,1 \cdot \sqrt[3]{56} \cdot 10^{-15} \text{ m} = 4,21 \cdot 10^{-15} \text{ m} .$$

Iz tega je prostornina

$$V = \frac{4\pi}{3} r^3 = 3,12 \cdot 10^{-43} \text{ m}^3 ,$$

gostota pa

$$\rho = \frac{m}{V} = 2,97 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3 .$$

Z enakim računom dobimo za jedro urana ^{238}U gostoto

$$\rho = 2,98 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3 .$$

Ta gostota je nepredstavljivo velika, ne sme pa nas presenetiti. Videli smo, da je treba skoraj vso maso atoma pripisati jedru. To pa zavzema manj kakor 10^{-12} -ti del prostornine atoma. Lahko bi sklepali, da je gostota jedrske snovi več kakor 10^{12} -krat večja od gostote najgostejših snovi na Zemlji, kar zgornja računa potrjujeta. V vesolju so odkrili preostanke zvezd, ki so v celoti iz nevtronov. To so *nevtronske zvezde* ali *pulzarji*. To ime so dobili zato, ker njihovo sevanje zadeva Zemljo v kratkotrajnih sunkih, podobno kakor svetlobni snop s svetilnika zadeva ladje na morju. Značilna nevtronska zvezda s premerom okoli 10 km ima maso, ki je enaka sončni masi. Izračunate lahko, da je njena gostota $3,7 \cdot 10^{18} \text{ kg/m}^3$, torej še desetkrat več kakor v atomskih jedrih.

* Da je gostota jedrske snovi za vsa jedra približno enaka, hitro uvidimo takole. Mase atomov in s tem tudi mase jeder so sorazmerne s številom nukleonov, to je z nukleonskim številom A . V prvem približku lahko zapišemo

$$m = A u .$$

Ker je tudi prostornina jedra sorazmerna z nukleonskim številom

$$V = \frac{4\pi}{3} r^3 = \frac{4\pi}{3} r_0^3 A ,$$

je gostota od njega neodvisna:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{3u}{4\pi r_0^3} = 2,98 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3 .$$

Ker jedra sestavljajo protoni in nevtroni, bi pričakovali, da bo masa jedra kar enaka vsoti mas sestavnih delov. Primerjava pa pokaže, da je masa jedra vselej manjša od nje. Razlika je povezana z energijo, ki jo sistem nukleonov odda, ko se spoji v atomsko jedro.

Za zgled si oglejmo nastanek *devterona*, to je jedra *težkega vodika* ali *devterija*. Devteron sestavljata proton in nevtron. Nastane, ko se nevtron skoraj brez kinetične energije približa prav tako mirujočemu protonu in se z njim spoji. Delca pri tem izsevata foton svetlobe z energijo 2,23 MeV. Primerjajmo mase delcev pred reakcijo z maso devterona:

$$\begin{aligned} m_p &= 1,0073 \text{ u} , \\ m_n &= 1,0087 \text{ u} , \\ m_d &= 2,0136 \text{ u} . \end{aligned}$$

Razlika med skupno maso protona in nevtrona ter maso devterona, 0,0024 u, je enakovredna energiji

$$0,0024 \text{ u } c^2 = 2,23 \text{ MeV} ,$$

to je energiji, ki jo odnese foton. Nastanek devterona dokazuje razširjeni zakon o ohranitvi energije v sistemu, ki je ločen od okolice, ki smo ga spoznali v enem od prejšnjih poglavij.

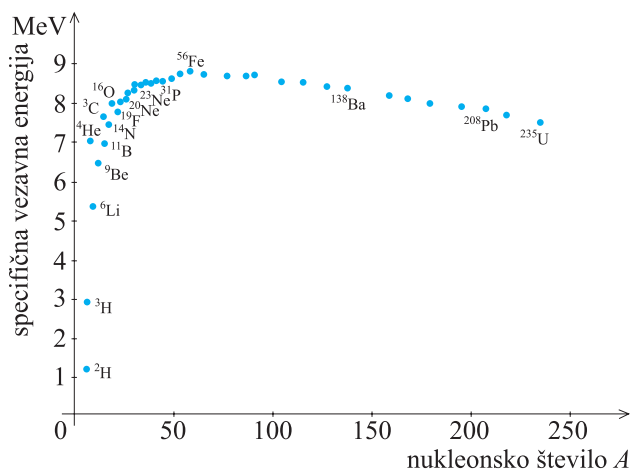
Energijo, za katero se razlikujeta lastni energiji prostih in vezanih delcev in jo sistem delcev pri vezavi odda, imenujemo *vezavna energija*. Če hočemo sistem vezanih delcev spet razbiti na sestavne dele, mu moramo vezavno energijo dovesti. Pri absorpciji fotona z energijo 2,23 MeV devteron zares razpade na sestavna dela.

Nastanka večjih jeder neposredno iz sestavnih delov ne moremo opazovati v laboratoriju, prav tako ne moremo opazovati njihovega popolnega razcepa na sestavne dele. Vendar lahko enako kakor pri devteronu določimo vezavno energijo, ki jo je sistem delcev oddal pri združitvi v jedro. *Vezavna energija jedra* $J(Z,A)$, ki ga sestavlja Z protonov in $A-Z$ nevtronov, in ima maso $m(Z,A)$, je energija

$$W = [Z m_p + (A - Z) m_n - m(Z, A)] c^2 ,$$

to je razlika med skupno lastno energijo ločenih protonov in nevtronov ter lastno energijo sestavljenega jedra v osnovnem stanju. Namesto mase protona in mase sestavljenega jedra lahko v enačbo postavimo kar maso atoma vodika in maso nastalega atoma, saj se v rezultatu masa elektronov izravna. Majhna razlika, ki je posledica razlik v vezavni energiji elektronov v atomih, je zanemarljiva.

Vezavna energija jedra se povečuje s številom nukleonov in nam pri razumevanju razmer v jedru ne pomaga veliko. Več pove vezavna energija na nukleon ali *specifična vezavna energija*, W/A . Slika 37.4 kaže potek specifične vezavne energije v odvisnosti od števila nukleonov v jedru.



Slika 37.4 specifična vezavna energija v odvisnosti od nukleonskega števila

Specifična vezavna energija se poveča od okoli 1 MeV pri devteronu na okoli 8,6 MeV pri jedrih z masnim številom okoli 60 – sem sodijo jedra izotopov železa – nato pa pada in je pri največjem jedru, ki ga najdemo v naravi, jedru urana 238, le še 7,5 MeV. Med lahкими jedri izstopajo jedra helija, ^4He , ogljika, ^{12}C , in kisika, ^{16}O , ki imajo izrazito povečano specifično vezavno energijo glede na jedra z nekaj večjim ali manjšim masnim številom. To kaže na posebno trdnost teh jeder. Spominja nas na izstopajočo trdnost in inertnost atomov s polnimi elektronskimi podlupinami.

Jedra z veliko specifično vezavno energijo so v naravi med najpogostejšimi. To kaže, da so ta jedra nastala z večjo verjetnostjo kakor druga, pa tudi, da so bila po nastanku manj podvržena spremembam.

Na koncu se vprašamo, kaj je tisto, kar tako močno veže nukleone v jedro. Specifična vezavna energija nukleonov v jedru je namreč več kakor tisočkrat večja od vezavne energije najmočnejše vezanih atomskih elektronov. To in pa dejstvo, da so v jedro vezani tudi protoni, ki se sicer zaradi enakega naboja odbijajo, kaže, da sila, ki povezuje nukleone, ne more biti električna. Pravimo, da povezuje nukleone v jedra *jedrska sila*.

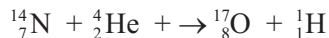
Med osnovne lastnosti jedrske sile naštejmo, da je privlačna in kratkega dosega, saj deluje le med bližnjimi nukleoni. Deluje enako na protone in nevtrone. Povzroči, da predstavlja atomsko jedro za vključene nukleone posodo z neprepustno steno, znotraj katere se skoraj prosto gibljejo.

JEDRSKE REAKCIJE

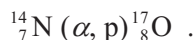
Pri *jedrskih reakcijah* in pri *radioaktivnem razpadu* se atomska jedra spreminjajo. Iz jedra izbranega elementa lahko nastane jedro drugega elementa, en izotop izbranega elementa se spremeni v drug izotop. V tem poglavju nas bodo zanimale predvsem jedrske reakcije.

Jedrske reakcije so v naravi sicer pogoste, vendar jih je težko raziskovati, saj jih ne moremo niti nadzorovati, niti po volji sprožiti. Prve v

laboratoriju sprožene jedrske reakcije so opazovali pri prof. E. Rutherfordu v Cambridgu v letih po prvi svetovni vojni. Ko so dušik obstreljevali z delci iz radijevih soli, so v reakciji očitno nastajali novi delci. Šele čez nekaj let so razvozlali pojav. Jedro dušika se po reakciji z delcem α , jedrom helija, spremeni v jedro kisika. Iz reakcije odleti proton – jedro vodika. Dogajanje simbolično zapišemo



ali okrajšano



Iz zapisa razberemo dve zakonitosti reakcije:

– *Število nukleonov pred reakcijo je enako številu nukleonov po reakciji.* To je izraz splošnejšega naravnega zakona, ki pravi, da se v sistemu, ki je ločen od okolice, ohranja število *barionov*. Med barione štejemo tudi nukleone. Vsakemu od njih pripišemo *barionsko število* 1. Barionsko število jedra je torej enako nukleonskemu ali masnemu številu.

– *Pri reakciji se ohranja električni naboj.* V našem primeru se kaže ohranitev naboja tako, da se ohranja število protonov. S tem se ohranja tudi število nevtronov.

Seveda se pri reakciji ohranjata tudi polna energija in gibalna količina.

Kako poteka jedrska reakcija, lahko spoznamo šele s podrobnim opazovanjem v nadzorovanih okoliščinah. V mnogih primerih si lahko predstavljamo, da delec in jedro neprožno trčita, pri čemer delec obtiči v jedru. Če je delec sestavljen, kakor npr. v našem primeru delec α , v jedru razpade, njegovi nukleoni pa se pomešajo z nukleoni v jedru. Zaradi energije, ki jo prinese delec, in zaradi spremembe v vezavi med nukleoni je nastalo novo jedro močno vzburjeno. To ima za posledico izsevanje posameznega nukleona (protona ali nevtrona) ali skupka več nukleonov (npr. delca α) ali fotonov svetlobe. Vsak od teh pojavov privede do drugačnega končnega jedra.

Po posplošenem energijskem zakonu je razlika polnih energij delcev po reakciji in pred reakcijo enaka z okolico izmenjani energiji. Pri zgornjem zgledu delci z okolico ne izmenjujejo energije, zato je polna energija po reakciji enaka tisti pred reakcijo, torej:

$$W({}^{14}_7\text{O} + {}^4_2\text{H}) = W({}^{17}_8\text{N} + {}^1_1\text{He}) .$$

Polno energijo sestavljata lastna in kinetična energija delcev. Pred reakcijo ima vso kinetično energijo delec α , saj jedro ${}^{17}_8\text{N}$ miruje, po reakciji pa se gibljeta tako proton kakor jedro ${}^{14}_7\text{O}$. Delež kinetične energije, ki jo odnese vsak zase, je odvisen od smeri njunega gibanja po reakciji. Kakor smo rekli, se mora namreč ohraniti tudi skupna gibalna količina.

Označimo *reakcijsko energijo* Q_r kot razliko med začetno in končno lastno energijo delcev v osnovnem stanju. V zgornjem primeru je reakcijska energija

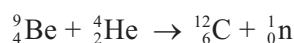
$$Q_r = [m({}^{14}_7\text{N}) + m({}^4_2\text{He}) - m({}^{17}_8\text{O}) - m({}^1_1\text{H})] c^2.$$

V tabelah najdemo za mase atomov naslednje podatke: $m({}^{14}_7\text{N}) = 14,0032 \text{ u}$, $m({}^{17}_8\text{O}) = 16,9991 \text{ u}$, $m({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$ in $m({}^1_1\text{H}) = 1,0078 \text{ u}$. Izračunamo, da je reakcijska energija

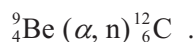
$$Q_r = -0,0011 \cdot 931,4 \text{ MeV} = -1,02 \text{ MeV}.$$

Negativna reakcijska energija pomeni, da sta lastna energija oziroma masa delcev po reakciji večji od lastne energije oziroma mase delcev pred reakcijo. Pravimo, da je reakcija *endoergna*. Če hočemo, da reakcija poteče, morajo imeti delci pred njo dovolj veliko kinetično energijo, ki najmanj pokrije negativno reakcijsko energijo.

Oglejmo si še reakcijo, ki je privedla do odkritja nevtrona. V istem laboratoriju so z delci α obsevali tarčo iz berilija. Pri tem je prišlo do reakcije



ali krajše



Seveda so bile za določitev nastalih delcev potrebne mnoge podrobne analize in dodatni poskusi. Na njihovi osnovi je J. Chadwick l. 1932 določil maso nevtralnega delca, ki se je pojavil pri reakciji, in ga imenoval *neutron*.

Poglejmo še, kako je z reakcijsko energijo. Iz tabel preberemo, da so mase sodelujočih atomov in delcev po vrsti: $m({}_4^9\text{Be}) = 9,0122 \text{ u}$, $m({}_2^4\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$, $m({}_6^{12}\text{C}) = 12,0000 \text{ u}$ in $m(\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$. Izračunamo, da je reakcijska energija

$$Q_r = 0,0061 \cdot 931,4 \text{ MeV} = 5,68 \text{ MeV}.$$

Vidimo, da je pozitivna, kar pomeni, da je masa delcev po reakciji manjša od mase delcev pred reakcijo. Pravimo, da je reakcija *eksoergna*. Če ni izmenjave z okolico, se pri reakciji poveča kinetična energija delcev.

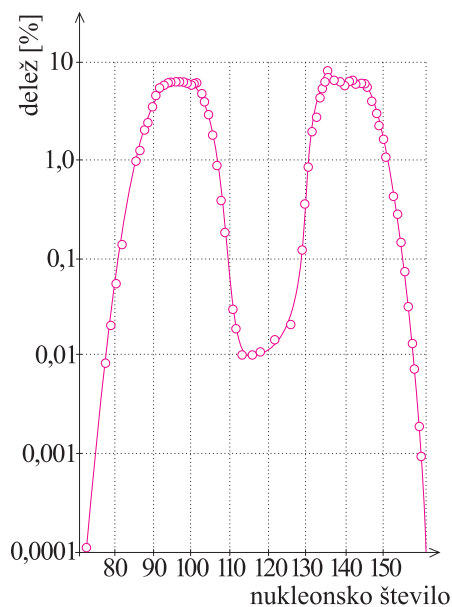
Do jedrskih reakcij pride, ko se delci približajo jedrom na doseg jedrskih sil, to je do razdalje okoli 10^{-15} m . Zaradi tega morajo imeti protoni in drugi nabiti delci dovolj veliko kinetično energijo, saj morajo premagati električni odboj. Nevtroni, ki so brez naboja, se lahko približajo jedrom tudi z zanemarljivo kinetično energijo. Pri reakcijah s takimi nevtroni dobimo nove izotope, ki imajo en nevtron več in je zato njihovo masno število za eno večje kakor pri jedru pred reakcijo. Po *zajetju nevtrona*, kakor to reakcijo tudi imenujemo, nastalo vzbujeno jedro namreč ne odda kakega delca kakor v prejšnjih primerih, ampak preide v osnovno stanje, tako da izseva foton svetlobe. Z reakcijami z nevtroni je uspelo izdelati nekaj tisoč novih izotopov, ki jih v naravi ni. Vsi ti izotopi so *radioaktivni*, kar pomeni, da sevajo. Sevanje je posledica razpada jeder.



Slika 37.5 prvi jedrski reaktor so pognali 2. 12. 1942 v Chicagu

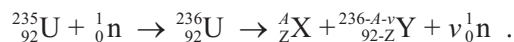
? V tabeli si izberite nekaj izotopov, ki jih najdemo v naravi, in pogledjte, kako se spremenijo pri reakciji z nevtronom. Kolikšne so reakcijske energije?

Slika 37.6 spekter razcepkov pri razcepu jedra ^{235}U po reakciji z nevtronom

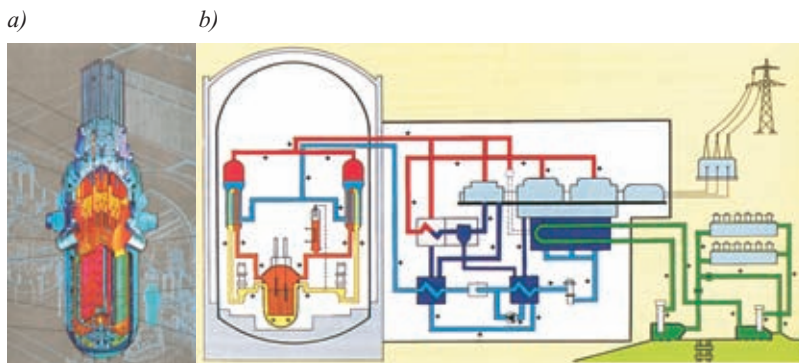


Med raznolikimi jedrskimi reakcijami si oglejmo še nekaj eksoergnih reakcij, ki so pomembne tudi s stališča pridobivanja energije.

Prva je *jedrski razcep*. Značilen zgled za to reakcijo je razcep jedra urana po zajetju nevtrona z zanemarljivo kinetično energijo. Pri reakciji se v prvem koraku nevtron vgradi v jedro – nastane jedro, ki pa je močno vzburjeno, saj se zaradi dodanega nevtrona poveča kinetična energija nukleonov v jedru. Jedro zaniha kakor kapljica vode in se razcepi na dva približno enaka dela, iz reakcije pa odletijo še 2 do 3 nevtroni. Izid reakcije ni enoličen, zato jo shematično zapišemo takole:



Simbola X in Y označujeta nastala *razcepka*. Slika 37.6 kaže spekter razcepkov. Vidimo, da se jedro najpogosteje razcepi tako, da ima en del nukleonsko število okoli 92 ali pa okoli 140. Drugi del skupaj s preostalimi nevtroni pokrije razliko med masnima in vrstnima številoma pred razcepom in po. Vzemimo, da je prvo od jedr ^{90}Sr in da se izsevajo trije nevtroni. Drugo jedro je tedaj ^{143}Xe . Obe nastali jedri sta radioaktivni.



Slika 37.7 (spodaj desno) Zgradba lahkovodnega jedrskega reaktorja (a). V jekleni posodi so zloženi gorivni elementi z gorivnimi palicami. To je reaktorska sredica. Vanjo segajo regulacijske palice in merilni kanali. Skozi sredico se pretaka voda, ki je hkrati hladilo in moderator. V gorivnih palicah, ceveh iz cirkonija, je jedrsko gorivo. To so keramične tablete uranovega dioksida, ki so odporne proti visoki temperaturi. V gorivu je 3 do 4 % uranovega izotopa ^{235}U , preostanek pa je uranov izotop ^{238}U . Pravimo, da je v primerjavi z naravnim uranom, v katerem je le 0,7 % izotopa ^{235}U , gorivo obogačeno.

Verižno reakcijo v reaktorju uravnavajo regulacijske palice. V njih so snovi, ki močno vpijajo nevtrone, kakor npr. kadmij ali bor. Ko so palice povsem potisnjene v sredico, verižna reakcija zamre in reaktor je ustavljen. Med delovanjem reaktorja palice skrbijo za konstanten nivo verižne reakcije.

Moderator, v našem primeru kar hladilna voda, rabi za upočasnjevanje nevtronov, ki se izsevajo pri razcepih. V nekaj mikrosekundah po razcepu se ob trkih z jedri vodika v vodi kinetična energija nevtronov zmanjša od okoli 2 MeV na nekaj stotink eV. S tem se zelo poveča verjetnost za reakcijo z jedri ^{235}U , ki vodi v razcep.

