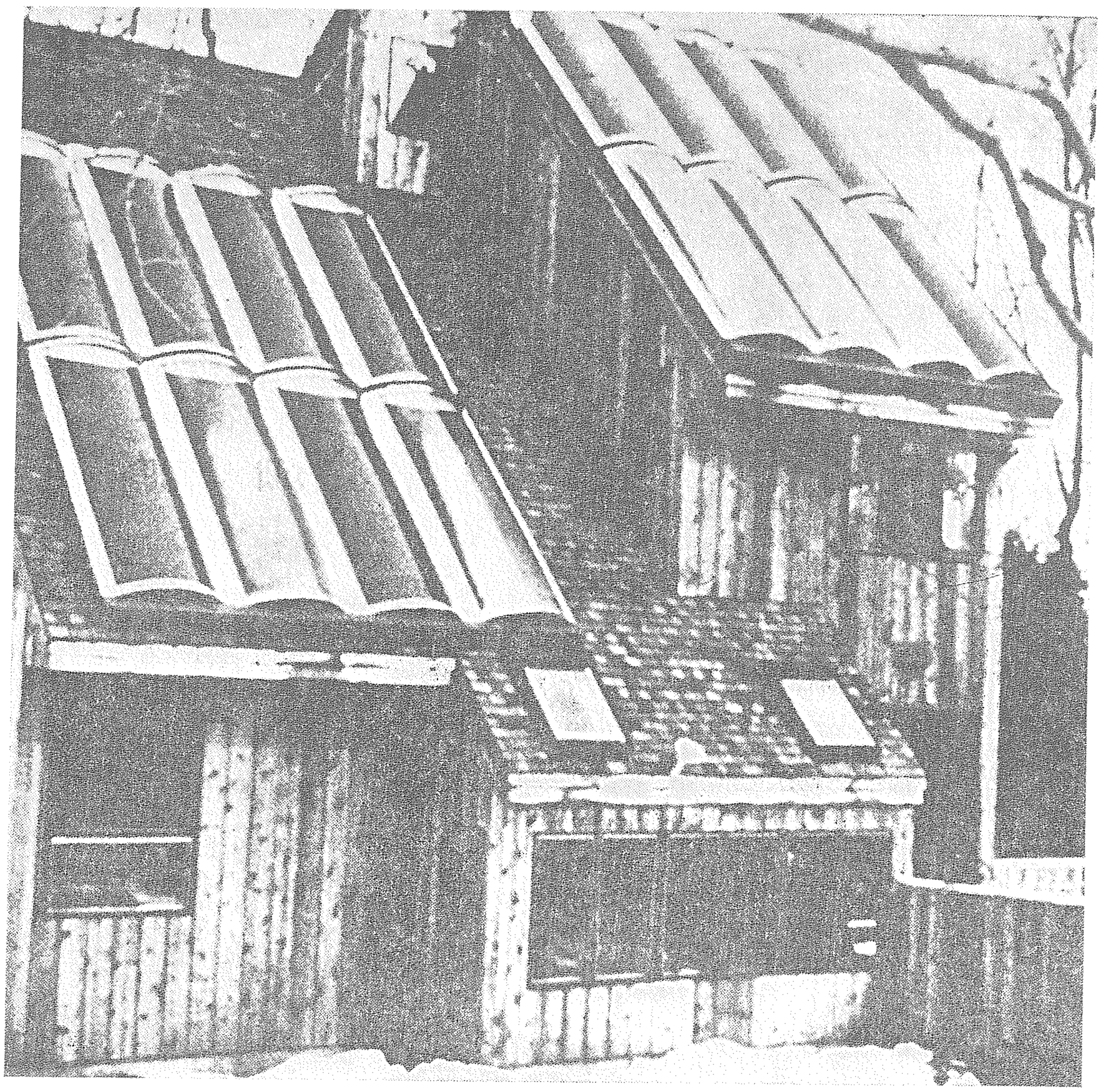
IZDAJA DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SR SLOVENIJE

OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO



1978
Letnik 25
6

LETNIK 25. — ŠTEVILKA 6

OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

LJUBLJANA, NOVEMBER 1978

Glavni in odgovorni urednik: Janez Strnad.

Uredniški odbor: France Avsec, gimnazija Kranj; Robert Blinc, FNT; Alojz Kodre, FNT; France Kvaternik, tehniška šola za lesarstvo, Ljubljana; Peter Legiša, FNT; Jože Lep, VTŠ, Maribor; Anton Moljk, FNT; Mitja Rosina, FNT; Tomaž Skulj, Iskra, Ljubljana; Janez Strnad (urednik za fiziko), FNT; Anton Suhadolc (urednik za matematiko), FNT; Ciril Velkovrh (urednik) FNT; Ivan Vidav, FNT; Slike je narisal Marjan Turk.

Naročnina: za posameznike 170.— din (za člane društva je že vračunana članarina), za dijake in študente 80.— din, za ustanove in podjetja 215.— din, za tujino 15 $ = 270.— din, posamezna številka 30.— din, dvojna številka 60.— din.

Dopise pošiljajte in list naročajte na naslov: **Komisija za tisk DMFA SRS,** 61001 Ljubljana, Jadranska c. 19, p. p. 227, tel. št. 265-061/53 žiro račun 50101-678-48363, devizni račun pri Ljubljanski banki 32009-007-10022/6.

Tiska tiskarna Ljudske pravice v Ljubljani, Kopitarjeva ul. 2. Naklada 1500 izvodov.

Izdajo revije sofinancirata Izobraževalna skupnost Slovenije in Raziskovalna skupnost Slovenije.

YU ISSN 0473-7466

CONTENTS

Energy and matter (Rudi Kladnik) 193
Man and energy (Rudi Kladnik) 199
Energetics of some atmospheric processes (Zdravko Petkovšek) 203
Energy and weather phenomena (Zdravko Petkovšek) 207
Planets of the Solar system (Andrej Čadež) 210
The Sun (Andrej Čadež) 214
Light and lasers (Drago Šulek) 218
Copernicus' heliocentric system (Mitja Kregar) 224
Newton's gravitational law (Mitja Kregar) 228
The development of the atomic theory up to 20th century (Mitja Kregar) . . . 231
The development of special relativity (Janez Strnad) 234
The development of quantum mechanics (Janez Strnad) 237
Atomic models (Norma Mankoč-Borštnik) 241
Radar (Norma Mankoč-Borštnik) 245
Radiation and radioisotopes in medicine (Marjan Hribar) 249
Radioactive isotopes in industry (Marjan Hribar) 253
Spectral analysis and contemporary spectroscopies (Jože Pahor) 256
Systems, feedback, regulation, automatic regulation (Jože Pahor) 259
Semiconductors (Peter Gosar) 264
The limits of observation with microscope (Franc Cvelbar) 267
Development of experimental facilities and measuring instruments (Franc Cvelbar) 270
Great research institutes and international research activity (Gabrijel Kernel) 273
Perception of sound (Janez Žitnik) 277
Power output of man (Mirko Cvahte) 281
The eye and colours (Jelka Lekić) 283
ECG (Zlatko Bradač) 285
The eye (Fedor Tomažič) 288
Didactical games in physics teaching (Janez Ferbar) 292
Physics and society (Anton Moljk) 298
Fizika za družboslovce (Aleksander Kregar) 304
Abstracts 305

Na ovitku: Hiša, v kateri izkoriščajo sončno energijo. Take in podobne zgradbe gradijo v vse večjem številu v ZDA in tudi drugod po svetu, da bi raziskali možnost za izkoriščanje sončne energije v gospodinjstvih in v večjih razmerah. Optimisti se nadejajo, da bo mogoče v prihodnosti tako kriti do ene četrtine energijskih potreb. Za zdaj je najpomembneje, da se je začel spreminjati pogled na porabo energije in na okolje. Sončna energija ima namreč še to prednost, da je »čista«. Nov pogled na energijo je med spoznanji, ki naj bi jih posredovala poglavja iz naravoslovja.

FIZIKA ZA DRUŽBOSLOVCE

VSEBINA

	Str.
Energija in snov (Rudi Kladnik)	193
Človek in energija (Rudi Kladnik)	199
Dogajanja v atmosferi z vidika energije (Zdravko Petkovšek)	203
Energija in vremenski pojavi (Zdravko Petkovšek)	207
Planeti našega Osončja (Andrej Čadež)	210
Sonce (Andrej Čadež)	214
Svetloba in laserji (Drago Šulek)	218
Kopernikov heliocentrični sistem (Mitja Kregar)	224
Newtonov gravitacijski zakon (Mitja Kregar)	228
Razvoj atomske teorije do 20. stoletja (Mitja Kregar)	231
Razvoj posebne teorije relativnosti (Janez Strnad)	234
Razvoj kvantne mehanike (Janez Strnad)	237
Atomski modeli (Norma Mankoč Borštnik)	241
Radar (Norma Mankoč Borštnik)	245
Uporaba sevanja in radioaktivnih izotopov v medicini (Marjan Hribar)	249
Uporaba radioaktivnih izotopov v tehniki (Marjan Hribar)	253
Spektralna analiza in današnje spektroskopije (Jože Pahor)	256
Sistemi, povratne zveze, reguliranje količin, avtomatizacija (Jože Pahor)	259
Polprevodniki (Peter Gosar)	264
Kaj lahko še vidimo z mikroskopom? (Franc Cvelbar)	267
Razvoj eksperimentalne opreme in merilnih instrumentov (Franc Cvelbar)	270
Veliki raziskovalni inštituti in mednarodna raziskovalna prizadevanja (Gabrijel Kernel)	273
Zaznavanje zvoka (Janez Žitnik)	277
Moč človeka (Mirko Cvahte)	281
Oko in barve (Jelka Lekič)	283
EKG (Žlatko Bradač)	285
Oko (Fedor Tomažič)	288
Didaktične igre pri pouku fizike (Janez Ferbar)	292
Fizika in družba (Anton Moljk)	298
Fizika za družboslovce (Aleksander Kergar)	304
Povzetki	305

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

ENERGIJA IN SNOV

RUDI KLADNIK

Energija je prav gotovo najpomembnejša količina v fiziki. Povezuje različne fizikalne pojave v celoto; zanjo velja ohranitveni zakon: energije ni mogoče ustvariti iz nič, niti je ni mogoče uničiti, lahko jo le pretvarjamo iz ene oblike v drugo obliko. Vsako dogajanje na našem planetu in v celotnem vesolju je tako ali drugače povezano z energijo. Skorajda si ne moremo zamisliti pojava, ki ga ne bi bilo mogoče obravnavati kot prelivanje energije ene vrste v energijo druge vrste.

V šoli vpeljemo energijo kot zmožnost telesa, da opravlja delo. Pravimo, da ima telo tem več energije, čim več dela lahko opravi.Najprej spoznamo kinetično energijo, to je energijo zaradi gibanja telesa. Z upočasnitvijo se kinetična energija telesa zmanjša za toliko, kolikor dela telo odda, premagujoč zaviralno silo, ki gibanje telesa upočasnjuje. Zaviralna sila z negativnim delom zmanjšuje kinetično energijo telesa in obenem povečuje npr. energijo toplotnega stanja telesa ter okolice. Pospeševalna sila povečuje kinetično energijo telesa. Povečanje kinetične energije je enako pozitivnemu delu pospeševalne sile, to pa je posledica zmanjšanja kakšne druge vrste energije, npr. notranje energije mišic, če pospešuje sila mišic, ali težnostne energije samega telesa, če pospešuje teža telesa.

Potisna sila lahko dvigne telo v zemeljskem težnostnem polju; težnostna potencialna energija, ki jo ima telo zaradi svoje lege glede na Zemljo, se v tem primeru poveča za toliko, kolikor dela dvižna sila opravi. Na telo lahko učinkujejo tudi druge sile, npr. električna sila. Vpliv sile na telo lahko interpretiramo, kot da sila z delom spremeni ustrezno vrsto energije telesa.

Sile izražajo medsebojno učinkovanje različnih teles. Zaradi delovanja sil se energija posameznih teles spreminja. Primer: Ob trku dveh teles se kinetična energija hitrejšega telesa zmanjša, kinetična energija počasnejšega telesa poveča. Če pri trku sodeluje le prožna sila, je zmanjšanje kinetične energije hitrejšega telesa enako povečanju kinetične energije počasnejšega telesa; prožna sila z delom prenese del kinetične energije s hitrejšega na počasnejše telo. Sile ob trkih večinoma niso povsem prožne, pa se zato poleg kinetične energije spremeni tudi notranja energija posameznih teles, telesa se deformirajo in segrejejo.

Odvisno od vrste sil, delujočih med telesi določenega sistema, nastajajo različne energijske spremembe posameznih teles, spreminja se tako vrednost kot vrsta energije. Delo sil omogoča, da se energija ene oblike preliva v energijo druge oblike.

Energijo smo vpeljali s stavkom, da je delo sile enako spremembi energije; torej poznamo in lahko ugotavljamo le spremembo energije, o njeni absolutni vrednosti se moramo dogovoriti.

Iz definicije pojma energije sledi, da se celotna energija vseh teles zaključenega sistema, ki je izoliran od okolice, ne spreminja. Lahko se spreminjajo energije posameznih teles, celokupna energija sistema pa je konstantna. Zakon o ohranitvi celokupne energije je sestavni del pojma energije. Trditev, da bo zakon o ohranitvi energije vedno veljal, je le izraz našega prepričanja, da bo glede na novo odkrite pojave še vedno mogoče vpeljati novo obliko energije, ki se bo na en ali drug način prelivala v znane ener-

gijske oblike.

Mislimo si zaključen sistem teles, izoliran od okolice. Energija sistema je v prvem približku sestavljena iz vstote kinetičnih energij posameznih teles sistema in iz vsote vseh možnih potencialnih energij zaradi različnih konservativnih sil, s katerimi telesa sistema medsebojno sodelujejo. Za pojave, pri katerih se telesa notranje ne spreminjajo, lahko zapišemo:

$$\Delta W_{kin} + \Delta W_{pot} = 0$$

pri čemer je ΔW_{kin} sprememba celokupne kinetične energije vseh teles sistema, ΔW_{pot} pa sprememba vsote potencialnih energij.

Brž ko se ob pojavih (npr. ob trku teles) spremeni tudi notranje stanje telesa, moramo prišteti še spremembo notranje energije vseh teles:

$$\Delta W_{kin} + \Delta W_{pot} + \Delta W_{not} = 0$$

Telo je sestavljeno iz atomov, ki se gibljejo in ki se medsebojno povezujejo z medatomskimi silami. Torej lahko spremembo notranje energije telesa razstavimo na spremembo kinetične energije vseh atomov v telesu in na spremembo potencialne energije atomov zaradi medatomskih sil. Če se ob spremembah atomi notranje ne spremenijo, lahko zapišemo:

$$\Delta W_{\substack{not \\ telesa}} = \Delta W_{\substack{kin \\ atomov}} + \Delta W_{\substack{pot \\ medatom.sil}}$$

Gibanje atomov v telesu je zaradi pogostih trkov neurejeno. Poti atomov in njihovih hitrosti ne moremo neposredno določevati, torej tudi ne moremo neposredno ugotavljati, kakšna je sprememba kinetične in potencialne energije atomov v telesu. Pomagamo si z empiričnimi zaključki. Spremembo kinetične energije neurejenega gibanja atomov merimo kot spremembo temperature telesa, kar je npr. v zvezi s sprejemanjem ali oddajanjem toplote. Spremembo celotne potencialne energije atomov v telesu izražamo npr. z različnimi latentnimi toplotami, ki jih telo prejme ali odda ob raznih spremembah agregatnih stanj, z deformacijsko energijo ob deformaciji telesa, s površinsko energijo itd. Spremembo notranje energije telesa torej merimo posredno, s tem da merimo spremembo lastnosti telesa. Dokler se ob spremembah ne spremeni tudi notranje stanje samih atomov, lahko spremembo notranje energije telesa ugotavljamo z metodami termodinamike.

Pri naslednjem koraku moramo popisati spremembo notranje energije samega atoma. Atom sestavljajo električno pozitivno atomsko jedro ter električno negativni elektroni. Ker ne vemo, kako se elektroni znotraj elektronskega plašča gibljejo, si ne moremo pomagati s preprosto predstavo, da je sprememba notranje energije atoma sestavljena iz spremembe kinetične energije elektronov in iz spremembe njihove potencialne energije zaradi električnih sil med elektroni in jedrom in elektroni med seboj. Vemo le, da elektroni v notranjosti atoma zasedajo točno določena, diskretna energijska stanja. Notranja energija atoma se spremeni, če elektroni preskočijo iz enih energijskih stanj v druga energijska stanja, pri čemer se razlika energije odda ali absorbira v obliki fotonov različnih energij. Ob takšni spremembi notranje energije atomov snov npr. seva svetlobo, infrardeče valove, ultravijolične žarke itd. S preskoki najbolj zunanjih elektronov med možnimi energijskimi stanji so združene različne kemijske spremembe snovi, spremeni se energija vezave atomov v molekule, kar se navzven pokaže npr. kot sproščena kemijska energija. Snov se lahko tudi naelektri. Ob teh spremembah atomska jedra neposredno ne sodelujejo, njihovo notranje stanje se ne spremeni. Sledi:

$$\Delta W_{\substack{not \\ atoma}} = \Delta W_{\substack{zaradi\ prehodov\ elektronov \\ med\ diskretnimi\ energ.stanji}}$$

Energijske spremembe atomov niso povezane le s spremembami kemijskih in električnih lastnosti snovi, pojavlja se tudi nova oblika energije - fotoni, kvanti elektromagnetne energije.

Preostane še, da k spremembi notranje energije atomov prištejemo spremembe atomskih jeder. Te spremembe se dogajajo pri različnih jedrskih reakcijah. Vemo, da je atomsko jedro sestavljeno iz nukleonov - protonov in nevtronov. Neznano pa je, v kakšnem stanju se nukleoni v jedru nahajajo. Ugotovimo lahko le, da se atomsko jedro nahaja v različnih, diskretnih energijskih stanjih, podobno kot elektroni v atomskem plašču. Ob jedrskih reakcijah, npr. zlitju lahkih jeder, razpadu ali cepitvi težkih jeder ter ob številnih jedrskih reakcijah med pospešenimi delci in jedri, se dogajajo burne jedrske spremembe: sproščajo se fotoni gama, katerih energija je za več velikostnih redov večja od energije fotonov, sproščenih ob elektronskih preskokih; spreminja se sestav jeder in s tem vrsta kemijskega elementa; predvsem se spreminja masa delcev.

Bistvena posebnost jedrskih energijskih sprememb je, da so v zvezi z opazno spremembo mase snovi. Opazimo, da se ob eksoergičnih jedrskih reakcijah, pri katerih se energija sprošča, celokupna masa udeležencev reakcij zmanjša: po reakciji je manjša kot pred reakcijo. Obratno velja za endoergične reakcije, ki se sprožijo, če dovedemo energijo. Večja kot je sproščena energija pri eksoergični reakciji, večji je ustrezni defekt mase.

Sprememba mase je posebno izrazita pri reakcijah med elektroni in pozitroni oziroma v splošnem med delci in antidelci. Delec in njegov antidelec se privlačita, združita in izgineta, namesto njiju se pojavi fotonska energija. Po najpreprostejši razlagi tega pojava se masa delcev prelije v fotonsko energijo. Možna je tudi obratna reakcija: foton z dovolj veliko energijo se prelevi v par delec-antidelec, kar pomeni, da se fotonska energija preobrazi v materialne delce, v snov. Medsebojno prepletanje mase in energije je verjetno vzrok, da je fizika osnovnih delcev, ki se ubada z interakcijami med močno pospešenimi osnovnimi delci, tako zameglena; saj je težko razločiti, ali pri neki reakciji nastane novo energijsko stanje sistema sodelujočih delcev ali se pravzaprav pojavi nov snovni delec.

Zgoraj navedeni primeri, predvsem anihilacija delcev in antidelcev, nakazujejo misel, da masa materialnega delca le izraža celokupno energijo, shranjeno v delcu. Večja kot je masa snovi, več energije je shranjeno v snovi. Torej je masa snovi le zunanja manifestacija celokupne energije, ki jo snov vsebuje. To energijo lahko z ustreznimi reakcijami, večinoma le delno, pretvorimo v razne energijske oblike.