V jedrskih elektrarnah (b) rabi hladilna voda za uparevanje vode v zunanjem krogu. Izmenjava toplote se vrši v uparjalnikih. Para rabi za pogon turbin.

Pri razcepu se sprosti okoli 200 MeV energije, kar je posledica tega, da je specifična vezavna energija razcepkov precej manjša od specifične vezavne energije urana. S slike 37.4 razberemo, da imajo jedra z masnim številom okoli 90 vezavno energijo okoli 8,8 MeV na nukleon, jedra z masnim številom okoli 140 pa vezavno energijo okoli 8,4 MeV na nukleon, medtem ko ima jedro urana 236 vezavno energijo le okoli 7,6 MeV na nukleon. Večino sproščene energije, okoli 180 MeV, imajo razcepki in nevtroni kot kinetično energijo.

Nevtroni, ki se izsevajo pri razcepu, lahko povzročajo nove razcepe uranovih jeter, pravimo, da lahko sprožijo *verižno reakcijo* (slika 37.8). V *jedrskih reaktorjih* (slika 37.7) s primerno konstrukcijo in regulacijo zagotovijo, da od izsevanih nevtronov le eden povzroči nov razcep, preostali pa razpadejo ali se ujamejo v drugih jedrih. V *jedrskih bombah* pride do nenadzorovane verižne reakcije, pri kateri večina izsevanih nevtronov povzroči nove razcepe. Zaradi velike množine v kratkem času sproščene energije bomba razžene.

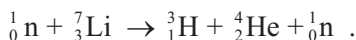
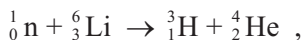
Do povečanja specifične vezavne energije nukleonov pride tudi pri *zlivanju* jeter z majhnim številom nukleonov. Značilen je niz reakcij, ki privede v središčah zvezd do zlitja štirih jeter vodika v jedro helija. Skupna reakcijska energija reakcij je 26,7 MeV. Kaže, da so te reakcije glavni vir, ki sproti nadomešča izsev Sonca. Da pride do zlivanja, morajo imeti protoni dovolj veliko kinetično energijo, da premagajo medsebojni električni odboj. V sončni središčici, kjer je temperatura okoli 10^7 K, ima ravno pravišnji del vodikovih jeter dovolj energije, da lahko vstopa v reakcijo. Prav počasno zlivanje vodika v središčici zagotavlja Soncu razmeroma dolgo aktivno življenje – skupaj okoli $10 \cdot 10^9$ let. Sedanja starost Sonca je okoli $5 \cdot 10^9$ let.

V središčah večjih zvezd pride lahko tudi do zlivanja drugih lahkih jeter. Končno se lahko v zvezdi oblikuje središčica iz jeter železa, ki se odlikujejo po največji vezavni energiji na nukleon. Z nadaljnjim zlivanjem se energije ne da več pridobiti.

Nadzorovano zlivanje lahkih jeter skušajo izrabiti za pridobivanje energije. Raziskovalci se trudijo ustvariti pogoje, pri katerih bi se lahka jedra pri visoki temperaturi zlivala podobno kakor v središčah zvezd. Največ možnosti je, da bi vzdrževali reakcijo



z reakcijsko energijo 17,6 MeV. V primernem reaktorju (slika 37.10) bi lahko izsevane nevtrone uporabili za pridobivanje tritija, ki je potreben pri prvi reakciji. Predlagani reakciji sta



Zlivanje lahkih jeter pri visoki temperaturi imenujemo tudi *termojedrska* ali *termonuklearna reakcija*. Doslej so se take reakcije v velikem obsegu žal posrečile le ob eksplozijah jedrskih bomb, ko je



Slika 37.8 Verižna reakcija. Pri razcepu izsevani nevtroni povzročajo nove razcepe

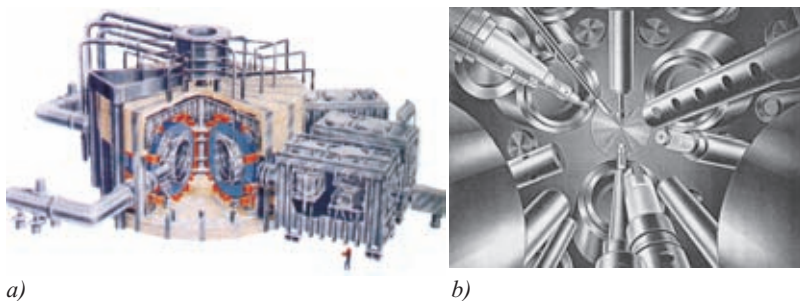


Slika 37.9 eksplozija atomske bombe

+ Dodatno čtivo Borut Mavko: Jedrski reaktor, zbirka Povejte nam kaj več o ..., Založba Modrijan, Ljubljana 1996

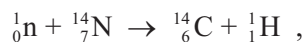
? Določite reakcijske energije za navedene tri reakcije.

Slika 37.10 V eksperimentalnih reaktorjih preizkušajo dva načina za proženje termonuklearnih reakcij. V tokamaku (a) naj bi prišlo do zlivanja deuterija in tritija v plazmi, ki jo v magnetnem polju z električnim tokom segrejejo na nekaj milijonov kelvinov. Plazmo z dovolj visoko temperaturo je uspelo ustvariti tudi s svetlobnimi sunki iz laserjev. Kroglico s premerom okoli 1 mm z zmrznjeno mešanico deuterija in tritija osvetlijo z vseh strani z s kratkimi svetlobnimi impulzi s skupno energijo 10^5 J. Slika b kaže del eksperimentalne naprave.



temperatura dovolj visoka. Zlivanje jeder tritija in deuterija še poveča jakost eksplozije.

Jedrske reakcije se neprestano dogajajo tudi v ozračju. Ob trkih kozmičnih protonov z atomskimi jedri nastajajo v ozračju nevtroni. V reakcijah teh nevtronov z jedri dušika nastajata radioaktivna izotopa ogljik in tritij :



Izotopa sta zanimiva, ker se vgrajujeta v žive organizme.

* REAKCIJSKI PRESEK

Jedrske reakcije navadno raziskujejo tako, da v tarčo iz izbrane snovi usmerijo curek delcev – izstrelkov. Z detektorji zaznavajo delce, ki nastanejo pri reakciji in letijo iz tarče.

Vzemimo curek delcev, ki ga usmerimo pravokotno v tanko tarčo iz izbrane snovi. Izstrelki, ki na slepo letijo skozi tarčo, lahko povzročijo reakcijo le, če so atomska jedra na njihovi poti, sicer pa ne. Ker so atomska jedra zelo drobna, je zelo malo verjetno, da bi bilo na poti izstrelka skozi tanko tarčo več kakor eno jedro.

Navada je, da si predstavljamo izstrelke kot točke, jedra v tarči pa kot drobne krožce s ploščino σ , ki so postavljeni pravokotno na smer vpadajočega curka izstrelkov (slika 37.11). Do reakcije pride, če izstrelka zadene krožec, ki predstavlja jedro.

Vzemimo, da vpada pravokotno na tanko tarčo z N jedri in s ploščino S enakomerno gost curek delcev. Tedaj je število reakcij kar sorazmerno z razmerjem med skupno ploščino krožcev in ploščino tarče:

$$\frac{N \sigma}{S} .$$

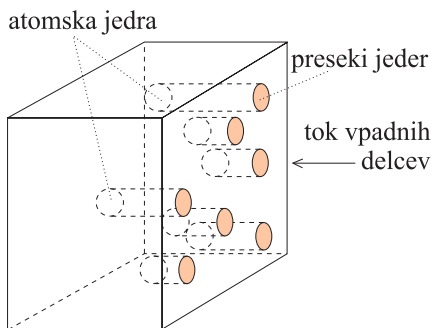
Če vpade na tarčo n izstrelkov, je število reakcij

$$R = n \frac{N \sigma}{S} .$$

Nekoliko drugačen zapis

$$R = (N \sigma) \frac{n}{S}$$

kaže, da je število reakcij kar produkt skupnega preseka vseh jeder v tarči in gostote izstrelkov.



Slika 37.11 k definiciji reakcijskega preseka

Ploščina krožca, ki predstavlja jedro, σ , je merilo za verjetnost, da pride do reakcije, zato mu pravimo tudi *reakcijski presek*. Pričakovali bi, da so reakcijski preseki približno enaki geometrijskim presekom atomskih jeder, kar pomeni, da so reda velikosti 10^{-28} do 10^{-30} m². Podatki o jedrskih reakcijah nas pouče, da je okvirno res tako.

Navada je, da podajamo reakcijske preseke v enoti *barn*:

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2 .$$

Verjetnost za mnoge jedrske reakcije je tako majhna, da se je zdel prvim raziskovalcem presek 10^{-24} cm² velik kakor skedenj – *barn*. Od tod ime enote.

Vzemimo za zgled tale poskus. S curkom nevtronov, v katerem je na vsak cm² na sekundo 10^6 nevtronov z energijo 0,025 eV, obsevamo 1 mm debelo kobaltovo pločevino s presekom 2 cm², ki jo v celoti sestavlja kobaltov izotop ⁵⁹Co. Nevtroni reagirajo z jedri kobalta, pri čemer nastane izotop kobalta ⁶⁰Co v vzbujenem stanju, iz katerega preide v osnovno stanje z izsevanjem fotona. Verjetnost za reakcijo je 37,0 barnov. Kolikšno je število atomov ⁶⁰Co po polurnem obsevanju?

Da bi rešili nalogo, moramo najprej najti število atomov ⁵⁹Co v tarči. Iz tabel preberemo, da je gostota kobalta 8,8 g/cm³, in s tem določimo, da je masa tarče $m = \rho S d = 1,76$ g. Število atomov v njej je tedaj

$$N = N_A \frac{m}{M} = 1,81 \cdot 10^{22} ,$$

njihov skupni presek pa

$$N \sigma = 0,67 \text{ cm}^2 .$$

Število nevtronov, ki vpadejo na kvadratni centimeter tarče v času obsevanja, je

$$\frac{n}{S} = 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \cdot 1800 \text{ s} = 1,8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} .$$

Izračunamo, da je število reakcij in s tem število nastalih atomov ⁶⁰Co enako

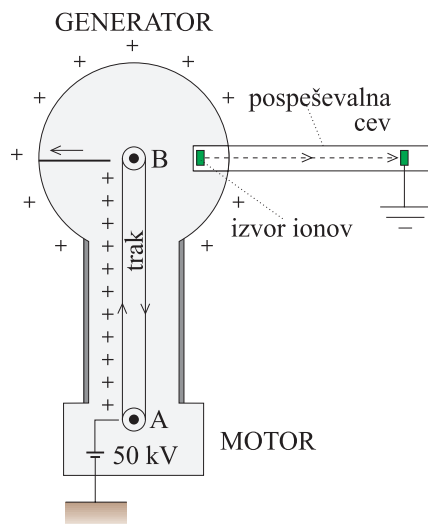
$$R = (N \sigma) \frac{n}{S} = 1,21 \cdot 10^9 ,$$

kar je le majhen del celotnega števila atomov v tarči.

Reakcijski presek za izbrano reakcijo se v splošnem spreminja z energijo izstrelkov.

* | POSPEŠEVALNIKI

Delci alfa, ki jih sevajo jedra pri radioaktivnem razpadu, so bili sprva edini izstrelki, s katerimi je bilo mogoče sprožiti jedrske reakcije. Njihova energija, nekaj MeV, je bila ravno še dovolj, da so kljub električnemu odboju prodrli v bližino jedra in so jedrske sile sprožile reakcijo. Nekaj se je dalo narediti tudi s protoni in nevtroni, ki izhajajo iz reakcij med jedri in delci α , vendar so pridobljeni curki šibki in tudi energije jim ni mogoče spreminjati. Do razcveta jedrske fizike



Slika 37.12 shema elektrostaticnega pospeševalnika

je prišlo, ko je bilo mogoče delce od protonov do večjih jeter pospeševati do poljubnih v naprej izbranih energij.

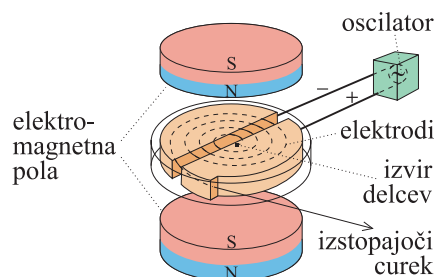
Spoznali smo že, da je mogoče delce z nabojem pospešiti z električnim poljem. Pridobljena kinetična energija je enaka spremembi električne potencialne energije delca. Po preletu napetosti U po vakuumu se tako delcu s pozitivnim nabojem e poveča kinetična energija za

$$\Delta W_k = e U .$$

Če želimo npr. pridobiti protone s kinetično energijo 1 MeV, jim moramo omogočiti prelet napetosti 1 MV.

Sprva so napetosti do nekaj MV dobili z elektrostaticnim *van de Graaffovim* generatorjem, ki ga imamo pomanjšanega tudi v šolskih zbirkah (slika 37.12). Delce so pospeševali v enem koraku po vakuumski cevi, ki je segala v kupolo generatorja. Večjih napetosti ni bilo mogoče doseči in s tem tudi večjih kinetičnih energij delcev ne.

V sodobnih pospeševalnikih, kjer pospešijo delce do kinetične energije nekaj milijard elektronvoltov, preletijo delci pospeševalno napetost mnogokrat. Predhodnik teh pospeševalnikov je *ciklotron*, ki ga je l. 1929 v eksperimentalno fiziko uvedel ameriški fizik E. O. Lawrence.



Slika 37.13 shema ciklotrona

Shema ciklotrona kaže slika 37.13. Votli polkrožni pospeševalni elektrodi ali *deja* sta v magnetnem polju, ki je pravokotno nanju. Priključeni sta na izvir izmenične napetosti in pri vsakem prehodu skozi

vmesni prostor med njima pospešita delce, ki jih oddaja izvir na sredi. Znotraj elektrod ni električnega polja, zato se delci tam gibljejo po krožnih tirih. Po vsakem pospeševanju se radij tira poveča. Ko doseže tir delcev obod elektrod, ko je torej dosežena maksimalna kinetična energija, s posebno elektrodo usmerijo curek proti tarči.

Spoznali smo že, da je frekvenca kroženja delcev po magnetnem polju ali *ciklotronska frekvenca*, kakor jo imenujemo, neodvisna od energije delcev. Odvisna je le od naboja in mase delcev ter od gostote magnetnega polja:

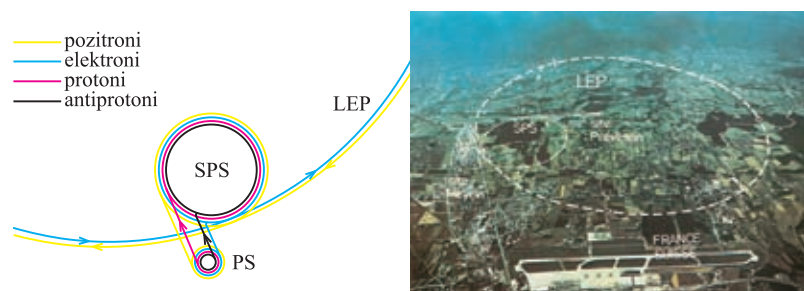
$$v = \frac{e B}{m} .$$

Če napajamo pospeševalni elektrodi v ciklotronu z izmenično napetostjo, ki ima ravno ciklotronsko frekvenco, se delci v reži med elektrodama lahko pospešijo ob vsakem prehodu. Za pospeševanje protonov v ciklotronu z gostoto magnetnega polja 1 T npr. moramo napajati pospeševalni elektrodi s frekvenco $9,6 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$.

S ciklotroni je bilo mogoče tako pospešiti protone do energije okoli 25 MeV. Pri višjih energijah, ko postane hitrost protona vse bližja hitrosti svetlobe, pa tako preprosto ne gre več. Relativistična mehanika pove, da frekvenca kroženja ni več neodvisna od energije.

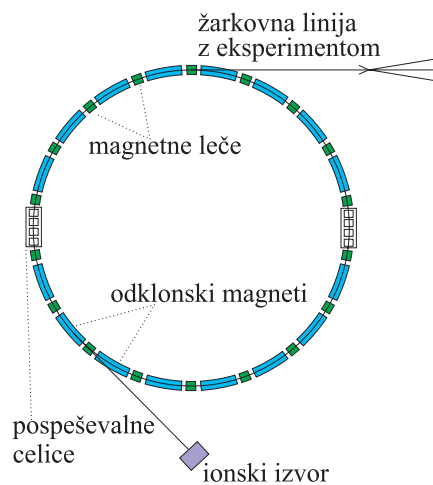
V prvih ciklotronih je izvir delcev oddajal delce ob izbranih trenutkih tako, da se je vsak lahko ujel v ritem pospeševanja, ki pa je bil ves čas enak. Tako ni bilo mogoče doseči večjih končnih energij, saj bi bila frekvenca kroženja delcev ob koncu pospeševanja drugačna od frekvence pospeševalne napetosti, delci pa bi zaradi tega prihajali v režo med elektrodama v nepravem trenutku. Težavo so rešili tako, da so vsak paket delcev pospeševali posebej od začetka do konca in pri tem prilagajali frekvenco pospeševalne napetosti frekvenci kroženja delcev.

Podobno delujejo sedanjí *sinhrotroni*. V njih se gibljejo paketi delcev po vakuumski cevi po približno krožnem tiru, vzdolž katerega se menjavajo *pospeševalne celice* ter *odklonski* in *zbiralni magneti* (slika 37.14). Slednji skrbijo, da se paketi delcev na dolgi poti ne razpršijo. Do zelo visokih energij pospešujejo delce z več zaporedno vezanimi pospeševalniki. Slika 37.15 kaže sistem pospeševalnikov, ki v evropskem centru CERN v Ženevi pospešuje protone in antiprotone do energije 450 milijard eV (450 GeV), elektrone in pozitrone pa do energije 100 milijard eV (100 GeV).



? Do kolikšne energije je mogoče pospešiti protone pri omenjenem magnetnem polju v ciklotronu, ki ima premer 1 m?

? Kolikšna je hitrost protonov s kinetično energijo 25 MeV? Kaj se zgodi s frekvenco kroženja, ko se hitrost protonov približa svetlobni?

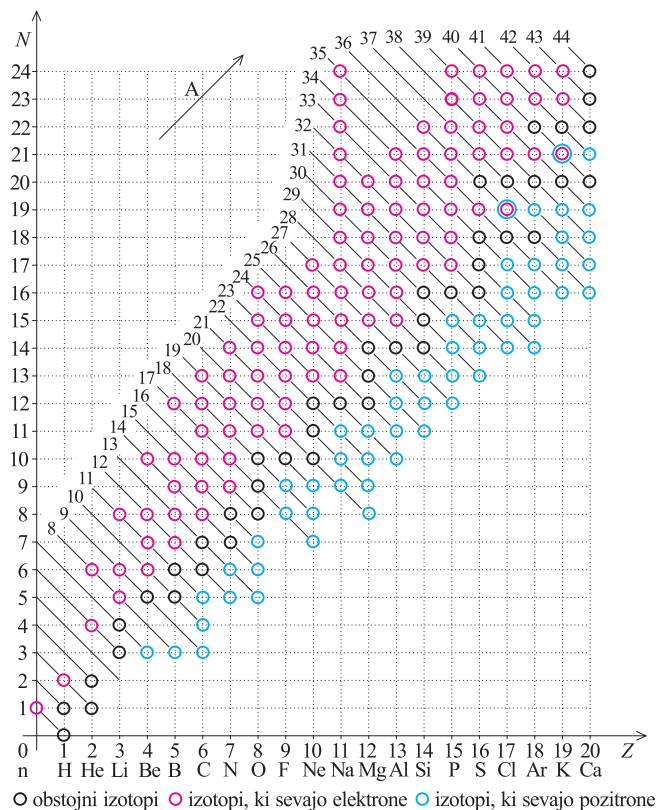


Slika 37.14 shema sinhrotrona

Slika 37.15 sistem pospeševalnikov v CERN in njegova lega v pokrajini pri Ženevi

Vrste radioaktivnosti

Slika 37.2. kaže število nevtronov in število protonov v jedrih izotopov, ki jih najdemo v naravi. Vprašamo se, kako to, da so v naravi prav ta jedra? Zakaj ni v naravi jeder, ki bi bila večja od jedra urana ^{238}U ? Zakaj ni v naravi elementov, ki bi imeli vrstno število večje od 92? Zakaj ni izotopa dušika ^{16}N ali zakaj ima fluor en sam izotop?