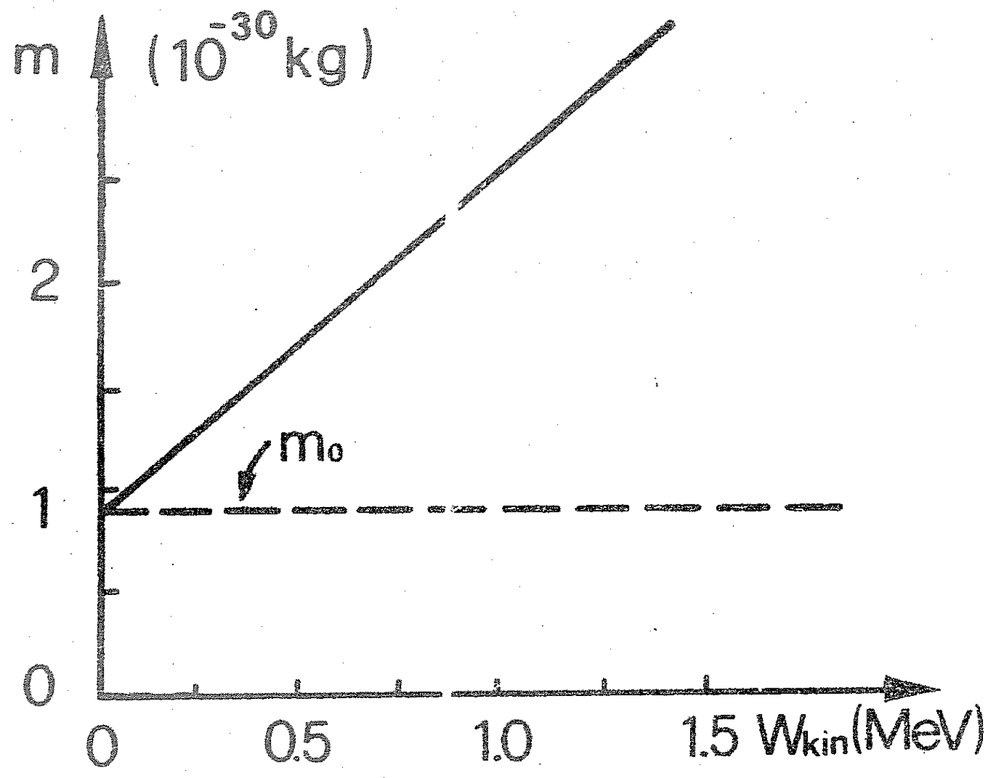
Najenostavneje je, da maso snovi vpeljemo kot količino, ki je premosorazmerna celotni energiji, naloženi v snovi: $m \propto W$ ali

$$W = km$$

Vrednost sorazmernostne konstante k je odvisna od izbire enot. Če bi k bil brez dimenzije, bi maso merili v enakih enotah kot energijo, npr. v džulih. V zgodovinskem razvoju fizike sta se masa in energija pojavili navidezno nepovezani. Maso smo vpeljali kot količino, ki izraža vztrajnost telesa proti spremembi hitrosti gibanja; povezana je tudi z množino snovi. Energijske spremembe smo obravnavali z delom različnih sil. Največkrat imamo opravek z energijskimi spremembami (kinetične, potencialne energije) teles, ki so le zanemarljivo majhen del celotne energije (W) teles, tako da se masa teles ob energijskih spremembah praktično ne spreminja. Torej lahko kljub opaznim energijskim spremembam vzamemo, da je masa teles stalna. Z izbiro enote mase (kg) smo se izognili potrebi, da bi poznali celotno energijo (W) telesa.

Sorazmernostno konstanto k določimo tako, da pri znanem povečanju energije materialnega delca izmerimo ustrezno povečanje njegove mase: $k = dW/dm$. Spreminjanje mase s prejeto ali oddano energijo se najmočneje pozna pri najlažjih delcih, elektronih. Elektron pospešimo v električnem polju; po preletu napetosti U se kinetična energija elektrona poveča za $W_{kin} = e_0 U$. Pospešene elektrone pošljemo skozi magnetno polje, da jim izmerimo maso. Ugotovimo, da se masa poveča od $m_0 = 0{,}911.10^{-30}$kg (tako imenovana mirovna

masa elektrona, to je masa mirujočega ali počasi gibajočega se elektrona) na m. Masa m pospešenega elektrona je linearna funkcija prejete energije W_{kin} (glej sliko). Z diagrama razberemo strmino premice: $dm/dW_{kin} = dm/dW = 1/k = 1{,}788.10^{-30}$ kg/MeV $= 1{,}113.10^{-17} s^2/m^2$. Dobljeno vrednost lahko izrazimo kot $1/c^2$, pri čemer je nova konstanta c po vrednosti identična s hitrostjo svetlobe v vakuumu: $c = 2{,}998.10^8$ m/s. Sledi rezultat:



$$W = c^2 m$$

Dobljena enačba je znana pod imenom *Einsteinova energijska enačba*; izraža zvezo med maso in energijsko vsebnostjo snovi. Če se telo mase m popolnoma pretvori v energijo, dobimo $c^2 m$ energije. Če se fotonska energija W transformira, dobimo snov mase W/c^2.

Vzemimo, da imamo popolnoma izolirano telo, ki miruje. Maso telesa označimo z m_o; imenuje se mirovna ali *lastna masa* telesa. Lastni masi m_o ustreza *lastna energija*:

$$W_o = c^2 m_o$$

Vsako telo oziroma vsak materialni delec vsebuje lastno energijo. Če se telo giblje ali če se energija telesa poveča zaradi učinkovanja drugih teles iz okolice (npr. za ΔW), se masa telesa poveča od m_o na m:

$$m = m_o + \Delta W/c^2 = m_o(1 + \Delta W/W_o)$$

Vidimo, da lahko spremembo mase telesa ob energijski spremembi zanemarimo, če je sprememba energije (ΔW) majhna v primerjavi z lastno energijo telesa (W_o): za $W \ll W_o$ je $m \simeq m_o$.

Telesu najpogosteje spreminjamo energijo tako, da mu dovedemo ali odvzamemo kinetično energijo: $\Delta W = W_{kin}$. Zanima nas, kako se v tem primeru spreminja masa telesa v odvisnosti od hitrosti gibanja.

Pospeševalna sila F na kratki poti ds poveča energijo telesa za $dW = dW_{kin} = Fds$, obenem poveča njegovo gibalno količino za $dG = d(mv) = Fdt$. Iz obeh enačb izločimo silo F in dobimo: $d(mv) = (dW/ds)dt = dW/v = c^2 dm/v$ ali $dm(v^2 - c^2) = - mvdv$. Po integraciji, upoštevaje začetni pogoj: $m = m_o$ za $v = 0$, sledi znani rezultat:

$$m = m_o(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

Dokler je hitrost telesa majhna v primerjavi s svetlobno hitrostjo, se masa telesa praktično ne spreminja in je enaka lastni masi m_o. Šele ko se hitrost telesa približa svetlobni hitrosti, masa telesa močno naraste - približa se neskončni vrednosti. Rezultat tega je, da se noben delec z lastno maso ($m_o \neq 0$), ki lahko obstaja v mirujočem stanju (materialni delec), ne more gibati s svetlobno hitrostjo.

Poleg kinetične energije vplivajo na maso telesa tudi drugi dodatki energije, npr. povečanje potencialne energije: če telo dvignemo, se njegova masa nekoliko poveča. Masa telesa se tudi poveča, če telo segrejemo ali če nanj posvetimo. Kolikšen je vpliv energijske spremembe na maso telesa, je odvisno od lastne energije oziroma od lastne mase telesa. Za ilustracijo navedimo nekaj primerov:

Telo	lastna masa m_o	lastna energija $W_o = m_o c^2$
Enota mase	1 kg	9.10^{16}J = 2,5.10^{10}kWh
Atomska enota mase	1,66.10^{-27} kg	1,492.10^{-11}J = 931 MeV
Elektron	0,911.10^{-30} kg	8,187.10^{-14}J = 0,511 MeV

Čeprav je energijska vsebnost snovi neodvisna od vrste snovi, je razlika med posameznimi snovmi v tem, do kolikšne mere je mogoče lastno energijo sprostiti in jo izkoristiti npr. za mehansko delo. Stoodstotno sprostitev lastne energije dosežemo le s spojitvijo materije in antimaterije, pri čemer nastane fotonska energija. Z običajnimi kemičnimi in jedrskimi reakcijami se sprosti le zelo majhen del (manj od 1%) v snovi naložene energije. Pri večini reakcij se na račun manjšanja mase energija sprošča v obliki fotonov in kot toplota, to je kot kinetična energija neurejenega gibanja atomov. Sproščeno toploto lahko s toplotnimi stroji deloma pretvarjamo v delo.

Oglejmo si tri tipične primere:

1. Gorenje ogljika. Pri oksidaciji ogljika v ogljikov dvokis se sprosti 4,1 eV energije na vsak atom ogljika oziroma na vsako molekulo nastalega ogljikovega dvokisa CO_2. Na en mol ogljikovega dvokisa (ki tehta 44 g) se sprosti 4,1.6.10^{23}eV = 94 kcal toplote.

Od 1 grama snovi (ki vsebuje 25 milijonov kWh lastne energije) se torej sprosti 2,13 kcal = 0,0025 kWh energije, kar je le 10^{-8}% celotne razpoložljive energije. Vidimo, da so kemične reakcije v pogledu izkoriščanja lastne energije snovi zelo nebogljene. Sproščena energija predstavlja tako majhen delež celotne naložene energije, da se pri tem masa snovi praktično ne zmanjša. Zaradi tega lahko predpostavljamo ohranitev mase snovi vseh udeležencev kemičnih reakcij.

Jedrske reakcije omogočajo večji izkoristek pretvorbe lastne energije. Pri radioaktivnem razpadu nestabilnih jeder se sproščajo fotoni gama in različni materialni delci; na eno razpadlo jedro odpade nekaj MeV sproščene energije. Izstopa cepitev ali fisija težkih jeder.

2. Cepitev jeder (urana 235, urana 233, plutonija 239). Težka jedra se v nekaterih primerih razcepijo, nastanejo srednjetežka jedra, ki so večinoma radioaktivna; obenem se sprostijo fotoni gama in nekaj nevtronov. Računamo, da se ob cepitvi vsakega jedra urana 235 sprosti okrog 200 MeV energije, večinoma kot kinetična energija nastalih jeder (170 MeV), približno 5 MeV odnesejo fotoni, 5 MeV sproščeni nevtroni, preostalih 20 MeV se sprosti kasneje z razpadom radioaktivnih cepitvenih produktov. Sproščena energija se slejkoprej pojavi kot toplota.

Če se vsa jedra 1 grama urana 235 razcepijo, se sprosti okrog 200 MeV .6.10^{23}/235 = 2,3.10^{4} kWh energije. Torej se s cepitvijo jeder izkoristi približno 0,09% razpoložljive energije, kar je za faktor 10^{7} bolj učinkovito kot s pomočjo kemičnih reakcij.

3. Termonuklearne reakcije - zlitje lahkih jeder. Omenimo reakcijo spajanja vodikovih jeder, pri čemer nastajajo helijeva jedra in pozitroni:

$$4\ {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + 2\ e^+ + 27\ \text{MeV energije}$$

Na 1 gram vodika odpade 4,05.10^{24} MeV = 1,8.10^{5} kWh sproščene energije, kar je 0,7% celotne razpoložljive energije. Zapisana reakcija poteka v več korakih z vmesnimi fazami, v katerih nastopajo srednjetežka jedra (npr. ogljik ali dušik) kot katalizatorji, na Soncu. V laboratoriju pa še ni uspelo doseči kontroliranega zlivanja lahkih jeder.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

ČLOVEK IN ENERGIJA

RUDI KLADNIK

Potreba človeka in človeške družbe po energiji vztrajno narašča. Človek sam troši razmeroma majhno moč; za zadovoljitev osnovnega metabolizma potrebuje povprečno od 65 do 85 W (odvisno od klime); med sprehodom se potrošena moč dvigne na 0,2 kW, pri hitri hoji in delu na 0,4 kW. Poleg tega želi človek proizvajati nove proizvode, nove snovi, namenjene fizičnemu udobju, želi živeti v okolju čim bolj neodvisno od naravnih pogojev, predvsem želi, da namesto njega delajo stroji, da se sam lahko posveti kulturi in znanosti. Menijo, da se energijska potrošnja za industrijske namene podvoji vsakih deset let.

V današnjem času odpade na osebo na svetu povprečno okrog 2 kW moči, v razvitih industrijskih državah celo od 10 do 13 kW. Za bodočnost ocenjujejo, da se bo poraba energije na osebo v razvitih državah dvignila na okrog 15kW, od tega bo šla polovica za zadovoljitev človekovih materialnih potreb, polovica pa za regeneracijo narave.

Izkoriščanje energije ima pomembno vlogo pri gospodarskem razvoju narodov, kar se kaže predvsem v podatkih, da je narodni dohodek pri različnih ljudstvih neposredno vezan na "per capita" porabo energije za toploto, svetlobo in delo. V zvezi s tem je tudi vpliv porabe energije na oblikovanje razvoja znanosti in kulture.

Učinkovitost energije v družbi je odvisna od verige faktorjev: razpoložljivi energijski viri, eksploatacija, transport, shranjevanje, pretvorba v želeno obliko, odlaganje odpadkov in na koncu regeneracija narave, to je ohranitev okolja, ki je v nevarnosti zaradi izkoriščanja energijskih virov.

Na Zemlji pretežno izkoriščamo sončno energijo; okrog 99,98% vse razpoložljive energije dobivamo posredno ali neposredno od Sonca. Poleg sončne energije omenimo še možne vire energije: prevajanje toplote iz zemljine notranjosti (geotermična energija), plimovanje oceanskih voda ter jedrska energija.

Energija plime in oseke je posledica vrtenja Zemlje in Lune ter njune medsebojne gravitacijske privlačnosti. Celokupna moč plimovanja oceanskih voda je ocenjena na 6.10^4MW. Energija plimovanja se izkorišča podobno kot energija rečnih voda. Potrebni so bazeni z visoko pregrado. Pregrada se odpre, da se bazen napolni le kratek čas med najvišjo plimo; izprazni se med najnižjo oseko. V Franciji so na tej osnovi ob ustju reke Rance zgradili elektrarno z močjo okrog 250 MW. Podobna elektrarna je v Sovjetski Zvezi (Kislaja Guba ob Barentsovem morju).

Geotermična energija. V zemljini notranjosti se z radioaktivnim razpadom uranovih izotopov, torija in kalija stalno sprošča toplota, zaradi česar teče skozi zemeljsko skorjo toplotni tok z gostoto okrog 60 kW/km^2. V zemeljski skorji vlada temperaturni gradient povprečno od 20 do 30°C na km globine. Na zemeljsko površino v celoti priteka toplotni tok okrog 3.10^7 MW, od tega velika večina s prevajanjem toplote skozi trdno skorjo in le okrog 1% s konvekcijo vročih plinov ter lave (gejzirji, vulkani). Geotermično energijo izkoriščamo s pomočjo vročih plinov ali pare temperature okrog 180°C in tlaka okrog 8 kp/cm^2.

Prvo geotermično termocentralo z močjo 250 kW so zgradili 1913 v Italiji

(Lardella). V ZDA na veliko izkoriščajo geotermično energijo na polju gejzirov v Kaliforniji, kjer obratuje več elektrarn s celokupno močjo okrog 500 MW; računajo pa na povečanje do 900 MW.

Geotermično energijo je vredno izkoriščati, če najdejo do globine 3 km velike rezervoarje (s prostornino nekaj km^3), v katere stiskajo paro. Para nato difundira skozi porozno skalovje, se segreje na okoli 180°C, in se nabira v drugem rezervoarju. Nato jo po cevah vodijo do površja, kjer odda toploto sekundarnemu hladilu, ki vodi v plinsko turbino.

Sončna energija. Gostota toka sončne energije je na oddaljenosti Zemlje od Sonca okrog 1,4 kW na m^2 prečne površine, kar pomeni, da Zemlja prejema od Sonca energijski tok $1,7.10^{11}$ MW. Spektralna razdelitev je približno naslednja: okrog 50% je svetlobe, okrog 40% infrardečih valov in okrog 10% ultravijoličnih žarkov. Okrog 30% vpadne sončne energije se takoj siplje v zemeljskem ozračju in se odbija v Vesolje, pretežno kot kratkovalovno sevanje (zato je Zemlja iz Vesolja videti modra). Okrog 47% vpadne energije se kot toplota absorbira v ozračju, v zemlji in v vodah; ta energija se izravnava z dolgovalovnim (infrardečim) sevanjem, ki ga Zemlja oddaja v Vesolje. Preostalih 23% se večinoma porabi za izhlapevanje zemeljskih voda in za konvekcijo, to je za pogon hidrološkega cikla. Le majhen del celokupne sončne energije (okrog 4.10^7 MW) se absorbira v klorofilu zelenih rastlin; povprečno okrog 0,5% te energije se naloži v ogljikovih hidratih.

Direktna uporaba sončne energije. Na naši zemljepisni širini pade na vsak prečni m^2 v letu dni povprečno 1700 kWh sončne energije. Ker letne energijske potrebe enodružinske hiše znašajo od 10000 do 15000 kWh, je sončne energije, padajoče na streho hiše, več kot dovolj za kritje energijskih potreb hiše.

Za izkoriščanje vpadne sončne energije so najprimernejši ravni, počrnjeni pretvorniki, pokriti z dvojnim prozornim pokrovom. Pokrov mora prepuščati svetlobo in kratkovalovno infrardeče sevanje ter absorbirati dolgovalovno sevanje, ki ga oddaja počrnjeni pretvornik. Uporabno je navadno steklo; druge umetne mase se v ozračju preveč zamažejo. Z enostavnim pretvornikom te vrste je možno segreti vodo (ki polzi med pretvornikom in pokrovom) na 100°C.

Druga možnost so konkavni reflektorji; odbita svetloba se zbere v goriščnem območju, kjer se voda segreje na 500°C, kar je dovolj za učinkovit parni stroj. Reflektor mora imeti veliko odbojnost (čisto površino) in mora se obračati za Soncem.

Pomembna je še direktna pretvorba sončne energije v električno energijo s pomočjo polprevodnikov (fotovoltična konverzija, sončne celice). Prve silicijeve sončne celice so imele izkoristek 5%, novejše (s kadmijevim sulfidom ali galijevim aresindom) delajo z izkoristkom od 10 do 15%. Več celic v kombinaciji (npr. v vesoljski postaji Spacelab) oddaja električno moč 25 kW. Za 1000 MW-no električno centralo bi bila pri 10%-nem izkoristku potrebna kolektorska površina okrog 10 km^2. Problematične so velike investicije ter shranjevanje energije.

Organski in fosilni viri energije. Sicer se le okrog 0,025% vpadne sončne energije absorbira v rastlinah in se naloži v njih kot notranja energija, vendar je ta energija v obstojni obliki, lahko jo prevažamo in uporabljamo v različnih časih ter na različnih mestih. Kot vir energije so pomembni: organska hrana, les, premog, zemeljski plini in nafta. Organsko hrano izkoriščajo živali in človek in jo deloma pretvarjajo v delo. Človek npr. dela največ z močjo 0,1 kW, vol z močjo 0,2 kW, konj največ z močjo 0,5 kW. Sončna energija se je milijone let nalagala v fosilnih gorivih, katerih zaloge toplotne energije so ocenjene približno takole: premog - 56.10^{15}kWh, nafta - 3.10^{15}kWh, zemeljski plin - 3.10^{15}kWh, peščenjaki - $0,5.10^{15}$kWh, oljni škriljavci - $0,3.10^{15}$kWh.

Do 1900 so kot gorivo največ uporabljali les, nato premog, zdaj pretežno zemeljske pline in nafto. Okrog leta 1970 je nafta prevzela čez 60% celotne porabe fosilne energije, zemeljski plini le 10%. Z uporabo teh goriv nastaja toplota, ki jo s toplotnimi stroji pretvarjamo v že eno delo. Najboljše so plinske turbine z izkoristkom do 40%, stroji z notranjim izgorevanjem delajo z izkoristkom od 10 do 15%. Odprto ognjišče na les ali premog izkoristi za ogrevanje prostorov le okrog 20% sproščene toplote, ostalo gre v dimnik; dober štedilnik izkoristi povprečno 50% toplote za ogrevanje.