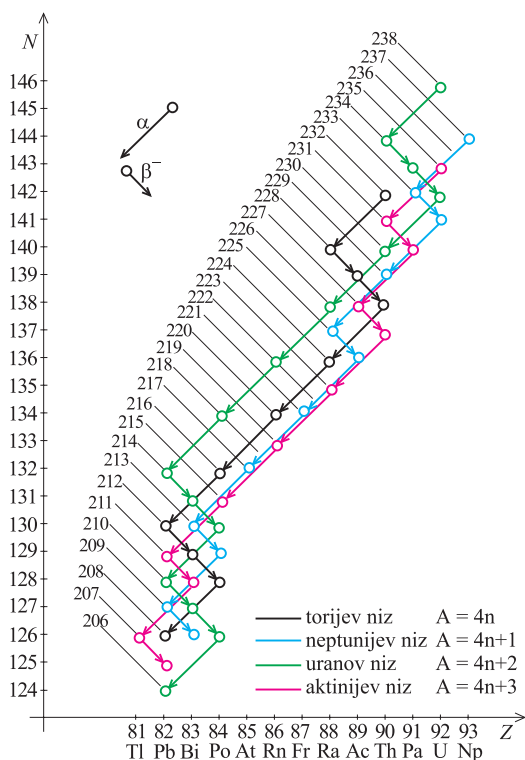


Slika 37.16 del slike 37.2 z dodanimi umetnimi izotopi

Nabor jeder se je posrečilo močno povečati z jedrskimi reakcijami. Vsi umetni izotopi naravnih elementov in vsi novi elementi pa so *radioaktivni*. To pomeni, da sami od sebe razpadajo, pri tem pa oddajajo značilno sevanje. Slika 37.16 kaže del slike 37.2, razširjen z umetnimi izotopi. Vsa jedra, ki imajo večje število nevtronov kakor stabilno jedro z enakim nukleonskim številom, razpadejo z oddajo elektrona. Jedra, ki imajo večje število protonov, kakor jih ima stabilno jedro z enakim nukleonskim številom, razpadejo z oddajo *pozitrona*, to je *antidelca* k elektronu. Pozitron in elektron se razlikujeta le v naboju: elektron ima negativni, pozitron pa pozitiven osnovni naboj. Oba razpada štejemo k *razpadu beta*.

Med jedri elementov s konca periodnega sistema so radioaktivna vsa, ki so težja od jedra izotopa bizmuta ^{209}Bi . Mednje sodijo jedra naravnih elementov: *polonija* (Po), *astata* (At), *radona* (Rn), *radija* (Ra),

aktinija (Ac), torija (Th), proaktinija (Pa) in urana (U), ter jedra umetnih transuranskih elementov od neptunija, ^{93}Np , do lavrencija, ^{103}Lw . Vsa ta jedra razpadajo z oddajo delca α , to je helijevega jedra. Zato imenujemo razpad tudi *razpad alfa*. Največkrat je tudi nastalo jedro radioaktivno. Prvemu razpadu sledi cel niz razpadov, dokler pri enem od njih ne nastane stabilno jedro. Znani so *torijev*, *neptunijev*, *uranov* in *aktinijev niz*, ki jih najdemo v naravi. Vsi se končajo pri izotopih svinca in bizmuta (slika 37.17).



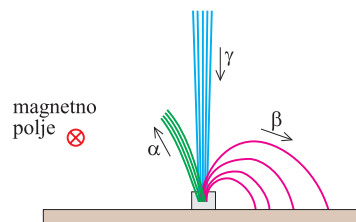
Slika 37.17 naravni radioaktivni nizi

Mnoga od naštetih težkih jeter se lahko tudi sama od sebe *razcepijo* na dve približno enaki manjši jedri. *Razcep* navadno spremlja oddaja nevtronov.

Poleg elektronov, pozitronov in helijevih jeter ali, kakor jih imenujemo, *žarkov beta* in *alfa*, oddajajo radioaktivni vzorci tudi kratkovalovno svetlobo ali, kakor jo imenujemo, *žarke gama*. Žarke gama oddajo z radioaktivnim razpadom nastala vzbujena jedra pri prehodu v osnovno stanje.

Če usmerimo curek sevanja iz radioaktivnega vzorca v magnetno polje v prečni smeri, se nabiti delci odklonijo od prvotne smeri, žarki gama pa ne (slika 37.18). Tako se lahko s poskusom prepričamo, da oddaja vzorec, v katerem je npr. radioaktivni cezij ^{137}Cs , žarke beta in žarke gama.

Za vsa radioaktivna jedra je značilno, da je njihova lastna energija oziroma masa večja od lastne energije oziroma mase nastalih jeter in



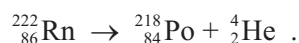
Slika 37.18 razklon sevanja iz naravnega radioaktivnega vzorca v prečnem magnetnem polju

delcev. Se pravi, da je reakcijska energija pri radioaktivnem razpadu pozitivna:

$$Q_r = (m_z - m_k) c^2 > 0 \text{ .}$$

V enačbi je m_z masa jedra pred razpadom, m_k pa skupna masa delcev po razpadu (gl. definicijo reakcijske energije na str. 226). Reakcijsko energijo imajo po razpadu delci kot kinetično energijo, del pa je lahko nastalo jedro odda kot svetlobo.

Za zgled si oglejmo razpad jedra radona ^{222}Rn . Jedro odda delec α in se spremeni v jedro polonija, ^{218}Po :

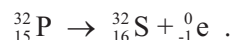


Iz zapisa razberemo, da se, kakor pri jedrskih reakcijah tudi pri razpadu alfa ohrani število nukleonov in še število protonov in nevtronov vsako zase. Iz tabel preberemo za mase atomov radona 222, polonija 218 in helija 4 po vrsti 222,01753 u, 218,00893 u in 4,00260 u. Ne da bi računali mase jeder, lahko izračunamo reakcijsko energijo kar s temi podatki:

$$Q_r = [m_{\text{Rn}} - (m_{\text{Po}} + m_{\text{He}})] c^2 = 0,00600931,4 \text{ MeV} = 5,59 \text{ MeV}$$

Ker je masa nastalega jedra velika v primerjavi z maso delca α , odnese skoraj vso reakcijsko energijo delec α kot kinetično energijo.

Vzemimo še zgled za *razpad beta*. Jedro fosfora ^{32}P razpade z oddajo elektrona v jedro žvepla ^{32}S :



Oznaka $^0_{-1}\text{e}$ pomeni elektron, za katerega vemo, da ima negativni osnovni naboj in ga ne štejemo med nukleone.

Reakcijsko energijo izrazimo z masami jeder m_j in z maso elektrona m_e :

$$Q_r = [m_{j,\text{P}} - (m_{j,\text{S}} + m_e)] c^2 \text{ .}$$

Da bomo lahko reakcijsko energijo računali z masami atomov namesto z masami jeder, v izrazu v oklepaju prištejemo in odštejemo maso elektronov v atomu fosfora. S tem lahko vsoto mas jeder in elektronov nadomestimo z masama atomov in dobimo

$$Q_r = (m_{\text{P}} - m_{\text{S}}) c^2 \text{ .}$$

V tabelah najdemo za masi fosfora in žvepla po vrsti 31,9739 u in 1,9721 u. Tako dobimo za reakcijsko energijo

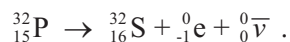
$$Q_r = 0,00183931,4 \text{ MeV} = 1,70 \text{ MeV} \text{ .}$$

Pričakovali bi, da vso reakcijsko energijo odnese elektron kot kinetično energijo, saj je kinetična energija nastalega jedra zanemarljiva. Eksperimenti pa kažejo, da ima tolikšno kinetično energijo le neznaten del elektronov. Energijski spekter izsevanih elektronov je zvezen

? Utemeljite! Pokažite, da je kinetična energija jedra zanemarljiva v primerjavi s kinetično energijo delca α . Vzemite, da jedro radija pred razpadom miruje. Tedaj odletita po razpadu delec α in jedro radona v nasprotnih smereh, saj mora ostati skupna gibalna količina enaka nič.

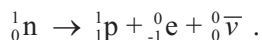
(slika 37.19). Podrobnejši eksperimenti so tudi pokazali, da skupna gibalna količina nastalega jedra in izsevanega elektrona ni nič, čeprav jedro fosfora pred razpadom miruje. Vse kaže, da dva od splošno veljavnih naravnih zakonov pri razpadu beta odpovesta, ali pa zapisana razpadna slika ni popolna.

Raziskovalci so se odločili za drugo možnost. Predpostavili so, da nastane pri razpadu še električno nevtralen delec brez mase, ki si skupaj z elektronom deli reakcijsko energijo – *antinevtrino*, $\bar{\nu}$. Popoln zapis razpada fosfora je tedaj



Indeksa pri oznaki za antinevtrino povesta, da je delec brez naboja in da je njegovo nukleonsko število 0.

Poglejmo razpad podrobneje. Tako fosfor kakor žveplo imata enaki nukleonski števili, kar pomeni, da se tudi pri tem razpadu ohranja število nukleonov. Ne ohranjata pa se vsako zase število protonov in število nevtronov. Ker se poveča vrstno število za eno, pomeni, da se pri razpadu en nevtron spremeni v proton. Pri razpadu se izsevata elektron in antinevtrino, delca, ki ju pred razpadom v jedru ni bilo. Ker ima elektron negativni osnovni naboj, antinevtrino pa je brez naboja, se pri razpadu ohranja tudi skupni naboj. Sprememba je taka, kakor da bi se eden od nevtronov v jedru spremenil v proton, pri čemer bi se izsevala elektron in antinevtrino:

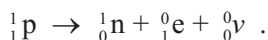


Zanimivo je, da je radioaktiven tudi prost nevtron in da razpade po zapisani shemi.

Omenili smo že, da so radioaktivna tudi jedra, ki imajo glede na stabilna jedra z istim nukleonskim številom presežek protonov. Tudi pri tem razpadu se izsevata dva delca: *pozitron* – antidelec k elektrону in *neutrino* – antidelec k antinevtrinu. Tako razpade jedro cinka ${}^{65}\text{Zn}$. Pri razpadu preide v jedro bakra ${}^{65}\text{Cu}$:

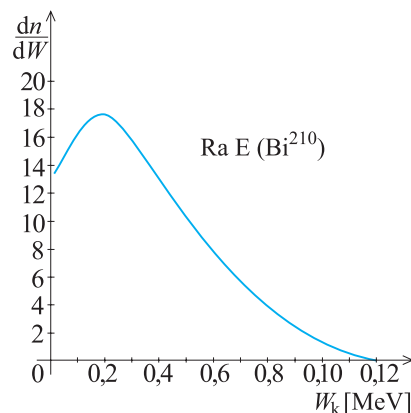


Tudi tu se ohranjata število nukleonov in naboj. Spremembo si razlagamo tako, da se eden od protonov v jedru spremeni v nevtron, pri tem pa nastaneta pozitron in nevtrino:



Razpad je mogoč le v jedru, prosti protoni – vodikova jedra – pa so stabilni, saj je lastna energija protona manjša od lastne energije nevtrona.

Presežek protonov v jedru se lahko zmanjša tudi tako, da jedro zajame kakega od bližnjih elektronov v atomu. Reakcijsko energijo v tem primeru odnese nevtrino. Ta pojav vedno spremlja razpad z izsevanjem pozitrona. Pri nekaterih jedrih, kjer je za izsevanje pozitrona premalo



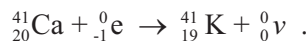
Slika 37.19 spekter beta pri radioaktivnem ${}^{210}\text{Bi}$

? Kolikšna je reakcijska energija pri razpadu prostega nevtrona? Kolikšna je največja energija izsevanih elektronov?

? Določite reakcijsko energijo za zgornji razpad.

? Določite reakcijsko energijo za zapisani razpad.

energije, lahko jedro preide v stabilnejšo obliko edino na ta način. Tako je pri jedru kalcija $^{41}_{20}\text{Ca}$, ki preide z zajetjem elektrona v jedro kalija $^{41}_{19}\text{K}$:



****** Razpad beta, pri katerem nastanejo novi delci in se spremeni nevtron v proton ali obratno, se razlikuje od razpada alfa, kjer se nukleoni ne spreminjajo. Pri razpadu alfa sodelujejo le nukleoni, ki jih povezuje jedrska sila. Ta pa ne deluje na elektrone ali na nevtrine, ki tudi sodelujejo pri razpadu beta. Če naj razumemo, zakaj pride do razpada, moramo dopustiti, da ga povzroča sila, ki deluje tako na nukleone, kakor na elektrone in nevtrine. To silo imenujemo *šibka sila*.

Elektron, pozitron, nevtrino in antinevtrino so osnovni predstavniki lahkih delcev, ki jih imenujemo *leptoni*. Čeprav kaže, da lahko nastajajo in izginevajo, pa tudi zanje veljajo stroga pravila. V knjigovodstvu delcev pripišemo elektronu in nevtrinu *leptonsko število* 1, pozitronu in antinevtrinu pa leptonsko število -1 . Pri razpadu beta se ohrani leptonsko število: pred razpadom leptonov ni in je leptonsko število 0, po razpadu pa imamo delca z nasprotnim leptonskim številom, tako da je vsota spet 0. Videli smo že, da se pri razpadu ohrani število nukleonov, torej tudi barionsko število, in seveda električni naboj.

+ **Dodatno čtivo** J. Strnad: Začetki sodobne fizike (od elektrona do jedrske cepitve), Presek VI (1978/79) 5.

Časovni potek radioaktivnega razpada

Eden od osnovnih podatkov o radioaktivnih vzorcih je njihova *aktivnost*, to je število razpadov na enoto časa. Aktivnost A je premo sorazmerna z množino radioaktivne snovi oziroma s številom radioaktivnih jeder v vzorcu, N , z enačbo zapisano:

$$A = \lambda N .$$

Koeficient λ imenujemo *razpadna konstanta*. Izražamo jo z enoto s^{-1} . Pove, kolikšen je delež števila jeder, ki razpadejo na enoto časa. Recipročno vrednost razpadne konstante, $\tau = 1/\lambda$, imenujemo *razpadni čas*. Pove, kolikšen je povprečni življenjski čas radioaktivnega jedra.

Aktivnost radioaktivnih vzorcev podajamo v enoti *becquerel* (Bq). Becquerel je aktivnost vzorca, v katerem razpade eno jedro na sekundo

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} .$$

Starejša enota za aktivnost je *curie* (Ci). Aktivnost 1 Ci ima vzorec, v katerem razpade $3,7 \cdot 10^{10}$ jeder na sekundo. Torej je

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} .$$

Navadno najdemo med podatki o radioaktivnem jedru *razpolovni čas* $t_{1/2}$, ki pove, v kolikšnem času se število radioaktivnih jeder v vzorcu zmanjša na polovico. Po preteku dveh razpolovnih časov je v vzorcu še četrtnina začetnega števila jeder, po preteku treh razpolovnih časov

še osmina in tako naprej (slika 37.20). Že od prej vemo, da je to značilnost *eksponentne časovne odvisnosti*. Z enačbo zapisano je število jeder N ob času t enako

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}, \quad (1)$$

če je N_0 število jeder ob začetku opazovanja, ob času $t = 0$. Podobno velja za aktivnost

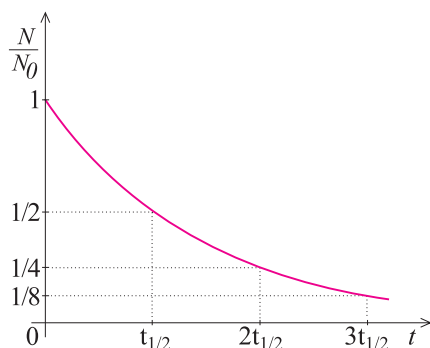
$$A = A_0 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}},$$

če je $A_0 = \lambda N_0$ začetna aktivnost.

Hitro uvidimo, da sta razpadna konstanta oziroma razpadni čas in razpolovni čas povezana. Čim krajši je razpolovni čas, tem večja je razpadna konstanta in s tem pri izbranem številu jeder aktivnost vzorca. S primerjavo zgornjih enačb dobimo:

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2} = 0,693 / t_{1/2}. \quad (2)$$

Tabela spodaj kaže razpolovne čase in razpadne konstante za nekaj najbolj znanih naravnih in umetnih radioaktivnih izotopov.



Slika 37.20 časovni potek števila radioaktivnih jeder v vzorcu in aktivnosti vzorca

Izotop	Razpolovni čas	Razpadna konstanta [s ⁻¹]
Uran 238	4,51.10 ⁹ let	7,1.10 ⁻¹⁸
Uran 235	7,13.10 ⁸ let	4,5.10 ⁻¹⁷
Radij 226	1620 let	1,96.10 ⁻¹¹
Kalij 40	1,3.10 ⁹ let	2,4.10 ⁻¹⁷
Ogljik 14	5568 let	5,7.10 ⁻¹²
Cezij 137	27 let	1,18.10 ⁻⁹
Stroncij 90	28 let	1,14. 10 ⁻⁹
Kobalt 60	5,25 let	6,06.10 ⁻⁹
Fosfor 32	14,3 dni	8,09.10 ⁻⁷
Jod 131	8,05 dni	1,44.10 ⁻⁶
Zlato 198	2,7 dni	4,29.10 ⁻⁶
Iridij 192	74,4 dni	1,56.10 ⁻⁷

Razpadna konstanta je neodvisna od časa. Pomeni, da je verjetnost, da bo razpadlo jedro v naslednji sekundi, vselej enaka, neodvisno od tega, koliko časa je preteklo od nastanka jedra.

* Iz definicije aktivnosti sledi

$$A = - \frac{dN}{dt} = \lambda N,$$

kjer smo z negativnim znakom upoštevali, da se zaradi razpadanja število jeder zmanjšuje. S tem dobimo diferencialno enačbo

$$\frac{dN}{N} = - \lambda dt,$$

ki ima rešitev v obliki

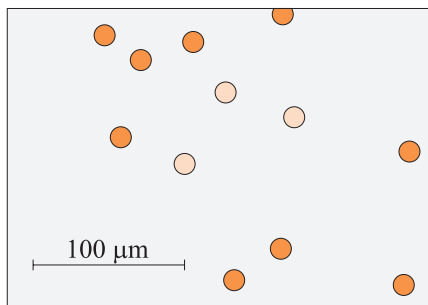
$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

pri pogoju, da je ob času $t = 0$ v vzorcu N_0 jeder. Enačba predstavlja isti eksponentni pojav kakor enačba (1), zato je

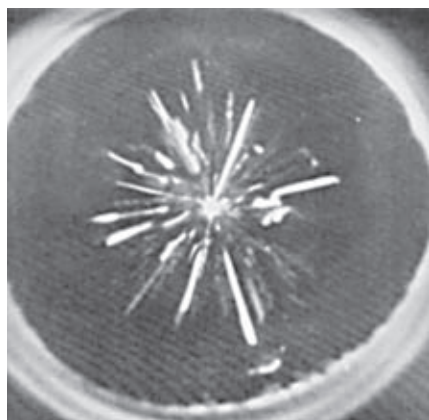
$$e^{-\lambda t} = 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}.$$

Od tod z logaritmiranjem dobimo enačbo (2).

DETEKTORJI JEDRSKEGA SEVANJA



Slika 37.20 Del detektorja sledi, kakor ga vidimo pod mikroskopom. Temnejše pike so sledi delcev α z energijo okoli 4,7 MeV, svetlejše pa so sledi delcev α z energijo okoli 3,5 MeV. Delci so vpadali na detektor pravokotno, zato so sledi po jedkanju krožne.



Slika 37.21 sledi delcev alfa v meglični celici



Slika 37.22 sledi delcev pri jedrski reakciji v mehurčni celici

Delci, ki nosijo električni naboj, delci alfa, delci beta, protoni, atomska jedra ali hitri ioni, na poti skozi snov ionizirajo okoliške atome. Pri tem izgubljajo energijo in se prej ali slej ustavijo. Delci z velikim nabojem in z majhno hitrostjo izgubljajo svojo energijo hitreje kakor delci z majhnim nabojem in z veliko hitrostjo. Gostota nastalih ionov ob poti delca je v prvem primeru večja kakor v drugem. Po ionizaciji, ki jo povzročajo, lahko delce, ki nosijo električni naboj, tudi odkrivamo.

Delce, ki nimajo naboja, in žarke gama lahko odkrivamo le posredno. Žarki gama se podobno kakor rentgenski žarki absorbirajo v atomih s fotoefektom. Izsevani elektroni povzročajo ionizacijo, ki omogoča detekcijo.

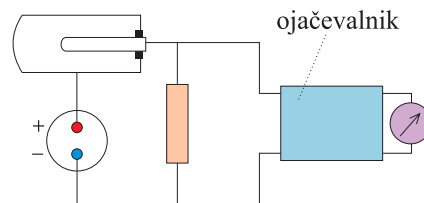
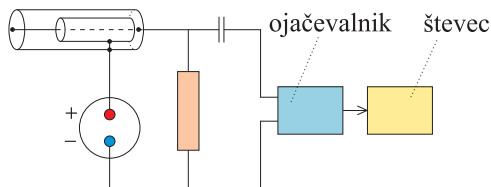
Nabite delce, zlasti tiste, ki na svoji poti močno ionizirajo, lahko odkrijemo že po sledih, ki jih puščajo v snovi. V fotografskih emulzijah ali v posebnih folijah iz polivinilalkohola ostanejo po prehodu nabitih delcev stalne poškodbe, ki jih lahko razvijemo, da postanejo sledi vidne z mikroskopom. V fotografski emulziji dobimo po fotografskem razvijanju vzdolž sledi niz razvitih zrn srebrovega bromida. V foliji polivinilalkohola pa ostanejo po jedkanju vzdolž poti delcev stožčaste sledi (slika 37.21). Zlasti fotografske emulzije so rabile za raziskovanje jedrskih reakcij, ki jih povzročajo delci iz vesolja (kozmični žarki) v zgornjih plasteh atmosfere.

V raziskovalnih laboratorijih so opazovali sledi delcev z *Wilsonovo* ali *meglično* in z *mehurčno* celico. Preprosto meglično celico najdemo v mnogih šolskih zbirkah. V njej lahko opazujemo sledi delcev alfa iz vgrajenega radioaktivnega izvora. V celici je zrak, nasičen z alkoholnimi parami. Ko z batom na hitro zmanjšamo tlak v celici, se plin v celici ohladi, zaradi česar postanejo alkoholne pare prenasočene in se začno kondenzirati okoli ionov in drugih kondenzacijskih jeder. Ker so ioni najgostejši vzdolž sledi, lahko vidimo sled za kratek hip, preden se razprši. Pri merjenjih celico hkrati z zmanjšanjem tlaka osvetljuje in fotografirajo. Slika 37.21 kaže fotografijo sledi delcev alfa v taki celici.

Podobno nastajajo sledi tudi v kapljevinah pri vrelišču. Ioni v njih predstavljajo vrelna jedra, okoli katerih nastanejo mehurčki pare, če tlak nenadoma nekoliko zmanjšamo. Slika 37.22 kaže fotografijo sledi jedrskih reakcij med protoni v mehurčni celici, ki je napolnjena s tekočim vodikom.

? Ponovite poglavje o ravnovesju med kapljevino in njeno paro. Opazujte sledi delcev alfa v meglični celici!

Ionizacijo izrabljamo tudi v drugih detektorjih jedrskega sevanja. Najpreprostejša je *ionizacijska celica*. To je kondenzator, napolnjen z zrakom ali kakim drugim plinom. Ko priključimo celico na izvir napetosti, električno polje med ploščama povzroči urejeno gibanje zaradi sevanja nastalih pozitivnih in negativnih ionov (slika 37.23). Zaradi tega gibanja teče majhen tok tudi po uporniku, ki je povezan zaporedno s celico. Z elektronskim voltmetrom merimo napetost na tem uporniku.



Slika 37.23 shema ionizacijske celice in pripadajočega merilnika

Slika 37.24 shema Geigerjevega števca in pripadajočega merilnika

S števci lahko zaznavamo posamezne delce ali žarke gama. Slika 37.24 kaže *Geigerjev števec*. To je valjast kondenzator, ki ima za anodo tanko žičko. Napolnjen je z argonom s primesmi alkohola ali broma pri tlaku okoli 100 mbar. Električno polje pospeši proti anodi elektrone, ki nastanejo v plinu ob prehodu nabitega delca. Ko pridejo v okolico žičke, kjer je električno polje zelo močno, že med zaporednima trkoma z molekulami v plinu pridobijo toliko kinetične energije, da lahko ionizirajo naprej. Proti anodi se razširi cel plaz elektronov, proti katodi pa se giblje oblak pozitivnih ionov. To povzroči na uporniku, ki je vezan zaporedno s števcem, sunek toka in s tem sunek napetosti. Te sunke štejemo z elektronsko števno napravo.

V *večžičnih števcih* lahko delec povzroči električne sunke v več žicah. Iz zaporedja teh sunkov je mogoče določiti tir delca. Ti števci nadomeščajo mehurčne celice, saj je mogoče podatke iz njih neposredno prenašati v računalnike za nadaljnjo obdelavo (slika 37.26).

V novejšem času uporabljajo poleg plinskih števcov tudi *polprevodniške števce*. V števcih iz čistega silicija ali germanija povzročajo nabiti delci nastanek prostih elektronov in vrzeli, ki se v električnem polju gibljejo podobno kakor ioni v ionizacijski celici.

UPORABA RADIOAKTIVNIH SNOVI

Z detektorji jedrskega sevanja zlahka odkrivamo navzočnost radioaktivnih snovi. Pri raziskavah v biologiji in medicini, kjer nas zanimajo biokemične spremembe pri presnovi izbrane snovi v organizmu, radioaktivne izotope uporabljajo zato kot *sledilce*. V izbrano snov namesto stabilnega vgradijo radioaktivni izotop. Preiskava z detektorji potem pokaže, kam se je vgradil. Z radioaktivnimi izotopi zaznamujejo tudi snovi, ki na značilen način pokažejo delovanje kakšnega organa. Tako preiskujejo delovanje jeter z barvilom bilirubin, ki ga zaznamujejo z jodom ^{131}J . Z jodom ^{131}J zaznamovane spojine uporabljajo tudi za preiskavo delovanja ščitnice. V obeh primerih s tako imenovano



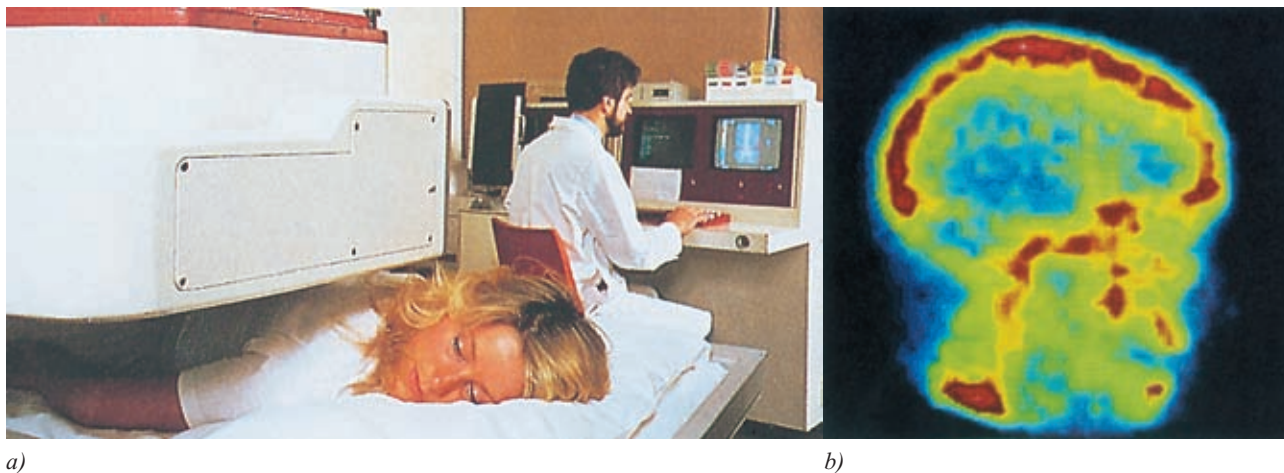
Slika 37.25 geolog išče radioaktivne elemente s prenosnim Geigerjevim števcem



Slika 37.26 pogled v notranjost večžičnega detektorja pri eksperimentu ARGUS pri DESY v Hamburgu



Slika 37.27 s pozitronsko emisijsko tomografijo (PET) zdravnik preučuje bolnikovo možgane



Slika 37.28 preiskava z gama kamero (a) in posnetek glave (b)

gama – kamero, ki jo namestijo nad preiskovani organ, zasledujejo nabiranje in izplakovanje zaznamovane snovi in njeno porazdelitev (slika 37.28).

Zaznamovanje snovi z radioaktivnimi izotopi uporabljajo tudi pri raziskovanju kemijskih reakcij in tehnoloških procesov.



Slika 37.29 Svitki iz Mrtvega morja. Starost svitkov in jam, kjer so svitke našli, so določili z radioaktivnim ogljikom.

Naravni radioaktivni izotopi rabijo za določanje starosti kamenin in bioloških ostankov. Znano je določanje starosti bioloških izkopanin z ogljikom ^{14}C . Kakor smo omenili, nastaja ogljik ^{14}C v atmosferi ves čas ob jedrskih reakcijah, ki jih povzroča kozmično sevanje. Novonastali ^{14}C sproti nadomešča razpadlega. Tako je v atmosferi konstantna koncentracija ogljika ^{14}C . V živih organizmih, ki vgrajujejo ogljik v svoje organe, se zaradi tega vzpostavi konstantno razmerje med stabilnim izotopom ogljika ^{12}C in radioaktivnim ^{14}C . Ko organizem odmre, preneha metabolizem, zato se začne zaradi razpadanja koncentracija ^{14}C zmanjševati. Iz aktivnosti ^{14}C lahko določimo čas, ki je pretekel od odmrtnja organizma.

Iz razmerja med koncentracijo urana ^{238}U in svinca ^{206}Pb v kamninah lahko določijo starost kamnin. Svinec ^{206}Pb je namreč zadnji, stabilni člen v nizu radioaktivnih razpadov urana ^{238}U . Ker so razpolovni časi vmesnih členov niza veliko krajši od razpolovnega časa urana, množina svinca v vzorcu naravnost pove, koliko urana je razpadlo od nastanka kamnine. Za najstarejše kamnine na Zemlji so določili starost okoli $2,7 \cdot 10^9$ let, za meteorite pa okoli $4,5 \cdot 10^9$ let. Toliko naj bi minilo tudi od nastanka Zemlje.

Radioaktivne izotope uporabljajo tudi kot izvire sevanja za preiskavo materialov in izdelkov. Tako z izviri žarkov gama, npr. s kobaltom, ^{60}Co , cezijem, ^{137}Cs , in iridijem, ^{92}Ir , preiskujejo kvaliteto zvarov. Z izviri žarkov beta, npr. s stroncijem, ^{90}Sr , pa debelino papirja ali plastičnih folij. Radioaktivne izvire sevanja gama, npr. kobalt, ^{60}Co , ali iridij, ^{92}Ir , uporabljajo tudi v medicini za obsevanje rakastih tvorbo.

Jedrsko sevanje prav tako kakor rentgensko sevanje poškoduje živo tkivo. Spoznali smo že, da je za poškodbe odločilna *absorbirana*

energija ali *doza*. Zaradi radioaktivnih snovi v zemlji in ozračju in zaradi sevanja, ki prodira skozi ozračje iz vesolja, smo ves čas izpostavljeni sevanju. V povprečju prejme človek dozo 2,4 mSv na leto. Medicinske preiskave prinesejo v povprečju še 0,45 mSv na leto. Radioaktivni izotopi v tleh, ki so posledica dosedanjih eksplozij jedrskih bomb v ozračju, prinesejo k letni dozi 0,01 mSv. Jedrske elektrarne prispevajo v povprečju po 0,0025 mSv, ostali izviri sevanja pa še 0,014 mSv. V človeškem organizmu ves čas potekajo varovalni pojavi, ki razmeroma učinkovito popravljajo poškodbe, ki jih povzroča sevanje v naravnem okolju. Vsako povečanje doze pa povečuje možnost trajnih poškodb.

Varovanje pred sevanjem nadzirajo mednarodne komisije. Te so na osnovi izkušenj in statističnih računov postavile 1 mSv na leto kot zgornjo mejo za dodatno obsevanje ljudi. Do te dodatne doze naj bi bilo povečanje števila smrti zaradi rakastih obolenj, ki jih sproži sevanje, statistično nedokazljivo.

Dejavnost Opazujte absorpcijo sevanj alfa, beta in gama!

Z detektorjem sledi raziščite naravno radioaktivnost alfa v različnih kameninah. Z enakimi detektorji lahko odkrijete tudi radioaktivnost alfa v zraku. Ta je v glavnem posledica razpadanja radona in njegovih potomcev. V preglednici naravnih radioaktivnih nizov lahko razberete izotope radona in njihove razpade.

Z Geiger-Müllerjevim detektorjem lahko približno ocenite aktivnost tal in različnih rastlin. Ta radioaktivnost je v prvi vrsti posledica poskusnih jedrskih eksplozij in jedrskih nesreč. Pred tem morate določiti *ozadje*, to je sevanje, ki ga zazna detektor brez vzorca. Ozadje je posledica naravne radioaktivnosti in sevanja iz vesolja.

+ Dodatno čtivo Fizika za družboslovce, Seminar, DMFA, Ljubljana 1978.

38. | OSNOVNI DELCI IN INTERAKCIJE

HADRONI IN LEPTONI

Proton, nevtron in elektron sestavljajo atome. Atomi sestavljajo molekule in kristale, ti pa naprej vso raznolikost okoli nas.

Elektrone veže na atomska jedra *električna sila*, ki deluje med vsemi telesi z električnim nabojem. Kot taka povezuje tudi atome v molekulah in kristalih in molekule med seboj. Protone in nevtrone povezuje v jedrih *jedrska sila*. Ta ni odvisna od električnega naboja in ne deluje na elektrone.

Videti je, kakor da pripadajo nukleoni in elektroni različnim družinam, ki ju povezuje le električna sila. *Radioaktivnost beta* pa kaže, da stvar le ni tako preprosta. Ob razpadu nevtrona v proton nastaneta elektron in spremljajoči antinevtrino, ki ju pred razpadom ni bilo. Podobno nastaneta ob razpadu protona v radioaktivnem jedru pozitron in spremljajoči nevtrino. Elektroni, pozitroni, nevtrini in antinevtrini skupaj z drugimi *lahkimi delci* tvorijo družino *leptonov*. Nukleona proton in nevtron sodita v širšo družino *barionov*. Obe družini poleg električne povezuje *šibka sila*, ki povzroča spremembe v družini barionov, pri katerih se rojevajo tudi leptoni .

Elektron in pozitron ter nevtrino in antinevtrino sta para *delcev* in *antidelcev*. Elektron in pozitron se razlikujeta le po naboju: elektron ima negativni, pozitron pa pozitivni osnovni naboj. Nevtrino in antinevtrino nimata naboja, masa obeh je nič ali pa zelo majhna. Razlikujeta se po tem, da ima eden vrtilno količino usmerjeno v smeri gibanja, drugi pa v nasprotni smeri.

Razpad beta nas pouči, da so delci spremenljivi in da se lahko ob spremembah rojevajo novi delci. Spoznali pa smo že, da veljajo pri spremembah stroga pravila. Tako nukleonsko oziroma barionsko število kakor leptonsko število se pri spremembi ne moreta spremeniti, kar pomeni, da mora biti vsako od njiju po spremembi takšno kakor pred njo. Pri tem štejemo delce za pozitivne, antidelce pa za negativne. Zato lahko novi delci vedno nastajajo le v parih, npr. elektron z antinevtrinom in pozitron z nevtrinom. Elektron in nevtrino sta delca z leptonskim številom 1, pozitron in antinevtrino pa antidelca z leptonskim številom -1 . Tako je pri razpadu beta

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

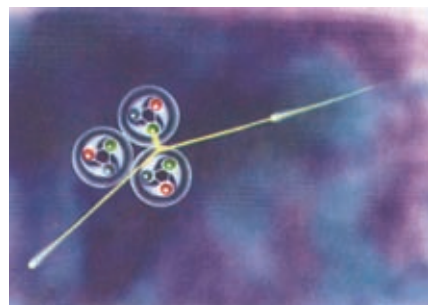
nukleonsko oziroma barionsko število pred razpadom in po njem enako 1, leptonsko število pa nič, saj moramo šteti elektron pozitivno, antineutrino pa negativno.

Poglejmo še en zgled. Foton gama lahko v bližini atomskega jedra povzroči rojstvo elektrona in pozitrona:

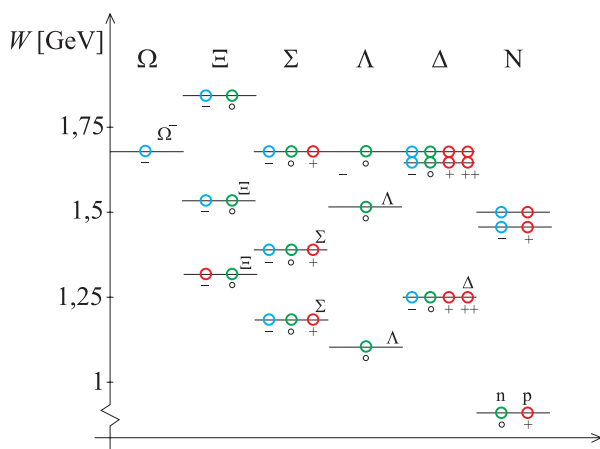
$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

elektron in pozitron pa lahko ob srečanju družno izgineta, se *anihilirata*, pri čemer dobimo dva fotona gama. Lahko se prepričate, da se pri teh spremembah ohranja skupno leptonsko število. Tako pred reakcijama kakor po njima je leptonsko število enako nič.

Rojevanje in izginjevanje delcev pa ni vezano le na družino leptonov. Pri poskusih, pri katerih z velikimi pospeševalniki pospešijo protone do energije, ki je nekajkrat večja od lastne, nastajajo *pari protonov* in *antiprotonov* ali *neutronov* in *antineutronov*, pa tudi drugi delci iz te družine, ki jih med gradniki snovi ni. S skupnim imenom smo jih imenovali *barioni*. Spodnja tabela kaže doslej odkrite barione in njihove lastnosti v osnovnih stanjih. Za večino barionov so odkrili tudi več vzbujenih stanj. Lestvico barionskih stanj kaže slika 38.2. Vsi barioni razen protona so nestabilni.

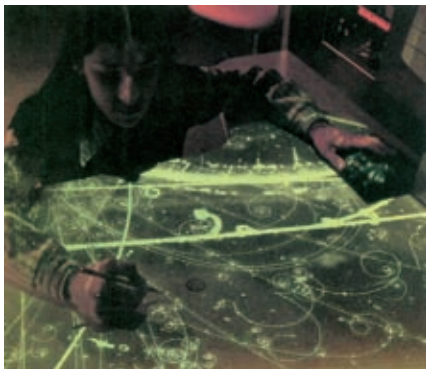


Slika 38.1 Umetnikova predstava trka visokoenergijskega delca z jedrom. Kvarki so majhne barvne kroglice znotraj večjih, ki predstavljajo nukleone.