Pri izgorevanju fosilnih goriv nastaja ogljikov dvokis katerega koncentracija v ozračju zato narašča. Ocenjujejo, da je v zadnjih sto letih koncentracija narasla od 0,00029 na 0,00032; ob predvidenem energetskem razvoju bo do leta 2000 narasla na 0,00040. Ogljikov dvokis se verjetno raztaplja v oceanskih vodah, kjer se pretvarja v minerale, delno ga absorbirajo zelene rastline. Zaradi prevelike koncentracije CO_2 v ozračju bi se povišala temperatura Zemlje, ker CO_2 absorbira dolgovalovno infrardeče sevanje, ki ga Zemlja oddaja v Vesolje. Druga možnost je, da namesto ogljikovih goriv uporabimo vodikova goriva; namesto ogljikovega dvokisa bi nastajala vodna para in ne bi bilo nevarnosti, da bi se povišala temperatura.

Konvekcijska energija. Zaradi neenakomernega ogrevanja različnih delov kopnega in morij nastajajo konvekcijski tokovi tako v oceanih kot v ozračju, ki nosijo precejšnjo kinetično energijo. Ocenjujejo, da je moč teh tokov okrog 4.10^8MW. Večina te energije se s trenjem pretvarja v toploto. Le majhen del se pretvori v mehansko delo, npr. s pomočjo jadrnic, jadralnih letal ter mlinov na veter. Mlini na veter izkoristijo do 50% vpadne kinetične energije vetra; njihova moč je od nekaj kW do sto kW. Najmočnejši mlin na veter so 1941 zgradili v državi Vermont (ZDA); poganjal je električni generator moči 1,25 MW.

Vodna energija. Omenili smo, da se okrog 23% vpadne sončne energije porabi za pogon hidrološkega cikla; to energijo lahko deloma izkoriščamo kot energijo rečnih voda. Ocenjena razpoložljiva moč znaša okrog 3.10^6MW, od tega danes izkoriščamo le okrog 10%, tako da bo vodna energija še vedno imela pomembno vlogo v prihodnosti. Poleg velikih hidrocentral z več deset do sto MW so predvsem v zadnjem času spet aktualne majhne centrale moči do 100 kW za lokalno uporabo v odmaknjenih predelih. Navadni vodni mlini imajo moč do 50 kW.

Dpbra stran vodne energije je razmeroma učinkovita pretvorba v električno energijo; izkorostek je okrog 90%. Slaba stran je sezonsko nihanje vode in potreba po velikih akumulacijskih jezerih.

Jedrska energija. Pridobivajo jo s kontrolirano verižno reakcijo cepljenja težkih jeder urana 235, urana 233 ali plutonija 239 v reaktorjih. Energija se sprošča kot toplota, ki jo v obliki pare odnaša iz reaktorja hladilo in jo predaja parni turbini. Dobljena toplota je za energijske namene manj kvalitetna kot toplota iz klasičnih termoelektrarn; jedrske elektrarne npr. delajo s 30%-nim izkoristkom. Slaba stran jedrske elektrarne je tudi intenzivno radioaktivno sevanje, ki se sprošča obenem s toploto, ter močno radioaktivni odpadki jedrskega gorenja. Zaradi tega morajo biti vse aktivne komponente jedrskega reaktorja obdane z debelim zaščitnim oklepom (večinoma iz težkega betona). Tudi delo z radioaktivnimi odpadki je zelo zahtevno. Zato so jedrski reaktorji ekonomični le kot velike stacionarne enote, npr. z električno močjo več sto MW, kar pomeni, da so investicijski stroški veliki. Medtem ko instalirani kW električne moči termične centrale stane (v ugodnem primeru) okrog 9000 din, stane kW investirane električne moči jedrske elektrarne kar okoli 14000 din.

Zaradi slabega toplotnega izkoristka oddajajo jedrske elektrarne veliko odpadne toplote, ki predstavlja precejšnje breme za okolje. Dodatna je še nevarnost radioaktivne kontaminacije ozračja in vode v okolici elektrarne.

Dobra stran jedrske elektrarne pa je v tem, da uporablja novo gorivo, ki

je v naravi dokaj razširjeno in ni zanimivo za kemično industrijo, da ne onesnažuje okolja kot elektrarna na fosilno gorivo, da kot stranski produkti nastajajo različna sevanja, novi izotopi in nova jedrska goriva (npr. plutonij). Vsi ti faktorji so vzrok, da je nuklearna energija v razvitih državah že zdaj cenejša v primerjavi z električno energijo, dobljeno iz klasičnih termoelektrarn. Približna cena električne kWh iz jedrske centrale je od 0,06 do 0,08 din. V ZDA obratuje 55 velikih komercialnih jedrskih elektrarn s skupno močjo 40000 MW; dodatnih 180000 MW je v gradnji. Okrog 1970 je le 1,5% električne energije v ZDA prihajalo iz jedrskih elektrarn; pričakujejo, da se bo leta 1980 ta odstotek dvignil na 25% in do leta 2000 celo na 50%.

LITERATURA za strani 194 - 202

|1| J.M. Hollander (Urednik), *Annual Review of Energy* 1 (1976).

|2| J.M. Fowler, *Energy and the Environment*, New York, McGraw-Hill 1975.

|3| F. Daniels, *Direct Use of the Sun's Energy*, New Haven, Yale Univ. Press 1974.

|4| J.O'M. Bockris, *Energy, the Solar-Hydrogen Alternative*, London, The Architectural Press 1976.

J.T. McMullan et al., *Energy Resources and Supply*, New York, John Wiley 1976.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

DOGAJANJA V ATMOSFERI Z VIDIKA ENERGIJE

ZDRAVKO PETKOVŠEK

DOTOK ENERGIJE

Skoraj vsa energija, ki v atmosferi vzdržuje v povprečju dokaj stalno temperaturo, prihaja v obliki elektromagnetnega valovanja s Sonca. Gostota tega energijskega toka na povprečni razdalji Sonce-Zemlja (150 milijonov km) je je na vrhu atmosfere po natančnih meritvah s sateliti (1353 ± 2) W/m^2 |1|. To je *solarna konstanta*. Za primerjavo z energijo elektrarn: na vsak km^2 pade 1400 MW. V dveh tednih prejme Zemlja od Sonca toliksno energijo, kot jo imajo po ocenah celotne zemeljske zaloge fosilnih goriv |2|.

Iz tople zemeljske notranjosti izhajajoči energijski tok bi v enem letu stalil le 7,5 mm debelo plast ledu, ki bi pokrivala vso Zemljo. Medtem bi sončni energijski tok, ki pade na Zemljo, stalil v enem letu 36,5 m debelo plast ledu okrog Zemlje. Energijski tok iz zemeljske notranjosti je torej v primeri s sončnim res zanemarljiv.

Sonce seva približno kot črno telo in ima zvezen spekter. Iz Stefanovega zakona sledi za njegovo površino temperatura malo pod 6000 K. Iz Wienovega zakona razberemo, da ima spekter maksimum približno pri valovni dolžini 0,5 μm.

Sevanja v atmosferi delimo na *kratkovalovno* z manjšimi valovnimi dolžinami od 3 μm in na *dolgovalovno* ali *terestično* z večjimi valovnimi dolžinami od 3 μm. Na prvo odpade 98% vse gostote sončnega energijkega toka. Na drugo pa odpade 99% gostote energijskega toka črnega telesa s temperaturo okoli 300 K, ki jo imajo tla in atmosfera. Pri téj temperaturi je po Wienovem zakonu maksimum v spektru pri valovni dolžini 10 μm.

VPLIV ATMOSFERE IN VPADNEGA KOTA

Atmosfera kot mešanica plinov sončno sevanje skoraj v celoti prepusti, le malo ga absorbira in odbije. Ob jasnem vremenu so povprečna prepustnost 0,75 , absorptivnost 0,18 in odbojnost 0,07. Toda atmosfera ni siva, ampak prepušča nekatere valovne dolžine bolj, druge manj. Zato se spekter gostote energijskega toka na zemeljski površini že ob jasnem vremenu precej razlikuje od tistega na zgornji meji atmosfere (Sl. 1). V glavnem absorbirajo ozon, vodna para in ogljikov dioksid. Reflektira pa precej aerosol, a tudi čista atmosfera in to selektivno (modrina neba).

Oslabitev enobarvne sestavine z valovno dolžino λ v sončnem sevanju na poti skozi atmosfero izračunamo po eksponentnem zakonu

$$j_\lambda(u) = j_\lambda(0)e^{-\alpha_\lambda u/\cos z} \qquad (1)$$

α_λ je koeficient ekstinkcije, z zenitni kot in u optična debelina ($u/\cos z$ je dolžina poti svetlobe v atmosferi). Pogosto privzamemo, da je atmosfera siva. V α_λ upoštevamo koeficient absorpcije in razpršitve in dobimo polempirične izraze za gostoto energijskega toka na zemeljski površini ob jasnem vremenu.

Vemo pa, da je v povprečju več kot polovica Zemlje pokrita z oblaki, ki imajo albedo 0,6 - 0,9 in večjo absorptivnost kot čista atmosfera. Do zemeljske površine pride zato v povprečju manj kot polovica energijskega toka, ki ga dobi Zemlja na vrhu atmosfere. Oblačnost se spreminja z vremenom

ter v dnevnem in letnem ciklu. Za vsak kraj je podana z vrsto klimatskih parametrov (srednja oblačnost, dnevna in letna razporeditev ipd.). Poleg teh odloča o gostoti energijskega toka pri tleh tudi čistost ozračja. Znano je |3|, da je nad nekaterimi mesti z močno onesnaženim zrakom gostota energijskega toka samo zaradi tega zmanjšana za 10% in več.

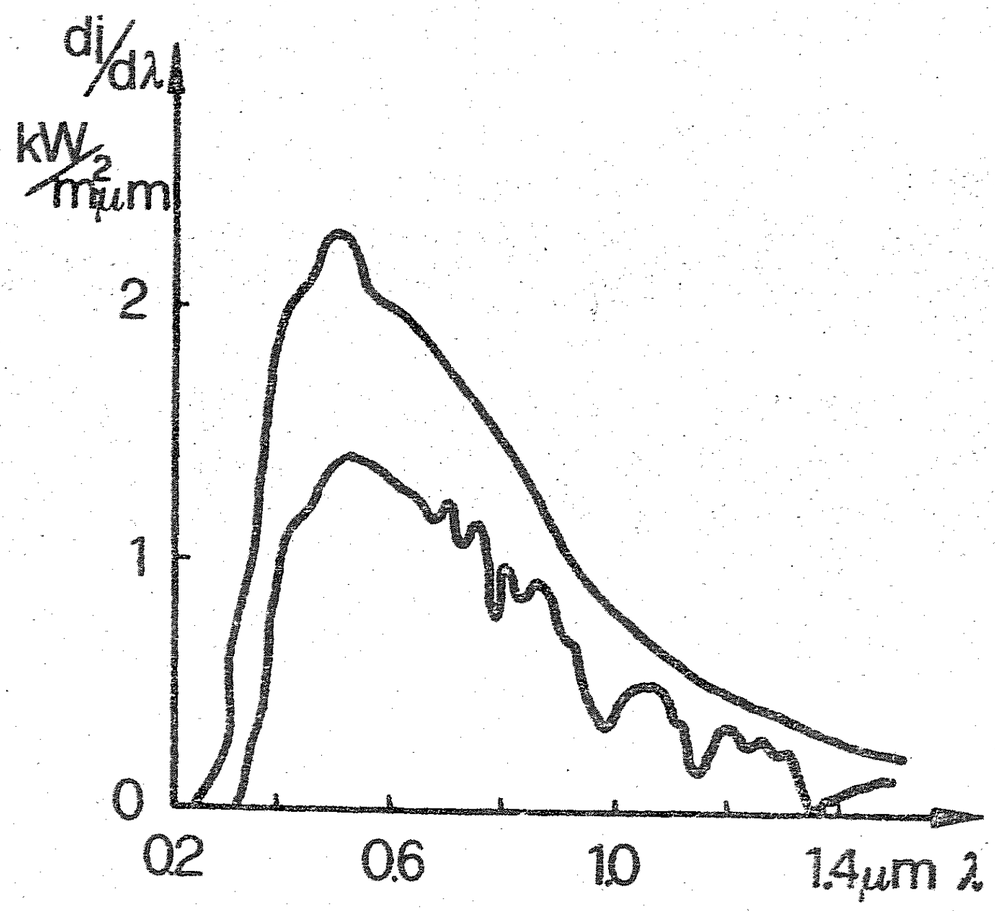
IZRABA SONČNE ENERGIJE

Z vsemi navedenimi faktorji moramo računati, ko ocenjujemo npr. možnost izkoriščanja sončne energije v kakem kraju. Še bolje pa je, če poznamo "prave" (za dovolj dolgo dobo izmerjene) vrednosti sončnega obsevanja, njegovo povprečje ter razporeditev v letnem ciklu. Nekaj podatkov za Ljubljano je razvidnih s slike 2, pri čemer je globalno obsevanje skupna gostota energijskega toka direktnega sončnega sevanja in difuznega sevanja neba na horizontalno površino |4|.

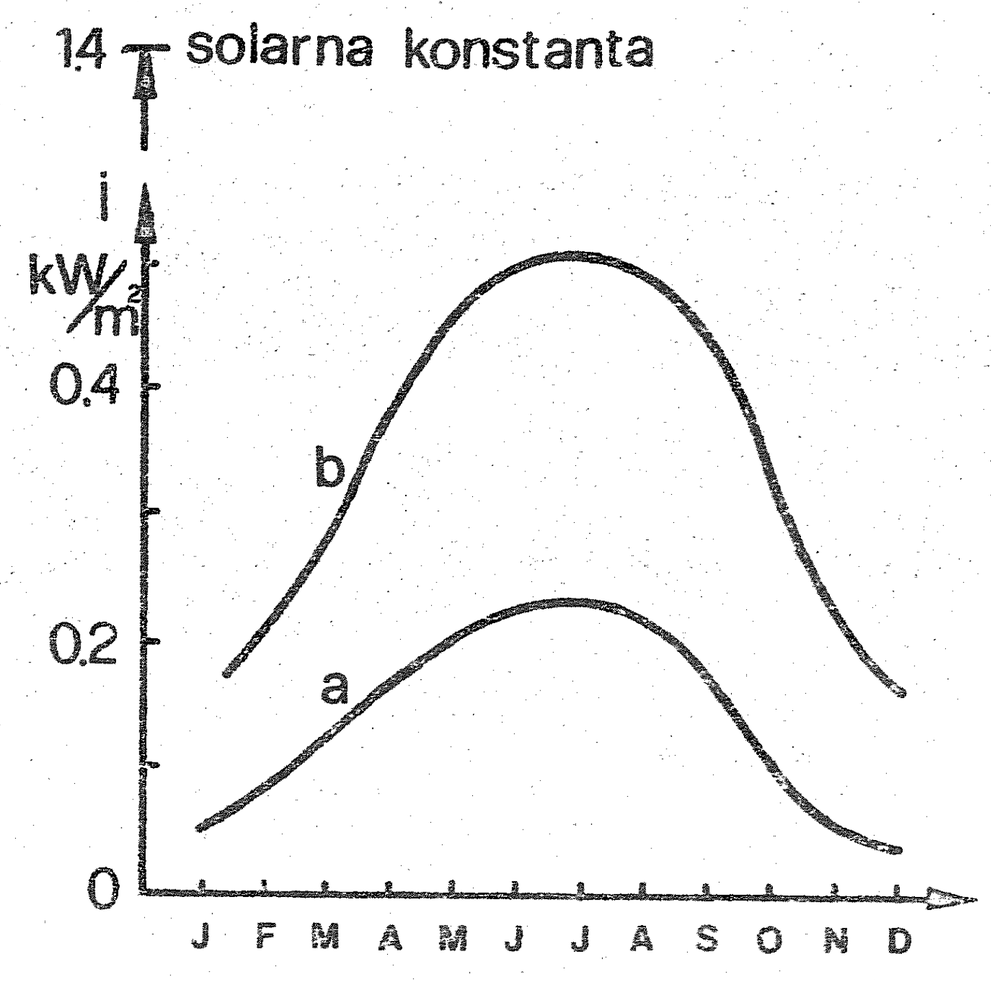
Če primerjamo te vrednosti s solarno konstanto (Sl. 2), vidimo, da so zlasti zimske vrednosti globalnega obsevanja zelo nizke. Povprečno zajema to v Ljubljani v decembru le 1,5% solarne konstante. Nekaj izgub gre na račun nagiba, nekaj pa na račun neugodnih klimatskih razmer v naših kotlinah. Te imajo ob ciklonih oblačno vreme (kot drugje), ob anticiklonih pozimi pa nastajajo v kotlinah megle, ki pogosto vztrajajo ves dan ali po več dni skupaj |5|. Zato so možnosti izkoriščanja sončne energije v naših kotlinah pozimi, ko bi bila energija najbolj potrebna, zelo majhne.

ENERGIJA V PLANETARNI CIRKULACIJI

Gostota energijskega toka sončnega sevanja na tleh je po enačbi (1) v polarnih področjih znatno manjša kot v ekvatorialnih zaradi zenitnega kota (ta je ob ekvinokciju opoldne enak geografski širini) in mnogo večje optične debeline atmosfere. Znani so Milankovićevi računi |6|, po katerih dobi v letnem povprečju enota horizontalne površine ob ekvatorju dvakrat tolikšno energijo kot na polu (čeprav dobi ob solsticiju npr. poleti na polu, ki je obsevan ves dan, več kot na ekvatorju). Posledica so v povprečju veliki presežki energije na ekvatorju in primanjkljaji na polih. To se odraža v temperaturah tal in zraka v spodnjih plasteh atmosfere.



Sl. 1. Spekter gostote energijskega toka s Sonca na zgornji meji atmosfere in pri tleh ob jasnem vremenu.



Sl. 2. Globalno obsevanje v Ljubljani (a) in gostota energijskega toka na horizontalno površino na vrhu atmosfere nad Ljubljano (b), v poprečju na dan posameznih mesecev.

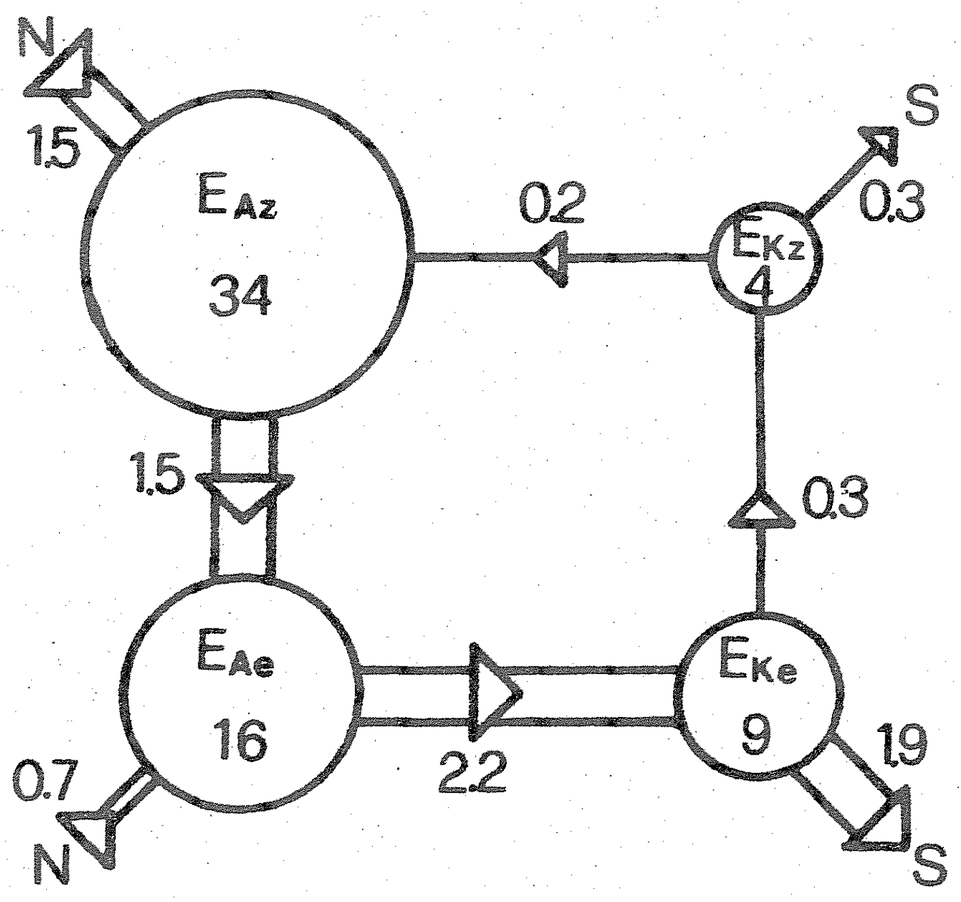
Ena od posledic višjih temperatur v spodnji troposferi nad ekvatorjem je to, da se pritiskove ploskve preko zmernih širin v smeri proti poloma spuščajo. V skladu z njihovim nagibom oziroma topografijo in z geostrofsko aproksimacijo |7| pihajo geostrofski vetrovi v širokem pasu zmernih širin srednje in zgornje troposfere okrog obeh hemisfer od zahoda proti vzhodu in so osnova splošne cirkulacije atmosfere. V teh tokovih nastajajo več tisoč km dolgi horizontalno-transverzalni Rossbyjevi valovi |7|. Nastane še vrsta manjših motenj, ki se v baroklini nestabilnosti razvijejo v ciklone in anticiklone kot največje predstavnike vrtincev v atmosferi (premera 10^6 m). Splošni zahodniki in ti horizontalni vrtinci ustvarjajo manjše vrtince in ti še manjše vse skozi 9 velikostnih stopenj linearnih dimenzij in dalje preko viskoznosti v končno pretvorbo kinetične energije vrtincev nazaj v toploto.