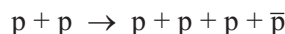
Slika 38.2 lestvica barionskih stanj

Barion	Lastna energija [MeV]	Razpadni čas [s]
nukleon - p	936,4	stabilen
nukleon - n	937,7	700
lambda - Λ	1116,6	$2,5 \cdot 10^{-10}$
sigma - Σ^+	1189,4	$0,8 \cdot 10^{-10}$
sigma - Σ^0	1192,5	10^{-14}
sigma - Σ^-	1197,3	$1,5 \cdot 10^{-10}$
ksi - Ξ^0	1314,7	$3,0 \cdot 10^{-10}$
ksi - Ξ^-	1321,3	$1,7 \cdot 10^{-10}$
omega - Ω^-	1672,5	$1,3 \cdot 10^{-10}$

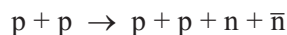


Slika 38.3 študij reakcij med osnovnimi delci

Za zgled si oglejmo nekaj reakcij, pri katerih nastajajo novi barioni. Protoni, ki jih s kinetično energijo, ki je večja od $5,63 \cdot 10^9 \text{ eV} = 5,63 \text{ GeV}$, usmerijo v tarčo iz tekočega vodika, sprožijo nastanek novega protona in antiprotona:



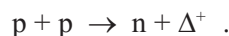
Podobno nastaneta nevtron in antinevtron



ali barion Δ^{2+}

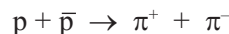


ali barion Δ^+

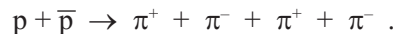


Lahko se prepričamo, da se pri nobeni od reakcij barionsko število ne spremeni.

Ob reakcijah med barioni pri visokih energijah pa se pojavljajo še drugi delci. Zaradi mase, ki je med maso barionov in maso leptonov, so jih imenovali *mezone*. Tako npr. ob anihilaciji protona in antiprotona, nastajajo *mezoni* π ali *pioni*



ali



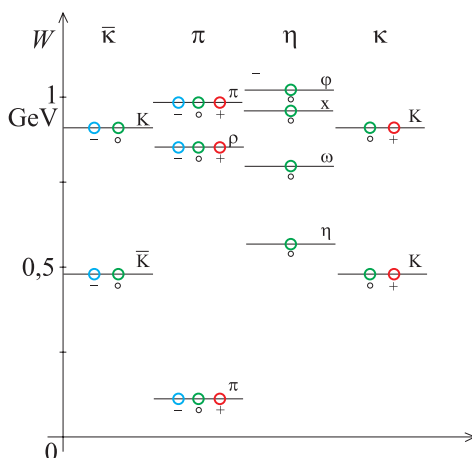
Število nastalih pionov je odvisno od energije, ki jo imata proton in antiproton. Tudi pri drugih reakcijah te vrste je število nastalih mezonov omejeno le z energijo, ki jo imajo delci.

Mezoni se očitno razlikujejo od barionov ali leptonov. Za barione in leptone velja, da se morajo pri vseh spremembah ohranjati njihova števila. Za mezone ni te omejitve. Njihovo vlogo v naravi razumemo, če si ustvarimo primerno sliko o silah med delci.

Mislino si, da z velike razdalje opazujemo igralca, ki si podajata žogo. Ne vidimo žoge, opazimo pa, da sta igralca nekako vezana drug na drugega. Predstavljamo si lahko, da je žoga, ki si jo podajata, posrednik sile med njima. Podobno si predstavljamo, da povezuje nukleone v jedru sila, ki je posledica *izmenjave pionov*. Predstavljamo si, da je v okolici nukleona oblak pionov, ki neprestano nastajajo in izginjajo. Ko se dva nukleona toliko približata, da se njuna pionska oblaka prekrijeta, se zaradi izmenjave pionov privlačita – med njima deluje *jedrska sila*. Pionov navadno ne opazimo, saj je čas med njihovim nastankom in izginotjem prekratek – pravimo, da so *navidezni* ali *virtualni*. Ko pa dovedemo sistemu nukleonov dovolj energije, npr. ob trku, se lahko pojavijo pioni kot pravi delci.

Podobno kakor silo med nukleoni si predstavljamo silo med drugimi barioni. Poleg pionov posredujejo to silo tudi drugi mezoni. V splošnem sile med barioni ne imenujemo več jedrska, ampak *močna*, s

čimer želimo poudariti njeno velikost v primerjavi z drugimi silami v naravi. Njeni posredniki so mezoni vseh vrst. Spodnja tabela kaže doslej odkrite mezone, slika 38.4 pa lestvico njihovih stanj. Mezone in barione imenujemo s skupnim imenom *hadroni*, kar naj označuje delce, ki sodelujejo med seboj z močno silo.



Slika 38.4 lestvica mezonskih stanj

Mezon	Lastna energija [MeV]	Razpadni čas [s]
pion – π^-	134,7	$1,3 \cdot 10^{-16}$
pion – π^0	139,3	$1,7 \cdot 10^{-8}$
kaon – K^-	493,8	$1,2 \cdot 10^{-8}$
kaon – K^0	497,8	$0,9 \cdot 10^{-10}$
eta – η	548,8	$2,5 \cdot 10^{-19}$

Na hadrone pa deluje tudi šibka sila. Na to opozarjajo razpadi, pri katerih nastajajo leptoni, na katere močna sila ne deluje. Poleg elektrona, nevtrina in njunih antidelcev nastajajo tudi drugi leptoni, ki jih doslej nismo poznali. Pri razpadu pozitivnega piona, npr. nastaneta *pozitivni mion* in *mionski nevtrino*

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

pri razpadu negativnega piona pa *negativni mion* in *mionski antinevtrino*

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Tudi pri teh razpadih se ohrani število leptonov. Pri tem pripišemo negativnemu mionu in mionskemu nevtrinu leptonsko število 1, pozitivnemu mionu in mionskemu antinevtrinu pa leptonsko število –1. Leptonska števila za miona in pripadajoča mionska nevtrina moramo ločiti od leptonskih števil za elektron in pozitron in elektronska nevtrina. To spoznamo iz načina, po katerem razpade mion:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

Prepričate se lahko, da se pri razpadu ohrani leptonsko število posebej za mionsko in posebej za elektronsko družino leptonov.

OSNOVNI DELCI IN INTERAKCIJE

Zaradi velikega števila hadronov so raziskovalci sklepali, da so hadroni sestavljeni. Dosedanja spoznanja kažejo, da jih sestavljajo točkasti *kvarki*. Protone, nevtrone in pione, ki sestavljajo običajno snov, sestavljata kvarka **u** in **d** in njuna antidelca. Pri tem sestavljajo proton in nevtron po trije kvarki, pion pa par kvark in antikvark. Kvarke opredeljujemo z dvema lastnostma: z *okusom* (*u* – gor (*up*) ali *d* – dol (*down*)) in z barvo (*r* – rdeča, *b* – modra in *g* – zelena). Proton, nevtron in pion so barvno nevtralni. To je doseženo tako, da tvorijo bariona po en rdeč, en moder in en zelen kvark, pione pa antikvarka z nasprotno barvo, npr. z rdečo in antirdečo, modro in antimodro ali zeleno in antizeleno. Prva tabela kaže lastnosti osnovnih dveh kvarkov, druga pa, kako ta kvarka skupaj s njunima antidelcema oblikujejo nevtron, proton in pion. Hadronov ne moremo razbiti na posamezne kvarke, iz reakcij vselej dobimo le hadrone.

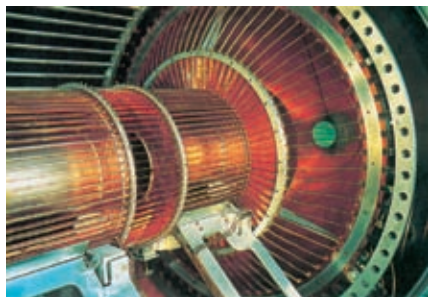
Okus kvarka	Naboj	Barva
u	$(2/3) e_0$	r, b, g
d	$-(1/3) e_0$	r, b, g
$\bar{u}$	$-(2/3) e_0$	r, b, g
$\bar{d}$	$(1/3) e_0$	r, b, g,

Hadron	Sestav	Naboj	Barva
proton	u u d	e_0	nevtralen
nevtron	u d d	0	nevtralen
pion π^+	u $\bar{d}$	e_0	nevtralen
pion π^0	$u\bar{u}, d\bar{d}$	0	nevtralen
pion π^-	$\bar{u} d$	$-e_0$	nevtralen

Preostale hadrone pojasnimo, če predpostavimo dodatno družino kvarkov z okusoma *s* – čudnost (*strangeness*) in *c* – čar (*charm*).

Sedanja spoznanja o najdrobnejši zgradbi snovi so strnjena v tako imenovanem *standardnem modelu*, ki ga lahko na kratko povzamemo takole:

Za osnovne gradnike snovi jemljemo delce, ki nimajo notranje zgradbe. Za sedaj kaže, da so taki delci *tri družine leptonov* in *tri družine kvarkov*. Poleg elektrona in miona in pripadajočih nevtrinov, je med leptone šteti še *tauon* in pripadajoči *tauonski nevtrino*. Njihove glavne lastnosti kaže prva tabela na str. 249. Podobno je treba že znanima družinama kvarkov prišteti še kvarka z okusom *t* – resnica (*truth, top*) in *b* – lepota (*beuty, bottom*) s po tremi barvami. Lastnosti kvarkov kaže druga tabela na str. 249. K vsaki od družin moramo šteti še pripadajoče antidelce.



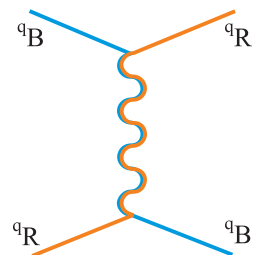
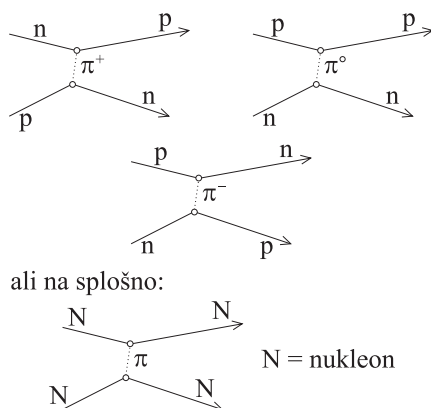
Slika 38.5 Spektrometer (na sliki) meri energijo elektronov pri razpadu beta. Z njim želijo znanstveniki ugotoviti, ali imajo nevtrini maso različno od nič.

Leptoni

naboj	1. družina	2. družina	3. družina
0	nevtrino	nevtrino	nevtrino
$-e_0$	elektron	mion	tauon

Kvarki

naboj	1. družina	2. družina	3. družina
$(2/3)e_0$	u	c	t
$-(1/3)e_0$	d	s	b



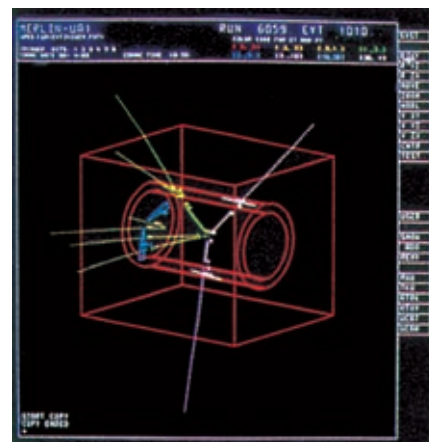
Slika 38.6 posredovanje hipermočne sile med kvarki

Slika 38.7 posredovanje jedrske sile med nukleoni

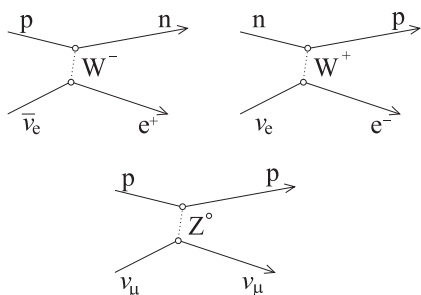
Kvarki so v hadronih povezani s *hipermočno silo*, ki jo posredujejo *gluoni*. Ti naj bi bili brez mase, imeli pa naj bi barvo. Slika 38. 6 kaže, kako naj bi gluoni povezovali kvarke.

Močno silo med *hadroni* posredujejo *mezoni*. Med nukleoni v jedru npr. posredujejo jedrsko silo *pioni*. Lahko si mislimo, da je močna sila med hadroni preostanek hipermočne sile, ki povezuje kvarke. Podobno se s preostalo električno silo povezujejo atomi in molekule. Slika 38.7 ponazarja, kako si predstavljamo posredovanje pionov pri interakciji med nukleoni: ob trku si nukleona izmenjata enega od pionov in se pri tem spremenita v nova nukleona. V atomskem jedru se taka izmenjava neprestano dogaja.

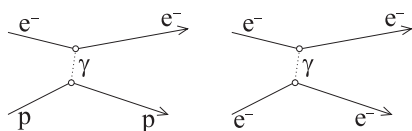
Na hadrone pa deluje še *šibka sila*, ki deluje tudi med leptoni. Ta sila povzroča razpade delcev in povezuje družino hadronov z družino leptonov. Tudi to silo posredujejo delci. To so W^+ , W^- in Z^0 , za katere velja, da so brez notranje zgradbe, imajo pa maso. Med reakcijami, ki jih uravnava šibka sila, so tudi naslednje:



Slika 38.8 Računalniška rekonstrukcija razpada delca Z^0 na elektron in pozitron. Njuni sledi sta označeni belo.



Slika 38.9 posredovanje šibke sile pri interakciji med nukleoni in leptoni

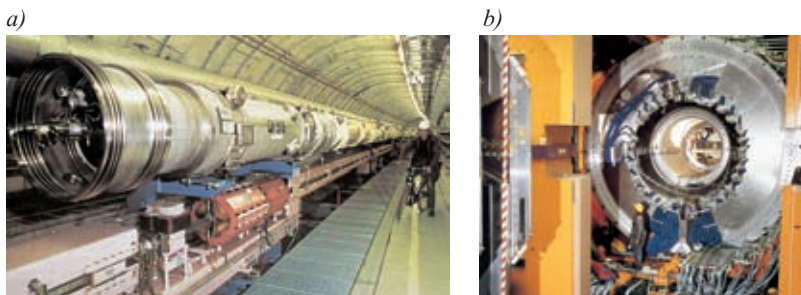


Slika 38.10 posredovanje električne sile med nabitimi delci

+ Dodatno čtivo J. Strnad: Iz take so snovi kot sanje, Založba Mladinska knjiga, Ljubljana.

M. Hribar in L. Babič, Analiza reakcij med visokoenergijskimi delci, Zbirka Povejte nam kaj več o ..., Založba Modrijan, Ljubljana 1996.

Slika 38.11 Trkalnik Hera v Hamburgu. Na sliki (a) je del podzemnega tunela, v katerem se v nasprotnih smereh pospešujejo protoni in elektroni. V detektorju Zeus (b) prihaja do trkov med protoni in elektroni, ki se gibljejo skoraj s svetlobno hitrostjo.



$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n ,$$

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p ,$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p .$$

Slika 38.9 ponazarja, kako si predstavljamo potek teh reakcij: v reakcijo vstopajoča delca si izmenjata enega od posrednikov šibke sile in se pri tem spremenita v druga delca.

Med vsemi delci, ki imajo električni naboj, deluje še *električna sila*. Tudi zanjo si zamislimo posrednika – to so fotoni. Slika 38.10 kaže, kako si zamišljamo vlogo fotonov pri interakciji med protonom in elektronom ali med dvema elektronoma.

Za konec si oglejmo relativno velikost sil. Za primerjavo moramo vzeti delca, med katerima delujejo vse tri sile, in to v razdalji, ki je znotraj njihovega dosega. Taka delca sta npr. piona v razdalji okoli 10^{-15} m. Če vzamemo močno silo za enoto, je električna sila okoli stotina močne (10^{-2}), šibka sila pa okoli desetmilijonina (10^{-7}) močne. Zanimarili smo *gravitacijsko silo*, ki deluje med vsemi delci z maso, vendar v svetu delcev ni pomembna. Predstavlja le okoli 10^{-40} del močne sile.

Fizika še ni našla dokončnega odgovora na vprašanja o najdrobnejši zgradbi snovi. Ob velikih pospeševalnikih tečejo raziskave z vse večjimi energijami delcev. Raziskovalci upajo, da bodo lahko odgovorili ne le na vprašanja o zgradbi snovi, ampak tudi na vprašanja o začetku vesolja, o nastanku snovi in o razvoju vesolja. O tem se boste podrobneje poučili, če se boste odločili za študij fizike. Pa tudi sicer ne boste mogli mimo morebitnih novih spoznanj.

39. | VPRAŠANJA IN NALOGE

1. Kaj je skupnega izotopom izbranega elementa in v čem se razlikujejo?

2. Katerim elementom pripadajo naslednji atomi: ${}^{232}_{92}\text{X}$, ${}^{18}_7\text{X}$, ${}^{82}_{38}\text{X}$ in ${}^{247}_{97}\text{X}$?

Odgovor: U, N, Sr, Bk

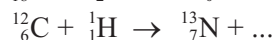
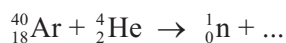
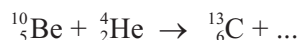
3. Zakaj vrednosti atomskih mas elementov v periodnem sistemu niso blizu celoštevilčnim?

4. Kolikšna je vezavna energija jeder ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{59}_{27}\text{Co}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$? Atomske mase izotopov so po vrsti 15,99491 u, 58,9519 u in 208,04164 u. Kolikšna je vezavna energija na nukleon?

Odgovor:

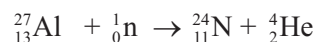
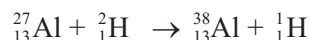
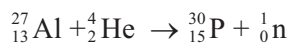
128 MeV; 7,98 MeV; 500 MeV
8,48 MeV; 1580 MeV; 7,58 MeV

5. Dopolnite reakcije:



Odgovor: ${}^1_1\text{H}$, ${}^{43}_{20}\text{Ca}$, ${}^1_0\text{n}$

6. Kolikšne so reakcijske energije pri naslednjih reakcijah:



Atomske mase izotopov so:

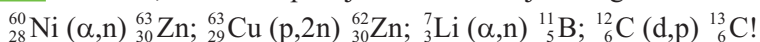


Odgovor: 2,65 MeV

5,84 MeV

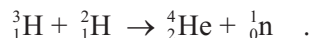
11,2 MeV

7. Presodite, katere od spodaj naštetih reakcij so mogoče in katere ne:



Pojasnilo: Znak d označuje devteron, jedro težkega vodika.

8. Za pridobivanje energije z zlivanjem jeder se zdi najugodnejša reakcija



Kolikšna je reakcijska energija? Zakaj reakcija ne poteka, če delci nimajo začetne kinetične energije? Mase atomov poiščite v tabeli na str. 221.

Odgovor: 17,6 MeV

9. V jedrskem reaktorju povzroči nevtron razcep jedra urana $^{235}_{92}\text{U}$:



Kolikšna je reakcijska energija? Atomske mase izotopov so:

Odgovor: 173 MeV

$^{235}_{92}\text{U}$ 235,043924 u, $^{92}_{36}\text{Kr}$91,92630 u in $^{141}_{56}\text{Ba}$ 140,91440 u.

10. V jedrskem reaktorju, kjer je tok nevtronov $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, je folija zlata $^{197}_{79}\text{Au}$ (naravno zlato) z maso 10 mg. Reakcijski presek za reakcijo z nevtroni, pri kateri nastaja radioaktivno zlato $^{198}_{79}\text{Au}$, je 99 barnov. Koliko jeder aktivnega zlata nastane v 10 minutah? Kolikšna je aktivnost folije, če je razpolovni čas radioaktivnega zlata 2,7 dni?

Odgovor: $1,81 \cdot 10^{13}$
 $5,4 \cdot 10^7 \text{ Bq}$

11. Kolikšna je gostota magnetnega polja v ciklotronu, v katerem krožijo protoni s frekvenco $1,9 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$?

Odgovor: 1,25 T

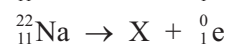
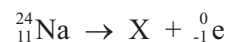
12. Med *dejema* v ciklotronu niha napetost z amplitudo 50 kV. Koliko obhodov morajo opraviti protoni, da dosežejo kinetično energijo 15 MeV?

Odgovor: 150

Odgovor: $1,2 \cdot 10^7 \text{ Bq}$

13. Kolikšna je aktivnost kilograma čistega urana, $^{238}_{92}\text{U}$?

14. Kateri izotopi nastanejo pri naslednjih radioaktivnih razpadih



Odgovor: $^{24}_{12}\text{Mg}$, $^{22}_{10}\text{Ne}$, $^{206}_{82}\text{Pb}$

15. Uran, $^{283}_{92}\text{U}$, razpade s serijo treh razpadov alfa in dveh razpadov beta. V kateri izotop se spremeni na tak način?

Odgovor: $^{226}_{88}\text{Ra}$

16. Na kateri strani niza stabilnih jeder na diagramu, ki kaže število nevtronov v odvisnosti od števila protonov, ležijo radioaktivna jedra, ki razpadajo z razpadom β^- , in na kateri strani jedra, ki razpadajo z razpadom β^+ ali z ulovom elektrona?

17. Izotop berilija, ^7_4Be , je radioaktiven in razpada v litij, ^7_3Li . Za kateri razpad gre? Kolikšna je reakcijska energija? Masi atomov berilija in litija sta 7,01693 u oziroma 7,01600 u.

Odgovor: ulov elektrona; 0,87 MeV

18*. Kako bi ugotovili, ali izbrano jedro lahko razpade z emisijo delca alfa, elektrona ali pozitrona?

19. Izotop kripton, $^{85}_{36}\text{Kr}$, z atomsko maso 84,91254 u je radioaktiven in razpada z razpadom beta. Presodite, za katero vrsto razpada β^- gre, β^+ ali ulov elektrona. Atomske mase sosednjih atomov z enakim masnim številom so: $^{85}_{35}\text{Br}$ 84,9155 u, $^{85}_{37}\text{Rb}$ 84,91180 u.

Odgovor: β^- ; 0,69 MeV

20. Izotop bora $^{12}_5\text{B}$ razpade z emisijo elektrona v izotop ogljika $^{12}_6\text{C}$. Kolikšna je maksimalna energija elektronov? Masi izotopov sta 12,0144 u oziroma 12,0000 u.

Odgovor: 13,4 MeV

21*. Polonij, $^{210}_{84}\text{Po}$, razpade z izsevanjem delca alfa v svinec, $^{206}_{82}\text{Pb}$. Kolikšna je reakcijska energija? Kolikšna je kinetična energija delca alfa in kolikšna je energija svinčevega jedra, če atom polonija pred

razpadom miruje? Atomske mase polonija, $^{210}_{84}\text{Po}$, in svinca, $^{206}_{82}\text{Pb}$, sta 209,982848 u oziroma 205,974440 u.

Odgovor: 5,41 MeV
5,30 MeV
0,11 MeV

22. V radioaktivnem vzorcu je radioaktivni izotop z razpolovnim časom en mesec. Kolikšna je aktivnost vzorca po dveh in po treh mesecih, če je aktivnost ob pripravi 10^5 Bq ? V kolikšnem času pade aktivnost na $(1/128)$ -ino prvotne?

Odgovor: $(1/4) \cdot 10^5 \text{ Bq}$, $(1/8) \cdot 10^5 \text{ Bq}$;
7 mesecev

23. V radioaktivnem vzorcu z razpolovnim časom 4 ure je v začetku 10^{20} radioaktivnih jeder. Kolikšna je začetna aktivnost vzorca? Kolikšno energijo odda vzorec v 4 urah, če se pri posameznem razpadu sprosti 4,5 MeV? Kolikšna pa je oddana energija v 12 urah?

Odgovor: $4,81 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$; $3,6 \cdot 10^7 \text{ J}$;
 $6,30 \cdot 10^7 \text{ J}$

24. Radioaktivni vodik – tritij, ki nastaja v atmosferi pri reakcijah, ki jih sprožajo kozmični žarki, rabi pri določanju starosti organskih snovi ali vodnih zalog. Delež radioaktivnega tritija v atmosferi, v površinskih vodah in živih organizmih je približno konstanten. V snoveh, ki so izgubile stik z atmosfero za dalj časa, pa delež tritija pada. Tako so v stari steklenici vina ugotovili le $1/10$ toliko tritija, kakor ga je v svežem vinu. Pred koliko časa je bilo vino ustekleničeno? Razpolovni čas tritija je 12,33 let.

Odgovor: 41 let

25. Za delavce, ki delajo z radioaktivnimi snovmi, velja omejitev, da letna doza ne sme preseči $0,05 \text{ Sv}$. V kolikšni razdalji od radioaktivnega vira sme delati delavec s 40-urnim delovnim tednom, če povzroča izvir v razdalji 1 m dozo $5 \cdot 10^{-4} \text{ Sv/h}$? Doza je obratno sorazmerna s kvadratom razdalje od izvira.

Odgovor: 4,7 m

26. V telesu odraslega človeka je okoli 3000 Bq radioaktivnega kalija, $^{40}_{19}\text{K}$, ki je primes v naravnem kaliju in ima razpolovni čas $1,23 \cdot 10^9$ let. Kolikšna je masa tega izotopa v telesu?

Odgovor: 11,2 mg

27. Kateri delci bi lahko sestavljali antiatome? Kaj bi se zgodilo, če bi se antiatomi srečali z atomi navadne snovi?

28. Pri anihilaciji pozitrona in elektrona z zanemarljivima kinetičnima energijama nastaneta dva fotona rentgenske svetlobe, ki odletita v nasprotnih smereh. Kolikšna je njuna energija?

Odgovor: 0,51 MeV

29*. Maso piona π^0 lahko določijo pri reakciji



ki poteče pri zanemarljivi kinetični energiji piona π^- in protona. Tedaj je kinetična energija nevtrona $0,60 \text{ MeV}$. Določite maso piona π^0 upoštevaje, da se pri reakciji ohranjata energija in gibalna količina.

Odgovor: $133 \text{ MeV}/c^2$

30. Katere od spodnjih reakcij so mogoče glede na to, da se morajo pri njih ohraniti naboj, barionsko število in leptonski števili

- a) $\pi^- + p \rightarrow K^+ + \Sigma^-$,
- b) $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0 + \pi^0$,
- c) $\pi^+ + p \rightarrow \Sigma^0 + \pi^0$,
- č) $\pi^- + p \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$,
- d) $\pi^- + p \rightarrow p + K^0 + \pi^0$.

Odgovor: a), b) in č)

40. | SNOV V ZVEZDAH

V jasnih nočeh na nebu žari množica zvezd. Nekatere oblikujejo značilna *ozvezdja*, kot so Veliki in Mali medved, Kasiopeja, Orion. Prek neba se vleče pas, ki je gosteje posejan z zvezdami – *Rimska cesta*.

Vse zvezde, ki jih vidimo, pripadajo galaksiji Rimska cesta. Pas, posejan z zvezdami, je bližnja veja Rimske ceste, ki je vidna z Zemlje.

Dejavnost Opazujte nebo ob različnih urah in z vrtljivo zvezdno karto določite glavna ozvezdja. Kako se orientiramo na nebu?

V galaksiji Rimska cesta je okoli 200 milijard zvezd, ki so porazdeljene po spiralno potekajočih vejah. Premer galaksije je okoli 100 000 svetlobnih let. Razdalje med zvezdami so zelo velike. Razdalja med Soncem in najbližjo zvezdo Proximo Centauri je 4,22 svetlobnih let. V merilu, v katerem bi imelo Sonce velikost pomaranče, bi bila ta razdalja okoli 1500 km. Vse drugo bi bil prazen prostor. V vejah Rimske ceste so poleg zvezd zgoščeni plini in prah, ki v nekaterih smereh ovirajo pogled v oddaljena območja galaksije in izven nje. Proti središču galaksije se gostota medzvezdne snovi in zvezd zelo poveča.

Bližnja galaksija, ki jo edino vidimo s prostim očesom kot megličasto tvorbo v ozvezdju Andromede (slika 40.1), je oddaljena od Rimske ceste okoli 2 000 000 svetlobnih let. Skupaj z Rimsko cesto pripada



Slika 40.1 Galaksija M31 v ozvezdju Andromede

lokalni jati, v kateri je skupaj 12 galaksij. Večje in manjše jate galaksij so posejane po vsem vidnem vesolju. Poznamo tudi jato 2500 galaksij, ki je vidna v ozvezdju Device in je 60 milijonov svetlobnih let daleč. Še večja je jata 10 000 galaksij v ozvezdju Herkules, ki je 300 milijonov svetlobnih let daleč. Na slikah, posnetih s teleskopi, ki zbirajo svetlobo iz razdalje več kot 10 milijard svetlobnih let, je nebo na gosto posejano z galaksijami (slika 40.2).

RAZVRŠČANJE ZVEZD PO SIJU

Podatke o zvezdah lahko dobimo le prek svetlobe, ki jo sevajo. S teleskopi (slika 40.3) določamo gostoto svetlobnega toka, ki vpada z zvezde na Zemljo, in spekter svetlobe. Gostota svetlobnega toka je osnova za razvrščanje zvezd po *siju*, iz spektra pa določamo temperaturo in sestav. Mnogo pove tudi časovno spreminjanje svetlobnega toka ali spektra.

Razvrščanje zvezd po siju sega daleč v preteklost. Tedaj so opazovali s prostim očesom in razvrstili zvezde po vidnem vtisu. Najsvetlejšim zvezdam so pripisali sij ali *magnitudo* 1, komaj vidnim zvezdicam pa +6. Kasneje so skalo razširili na obe strani. Zvezda s sijem 0 (0^m) pošilja na Zemljo svetlobni tok z gostoto $j_0 = 2,52 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$. Gostota svetlobnega toka z zvezde s sijem +5 pa je 100-krat manjša. Na splošno velja: gostoti svetlobnih tokov z zvezd, ki se po siju razlikujeta za 5, se razlikujeta za faktor 100. Oba podatka povežemo v zvezo:

$$m = 2,5 \cdot \log_{10} \frac{j}{j_0}.$$

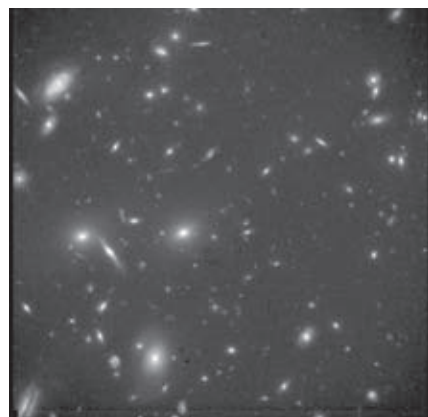
Po tej lestvici ima Sonce, ki pošilja na Zemljo svetlobni tok z gostoto $1,38 \text{ kW/m}^2$, negativni sij $-26,8^m$. Sirij, najsvetlejša zvezda na našem nebu, ima sij $-1,6^m$. Za primerjavo izračunamo, da je sij 1 km oddaljene žarnice, ki oddaja svetlobni tok 1 W, enak $-1,27^m$. S teleskopi lahko opazujemo zvezde s sijem do 28^m .

POVRŠINSKA TEMPERATURA ZVEZD

Spekter svetlobe zvezd je zvezen, kakor pri črnem telesu. Podobno kakor pri svetlobi s Sonca je v spektru veliko absorpcijskih črt.

Dejavnost Opazujte spekter svetlobe s Sonca in tako imenovane *Fraunhoferjeve črte*. Pri kateri valovni dolžini se zdi spekter najsvetlejši? Primerjajte valovne dolžine najizrazitejših črt s črtami iz spektra vodika in helija. Kako nastanejo absorpcijske črte?

Spomnimo se, da je po Planckovem zakonu spekter svetlobe, ki jo izseva črno telo, odvisen le od temperature. Prav tako je le od temperature odvisna gostota izsevanega svetlobnega toka – povezavo izraža Stefanov zakon. Spomnimo se še, da Wienov zakon valovno dolžino, pri kateri ima spekter maksimum, povezuje s temperaturo (str. 174).



Slika 40.2 Galaksije na razdalji 8 milijard svetlobnih let



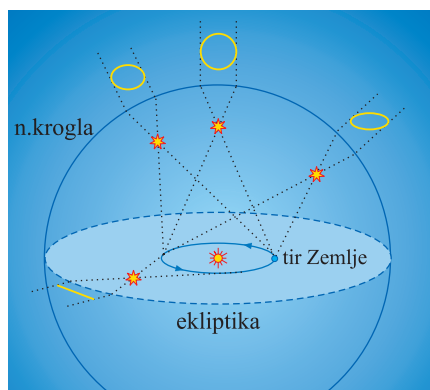
Slika 40.3 Astronomski daljnogled

Astronomi vse te zakone uporabljajo pri določevanju *površinske temperature zvezd*.

Tako iz podatkov za Sonce, ki ima pri površinski temperaturi 5800 K maksimum spektra pri 500 nm, po Wienovem zakonu sklepamo, da je pri Siriju, kjer je vrh spektra pri okoli 300 nm, površinska temperatura 9500 K. Natančnejše podatke o površinski temperaturi dobimo iz primerjave spektralnih črt v spektru.

Najbolj vroče zvezde imajo med 30 000 K in 80 000 K, najhladnejše pa od 3500 do 2000 K. Prve so na pogled modrikaste, druge pa rdečkaste. Med dobro vidnimi sta *Rigel* in *Betelgeza*, oba v ozvezdju *Orion* (slika 30.6 na str. 174).

IZSEV ZVEZD



Slika 40.4 Paralaksa zvezd

Sij o zvezdah ne pove veliko, saj so nekatere blizu, druge daleč. Če bi jih hoteli primerjati med seboj, bi morali poznati razdalje do njih.

Razdalje do bližnjih zvezd določamo s *paralakso*. Zaradi letnega gibanja Zemlje po tirnici okoli Sonca se lega zvezd na nebu nekoliko spreminja. Zvezde, ki so v smeri, pravokotni na ravnino tira, se na videz gibljejo po majhnem krožcu, tiste v ravnini tira po daljici, tiste vmes pa po elipsah (slika 40.4). Maksimalna kotna razlika med smermi opazovanja predstavlja hkrati zorni kot, pod katerim je z zvezde videti premer Zemljinega tira okoli Sonca. Kot paralakso navajamo polovični kot, se pravi zorni kot, pod katerim je videti *radij* Zemljinega tira. Razdalja do zvezde je obratno sorazmerna s paralakso. Zvezda, ki ima paralakso 1 kotna sekunda, je 3,26 svetlobnih let daleč. Razdaljo imenujemo tudi 1 *parsek*. Najmanjša merljiva paralaksa je tisočinka tega, torej lahko tako določimo razdalje do zvezd, ki so do 3000 svetlobnih let daleč. V tem območju je okoli 120 000 zvezd. Razdaljo do bolj oddaljenih zvezd določamo posredno.

Ko določimo razdaljo do zvezd, jih lahko razvrstimo po *izsevu*, to je po celotnem svetlobnem toku, ki ga oddajajo.

Izsev Sonca lahko izračunamo na podlagi gostote svetlobnega toka ob Zemljinem tiru in razdalje Sonca od Zemlje. Za prvo vemo, da je $1,38 \text{ kW/m}^2$, za drugo pa, da je povprečno 149,6 milijonov km. Sklepamo, da seva Sonce enakomerno v vse smeri, zato je izsev

$$P_S^* = 4 \pi R^2 j = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W} .$$

VELIKOST ZVEZD

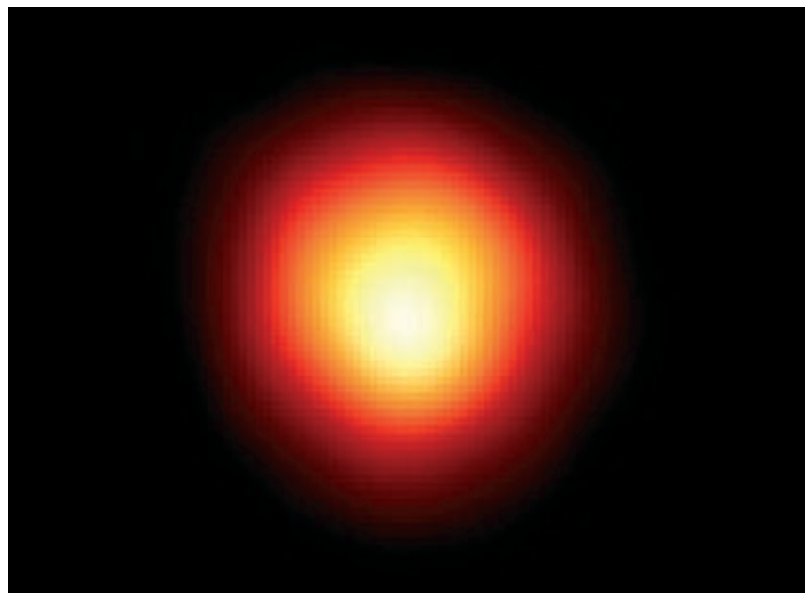
Zvezde se nam zdijo svetle točke brez razsežnosti, kar pomeni, da je zorni kot, pod katerim jih vidimo, veliko manjši od ločljivosti naših oči ali naprav. S Hubblovim vesoljskim teleskopom so neposredno določili le zorni kot Betelgeze v Orionu – meri 0,125 kotnih sekund.

? Primerjajte izsev Sonca in α Centauri A, za katero vemo, da je na razdalji 4,35 svetlobnih let in ima sij $0,1^m$. Kolikšen bi bil sij Sonca, ki bi ga določil opazovalec iz bližine te zvezde?

Pri najbližji zvezdi, Soncu, ni težav z opazovanjem. Vemo, da meri njegov zorni kot 1920 kotnih sekund. Ker je Sonce na povprečni razdalji 149,6 milijonov km, lahko izračunamo, da je njegov radij:

$$r = D \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) = 699\,000 \text{ km} \approx 700\,000 \text{ km}$$

Po izmerjenem zornem kotu je premer Betelgeze, ki je 520 svetlobnih let daleč, enak 1,5 milijard kilometrov, kar pomeni, da je 2000-krat večji od premera Sonca (slika 40.5).



Slika 40.5 Betelgeza, slikana z vesoljskim teleskopom Hubble

Velikosti zvezd lahko primerjamo med seboj, če poznamo njihov izsev in temperaturo. Po Stefanovem zakonu je izsev

$$P^* = 4 \pi r^2 \sigma T^4 ,$$

od koder dobimo radij:

$$r = \sqrt{\frac{P^*}{4 \pi \sigma T^4}} .$$

V tej enačbi namesto konstant pogosto vnesemo podatke za Sonce. Tako dobimo:

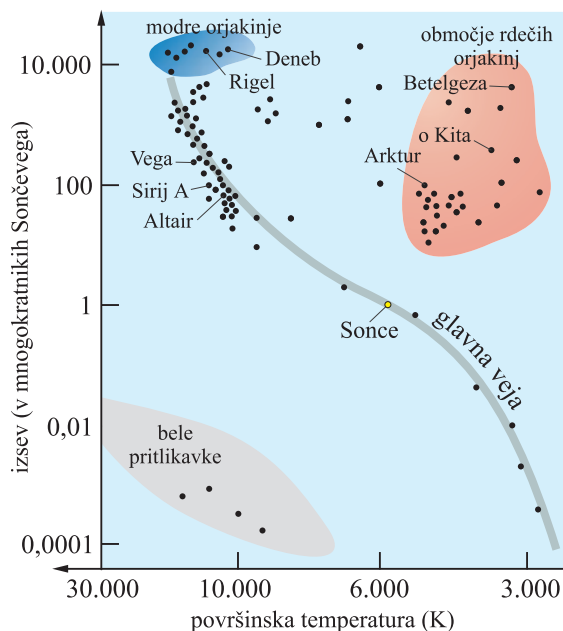
$$r = r_s \left(\frac{T_s}{T}\right)^2 \sqrt{\frac{P^*}{P_s^*}} .$$

Tako lahko ocenimo, da ima najsvetlejša zvezda na našem nebu, Sirij, ki ima izsev 24 izsevov Sonca in temperaturo 9500 K, radij okoli 1 300 000 km.