Energetsko gledano deluje toplotni stroj - atmosfera prav zaradi temperaturnih razlik med ekvatorjem in poloma. Izkoristek pa je zelo majhen, okoli 1%. Imenujmo odslej vsoto notranje in potencialne energije *potencialno energijo* $W = W_n + W_p$. Razmerje med obema deležema za izbran zračni steber je konstanta:

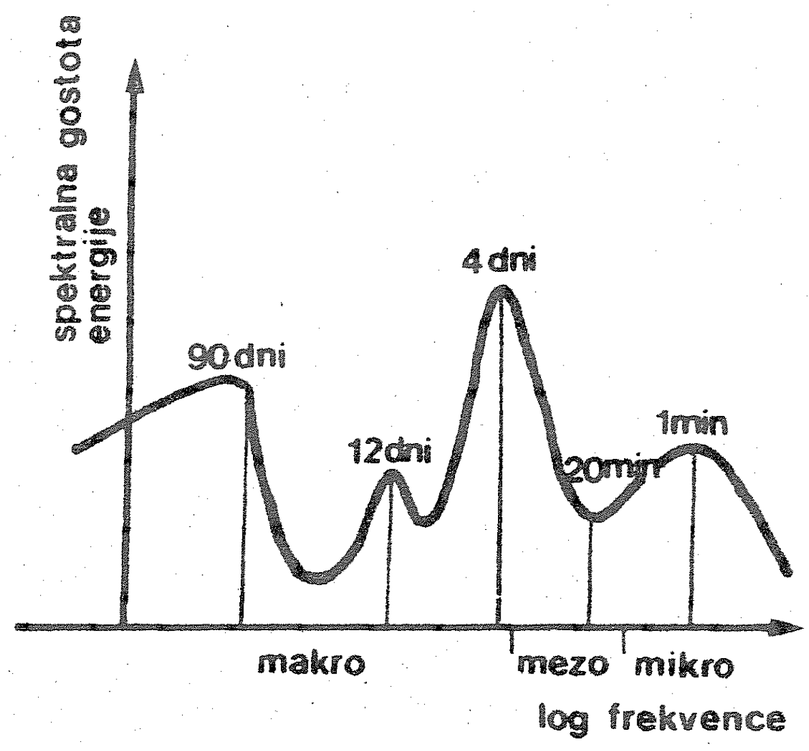
$$W_p/W_n = c_p/c_V - 1 = 0{,}4 \quad .$$

V stabilno stratificirani atmosferi brez horizontalnega gradienta gostote kljub veliki potencialni energiji W ni razpoložljive energije za pretvorbo v kinetično. Ne le krajevno dovajanje, že odvod energije na nekem kraju povzroči horizontalni gradient gostote in tlaka ter s tem možnost pretvarjanja dela potencialne energije v kinetično. Tako imenovana *razpoložljiva potencialna energija* W_A je razlika med minimalno potencialno energijo W (ki sledi iz adiabatne preureditve sistema) in pravo potencialno energijo W_p. Za tipične razmere v atmosferi je $W_A/W = 1/200$. Ker je razmerje kinetične energije proti razpoložljivi $W_k/W_A = 1/10$, je $W_k/W = 1/2000$.

Potencialna energija se v atmosferi pretvarja v kinetično pri nastanku splošnega zonalnega toka, ki smo ga že omenili, in v velikih kvazihorizontalnih vrtincih (ciklonih in anticiklonih), ki so temperaturno nesimetrični ali zvezani z izdatno divergenco. Zato je v atmosferi možen poleg pre-



Sl. 3. Povprečne zaloge energije (v 10^5 J/m^2) in pretvorbe energije (v W/m^2) celotne atmosfere po Oortu in Piexotu. Indeksi: A razpoložljiva potencialna energija, K kinetična, z zonalnega toka, e vrtincev; N nastanek in S



Sl. 4. Spektralna gostota energije v atmosferi kot funkcija frekvence turbulentnih gibanj.

hoda kinetične energije splošnega zonalnega toka (Z) v kinetično energijo vrtincev (e) tudi prehod v obratni smeri in ta v povprečju celo prevladuje (Sl. 3).

Veliki atmosferski vrtinci so zaradi sploščenosti atmosfere kvazidvodimenzionalni, medtem ko pri dimenzijah pod 10 km prevladuje tridimenzionalna turbulenca. Kinetična energija preko nje ni enakomerno porazdeljena. Če vzamemo namesto linearnih dimenzij časovno skalo, dobimo Moninovo oceno razporeditve spektralne gostote energije. (Sl. 4).

Pri tem je očitno maksimum pri štirih dneh. Tudi naše kraje preidejo frontalne motnje in južna obrobja ciklonov v povprečju vsake 4 dni.

Te in mnoge druge energijske obravnave nam dajejo nov vpogled v dogajanja v atmosferi. Pri tem so zelo pomembni globalni in tudi manj obsežni transporti energije z vodno paro, z zračnimi masami, z morskimi tokovi, s prevajanjem, konvekcijo in difuzijo, ki jih tu ne utegnemo obravnavati.

ENERGIJA VETRA

Vsa ta proučevanja nam dajejo le splošno sliko dogajanj v atmosferi. Glede energije vetrov in njenega izkoriščanja v nekem področju pa se je potrebno spet nasloniti predvsem na meritve. Izkoriščanje energije vetra je v glavnem možno le pri tleh. Tu ima na gibanje zraka prevladujoč vpliv topografija in relief neposredne okolice nekega kraja.

Masa zraka, ki preteče skozi enoto površine v enoti časa, je ρv. Zato je energijski tok na enoto površine in časa - tako imenovana *potencialna moč vetra*

$$\rho v \frac{1}{2} v^2 = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Kraji z dvakrat močnejšimi vetrovi imajo osemkrat večjo razpoložljivo energijo. Za praktičen izkoristek energije vetrov pa je seveda zaradi kubične odvisnosti pomembna tudi frekvenčna porazdelitev hitrosti.

Naši kraji leže glede na splošno cirkulacijo atmosfere in na splošne vetrove največjih vrtincev v zavetrju Alp. Poleg tega je večina gospodarskih objektov v kotlinah, kjer so zaradi nastajanja kotlinskih jezer hladnega zraka gibanja zraka tako šibka, da jih standardna meteorološka opazovanja in merjenja beležijo kot brezvetrja. Ta zajemajo ponekod v kotlinah več kot 30% opazovalnih terminov.

Veter kot pomemben izvir energije torej v nižinah in kotlinah Slovenije zagotovo ne pride v poštev. Tovrstne investicije bi bile celo v mnogih naših višjih legah ekonomsko problematične.

LITERATURA

|1| Paltridge and Platt: *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*, Amsterdam, Elsevier 1976.

|2| R.A. Anthers et al., *The Atmosphere*, Columbus C.E. Merill Pub. Comp. 1975.

|3| J.L. Glazier et al.,*Effects of aerosol on the local heat budget of the lower atmosphere*, Quart. Jour. RMS, 102 (1976).

|4| A. Hočevar, Z. Petkovšek, *Meteorologija, osnove in aplikacije*. Ljubljana, Partizanska knjiga 1977.

|5| Z. Petkovšek, *Celodnevne megle v Ljubljani*, Razprave - Papers XIII, DMS, Ljubljana 1971.

|6| M. Milanković, *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem*, K. Serb. Akad., Tom 33, Beograd 1941.

|7| Z. Petkovšek, *Dinamika atmosfere*, Obzornik mat. fiz. 22, (1975).

|8| J. T. Houghton, *The physics of atmospheres*, Cambridge, Cambridge Univ. Press 1977.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

ENERGIJA IN VREMENSKI POJAVI

ZDRAVKO PETKOVŠEK

ENERGIJA NEVIHT

Mnogi pojavi v atmosferi (npr. oblaki, padavine, nevihte, megla, rosa, slana itd.) so povezani s faznimi spremembami vode, ki obstaja v atmosferi v vseh treh agregatnih stanjih.

Te fazne spremembe so večinoma povezane z velikimi spremembami energije, ker je izparilna toplota q_i velika. Izparilna toplota je odvisna od temperature. Približno velja

$$dq_i = \Delta c_p dT$$

Razlika specifičnih toplot vodne pare in vode Δc_p je - 2,34 kJ/kgK. Pri temperaturah okrog 0°C, ki prevladujejo v atmosferi oziroma srednji troposferi, je izparilna toplota 2,50 MJ/kg pri izhlapevanju vode in 2,83 MJ/kg pri izhlapevanju ledu. Pri kondenzaciji vodne pare v oblaku se sprošča veliko toplote, kadar nastajajo kapljice, in še več, kadar se iz vodne pare izločajo ledeni kristalčki.

Da sprememba energije ni majhna, kaže naslednja presoja. V labilnem in sorazmerno vlažnem zraku poleti popoldne zakipi v nebo kopast oblak, ki se razširi v nevihtnega in da na površini S = 5km x 5km ploho s povprečno višino padavin h_p = 10 mm, kar ni nenavadno. Masa padle vode je $\rho S h_p$ = = $2{,}5.10^8$kg in sproščena toplota $q_i \rho S h_p$ = $6{,}3.10^{14}$J. Primerjajmo toploto z energijo atomske bombe, ki je razdejala Hirošimo, to je z 10^{14}J, kar ustreza 20 kt TNT. V našem oblaku, ki ni oddal vse vode, se je zaradi kondenzacije vodne pare sprostilo več toplote, kot v 10 "klasičnih" atomskih bombah. K sreči se v oblakih toplota sprošča počasi. Porabi se za vertikalne tokove v oblaku, za nastanek električnih polj, za bliske itd. Rušilnih učinkov na tleh navadno ni. Izjemoma pa viharji in strele, nalivi in toča, ki nastajajo ob nevihtah, lahko povzroče tudi veliko škodo.

Vzdolž ene same hladne fronte, kakršne nas prehajajo v povprečju vsake štiri dni, lahko nastane na tisoče takih neviht, vsekakor pa mnogo padavin. S tem dobimo predstavo o energiji, s katero razpolagajo nekateri vremenski pojavi (npr. fronte). Razumljivo nam postane, da se pojavom v atmosferi ne moremo postavljati po robu. Lahko pa včasih vplivamo nanje na njihovih "občutljivih mestih" in usmerimo razvoj v želeno smer (npr. umetno proženje padavin, obramba proti toči itd.).

ENERGIJA NESTABILNOSTI

Koristen pojem pri obravnavanju dviganja zraka je *energija nestabilnosti*. Vpeljemo jo, ko opazujemo del zraka z maso m, prostornino V in temperaturo T v hladnejši okolici s temperaturo T'. Rezultanta vzgona in teže deluje navpično navzgor

$$F = Vg\rho' - Vg\rho = Vg\rho\,(\rho'/\rho - 1) = gm(T/T' - 1)$$

Upoštevali smo, da sta gostoti ρ' in ρ v obratnem sorazmerju ustreznih temperatur. Pri počasnem dvigu opazovanega toplejšega zraka za dz opravi okolni zrak na njem delo

$$dA = Fdz = mgdz(T-T')/T' = - mr(T-T')dp/p$$

Pri tem smo izrazili višinsko razliko z razliko tlaka $dp = - \rho' g dz$ in

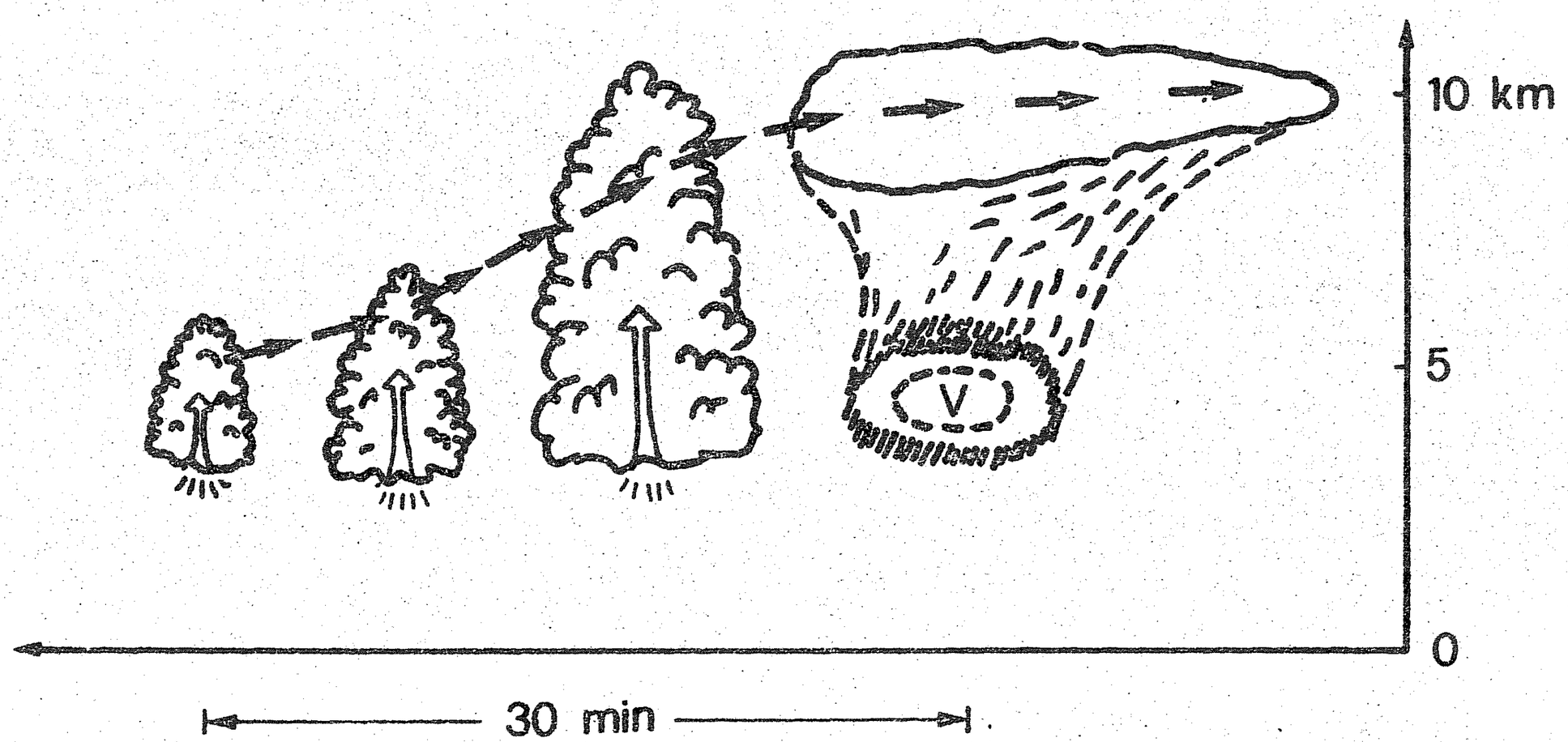
gostoto z $\rho' = pM/RT = p/rT'$, če je $r = R/M = 0{,}29$ kJ/kgK specifična plinska konstanta zraka. Na enoto mase preračunano delo vpeljemo kot energijo nestabilnosti $W = \int dA/m = -r\int_{p_k}^{p_p} (T-T')d\ln p$.

Nenasičena atmosferska plast je nestabilna, če je negativni vertikalni temperaturni gradient γ večji od $\gamma_a = g/c_p$. Nasičena plast pa je nestabilna že, če je $\gamma > \gamma_w$ in je γ_w individualni adiabatni temperaturni gradient nasičenega zraka. Ta je tem manjši (od γ_a), čim višja je temperatura |5| in z njo večja nasičena gostota vodne pare in s tem izdatnejše sproščanje toplote kondenzacije pri dvigu nasičenega zraka.

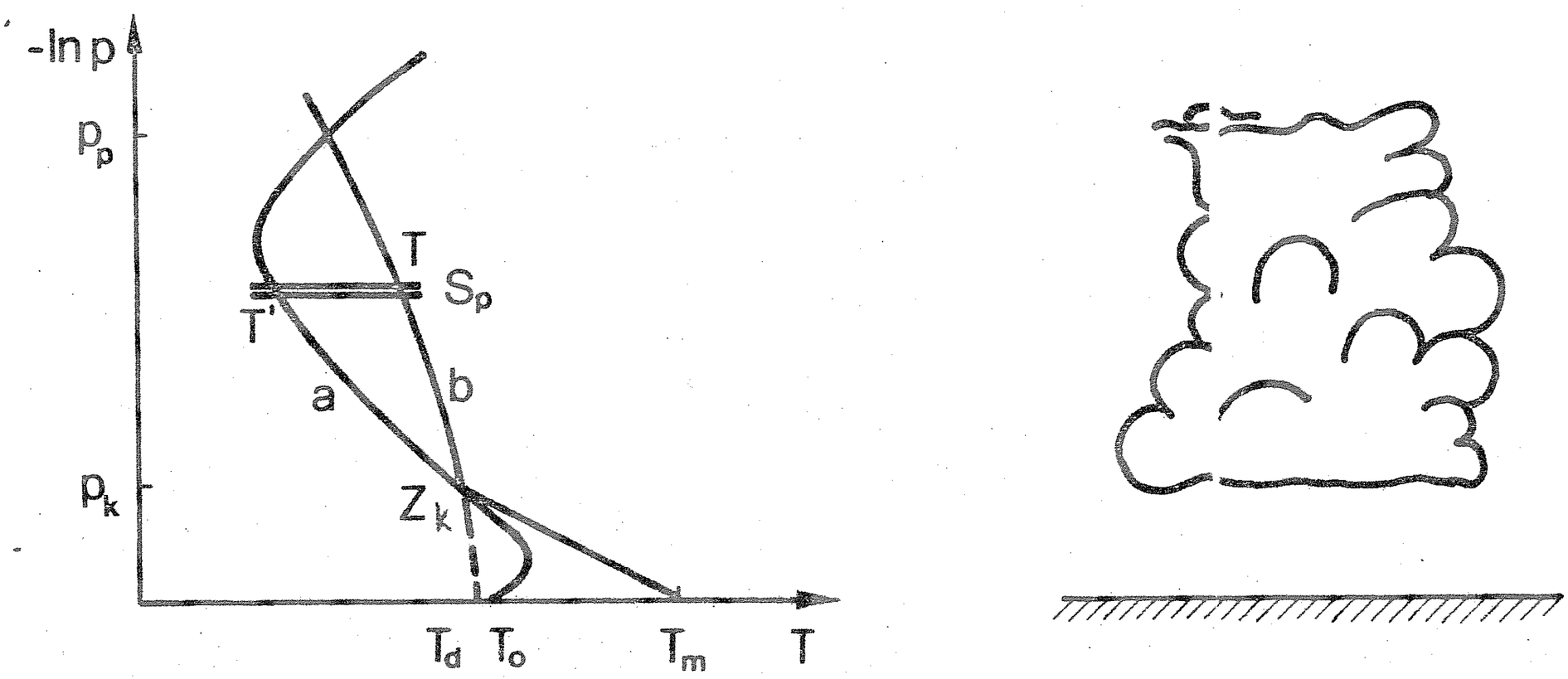
Krivuljo stratifikacije dobimo iz radiosondnih meritev |2|. Za dvig dela zraka od tal do nasičenosti (kondenzacijskega nivoja K_k) je individualni temperaturni gradient γ_a, od tu navzgor pa je γ_w.