Niso pa vse zvezde tako velike. Sirij ima spremljevalno zvezdo, s katero se gibljeta okoli skupnega težišča. Ta ima le 0,0024 izseva Sonca in temperaturo 15 000 K. Njen radij potemtakem meri 5000 km, kar pomeni, da je manjša od Zemlje.

HERTZSPRUNG-RUSSELLOV DIAGRAM

Astronoma E. Hertzsprung in H. N. Russell sta primerjala izsev zvezd in njihovo površinsko temperaturo. Vse znane zvezde sta lahko razvrstila v diagram, ki ga kaže slika 40.6 in se imenuje po njima.



Slika 40.6 Hertzsprung-Russellov diagram

? Primerjajte še velikost zvezd v različnih delih diagrama (npr. Proxime Centauri) z velikostjo Sonca. Temperatura Sonca je 5800 K, temperatura Proxime Centauri pa 2700 K.

Z diagrama, v katerem je izsev zvezd podan glede na izsev Sonca in v odvisnosti od temperature, razberemo, da je večina zvezd nanizana v okolici tako imenovane *glavne veje*. Sonce je nekje na sredi glavne veje. Zunaj glavne veje so zvezde z izrazito velikim izsevom in nizko temperaturo (*rdeče orjakinje*) in zvezde z zelo majhnim izsevom in visoko temperaturo (*bele pritlikavke*). Betelgeza sodi med prve, Sirijska spremljevalka pa med druge.

MASA ZVEZD

Maso Sonca smo določili na podlagi podatkov o gibanju Zemlje (poglavje o gravitaciji v učbeniku Mehanika in toplota) po Newtonovem zakonu oziroma po Keplerjevih zakonih. Podatek za maso Sonca,

$$m_s = 2.10^{30} \text{ kg},$$

nam je lahko za osnovo pri presojanju mase drugih zvezd.

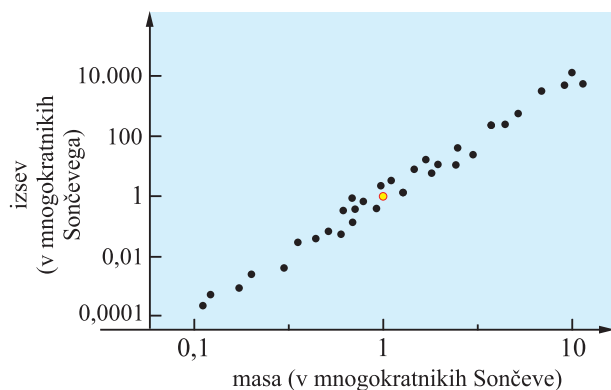
Tudi te določamo predvsem na osnovi Keplerjevega III. zakona. Pri tem nam pomaga dejstvo, da je skoraj 55 % zvezd v parih, kar pomeni, da se gibljejo okoli skupnega težišča. Pri takem gibanju je razmerje razdalj do skupnega težišča obratno razmerju mas, razmerje med kubom povprečne razdalje med zvezdama in kvadratom obhodnega časa pa je sorazmerna z vsoto mas. V primeru Sirijske in njegove spremljevalke je razmerje mas 2,2, vsota mas pa $3,2 m_s$. Od tod izračuna-

mo, da je masa Sirija $2,2 m_S$, masa njegove spremljevalke pa $1,0 m_S$. Zvezdica, ki je manjša od Zemlje, ima torej maso, ki je enaka masi Sonca.

Za zvezde v glavni veji je značilno, da imajo tiste z velikim izsevom tudi veliko maso, tiste z majhnim izsevom pa majhno maso. Značilna zveza med izsevom in maso je

$$\frac{P^*}{P_S^*} = \left(\frac{M}{M_S} \right)^{3,5},$$

ki jo lahko razberemo z grafa na sliki 40.7. Opazimo tudi, da ni zvezd, ki bi imele maso, večjo od nekaj 10 Sončevih mas, pa tudi ne takih, ki bi imele veliko manj kot desetino Sončeve mase.



Slika 40.7 Izsev zvezd v odvisnosti od mase

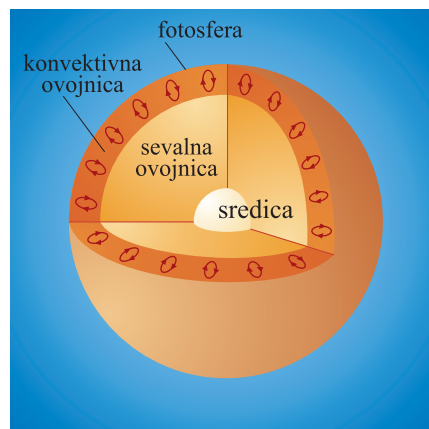
SONCE

Sonce je najbližja zvezda. Je plinska tvorba, ki jo sestavljata v glavnem vodik in helij.

Nekaj podrobnejših podatkov je v preglednici.

radij	$r = 6,96 \cdot 10^5 \text{ km}$
masa	$M = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
površinska temperatura	$T = 5770 \text{ K}$
izsev	$L_S = 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$
sestav	70 % H; 28 % He; 2 % drugi elementi

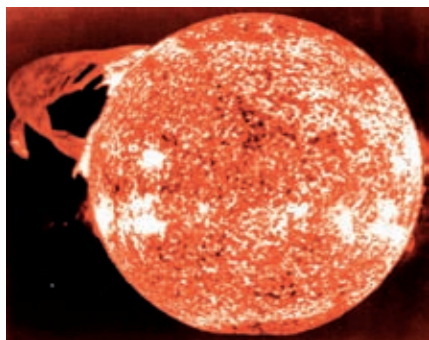
Opazujemo lahko le Sončevo površje. O stanju in dogajanju v notranjosti lahko sklepamo le ob pomoči modelov, ki jih oblikujemo na osnovi znanih fizikalnih zakonov. Slika 40.8 kaže presek zunanjih in notranjih plasti Sonca. Večina svetlobe s Sonca prihaja iz *fotosfere*, nekaj 100 km debele površinske plasti s povprečno temperaturo 5800 K. Pri opazovanju z majhno ločljivostjo izgleda fotosfera enakomerno svetla, le tu in tam opazimo pege, področja z nižjo temperaturo od okolice. Pri večji ločljivosti vidimo, da je površje zrnato. Središče zrna je svetlejšo, rob pa temnejši. To je posledica konvekcije. Na sredini celic izpod površja prodirajo vroči plini, ki se pogrezajo nazaj ob robovih, ko se ohladijo zaradi sevanja. Pege so posledica magnetnih pojavov.



Slika 40.8 Pogled v notranjost Sonca



Slika 40.9 Sončeva korona, posneta ob popolnem mrku avgusta 1999. Korona je poudarjena z elektronsko obdelavo slike.



Slika 40.10 Izbruh na Soncu

Slika 40.11 Sonce v rentgenski svetlobi

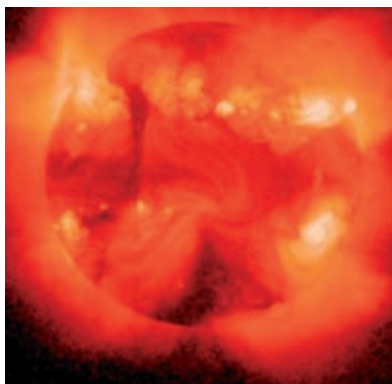
Slika 40.12 Polarni sij na Islandiji

Nad fotosfero je nekaj 1000 km debela *kromosfera*. Njene svetlobe običajno ne moremo opaziti, ob popolnem mrku pa se pokaže rdeča svetloba kromosfere tik ob robu Lune.

Iznad kromosfere se daleč v vesolje razteza Sončeva *korona*, ki jo lahko opazujemo le ob popolnih mrkih ali pa s posebnimi napravami – *koronografi* (slika 40.9).

Pod površjem je okoli 200 000 km debela *konvekcijska plast* s konvekcijskimi celicami v premeru nekaj 1000 km, v katerih se z gibanjem vročih plinov prenaša energija iz notranjosti na površje. Večino notranjosti predstavlja *sevalna plast*, skozi katero se s sevanjem prenaša energija iz *sredice* navzven. Premer sredice meri okoli 25 % premera Sonca.

Sonce, ki od daleč gledano mirno sije, je v resnici silno razburkano. O tem pričajo fotografije izbruhov in drugih dogajanj, povezanih z magnetnimi pojavi na Soncu (slika 40.10). Najburnejše pojave spremlja močno rentgensko sevanje (slika 40.11). Izsevana snov se kot *Sončev veter* širi v okoliški prostor. Ob velikih izbruhih se Sončev veter močno poveča in vpliva na magnetno polje na Zemlji. Takrat imamo tako imenovane *magnetne nevihte*, ki jih spremlja izrazit polarni sij (slika 40.12).



Dejavnost Na internetu lahko spremljate podatke o Sončevem vremenu, ki jih posreduje ameriška vesoljska agencija NASA.

Gostota Sončeve snovi na površju je komaj okoli 1 g/m^3 , z globino pa se povečuje. Povprečna gostota je $1,1 \text{ g/cm}^3$. Podrobnejši račun pokaže, da je gostota v sredici okoli 150 g/cm^3 , na robu jedra okoli 20 g/cm^3 , na robu sevalne plasti okoli 1 g/cm^3 . Pri tem je okoli 90 % Sončeve mase znotraj polovice polmera.

Z globino narašča tudi tlak, saj si lahko predstavljamo, da so notranje plasti vse bolj stisnjene pod težo zunanjih. Račun pokaže, da je težni tlak v središču okoli $3 \cdot 10^{11} \text{ bar}$. Vzdržuje ga termično gibanje delcev.

V središču Sonca so atomi ionizirani. Ker Sončevo snov sestavlja predvsem vodik, to pomeni, da imamo v notranjosti plin, ki ga sestavljajo prosti protoni in elektroni. Številiska gostota delcev je zato

dvakrat tolikšna, kot je gostota protonov. Povprečno številsko gostoto ocenimo na podlagi podatka za gostoto v sredici:

$$\bar{n} = \frac{2\bar{\rho}}{m_p} = 1,9 \cdot 10^{32} / \text{m}^3 .$$

Iz relacije med tlakom in temperaturo

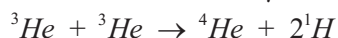
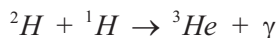
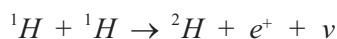
$$p = \bar{n} k T$$

dobimo podatek, da je v središču temperatura $1,4 \cdot 10^7$ K.

ENERGIJA SONCA

Sončev sistem je star okoli $4,6 \cdot 10^9$ let. Življenje na Zemlji je nastalo pred okoli 10^9 leti. Iz fosilnih ostankov je mogoče sklepati, da je izsev Sonca ves ta čas približno konstanten, torej okoli $3,8 \cdot 10^{26}$ W. Od nastanka do sedaj je torej Sonce izsevalo okoli 10^{43} J, ne da bi se kaj dosti spremenilo.

Sprva so mislili, da Sonce seva zaradi zmanjševanja potencialne energije, ko se zaradi teže krči. Zadovoljivo pojasnilo pa je dalo spoznanje, da potekajo v sredici Sonca jedrske reakcije zlivanja, pri katerih vodik prehaja v helij. V nizu reakcij:



se zlijejo 4 protoni v jedro helija, pri čemer se sprosti energija 26,2 MeV. Energijo iz jedra sproti odnašajo fotoni in nevtrini.

Z dobljenim podatkom, $6,3 \cdot 10^{14}$ J, izračunamo, da se porabi na Soncu $6,2 \cdot 10^{11}$ kg vodika na sekundo oziroma okoli $2 \cdot 10^{19}$ kg vodika na leto. Masa nastalega helija je za $1,3 \cdot 10^{17}$ kg manjša od tega. V preteklih 4,9 milijardah let je Sonce izgubilo okoli 10^{29} kg vodika, masa pa se mu je zmanjšala za $6,5 \cdot 10^{26}$ kg, kar je zanemarljivo v primerjavi s celotno maso. Jedrske reakcije tako pojasnjujejo dosedanje stalnost Sončevega izseva.

Fotoni, ki nastanejo v sredici Sonca, potrebujejo zaradi sipanja na elektronih skozi radiacijsko in konvekcijsko plast do površja okoli milijon let. Nevtrini preidejo Sonce hipoma brez izgub, saj vemo, da skoraj nimajo interakcije s snovjo. Po izračunih bi morale zadeti Zemljo okoli $3 \cdot 10^{14}$ nevtrinov na kvadratni meter na sekundo. Eksperimenti, pri katerih so merili le tok elektronskih nevtrinov, so dajali precej nižje podatke. Šele pred kratkim so potrdili pravilnost domneve. Hkrati so ugotovili, da se lahko elektronski nevtrini spreminjajo v mionske in tauonske.

 Izračunajte, kolikšna energija se sprosti, če se 1 kg vodika zlije v helij!

Celotno zalogo vodika bi Sonce porabilo šele v okoli 100 milijardah let. Vendar je življenje zvezd veliko krajše, konča se že, ko porabijo komaj 1/10 svojega goriva.

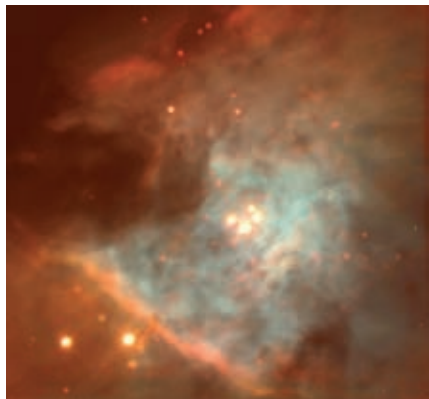
Jedrske reakcije se dogajajo v sredici, kjer je temperatura dovolj visoka, da lahko del protonov ob trkih pride v območje jedrskih sil, se pravi v območje velikosti protonov samih. Električna odbojna sila med protonoma večjemu delu protonov preprečuje take bližnje trke.

Delež protonov z dovolj veliko kinetično energijo zelo hitro narašča z višanjem temperature. Pri temperaturi, ki bi bila dvakrat tolikšna, kot je v središču Sonca, bi bila hitrost zlivanja okoli 30 000-krat večja.

Ker se snov v notranjosti Sonca nič ne meša, se množina vodika v področju, kjer poteka zlivanje, počasi zmanjšuje, narašča pa množina helija. V območju okoli središča, kjer potekajo jedrske reakcije, je delež vodika le še 35 %, medtem ko je v povprečju 70 %. Sklepamo lahko, da se je v sredici Sonca doslej porabila okoli polovica razpoložljivega vodika.

? Kolikšno kinetično energijo morata imeti protona, da se ob centralnem trku približata na razdaljo $2 \cdot 10^{-15}$ m?

RAZVOJ ZVEZD

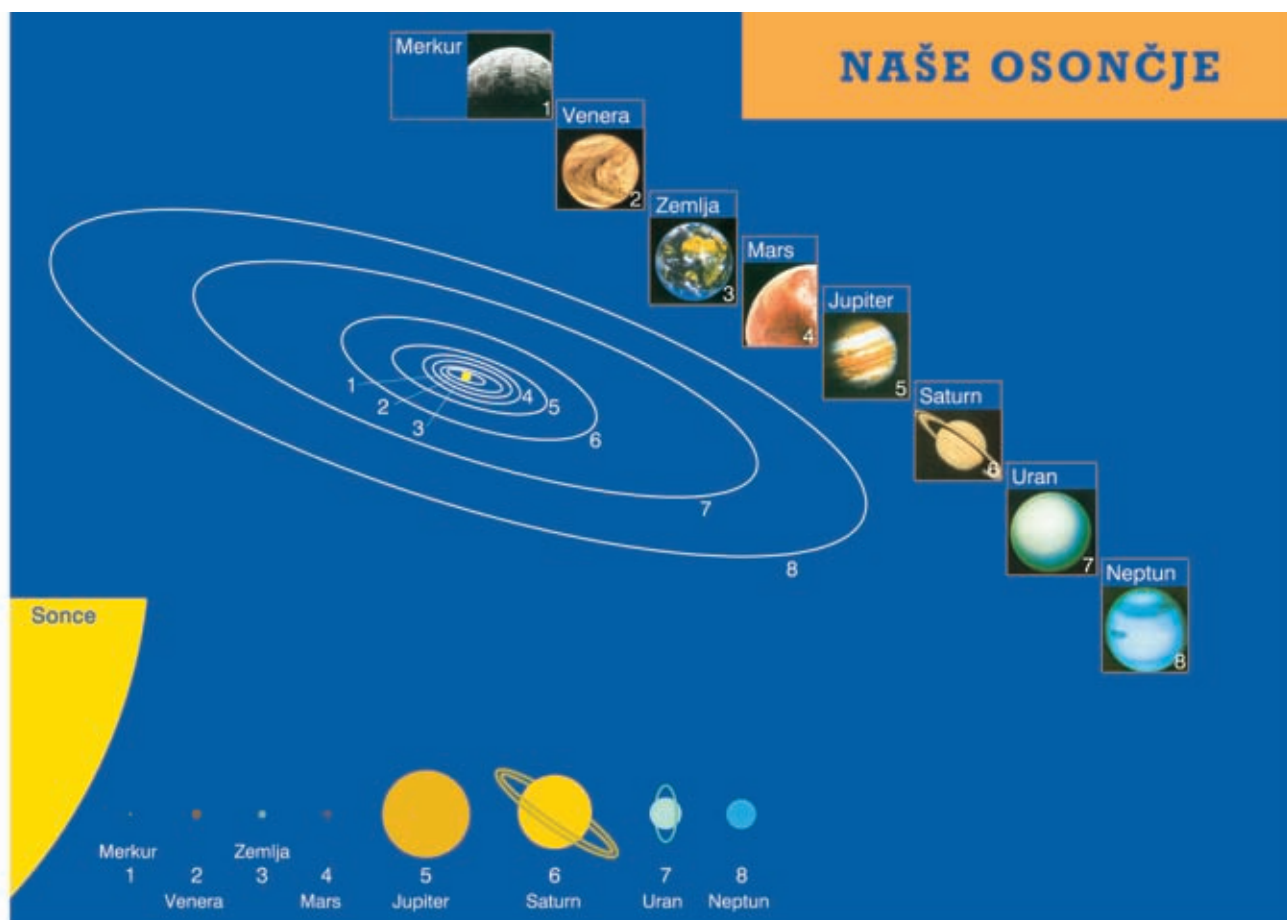


Slika 40.13 Orionova meglenica z mladimi zvezdami

Sprejeta je domneva, da so zvezde nastale z zgoščanjem plinskih oblakov v vesolju. Astronomi tudi sedaj opazujejo nastajanje zvezd. Slika 40.13 kaže plinski oblak v Orionovi meglenici, ki ga osvetljuje svetloba zelo vročih mladih zvezd, ki nastajajo v njegovi notranjosti.

Po kemijskem sestavu ločimo v naši galaksiji dve populaciji zvezd. Zvezde II. populacije sestavljata skoraj izključno vodik in helij, delež preostalih lahkih elementov je majhen; zvezde I. populacije pa sestavljajo tudi drugi elementi. Zvezde II. populacije štejemo med stare, nastale so iz prvotne vesoljske snovi, ki sta jo sestavljala vodik in helij. Zvezde I. populacije, med katere štejemo tudi Sonce, so nastale iz snovi, ki so se razširile v vesolje ob eksplozijah zvezd II. populacije. Zato so v njih tudi elementi, ki so nastali ob jedrskih reakcijah pri zlivanju v sredicah zvezd in ob eksplozijah. Eno od pomembnih spoznanj astrofizike in jedrske fizike je, da so vsi elementi z atomskimi števili, večjimi od 6, nastali ob jedrskih reakcijah v zvezdah.

Predstavljamo si, da se začne plinski oblak zgoščati zaradi težnosti. Pri tem se plin segreva, ker se potencialna gravitacijska energija spreminja v kinetično energijo, ta pa se ob trkih prenese na termično gibanje. Zato se povečuje izsev. V celoti se pri tem izseva polovico začetne potencialne energije. Snov se zgošča še naprej, dokler temperatura v sredici zvezde ne doseže vrednosti, pri kateri se začne zlivanje vodika v helij. Doseženo je stacionarno stanje, v katerem energija, ki se sprošča pri zlivanju, v celoti pokriva izgubo zaradi sevanja. V tem ravnovesju zvezda ostane, dokler v sredici ne zmanjka vodika. Preostanek oblaka se lahko zgosti v planete. Tako je nastalo tudi Sonce in z njim planetni sistem, katerega del je Zemlja (slika 40.14).



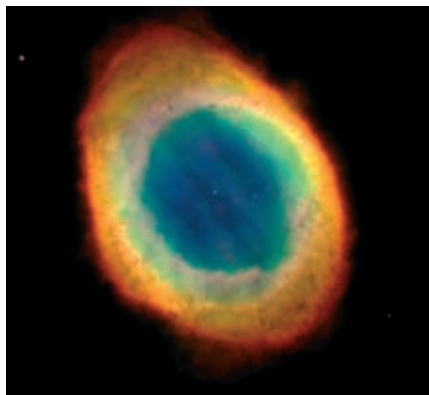
Sonce je v stacionarnem stanju že okoli $4,5 \cdot 10^9$ let in je pri tem pokurilo okoli polovico vodika v sredici. V skladu s tem naj bi stacionarno stanje trajalo še okoli $4 \cdot 10^9$ let. V tem času naj bi se v sredici porabil ves vodik in ustvarilo naj bi se helijevo jedro.

Slika 40.14 Sončev sistem

Po prenehanju jedrskih reakcij se začne jedro stiskati, pri čemer zaradi sproščene potencialne energije narašča temperatura. Vroče jedro segreva bližnje vodikove plasti, kar povzroči ponovno zlivanje vodika. Ker je temperatura višja kot prej, je zlivanje živahnije. Zaradi tega se poveča tok sevanja proti površju, kar povzroči, da se zvezda napihne, ne da bi se povečal izsev. Sproščena energija se porablja za povečanje potencialne energije zvezde. Pri Soncu je pričakovati, da bo trajalo to obdobje okoli 10^9 let. Radij se lahko poveča na trikratno sedanjost, površinska temperatura pa zmanjša na 3000 do 4000 K.

Zgoščanje helijevega jedra se nadaljuje še naprej, kar povzroča nadaljnje višanje temperature in vse živahnije zlivanje vodika ob površju jedra. Napihovanje zunanjih plasti je vse hitrejše, povečuje pa se tudi izsev, ker povečevanje potencialne energije samo ne more več uravnovešati povečanega sproščanja energije pri zlivanju vodika. V tej fazi, ki naj bi trajala okoli $100 \cdot 10^6$ let, naj bi se Sonce napihnilo do okoli 100-kratnega sedanjega premera, izsev pa naj bi narasel na 1000-kratno sedanjost vrednost.

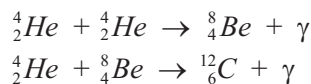
? Koliko energije se sprosti pri reakcijah?



Slika 40.15 Planetarna meglenica M 57 v ozvezdju Lira

Sonce naj bi tako postalo rdeča velikanka s površinsko temperaturo okoli 3000 K. Helijevo jedro naj bi imelo premer okoli 30 000 km in gostoto okoli 60 kg/cm³. Jedro naj bi obdajala okoli 1000 km debela plast gorečega vodika. Preostalo je zelo razredčen vodik, po katerem se sevanje prenaša na površje.

Jedro se zaradi teže krči in segreva naprej. Pri temperaturi 10.10⁷ K se začne niz reakcij, ki privede do zlivanja helija v ogljik:

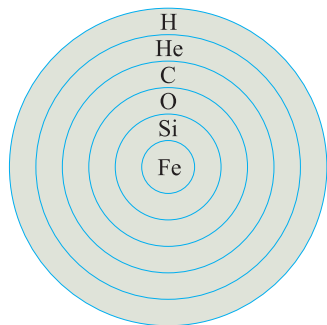


V nadaljnjem razvoju se zaradi njih oblikuje ogljikova sredica z gostoto med 10⁹ in 10¹⁰ kg/m³ in temperaturo nekaj 10 milijard K. Ob njej je plast, v kateri poteka zlivanje helija. Sevanje vse bolj napihuje zvezdo, dokler se zunanje plasti ne ohladijo do temperature, pri kateri se lahko tvorijo nevtralni atomi – se pravi, da se elektroni in protoni združijo v atome vodika, elektroni in helijeve jedra v helijeve atome in podobno pri drugih elementih. Fotoni, ki jih pri tem oddajo atomi, povzročijo, da se zunanje plasti zvezde razpršijo po prostoru. Ostane megličasta tvorba z drobno vročo zvezdico – *belo pritlikavko* v središču (slika 40.15).

Bela pritlikavka – preostanek prejšnje zvezdne sredice – ima radij okoli 15 000 km, površinsko temperaturo pa okoli 20 000 K. Ker nima več svojega energijskega vira, se počasi ohladi in preneha svetiti. Snov v beli pritlikavki sestavljajo predvsem jedra ogljika in prosti elektroni. Številna gostota prostih elektronov je dvanajstkrat večja od številske gostote ogljikovih jeder in je tolikšna, da elektroni drug drugega motijo. Stanje elektronskega plina določa izključitveno načelo, ki smo ga spoznali pri zgradbi atomov – se pravi, da sta lahko v vsej zvezdi le po dva elektrona v enakem stanju.

Razvoj od rdeče velikanke do bele pritlikavke traja le okoli milijon let. Doleti zvezde z maso med 0,4 in 3 masami Sonca.

Pri zvezdah z večjo maso gre razvoj naprej. V notranjosti se lahko z zlivanjem oblikuje jedro iz vse težjih elementov do železa. Za železo vemo, da ima največjo vezavno energijo na nukleon, zato z zlivanjem jeder železa ne pride do sproščanja energije, ampak do porabe. Niz jedrskih reakcij, pri katerih z zlivanjem nastajajo vse težja jedra, se zato ustavi. Tedaj ima zvezda zgradbo, ki jo kaže slika 40.16. V nadaljnjem razvoju se železno jedro povečuje zaradi zlivanja na robu in se stiska naprej. Če je masa zvezde dovolj velika, lahko naraste tlak do tolikšne vrednosti, da elektroni prodrejo v protone in se z njimi združijo v nevtrone. Pri tem se v hipu sprosti toliko sevanja, da razprši zunanje dele zvezde daleč v vesolje. Tedaj lahko opazujemo tako imenovano *supernovo* – zvezdo, ki za hip zasije z izsevom milijon Sonc ali več in v kratkem času zamre. Na njenem mestu lahko opazujemo megličasto tvorbo, ki ima v središču drobno, zelo vročo *nevtronsko zvezdo*. Njen premer je nekaj 1000 km, njena masa pa približno enaka masi Sonca. Sestavljajo jo predvsem nevtroni z go-



Slika 40.16 Zgradba zvezde z maso 8 m_s ob koncu razvoja

stoto, ki je večja od gostote atomskih jeder. Zanj sta značilni hitro vrtenje in veliko magnetno polje. Zvezda oddaja curek polarizirane svetlobe, ki se vrti hkrati z njo. Curek se širi po vesolju podobno kot curek svetlobe iz svetilnika z vrtečo se lučjo. Če tak curek oplazi tudi Zemljo, lahko opazimo kratke bliske, kakor z ladje na morju opazujejo bliske svetilnika. Zato te zvezde imenujemo tudi *pulzarji*. Značilen predstavnik je pulzar v Rakovici, ki je preostanek eksplozije supernove, ki so jo opazovali kitajski astronomi leta 1054 (slika 40.17).

Če je začetna masa zvezde 20 mas Sonca ali več, se sesedanje železnega jedra ne konča, zaradi velike teže se jedro sesede v tako imenovano *črno luknjo*, ki jo lahko zaznamo le po gravitaciji. Zanj je značilno, da je na njenem robu, tako imenovanem *horizontu*, težnost tolikšna, da je ubežna hitrost enaka svetlobni hitrosti. Opazovanja kažejo, da so črne luknje v središčih galaksij. V središču Rimske ceste je verjetno črna luknja z maso okoli 4 milijonov Sonc.

Hertzsprung-Russellov diagram kaže zvezde v različnih fazah razvoja. Največ zvezd je na glavni veji, kjer se zadržujejo najdlje. Tam so tiste, v katerih poteka zlivanje vodika v helij. Z glavne veje se zvezde preselijo med rdeče velikanke, to je zvezde v prehodnem obdobju. Nato v veliki večini končajo kot bele pritlikavke, to je kot vroča jedra, ki nimajo jedrskega goriva in se le še ohlajajo s sevanjem.



Slika 40.17 Rakova meglenica s pulzarjem v sredini

? Kolikšen je radij horizonta pri črni luknji, ki ima trikrat tolikšno maso kot Sonce?

41. | SNOV V VESOLJU

Močni teleskopi omogočajo opazovanje vesoljskega prostora do več kot 10 milijard svetlobnih let daleč. V vsem tem prostoru je razpršenih nekaj milijard galaksij, ki se združujejo v jate, med katerimi so obsežna prazna območja. V velikostnem območju 100 Mpc, to je nekaj milijonov svetlobnih let, pa je vesolje homogeno, se pravi, da je povprečna gostota snovi znotraj takega prostora povsod po vesolju enaka. Tudi smerne odvisnosti ni opaziti, kar pomeni, da je vesolje v vseh smereh enako, pa tudi neodvisno od tega, s katerega mesta bi ga opazovali. Čeprav sežejo opazovanja le do končne razdalje, moramo predpostavljati, da je vesolje brez roba. Nobenega razloga tudi ni, da ne bi verjeli, da po vsem vesolju veljajo enaki naravni zakoni.

Merjenja kažejo, da se oddaljeni deli vesolja oddaljujejo od nas s hitrostjo, ki je sorazmerna z razdaljo. Tako je, kakor da bi sedeli na rozini v testu, ki vzhaja. Ko se napihuje testo, se vse rozine oddaljujejo druga od druge.

Podatke o oddaljevanju delov vesolja dobimo iz opazovanja spektra svetlobe z oddaljenih galaksij. Spektralne črte znanih elementov kažejo tako imenovani *rdeči premik*, to je premik proti daljšim valovnim dolžinam. Frekvenca svetlobe je znižana zaradi Dopplerjevega pojava, ki ga dobro poznamo pri zvoku. Spomnimo se, da je relativna sprememba frekvence sorazmerna s hitrostjo. Enako velja tudi za valovno dolžino:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{v}{c} .$$

Hitrost oddaljevanja podamo z relacijo

$$v = Hd ,$$

kjer je H *Hubbleova konstanta*:

$$H = 65 \text{ km}/(\text{s.Mpc}) = 19 \text{ km}/(\text{s} \cdot 10^6 \text{ svetlobnih let}) .$$

S tem izračunamo, da se rob vidnega vesolja oddaljuje od nas s hitrostjo okoli 200 000 km/s, kar je blizu svetlobni hitrosti.

Izmerili so tudi, da je v vsem vesolju skoraj izotropno *mikrovalovno sevanje*. Natančno so izmerili spekter sevanja in ugotovili, da se sklada s spektrom črnega telesa pri temperaturi 2,735 K.

Med podatki, ki so pomembni za razumevanje dogajanja v vesolju, je tudi sestav snovi. Lahko ga razberemo iz spektra zvezd. Medtem ko je v zvezdah I. populacije, kakršno je Sonce, poleg vodika in helija še okoli 3 % težjih elementov, je v zvezdah II. populacije delež elementov, težjih od helija, neznamen. Sklepamo, da je morala snov, iz katere so nastale zvezde II. populacije, vsebovati 75 % vodika in 25 % helija z neznatnimi primesmi litija in berilija.

NASTANEK VESOLJA IN NJEGOV RAZVOJ

Razpenjanje vesolja nas navede na sklep, da je moralo biti nekoč gostejše in drugačno kot danes. Galaksije, ki so danes daleč narazen, so se morale nekoč stikati. Če je bilo razpenjanje vedno enako hitro, lahko izračunamo čas, ki je pretekel, da so galaksije dosegle sedanjo oddaljenost. Hitro vidimo, da je ta čas neodvisen od trenutne razdalje

$$t = \frac{d}{v} = \frac{1}{H} = \frac{10^6 \text{ sv. l.}}{19 \text{ km/s}} = 15 \cdot 10^9 \text{ let} .$$

To imamo lahko za grobo oceno *starosti vesolja*. Zaradi negotovosti Hubblove konstante je lahko ta čas med 10 in 20 milijardami let. Verjetno je najbolj upravičena vmesna vrednost, saj je bilo razpenjanje na začetku hitreje, kakor se kaže sedaj.

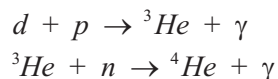
Fizikalni zakoni, kakršne poznamo, so bili osnova za postavitev *standardnega modela* razvoja vesolja. Po tem modelu se je vesolje rodilo v *velikem puku* pred okoli 15 milijardami let. Tedaj se je začelo širiti z začetnega stanja z nepredstavlljivo veliko gostoto in temperaturo.

Razvoj vesolja je mogoče zasledovati od 10^{-43} s po velikem puku naprej. Vesolje naj bi imelo tedaj gostoto 10^{94} g/cm^3 in bilo napolnjeno s sevanjem s temperaturo okoli 10^{33} K in delci z energijo okoli 10^{20} GeV . Ta gosta juha fotonov in drugih delcev naj bi se do časa 10^{-35} s ohladila na temperaturo okoli 10^{27} K s tipično energijo delcev okoli 10^{14} GeV . Vesolje v tej fazi sestavlja mešanica fotonov, leptonov in prostih kvarkov, ki se začenjajo združevati v hadrone. Predstavljamo si, da sestavljajo mešanico fotonov, delci in antidelci, ki neprestano nastajajo in izginevajo. Interakcija med njimi je neodvisna od njihove vrste.

Do okoli 10^{-4} s naj bi se vesolje ohladilo na 10^{13} K s tipično energijo delcev 1000 MeV , kar predstavlja lastno energijo protona oziroma nevtrona. Od tedaj naprej protoni in antiprotoni ne morejo več nastajati ob trkih delcev ali ob trkih fotonov. Protoni in antiprotoni oziroma drugi hadroni in njihovi antidelci so se skoraj v celoti anihilirali v fotone. Zaradi majhne asimetrije pri nastajanju je po anihilaciji ostal presežek protonov in nevtronov, približno po en delec na prvotnih 10^9 . Vesolje so napolnjevali večinoma fotoni in leptoni, ki so lahko nastajali in izginevali še naprej, gostota protonov in nevtronov je bila 10^9 -krat manjša.

V naslednjih 4 s se je vesolje ohladilo na temperaturo okoli $6 \cdot 10^9$ K s tipično energijo delcev 0,5 MeV, to je mirovno energijo elektrona in pozitrona. Od tedaj naprej ni bilo več mogoče nastajanje parov elektronov in pozitronov ob trkih fotonov. Ravnovesje med nastajanjem in izginenjem se je porušilo in elektroni so skoraj v celoti izginili, preostal je le majhen presežek elektronov – en delec na 10^9 . Spet se je povečala gostota fotonov. Od tedaj je vesolje napolnjevalo večinoma sevanje. Gostota fotonov je za faktor 10^9 presegala gostoto elektronov, protonov in nevtronov.

Do 2 minut po začetku se je vesolje ohladilo na okoli $1 \cdot 10^9$ K s tipično energijo delcev 0,1 MeV. To je omogočilo, da so ob trkih nevtronov in protonov začeli nastajati tudi devteroni. Vendar je bila gostota devteronov komaj stotino gostote protonov in nevtronov, ko se je malo pozneje, ob starosti 3 min, v nizu reakcij začelo nastajanje helija:



Nadaljnje reakcije med protoni ali nevtroni in jedri helija ne dajejo stabilnih jeder. Samo z reakcijami med helijevimi jedri in devteroni so lahko nastajala litijeva jedra, prav tako so lahko nastajala berilijeva jedra pri reakcijah med litijevimi jedri in devteroni. Zaradi hitrega ohlajanja in zmanjševanja gostote pa je postajalo nadaljnje zlivanje jeder malo verjetno. Ocenili so, da se je zlivanje jeder končalo približno pol ure po začetku vesolja. V nadaljnjem razvoju so nevtroni radioaktivno razpadli na elektrone in protone. Izračunali so, da je snov po tem sestavljala 75 % protonov, 25 % helijevih jeder ter sledi jeder litija in berilija. To je ravno sestava v snovi zvezd II. populacije.

V vesolju je prevladovalo sevanje, zaradi sipanja svetlobe na elektronih je bilo neprosojno. Naslednja pomembna faza v razvoju je nastopila približno milijon let po začetku, ko se je vesolje ohladilo na okoli 3000 K. Karakteristična energija pri tej temperaturi je pod eV, zato se je lahko začelo združevanje elektronov in jeder v atome. Atomi ne sipajo svetlobe tako učinkovito kot elektroni, zato je vesolje postalo prozorno, sevanje se je lahko razširilo in vesolje se je ohlajalo naprej. Hkrati se je začelo združevanje prej enakomerno razpršene snovi v galaksije in zvezde, kar je privedlo do sedanjega stanja.

Nadaljnji razvoj vesolja je odvisen od gravitacije in zato posredno od povprečne gostote snovi. Gravitacija zavira širjenje, pri dovolj veliki gostoti snovi pa ga lahko zaustavi in povzroči ponovno zgoščanje. Ocenili so, da je kritična gostota snovi, pri kateri gravitacija ustavi širjenje, okoli 10^{-27} kg/m³, kar pomeni v povprečju po en proton na kubični meter. Vidna snov daje povprečno gostoto, ki je le manjši del kritične gostote. Sklepajo pa, da je v vesolju tudi veliko nevidne snovi, ki jo je mogoče odkriti le po njeni težnosti. Ocenjujejo, da bi tako utegnili povprečna gostota doseči kritično, vendar so domneve zelo negotove, zlasti ker najnovejša opazovanja kažejo, da se širjenje pospešuje.

V primeru, da je povprečna gostota snovi v vesolju kritična ali manjša od kritične, se bo vesolje širilo v nedogled in na koncu umrlo, ko bo zmanjkalo jedrskega goriva. V primeru, da povprečna gostota snovi presega kritično, se bo širjenje ustavilo. V naslednjem obdobju se bo vesolje zgoščalo in prešlo vse prejšnje faze v obrnjenem vrstnem redu. Po mnenju nekaterih bi lahko temu sledilo novo razpenjanje, po mnenju drugih pa bi vesolje izginilo.

Slika razvoja vesolja dobro pojasnjuje sedanje stanje. Podrobnejše opazovanje in teoretične raziskave bodo sliko gotovo še izboljšali.