Površina, ki jo zaklepata obe krivulji na sl.2 nad Z_k predstavlja energijo nestabilnosti. Očitno je v diagramu T, $-\ln p$ (emagramu), energija nestabilnosti sorazmerna s površino med krivuljama. Predznak je odvisen od temperaturne razlike na vsakem nivoju.

Del zraka z enoto mase, ki se pregreje nad toplejšo podlago, se dvigne do kondenzacijskega nivoja (npr. ploskve 850 mb), kjer postane nasičen. Od tu naprej začne izkoriščati energijo nestabilnosti, ki meri lahko za $\overline{\Delta T} = 10$K do $p_p = 350$ mb celo 4 kJ/kg. Zato ni čudno, da se v labilni atmosferi poleti ob ogrevanju zraka od tal in dviganju do Z_k razvijejo močni vertikalni tokovi in konvektivni oblaki s plohami in nevihtami. Ob nekaj časa trajajočem toku ogrevanega zraka nad površino nekaj več kot 5 km x 5 km bi dobili za skupno maso dvigajočega se zraka čez 10^{11}kg. Energija nestabilnosti zanj bi bila 4.10^{14}J, kar je blizu prej izračunane toplote, ki se sprosti v nevihtnem oblaku ob plohi. Na osnovi termodinamičnih diagramov (npr. emagrama) in nočne radiosondažne meritve lahko določimo energijo nestabilnosti takoj po meritvi, to je 12 ur pred pojavom neviht. Ob prognozi lastnosti bližajoče se labilne zračne mase pa je možno napovedati njeno energijo nestabilnosti in s tem verjetnost za nastanek neviht tudi za nekaj dni vnaprej.



Sl. 1. Razvoj nevihte in tir nekega zračnega dela pri splošnem horizontalnem toku |6|.



Sl. 2. Krivulja stratifikacije (a) in individualnih temperaturnih sprememb pri dvigu od tal (b) v labilni atmosferi.

RAZKROJ MEGLE IN ENERGIJA

Megla je roj v zraku lebdečih drobnih vodnih kapljic, na katerih se sipa svetloba, kar zmanjšuje vidnost pod 1 km. Večina vodnih kapljic naših radiacijskih megel ima premer med 5 in 30 μm. Če se megla gosti, se veča število kapljic, ne da bi kapljice rasle. Število meglenih kapljic navadno tudi ne preseže 100 cm^{-3} |7|. Zato je vodna vsebina megle (in oblakov) navadno majhna - komaj okrog 0,3 g/m^3. Toda prostornina megle je velika. Če sega (kot navadno) megla v Ljubljanski kotlini do sedla Šmarne gore, je prostornina meglenega jezera okrog 180 km^3 in je v njegovi megli kljub majhni vodni vsebini okrog 54 000 ton kondenzirane vode. Če bi hoteli meglo odpraviti, bi ji morali dovesti nad $1{,}3.10^{13}$J toplote samo za to, da bi kapljice megle izhlapele. Obenem bi morali vse skupaj ogreti vsaj za 1 K, da se ne bi vodna para takoj spet kondenzirala. Za to bi porabili še $2{,}5.10^{14}$J. Pri tem pa bi iz tal izhlapelo precej vode (rosa in vlaga v tleh), za kar bi porabili skoraj prav tolikšno toploto. Preračunano na trboveljski premog s sežigno toploto 18 MJ/kg bi pri izkoristku 100% za razkroj megle v Ljubljanski kotlini potrebovali čez 6000 vagonov premoga. Očitno v praksi tega ne bomo poskušali in bomo raje počakali, da bo to opravilo Sonce v dopoldanskih urah.

LITERATURA

|1| Haltiner, Martin, *Dynamical and Physical Meteorology*, New York, McGraw-Hill 1975.

|2| A. Hočevar, Z. Petkovšek, *Meteorologija, osnove in nekatere aplikacije*, Ljubljana, Partizanska knjiga 1977.

|3| Z. Petkovšek, *Dinamika atmosfere*, Obzornik mat. fiz. 22 (1977).

|4| Z. Petkovšek, *Vergleichungen der lokalen Temperaturänderungen im Gebirgsgebiete, Flachland und freie Atmosphäre*, La Meteorologie, (1973).

|5| M. Čadež, *Uvod u dinamičku meteorologiju*, Beograd Savez stud. PMF 1959.

|6| R.R. Rogers, *Short Course in Cloud Physics*, Pergamon 1976.

|7| B.J. Mason, *The Physics of Clouds*, Oxford, Oxford Univ. Press 1971.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

PLANETI NAŠEGA OSONČJA

ANDREJ ČADEŽ

Kot vemo, kroži okrog Sonca poleg Zemlje in Lune še osem planetov. Po oddaljenosti od Sonca si sledijo Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter, Saturn, Uran, Neptun in Pluton. Ti planeti našega Osončja imajo v astronomiji posebno vlogo. Že zelo zgodaj so opazili s prostim očesom, da samo sedem teles na nebu ne vztraja na istem mestu med zvezdami (to so: Sonce, Luna, Merkur, Venera, Mars, Jupiter in Saturn). Grki so izdelali zamotane teorije za napovedovanje leg planetov. Vendar je šele kakih 1500 let kasneje Kopernik pokazal na nujnost drugačnega pogleda na planete. Po opazovanjih Tyha Bracheja in Keplerjevih računih je Newton formuliral svoj gravitacijski zakon. Ta zakon je dobrih 200 let blestel kot eden največjih dosežkov človeškega uma. Iz enačb, ki sledijo iz Newtonovega zakona, so lahko z dotedaj neslutene natančnostjo napovedali lego planetov. Samo gibanje Urana se ni povsem ujemalo z napovedmi. Le Verrier in Adams sta sklepala, da je to posledica gravitacijskega vpliva do tedaj še neznanega planeta. Iz odklonov Urana od napovedanih leg sta izračunala lego, kjer naj bi bil neznani planet. Po kratkem iskanju je Galle res uspel odkriti planet, ki so mu dali ime Neptun. To je bil velik uspeh Newtonove mehanike.

Kot je bilo opazovanje gibanja planetov odločilno za potrditev Newtonove mehanike, je bilo tudi zelo pomembno za dokaz še boljše Einsteinove teorije gravitacije. Lege planetov so se odlično ujemale z napovedmi Newtonove mehanike, samo Merkur je kazal odklone. Njegov perihelij se v stoletju premakne za 43" več, kot so napovedali. Tudi to so dolgo pripisovali še neodkritemu planetu znotraj Merkurjevega tira. Zelo so se trudili, da bi ta planet odkrili, a zaman. Einsteinova teorija pa je takoj pojasnila razliko kot posledico spremenjenega Newtonovega zakona gravitacije v bližini velike mase - Sonca.

Študij gibanja planetov ima razen spoznavnega pomena za razvoj znanosti še povsem praktičen pomen. Ob tem študiju se je razvila analitična mehanika, ki je bila najpomembnejša teoretska panoga v znanosti devetnajtega stoletja. Njene metode so bile nepogrešljive tudi pri razvoju kvantne mehanike v tem stoletju.

Preglednica 1 kaže nekatere osnovne fizikalne lastnosti planetov Osončja. Kratek pogled nanjo pokaže, da lahko planete razdelimo na dve skupini. Prvi štirje planeti so blizu Sonca, imajo približno enake mase in enako povprečno gostoto. Naslednji štirje planeti od Jupitra do Neptuna so dosti večji in imajo približno stokrat večjo maso. Zadnji planet Pluton pa je nekaj posebnega. Zaradi velike oddaljenosti je še razmeroma slabo raziskan. Nekateri mislijo, da je bil nekoč Neptunov satelit.

V prostoru med planeti iz prve in druge skupine kroži okrog Sonca na razdaljah od 2,1 do 3,2 a.e.* še množica asteroidov. Znanih je okrog 1600 asteroidov. Verjetno pa je v tem prostoru še kakih 30 000 asteroidov, ki bi jih bilo mogoče videti s sodobnimi teleskopi. Skupno maso asteroidov cenijo na 10^{22}kg, kar je manj kot stotina mase Zemlje.

Merkur je najlažji planet v Osončju. Zaradi visoke temperature in nizke ubežne hitrosti ni mogel zadržati atmosfere. Atmosferski tlak na njem ceni-

* 1 astronomska enota (a.e.) je enota za merjenje razdalje, to je povprečna razdalja Zemlja - Sonce.

Preglednica 1

Planet	razdalja do Sonca	hitrost vrtenja okrog lastne osi	masa*	polmer	gostota	gostota energ. toka, ki prihaja s Sonca*
Merkur	0.39 a.e.	59^d	$0.05 m_z$	2400km	$5.4 g/cm^3$	$6.7\ j_o$
Venera	0.72	243^d	0.22	6100	5.1	1.9
Zemlja	1.00	$23^h\ 56^m\ 4.1^s$	1.00	6340	5.52	1.00
Mars	1.52	$24^h\ 37^m\ 22.6^s$	0.12	3400	3.97	0.43
Jupiter	5.20	$9^h\ 50^m$	317.80	71000	1.33	0.04
Saturn	9.45	$10^h\ 14^m$	95.2	60000	0.68	0.01
Uran	19.18	$10^h\ 49^m$	14.5	24000	1.60	0.0031
Neptun	30.07	15^h	17.2	22000	2.25	0.001
Pluton	39.44	6.39^d	0.1 ?	3000 ?	4 ?	0.0006

* m_z je masa Zemlje, j_o pa solarna konstanta, to je gostota energijskega toka, ki prihaja s Sonca na vrh zemeljskega ozračja

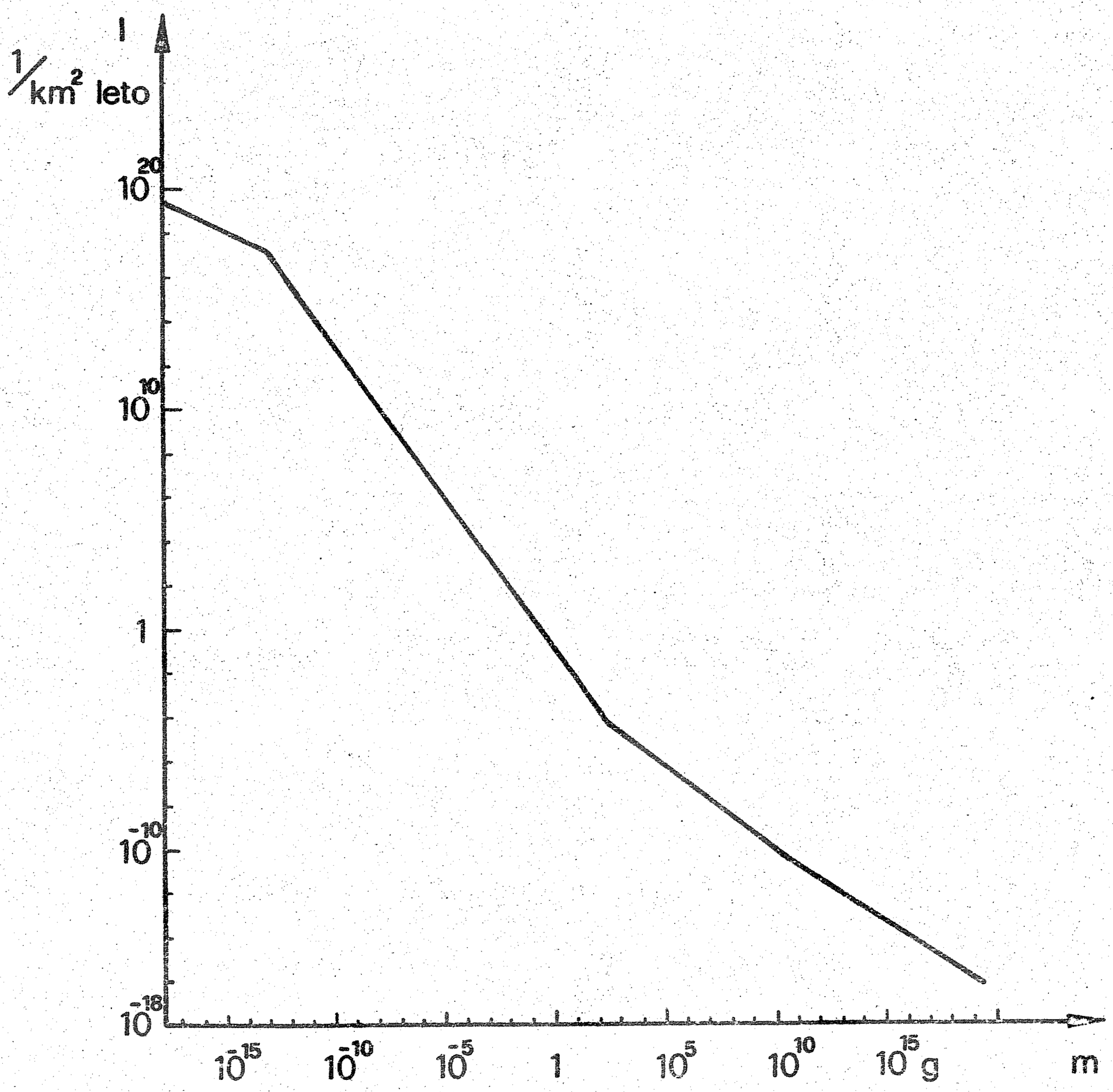
Preglednica 2

Temp., ki bi jo imel planet, če bi zelo dobro prevajal toploto	temp. topl. izolirane črne površine na planetu s Soncem v zenitu	izmerjena temp. na površini	ubežna hitrost
M. 445 K	633 K	100-700 K	4.17 km/s
V. 325	464	750	10.3
Z. 277	394	300	11.1
M. 255	320	220	5.09
J. 122	173	110-150 *	61
S. 90	128	95 *	37
U. 63	90	130-220 *	23
N. 50	71	180 *	25
P.			5 ?

* Ni jasno, kaj je površina.

jo na manj kot 2.10^{-9} milibarov. Njegova površina je močno podobna Lunini. Ostankov vulkanske aktivnosti ni opaziti, pač pa so nekatere redke razpoke morda ostanki sproščanja napetosti med ohlajanjem. Površina je pokrita s kraterji, ki so nastali ob padcih meteoritov.

Meteoriti so zelo pomembni za razumevanje morfoloških značilnosti Merkurja, Lune in Marsa ter deloma tudi nekaterih značilnosti na Zemlji. Z merjenji so ugotovili povprečni tok meteoritov na Lunino površino (Sl. 1). Velika večina meteoritske mase pade na Luno in druge člane Osončja v obliki zelo drobnega prahu (Sl.1). Povečini gre za prašne delce mikronskih velikosti, ki kot zelo droben sneg prekrivajo površine planetov. Naletavanje tega "snega" pa je zelo počasno, saj traja milijon let, da ga nanese 1 mm. V mnogih milijonih let, odkar obstaja Merkur, pa je vendar naneslo več kot meter prahu, ki je kot sneg zasul nekatere prvotne vdolbine na površini.



Sl. 1. Število meteoritov I, ki padejo na kvadratni kilometer Lunine površine v enem letu in ki imajo večjo maso od m

Med meteoriti so tudi redki z veliko maso (Sl. 1). Na 1 kg meteoritske snovi pride približno 1 meteorit z maso večjo od 1 g. Meteorit z večjo maso od 1000 ton pa pride v povprečju šele na milijardo ton meteoritske snovi. Meteoriti z veliko maso ob padcu na površino planeta ustvarijo velike kraterje, ki so značilni za površino Lune in Merkurja. Nastale kraterje potem počasi zasipa meteorski prah. Z merjenjem višine prahu v posameznih kraterjih so prišli do pomembnih podatkov o njihovi starosti in o gostoti meteoritskega prahu v različnih obdobjih Osončja.

Zemlja in Venera sta notranja planeta, ki se močno razlikujeta od Merkurja. Zadržala sta atmosfero, ker je ubežna hitrost z njune površine precej večja kot pri Merkurju. Verjetno pa je pomagalo zadržati atmosfero tudi magnetno polje, ki je na Zemlji in Veneri močnejše kot na Merkurju. Venerina atmosfera je veliko bolj neprijazna od naše: na površini je tlak skoraj 100 atmosfer, temperatura pa je višja od 450°C. Zaradi visoke temperature na Venerini površini ne more obstajati voda v tekočem stanju. Po podobnosti z Zemljo bi pričakovali, da je Venerina voda izhlapela v atmosfero. Meritve pa tega niso potrdile. Venerino atmosfero sestavlja v glavnem CO_2, vode je le 0,01%. Zakaj je Venera tako suh planet, lahko samo ugibamo.

Po morfoloških značilnostih sta si Zemlja in Venera verjetno zelo blizu. Meteoritskih kraterjev, ki so značilni za Merkur, praktično ni. Vzrok za to je močna erozija zaradi atmosferskih pojavov, ki v kratkem času popolnoma zabriše vsako sled meteoritov. Površino Zemlje in Venere določa predvsem tektonska aktivnost. Vemo, da je Zemlja v razmeroma kratkem obdobju 150 milijonov let zaradi tektonske aktivnosti doživela celo razpolovitev prvotnega kontinenta na Afriko in Južno Ameriko. Med tem časom se je tudi Indija zaletela v Azijo in iz prejšnjega morskega dna med celinama se je dvignila Himalaja. Po radarskih posnetkih Venere sklepajo, da so tudi tam gorske verige, ki so posledica podobnih sprememb kot na Zemlji.

Planet Mars je po svojih lastnostih med Zemljo in Merkurjem. Ima zelo redko atmosfero (tlak meri samo nekaj milibarov) in kaže znake tektonske aktivnosti, meteoritskega bombardiranja ter atmosferske in vodne erozije. Voda sama pa je na Marsu precej redka. Ni znano, kam je izginila voda, ki naj bi bila izdolbla nekatere struge v reliefu planeta. Nekaj vode je še v ledenih kapicah na tečajih. Te kapice so verjetno zmes vode in zmrznjenega ogljikovega dioksida.

O zunanjih planetih je mnogo manj znanega kot o notranjih. Zaradi velike mase so lahko obdržali celo vodik. Gosta atmosfera preprečuje, da bi videli njihovo površino, če jo sploh imajo. Kaže, da je fizika teh planetov precej drugačna od fizike notranjih planetov in je danes še ne poznamo dobro. Obetamo pa si lahko, da bosta vesoljski sondi Voyager, ki sta bili lani izstreljeni na dolgo pot do Jupitra, Saturna in morda do Urana in Neptuna, prinesli nove podatke o velikih planetih.

LITERATURA za strani od 210 - 217

|1| F. Dominko, *Najnovejša spoznanja o fiziki planetov Osončja*, Obzornik mat.fiz. 24 (1977) 109.
|2| Science 183 (1974) (Celotna izdaja je posvečena Veneri).
|3| Science 185 (1974) (Izdaja je posvečena Merkurju).
|4| K. Beatty, *Voyaging to the Outer Planets*, Sky and Telescope 54 (1977)95.
|5| W.M. Kaula, *An Introduction to Planetary Physics*, New York, Wiley 1968.
|6| R. Jastrow, M.H. Thompson, *Astronomy - Fundamentals and Frontiers*, New York, Wiley 1972.
|7| G.P. Kuiper (editor), *The Solar System*, Vol. I, *The Sun*, Chicago, The Univ. of Chicago Press 1954.
|8| J.C. Brandt, *The Sun and Stars*, New York, McGraw Hill 1966.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

S O N C E

ANDREJ ČADEŽ

Za ljudi na Zemlji je Sonce izjemna zvezda, ki jim omogoča obstoj. Tudi za astronoma je Sonce izjemno, saj le pri njem vidi podrobnosti na površju, medtem ko se zdijo vse druge zvezde v teleskopu točkaste. Sicer pa je Sonce že lo povprečna zvezda, kakršnih je v naši Galaksiji na desetine ali stotine milijonov.

Poglejmo preglednico, ki kaže nekatere osnovne podatke o Soncu:

		Način merjenja:
povpr. razdalja Z - S	a = 149 598 000 km	merjenje razdalje do Venere z radarjem
navidezni premer	d = 32'	
polmer	r_o = 696 000 km	iz nav. premera in razdalje Z - S
masa	M_o = 1,99.10^{30}kg	iz obh. časov planetov in razdalj (po Kepl. zakonu) ($4\pi^2a^3 = GM_oT^2$)
povprečna gostota	ρ = 1,41 g/cm^3	
solarna konstanta	j_o = 1,358 kW/m^2	merj. z letali, ki letijo zelo visoko
izsev	3,90.10^{26}W	$L_o = 4\pi a^2 j_o$
temperatura na površini	T_o = 5800 K	$L_o = 4\pi R_o^2 \sigma T_o^4$
hitrost vrtenja	sončne pege / fotosfera	gibanje peg in dopplerski premiki v fotosferi
ekvator	25.0 dni / 26.0	
30°	26.4 / 27.3	
60°	/ 32.5	
80°	/ 35	
magnetno polje	v povprečju na površini 10^{-4}T (= 1 gauss), polje niha in je nepravilno, v viharnih področjih doseže nekaj 10^{-2}T, v pegah pa le malo manj kot 1 T.	zeemanska razcepitev spektralnih črt
sestav (v deležih mase)	H 75%	
	He 25%	
	O 0.8	
	C 0.3	sončni absorpcijski spekter
	N 0.2	
	Ne 0.2	
	Si 0.06	
	Fe 0.04	

Ti podatki sestavljajo nekakšno osebno izkaznico Sonca. Po njih in morda drugih neposredno merljivih količinah bi radi ugotovili kaj več o nastanku

in življenju Sonca.

Kdaj je nastalo Sonce, lahko sklepamo po starosti Zemlje. To je mogoče oceniti po starosti nekaterih kamnin na osnovi radioaktivnih izotopov. Če ugotovimo, da je izotop le razpadni produkt drugega izotopa, moremo iz razmerja koncentracij obeh določiti čas nastanka drugega. Do danes so ugotovili že vrsto sorodstvenih vezi in tako je mogoče s precejšnjo gotovostjo določiti starost kamnin od trenutka, ko so se strdile. Tako so ugotovili, da so najstarejše kamnine na Zemlji stare okrog 4,5 milijarde let. Povsem upravičeno lahko domnevamo, da Sonce ni mlajše od Zemlje, torej je staro vsaj okrog 4,5 milijarde let. Še več: našli so milijardo let stare fosilne alge. Vemo, da take alge ne bi mogle obstajati, če bi bila temperatura Sonca bistveno drugačna od današnje. Sonce torej sveti z enako močjo vsaj milijardo let. To dejstvo je povzročalo astrofizikom velike težave, ker dolgo niso mogli ugotoviti, odkod dobiva Sonce energijo, ki jo seva.

Pomnožimo današnji izsev Sonca z njegovo starostjo, pa ugotovimo, da je Sonce od nastanka izsevalo $5{,}5.10^{43}$J. Vsak kilogram sončne snovi je prispeval v povprečju po $2{,}8.10^{13}$J, to je nekaj stotisočkrat več, kot bi lahko dobili pri kemičnem gorenju. Letos bo poteklo ravno štirideset let, odkar je uganka rešena. Bethe in Critchfield sta namreč 1938 izračunala, kako potekajo jedrske reakcije v Soncu in s tem pojasnila, odkod Soncu energija.

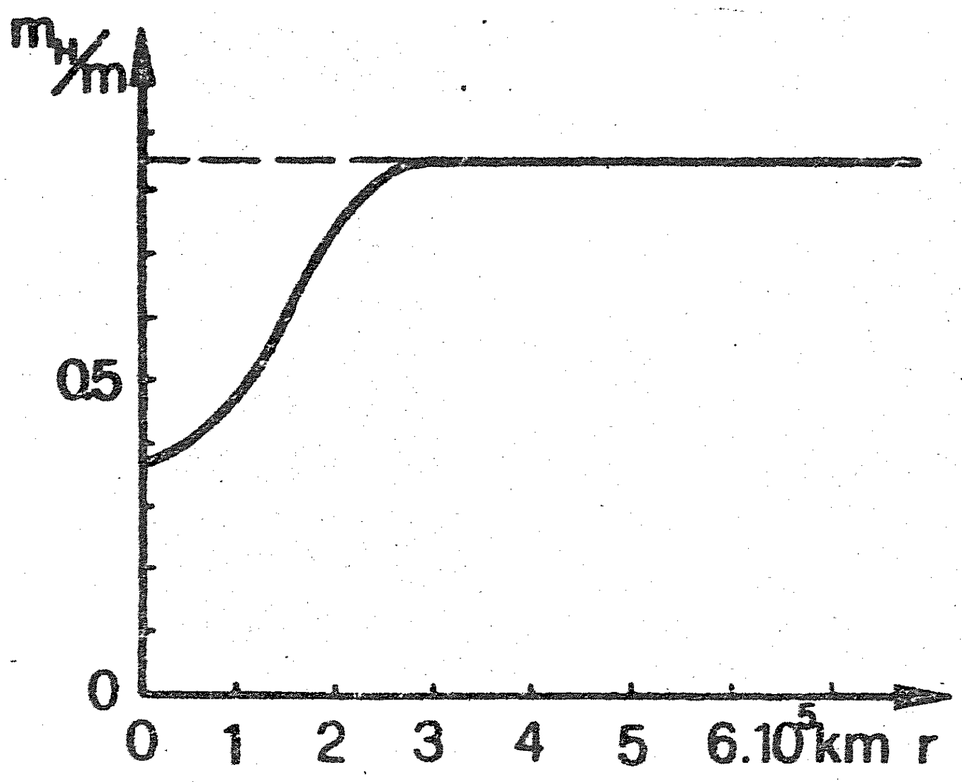
Če se zlije 1 kg vodika v helij, se sprosti $7{,}2.10^{14}$J energije. Sonce je torej v vsem svojem življenju porabilo le okrog 4% vsega vodika, ki ga je imelo ob rojstvu. Po tem bi sklepali, da je Sonce še zelo mlado. To ni popolnoma res, čeprav še ni razloga za strah, da bo kmalu ugasnilo. Jedrske reakcije lahko potekajo le v globinah, v katerih je temperatura višja od približno 10^7K. Prostornina, v kateri je pogoj izpolnjen, zajema le okrog 10% celotne mase Sonca. Po tem lahko računamo, da bo Sonce svetilo tako kot danes še nadaljnjih 4,5 milijarde let.

Z odkritjem pomena jedrskih reakcij v Soncu in z razvojem kvantne mehanike je astrofizika dobila močno orodje za študij notranjosti Sonca. Izdelali so numerične modele Sonca, ki dajo porazdelitev temperature in gostote v notranjosti, gibanje mas itd. (Sl. 1).

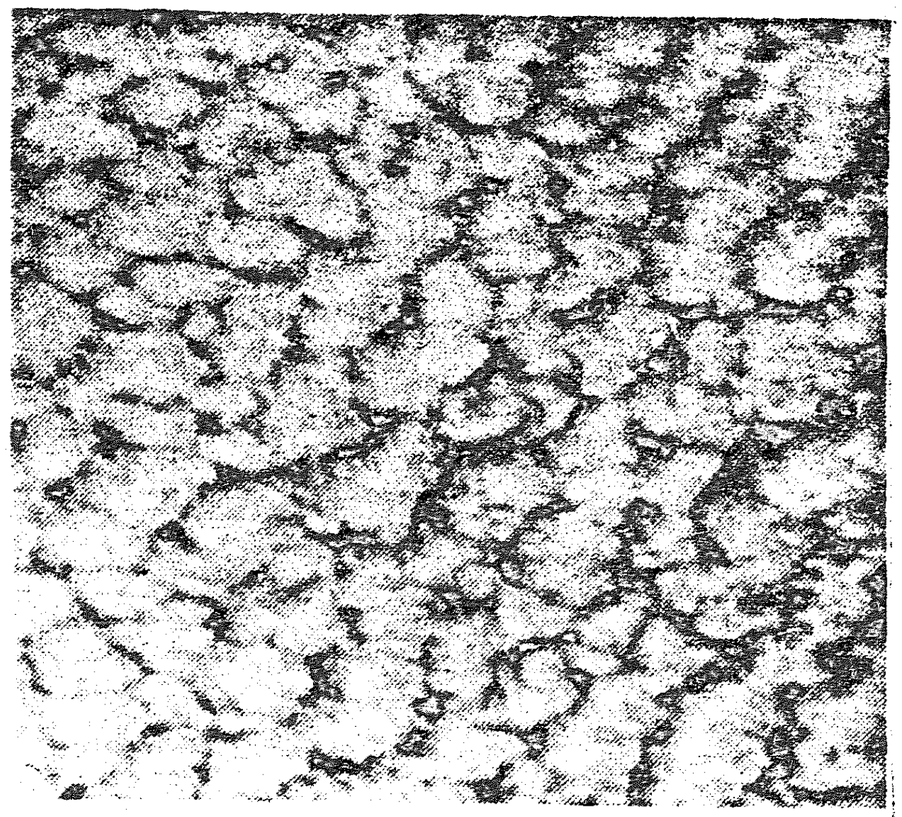
Vidimo, da so v notranjosti izjemne razmere: temperatura v središču je 15.10^6 K, gostota pa okrog 150 g/cm^3, kar je 13-krat več od gostote svinca. Večina sončne mase je zbrana blizu sredice. Na površini je gostota le še okrog 10^{-7} g/cm^3, to je desettisočkrat manj od gostote ozračja na površini Zemlje. Modeli so tudi pokazali, da je notranjost Sonca precej mirna, čeprav tečejo tam jedrske reakcije. Jedrske reakcije so namreč za naše razmere zelo počasne, saj proizvaja vsak kilogram snovi v povprečju le okrog 2.10^{-3} W. Ta energija se v vroči sončni notranjosti brez težav prenaša s sevanjem proti površini. Drugače pa je v vrhnjih plasteh Sonca. Temperatura je tam precej nižja. Sončna snov je zato dosti manj prozorna kot v notranjosti in tako se energija iz notranjosti ne more s sevanjem odvajati na površje. V površinskih plasteh nastanejo konvekcijski tokovi, ki odnašajo energijo na površje. Konvekcija je zelo podobna tisti, ki jo opazujemo v loncu olja na vročem štedilniku. Deli olja na dnu se hitro segrejejo in postanejo lažji od okolice. Zato se dvigajo, hladnejše zgornje plasti pa padajo proti dnu. Tako se razvije celična struktura konvekcijskih tokov. Do podobnega pojava pride tudi v zemeljskem ozračju, ko Soce segreje površino Zemlje (Sl. 2).

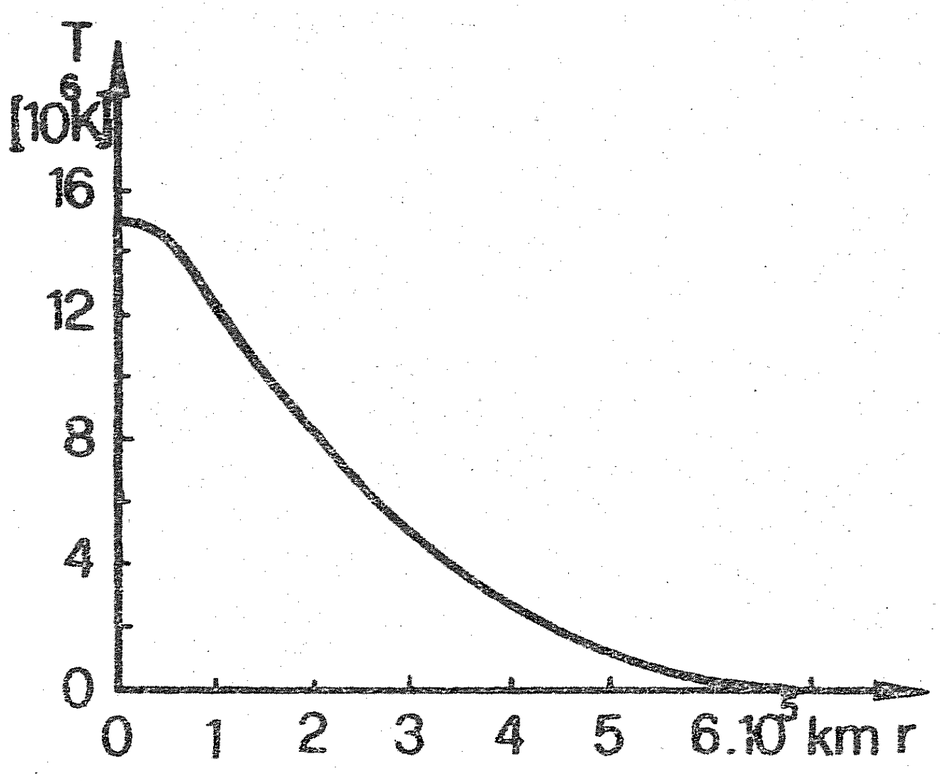
Rečemo lahko, da na osnovi numeričnih modelov razmeroma dobro razumemo osnovne fizikalne mehanizme, ki uravnavajo življenje Sonca in določajo njegove lastnosti. Seveda pa je ostalo še mnogo odprtih vprašanj. Na kratko opozorimo na nekatere zanimivosti na sončni površini, ki so že dolgo predmet intenzivnih raziskav.

Sonce je plinasta krogla, katere vrhnje plasti imajo desettisočkrat manjšo gostoto od našega ozračja. Kljub temu lahko govorimo o *sončni površini*.

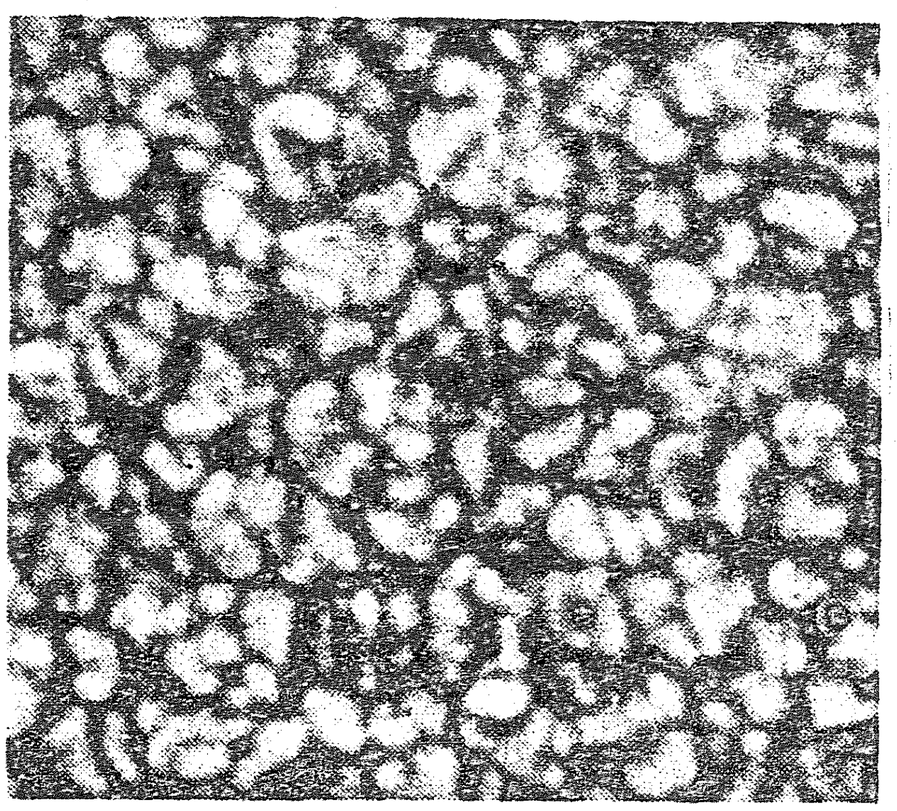


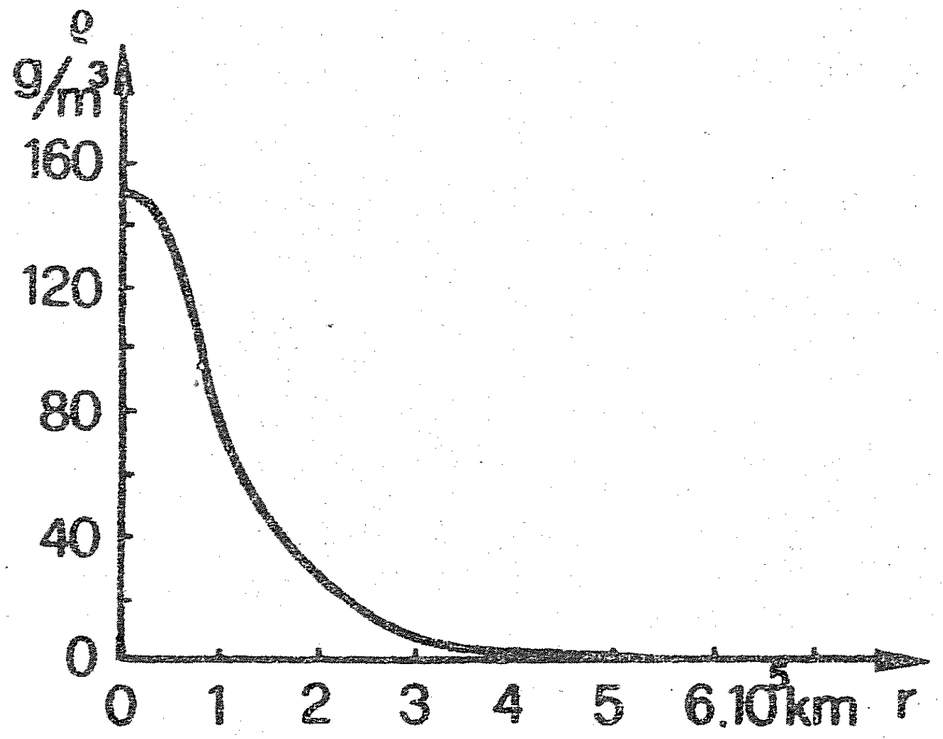
a)



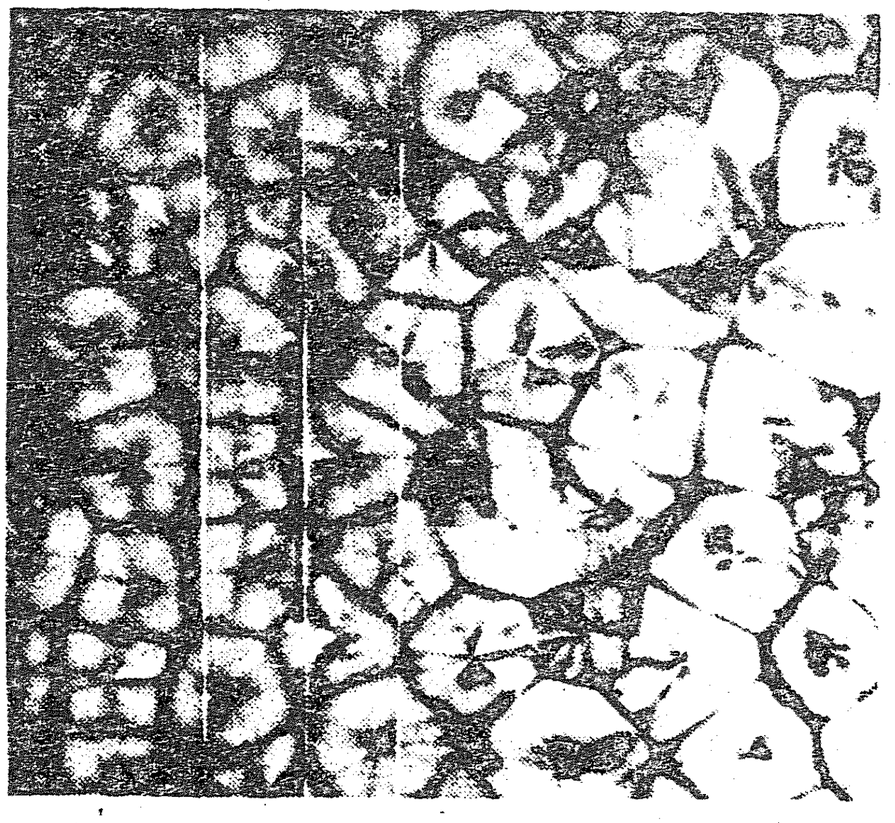


b)





c)



Sl. 1. Delež vodika (a), temperatura (b) in gostota (c) v Soncu v odvisnosti od razdalje od središča.

Sl. 2. Slika oblakov, ki nastanejo v hladnejših konvekcijskih celicah v zgornjih plasteh ozračja (a), slika sončne fotosfere, temnejše proge so celice z nižjo temperaturo (b) in slika turbulentnega gibanja kapljevine v loncu, ki ga grejemo na dnu.

Snov je v Soncu zelo vroča, zato v njej neprestano nastajajo novi fotoni. Velika večina se jih absorbira v neposredni okolici nastanka. Ker pa so spodnje plasti bolj vroče od gornjih, obstaja presežek fotonov, ki v povprečju odnašajo energijo proti površju. Dovolj visoko pa je snov že tako redka, da se foton, ki nastane v taki plasti, nima več kje absorbirati in pobegne. Plast, v kateri nastane največ fotonov, ki pridejo do nas, imenujemo površino Sonca. Taka površina seveda ni povsem ostro definirana, ampak je odvisna od valovne dolžine svetlobe, v kateri opazujemo. Fotoni, ki lahko vzbudijo prehode med stanji atomov v sončevi atmosferi, se tam veliko bolj absorbirajo kot drugi fotoni. Taki fotoni prihajajo zato iz višjih plasti kot drugi. Ker so višje plasti hladnejše, oddajajo manj fotonov in zato vidimo absorpcijske črte v spektru sončne svetlobe. Kljub tem razlikam pa se globina atmosfere za različne valovne dolžine ne razlikuje za kaj več kot za 400 do 500 km, kar je zelo malo v primeri z radijem Sonca.

Eden od najzanimivejših pojavov na sončni površini so *sončne pege*. Pege je opazil že Galilei, kasneje pa je Schwabe dolga leta risal njihove vsakodnevne lege in oblike in 1611 ugotovil, da število peg niti v grobem ni konstantno. Pege se pojavljajo in izginjajo v nekakšnem kvaziperiodičnem enajstletnem ciklu. Tega cikla še niso uspeli pojasniti. Kljub temu je znanje o pegah že zelo bogato. Pege so temnejša področja nepravilnih oblik na sončni površini. Njihove velikosti so zelo različne. Najmanjše pore - je komaj mogoče razločiti s teleskopom, največje, ki so zelo redke, pa merijo tudi petino sončnega radija, to je 150 000 km. Povprečna velikost peg je okrog 10 000 km. Pege se ponavadi javljajo v parih ali pa v nepravilnih skupinah v bližini sončnega ekvatorja. Dvojica peg je vedno orientirana vzporedno s sončnim vzporednikom in nikdar z meridianom. Spektroskopske meritve so pokazale, da je v pegah dokaj močno magnetno polje, tudi do nekaj desetin tesla. V eni pegi od dvojice je severni pol, v drugi pa južni: magnetne silnice izvirajo iz ene pege in se stekajo v drugo.

Okvirno pojasnimo nastanek pege takole: Sonce se vrti okrog svoje osi, vendar ne kot togo telo: ekvator se vrti hitreje kot pola. Podobno kot na Zemlji je tudi na Soncu razmeroma šibko dipolno magnetno polje. O tem nas prepričajo slike sončne korone ob mrkih. Vroča sončna snov razmeroma dobro prevaja elektriko, zato "nosi" magnetne silnice s seboj. Zaradi diferencialne rotacije se potem silnice navijajo in postajajo vse gostejše in vse bolj vzporedne z vzporedniki. Na sončno snov deluje "magnetni vzgon", ki končno potisne navito polje skoti površino; pojavi se dvojica peg. Ta razlaga pojasni, zakaj so pege v dvojicah ali gručah, zakaj so nepravilnih oblik in zakaj je dvojica vzporedna s sončnimi vzporedniki ter še nekaj drugih pojavov..

S pegami so povezana dogajanja na Soncu, ki vplivajo tudi na razmere na Zemlji. Že dolgo je znano, da Sonce močno vpliva na radijske zveze. V zadnjem času pa zbirajo dokaze o vplivu sončne aktivnosti na vreme in na naše počutje. Baje je naša dobra ali slaba volja do neke mere odvisna od števila nabitih delcev v zraku. Gostota nabitih delcev (kakih 100 delcev/cm^3) pa je predvsem odvisna od sončne aktivnosti. Raziskave Sonca so prinesle mnoga nova spoznanja, ki so veliko prispevala k razvoju astrofizike zvezd, še več pa so v zadnjem času povedale o neposrednem vplivu Sonca na naše okolje.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

SVETLOBA IN LASERJI

DRAGO ŠULEK

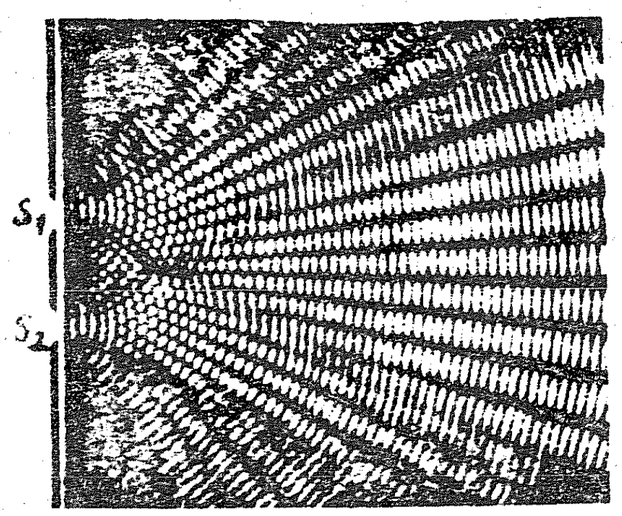
Oko je naše najpomembnejše čutilo. Z vidom smo tesno povezani z dogajanji v naravi. Svetloba posreduje največji del informacij o vsem, kar se dogaja okrog nas na Zemlji in kar se je zgodilo v vesolju takrat, ko je tam nastala svetloba, ki danes prihaja do nas. Pomen sončne svetlobe v širšem smislu je za življenje na Zemlji še posebno velik. Fotosinteza omogoča življenje na Zemlji. Od nje izvirajo tudi zaloge premoga, nafte in zemeljskega plina. Razumljivo je, da je fizika posvečala v vseh obdobjih svojega razvoja veliko pozornost svetlobi in pojavom, ki so z njo v zvezi.

ZGODOVINSKI PREGLED ZAMISLI IN SPOZNANJ

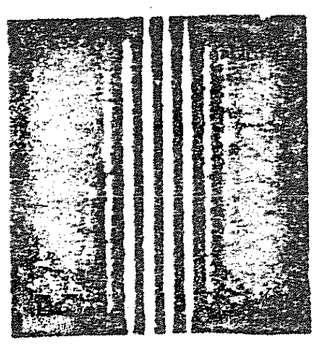
Do sredine 16. stoletja je bilo naravoslovje omejeno na opazovanje naravnih pojavov, predvsem na nebu, ter na poskuse, da bi jih pojasnili s filozofsko usmerjenimi razpravami in hipotezami. Galilei (1564 - 1642) velja za prvega znanstvenika, ki se je trudil, da bi svoje hipoteze dosledno preskusil z eksperimenti. Vedel je, da vidimo predmete zaradi svetlobe, ki pada nanje in se od njih odbija. S pošiljanjem svetlobnih signalov s hriba na hrib je poskušal izmeriti njeno hitrost. Seveda mu s tedanjimi napravami to ni uspelo. Toda že misel, da svetloba potuje s končno hitrostjo, je dokaz, kako daleč je bil Galilei pred sodobniki.

V 17. stoletju so razvili o svetlobi dve teoriji. Huygens (1629 - 1695) je na osnovi širjenja, odboja in loma trdil, da je svetloba valovanje (*valovna teorija*), Newton (1642 - 1727) pa je te pojave pojasnil s curki delcev (*delčna teorija*). Zaradi Newtonove avtoritete je zmagala delčna teorija. Tudi ko je Youngu (1773 - 1829) 1801 uspel interferenčni poskus na dveh režah (Sl. 1), ki ga je mogoče pojasniti le z valovno teorijo, delčne teorije niso zavrgli.

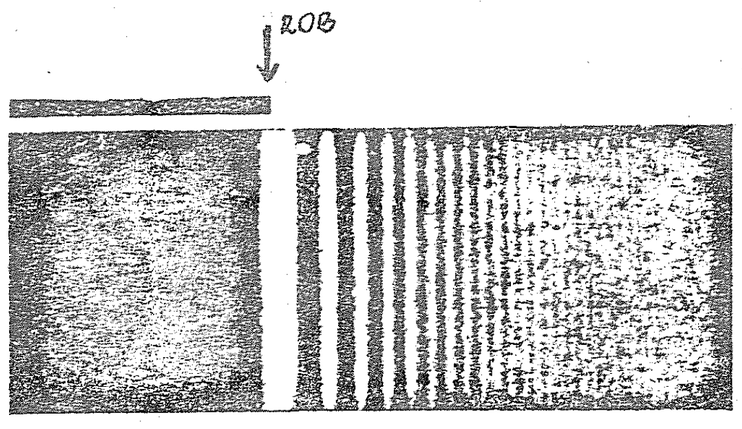
1815 je Fresnel (1788 - 1827) na osnovi valovne teorije matematično obdelal uklonski sliki na široki reži in na ostrem robu (Sl. 2). Tudi to za zagovornike delčne teorije še ni bilo dovolj. Poisson (1781 - 1840) je 1818 s Fresnelovo teorijo uklona ugotovil, da mora biti v sredini sence za okroglo ploščico, osvetljeno s svetlobo iz majhnega izvira, bela točka. Napoved se je zdela Poissonu absurdna in jo je uporabil kot dokaz, da je valovna teorija uklona napačna. Toda Fresnel je napravil poskus in dobil nepričakovan rezultat: belo točko v sredini sence krožne ploščice (Sl. 3). Šele to je pomenilo zmago valovne teorije. Ni pa bilo jasno, kaj valuje v svetlobi.



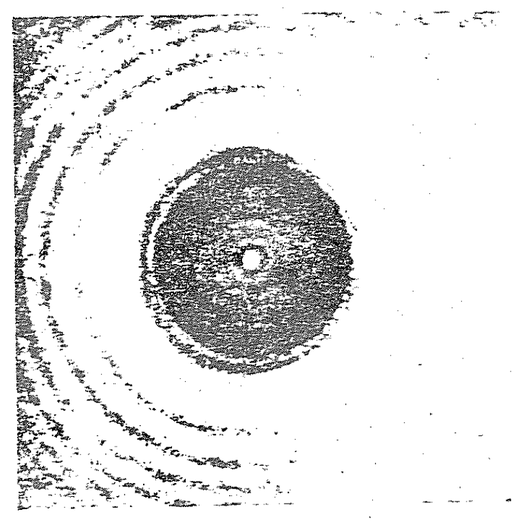
Sl. 1. a) Model Yungovega poskusa



b) Youngov poskus s svetlobo - interferenčne proge na zaslonu



Sl. 2



Sl. 3

V prvi polovici 19. stoletja so Oersted, Ampere in Faraday povezali v celo to magnetne in električne pojave. Maxwell (1831 - 1879) je 1864 dal zakonom za električno in magnetno polje pregledno matematično obliko. Na osnovi svo jih enačb je napovedal elektromagnetno valovanje, ki se širi s takrat že iz merjeno hitrostjo svetlobe. Hertzu (1857 - 1894) je uspelo dobiti valove, ki jih je napovedal Maxwell. Tedaj je postalo jasno, da je svetloba elektro magnetno valovanje.

Toda zgodba o svetlobi še ni končana. Komaj je bila svetloba spoznana za elektromagnetno valovanje, so se pojavili novi problemi. Z Maxwellovo teorijo ni bilo mogoče pojasniti spektra svetlobe, ki jo seva črno telo. Še trši oreh je bil 1899 odkriti fotoelektrični pojav (fotoefekt). Pot iz zagate je 1900 nakazal Planck (1858 - 1947). 1905 jo je s preprosto razlago fotoefekta podkrepil Einstein (1879 - 1955). Elektromagnetno valovanje ne izmenjava energije z elektroni in drugimi delci zvezno, ampak v drobcih - *kvantih elektromagnetnega polja* ali *fotonih*. 1916 je Millikan s poskusom potrdil Einsteinovo enačbo:

$$W_k = h\nu - W_o$$

V njej je W_k največja kinetična energija izbitih elektronov, $h\nu$ energija fotonov in W_o izstopno delo, to je najmanjša energija fotonov, potrebna za izbitje elektrona iz snovi.

Fiziki so se morali sprijazniti s fotoni. Svetloba se širi, uklanja in interferira kakor valovanje, njena energija pa je razdrobljena na fotone, ki jih obravnavamo kot delce. Emisija in absorpcia fotonov je osnova za študij energije atomov. Energija nastalega ali absorbiranega fotona je enaka spremembi energije atoma: $h\nu = W_2 - W_1$. Natančne metode spektralne analize omogočajo študij energijskih stanj atomov in molekul.

Kazalo je, da v optiki ne moremo več pričakovati nobenih velikih novosti. 1960 pa je Maiman zgradil prvi *laser*. Teorijo so prej pripravili Townes v ZDA ter Basov in Prohorov v SZ. Laserji so danes v množični rabi kot svetila, katerih svetloba se odlikuje po *enobarvnosti* in *koherentnosti*.

Z lasersko svetlobo se je odprlo novo področje - *nelinearna optika*. Pri poskusih se je pokazalo, da pride pri širjenju močnih curkov laserske svetlobe skozi mnoge snovi do prej neznanega medsebojnega učinkovanja med svetlobo in snovjo. Fazna hitrost svetlobe ni odvisna samo od frekvence, temveč tudi od gostote svetlobnega toka. V spektru svetlobe se pri prehodu skozi snov pojavijo mnogokratniki frekvence osnovnega valovanja. Če se skozi snov širi ta hkrati dva svetlobna curka, pride do njunega medsebojenga učinkovanja. Oboje je v nasprotju z načelom linearne superpozicije valovanj. Maxwellovo teorijo elektromagnetnega polja je treba dopolniti in poiskati meje veljavnosti načela linearne superpozicije, ki smo ga v optiki jemali za splošno veljavno.

ENOBARVNOST IN KOHERENTNOST

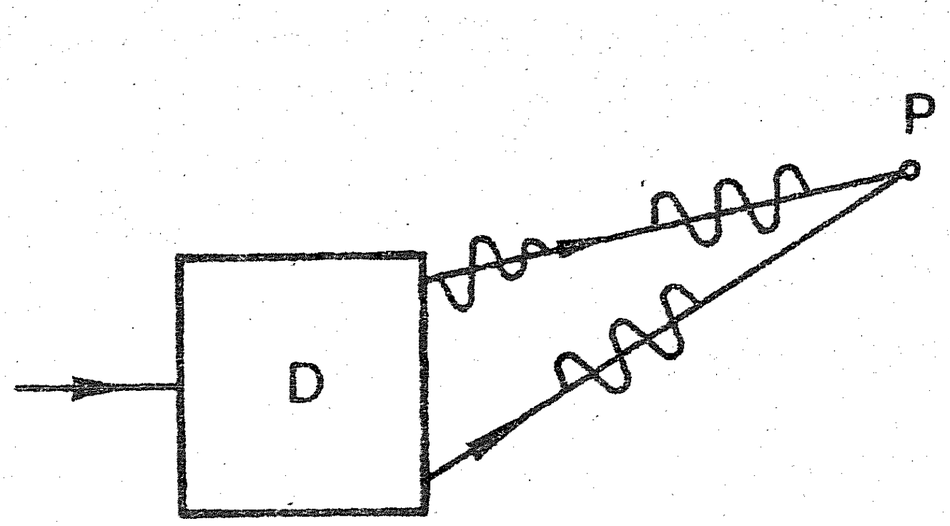
V enobarvnem valovanju niha jakost električnega polja na izbranem kraju sinusno s frekvenco ν_o :

$$E = E_o \cos 2\pi\nu_o t \qquad (1)$$

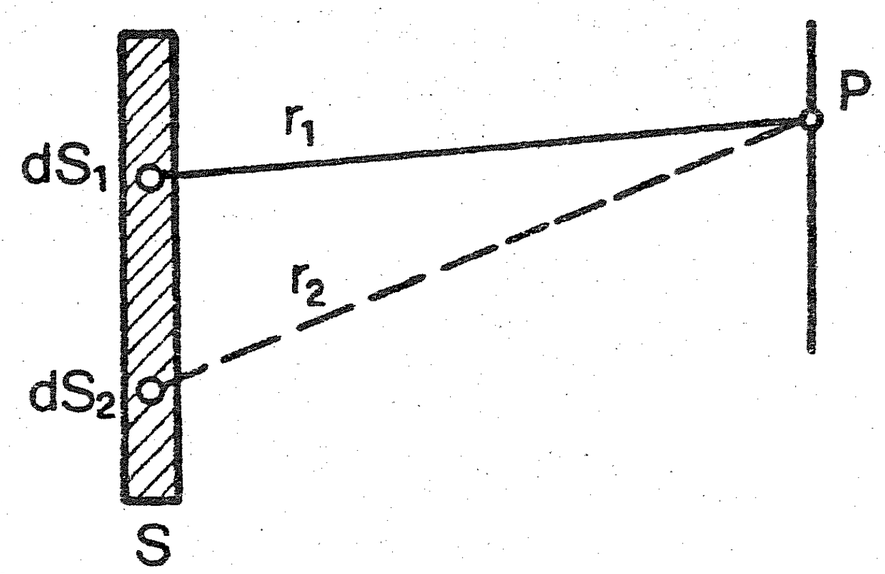
Takega valovanja ni mogoče uresničiti, ker bi moralo trajati neskončno dolgo. Valovanje, ki traja končen čas, ni enobarvno. Valovanja, ki traja čas T, ni mogoče zapisati z eno sinusno sestavino (1). Izrazimo ga lahko z množico sinusnih sestavin s frekvencami na intervalu s širino $\Delta\nu \sim 1/T$ okoli srednje frekvence ν_o. Razmerje $\Delta\nu/\nu_o$ je relativna širina ustrezne spektralne črte. Čim manjše je to razmerje, tem bolj je svetloba enobarvna. Tako lahko uvedemo obratno vrednost $\nu_o/\Delta\nu$ kot mero za enobarvnost. Pri svetlobi je $\nu_o \sim 5.10^{14}$Hz. Če vzamemo za čas T 10^{-8} s, dobimo za relativno širino spektralne črte $1/\nu_o T \sim 2.10^{-7}$. Za čase T, večje kot 10^{-8} s, so spektralne črte zelo ozke in je enobarvnost zelo velika.

O koherenci svetlobe govorimo navadno le na splošno. Če hočemo biti doslednejši, moramo definirati *koherentnost*. Ta količina pove, do kolikšne mere je konstantna fazna razlika med valovanji, ki se sestavljajo. Običajna svetila oddajajo množico neodvisnih valovnih potez, med katerimi ni fazne povezave. Pri interferenčnem poskusu s svetlobo iz dveh takih svetil se položaj interferenčnih prog tako hitro spreminja, da ni vidne interferenčne slike. Dovolj veliko koherentnost za interferenčne poskuse lahko z navadnimi svetili dosežemo le tako, da razdelimo valovanje iz drobnega svetila na delna valovanja. Naprave, ki to omogočajo, so bistveni sestavni deli klasičnih interferometrov.

Razlikovati moramo časovno in prostorsko koherentnost. *Časovna koherentnost* je v tesni zvezi z enobarvnostjo. Razdelimo v napravi D ozek svetlobni



Sl. 4.



Sl. 5.

curek na dva dela, ki pretečata različni poti do točke P (Sl. 4). Če je razlika poti velika, se lahko zgodi, da se v izbranem trenutku srečata v točki P valovanji iz različnih valovnih potez. Ker med njima ni fazne povezave, ni koherence. Zakasnitev delnih valovanj sme tedaj biti največ tolikšna, kot povprečno traja valovna poteza, če želimo opazovati interferenco. Povedali smo že, da je trajanje valovne poteze obratno sorazmerno s širino frekvenčnega intervala $\Delta\nu$. Pot $l_c = cT$, ki jo v času T preteče svetloba, imenujemo *koherenčno dolžino*. Pri zelo ozki spektralni črti zelene svetlobe ($5{,}45.10^{14}$Hz) s širino 3.10^8 Hz traja valovna poteza 4.10^{-9}s in je koherenčna dolžina 1,2 m. Če hočemo večjo koherenčno dolžino, mora biti frekvenčni interval ožji, torej enobarvnost večja. Takšna je laserska svetloba: valovne poteze so dolge tudi po nekaj kilometrov.

Tudi ko je enobarvnost in s tem časovna koherentnost velika, je svetloba iz različnih točk razsežnega svetila lahko *prostorsko nekoherentna* (Sl. 5). Površinska elementa dS_1 in dS_2 naj pošiljata časovno zelo koherentno svetlobo v točko P. Valovanji iz obeh površinskih elementov klasičnega svetila sta v točki P koherentni samo, če je razlika poti $r_1 - r_2$ majhna v primerjavi z valovno dolžino. Povečanje razdalje med elementoma dS_1 in dS_2, torej povečanje razsežnosti svetila, zmanjša prostorsko koherentnost.

Laserji dajejo svetlobo, ki se odlikuje s časovno in prostorsko koherentnostjo. Z lasersko svetlobo lahko brez posebnih pripomočkov opazujemo interferenco. Laserska svetloba omogoča široko uporabo interferometrov, omogoča holigramski zapis slike, obeta učinkovit prenos sporočil po svetlobnih vodnikih itd.

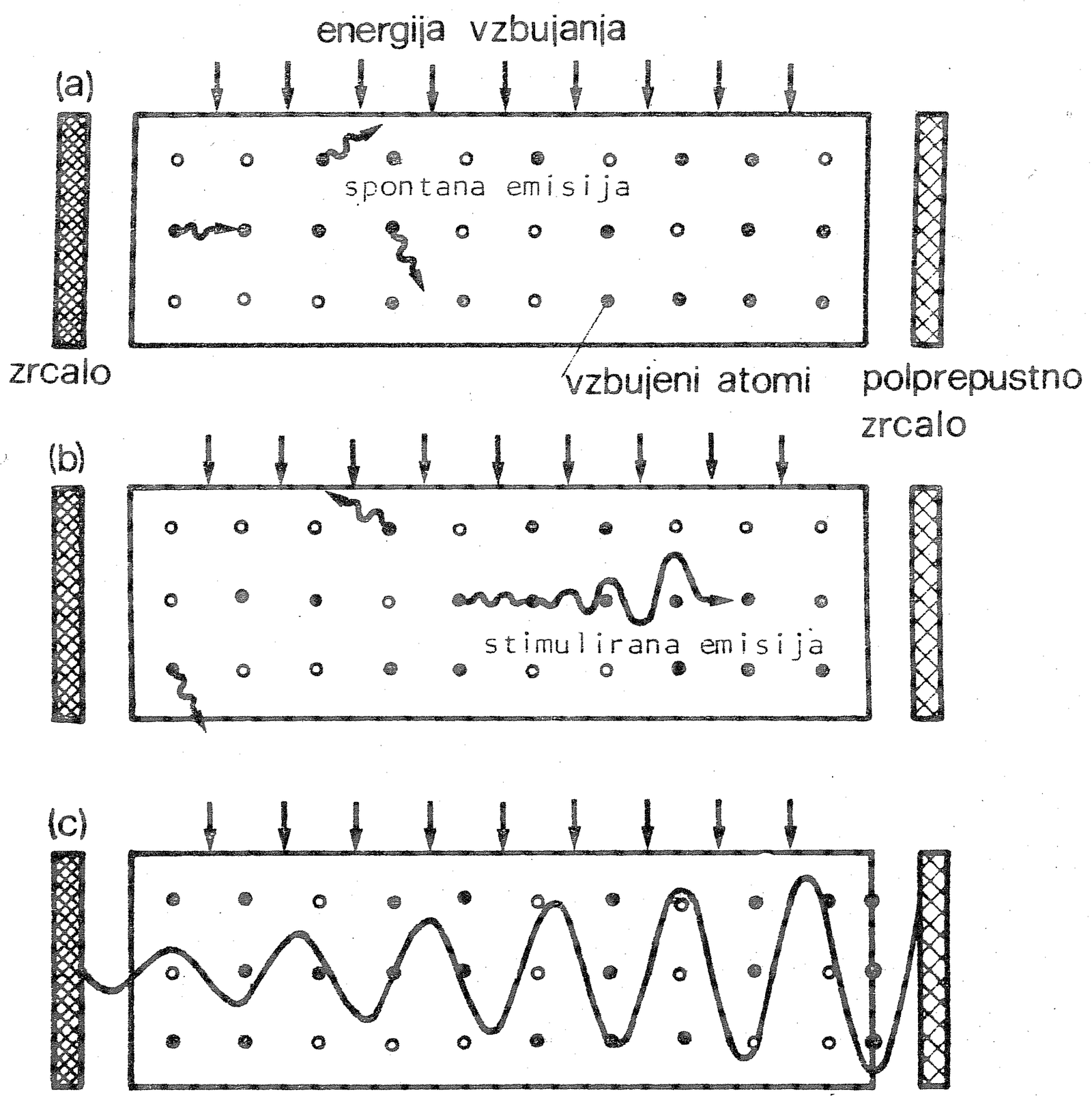
LASERJI

Laser deluje v bistvu kot "optična piščal", saj se v njem s stimuliranim sevanjem ojačuje samo svetloba z lastno frekvenco resonatorja, ki ga sestavlja laserska snov z obema zrcaloma. Svetloba je vzporedna z osjo resonatorja ter časovno in prostorsko zelo koherentna (Sl. 6).

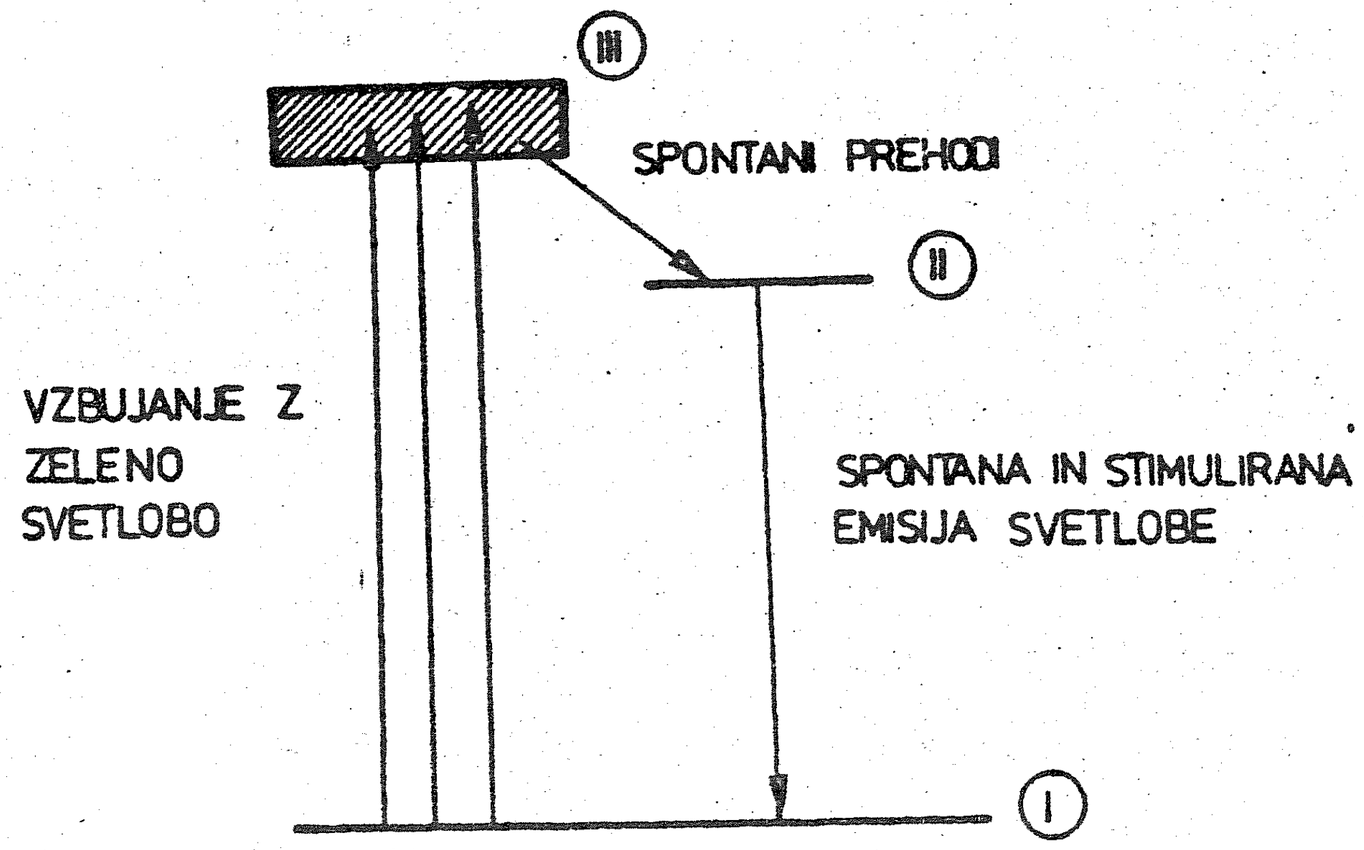
Oglejmo si fizikalne osnove delovanja rubinovega laserja, ki so ga zgradili prvega, a je še vedno pomemben.

Za preprosto razlago je v rabi model, v katerem so izpuščene nebistvene podrobnosti. V tem modelu so za delovanje pomembna tri stanja ionov Cr^{3+}, ki so kot primes dodani kristalu aluminijevega oksida: široki pas III, vmesno stanje II in osnovno stanje I. Takšen model s tremi stanji je uporaben tudi za nekatere druge laserske kristale (Sl. 7).

Optično vzbujanje povzroči absorpcijske prehode iz osnovnega stanja I v široki energijski pas III. Večina absorbirane energije se prenese s hitrimi nesevalnimi prehodi na ozko vmesno energijsko stanje II. Spontani prehodi iz tega stanja v osnovno stanje predstavljajo običajno fluorescenco. Če je za vzbujanje na razpolago toliko energije, da več kot polovica ionov zapusti osnovno stanje in zasede stanje II, nastane stimulirano sevanje. Sevanje traja, dokler je zasedba energijskih stanj invertirana. Prag za to, da stimulirana emisija prevlada, je v laserjih s tremi stanji zelo visok, saj je treba veliko energije, preden več kot polovica ionov zapusti osnovno stanje. Zato se rubinov laser močno greje in je primeren samo za pulzno delovanje, pri čemer daje pulze z neenakomerno strukturo.



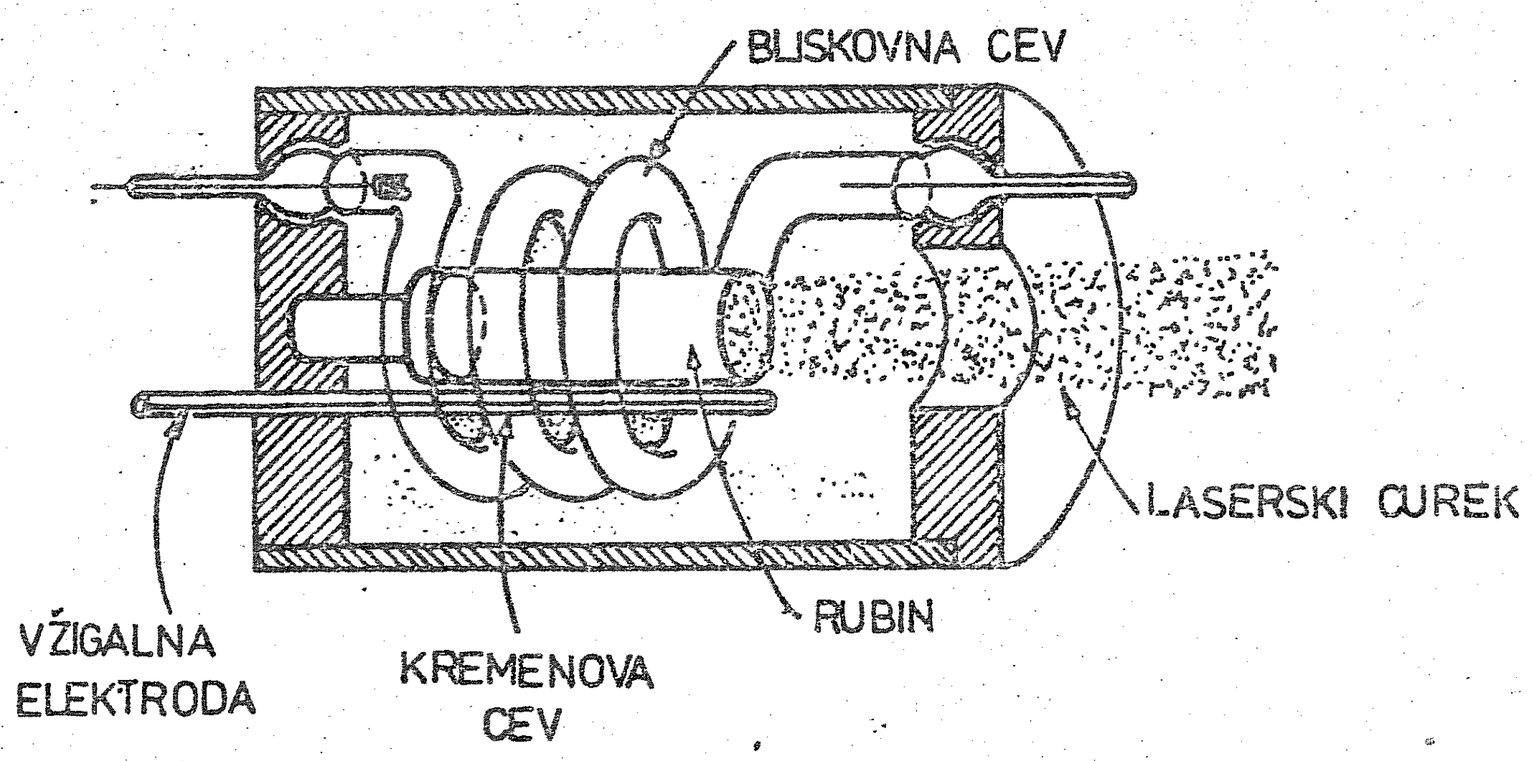
221 Sl. 6: Poenostavljen model dogajanja v laserski snovi



Sl. 7

Tipičen rubinov laser (Sl. 8) ima kristal v obliki valja, ki je dolg 2 do 10 cm in debel 0,5 do 1 cm ter vsebuje 0,05 odstotka ionov Cr^{3+}. Mejni ploskvi valja sta ravni in kolikor se da vzporedni. Ena je zrcalna, druga polprepustna. Ob rubinu je bliskovna cev. Bliski trajajo po nekaj milisekund in sproščajo po 1 do 2 kJ energije.

Majhen del svetlobe, ki se sprosti v vsakem blisku, se absorbira v rubinu; kromovi ioni oddajo del absorbirane energije s stimulirano emisijo kot ozko spektralno črto z valovno dolžino 694,3 nm. Stimulirano sevanje se ne pojavi takoj v začetku vzbuditve: najprej nastane s spontanim sevanjem neko herentna fluorescenčna svetloba, ki zajema širok spektralni interval okrog navedene valovne dolžine. Šele ko vzbujevalna energija bliska preseže prag, prevlada stimulirano sevanje in skozi polprepustno mejno ploskev rubinove palice pride koherentna svetloba. To se zgodi približno pol milisekunde po začetku bliska.



Sl. 8

Gostota svelobnega toka iz običajnega rubinovega laserja doseže nekaj kW/cm^2, zgornja meja pa je nekaj MW/cm^2. Vsa svetloba je v ozkem intervalu valovnih dolžin, ki ne preseže širine $10^{-2}nm$.

Te vrednosti je zanimivo primerjati s podatki za sevanje črnega telesa. Po Wienovem zakonu ima črno telo, ki ima maksimum svojega emisijskega spektra pri 694,3 nm, temperaturo 4174 K. Iz Planckovega zakona izračunamo, da izseva tako telo v $10^{-2}nm$ širokem intervalu okrog maksimuma svetlobni tok z gostoto $16mW/cm^2$, za ves spekter pa dobimo s Stefanovim zakonom 1,7 kW/cm^2.

Razvoj laserske tehnike, ki je sledil odkritju rubinovega laserja, je bil zelo hiter. Danes je v rabi mnogo snovi, v katerih je mogoče z različnimi metodami vzbujanja doseči stimulirano sevanje svetlobe: dielektrični in polprevodniški kristali s primesmi, plini in mešanice plinov, v zadnjem času pa predvsem organska barvila.

Od plinskih laserjev uporabljajo na vidnem območju najpogosteje helij-neonove, na infrardečem pa laserje s CO_2. Od kapljevinskih laserjev so največ v uporabi laserji na organska barvila, od trdnih pa neodimovi laserji, ki lahko delujejo pulzno ali zvezno. Osnovna valovna dolžina neodimovega laserja je 1060 nm, s standardno opremo za podvojitev frekvence pa dajejo tudi zeleno svetlobo z valovno dolžino 530 nm. V pulznem delovanju dosežejo v 10^{-9} s trajajočih pulzih moči preko GW, v zveznem delovanju pa moči več deset vatov.

LITERATURA

|1| S.G. Lipson in H. Lipson, *Optical Physics*, Cambridge University Press 1969.

|2| B.A.Lengyel, *Introduction to Laser Physics*, New York, John Wiley & Sons 1966.

|3| D. Šulek, *Nelinearna optika v pouku fizike* (magistrsko delo), Ljubljana, FNT 1977.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

KOPERNIKOV HELIOCENTRIČNI SISTEM

MITJA KREGAR

Človek si od nekdaj želi spoznati svoje mesto na Zemlji in v vesolju. Religije, ki jih je uvedel že zelo zgodaj, so prvi poskus zadostiti tej želji. Vanje pa ni mogel vključiti vsega znanja, ki ga je z opazovanjem in z izkušnjami vsakodnevnega življenja stalno povečeval. To znanje je skušal sistematizirati in vskladiti s svojimi predstavami v okviru naravoslovnih ved. Prebujajoči se človek renesančne Evrope je pri tem povezal nauke krščansko-židovske v duhovnost usmerjene kulture z racionalnejšim izročilom helenistične kulture. Tako je tudi povezal pitagorejski nauk o harmonijah v naravi |1| s krščansko kozmogonijo.

Na tem izročilu so v srednjem veku gojili povsem kinematično predstavo o gibanju nebesnih teles. Telesa naj bi bila pripeta na nevidne krogle ali sfere, od katerih se vsaka enakomerno vrti okrog svojega središča. Po tej še iz Platonove šole izvirajoči razlagi (Eudoxos, 4. st.pr.n.št.), nebesna telesa nimajo lastnega gibanja, ampak le sledijo gibanjem sfer.

V ozadju razlage je pitagorejska ideja o popolnosti kroga in krogle. Po Bronowskem |2| naj bi prav ta ideja, ki spremlja vso evropsko kulturo tja do 17. stoletja, odigrala odločujočo vlogo pri razvoju zahodnoevropske civilizacije.

Kopernik (1473 - 1543) je v celoti prevzel razlago o sferah, ki nosijo nebesna telesa. Nikjer v njegovih delih ne najdemo opore za domnevo, da bi mu te sfere služile le kot matematični pripomoček. Celo Kopernikova edina knjiga, ki je izšla ob njegovi smrti (1543), nosi značilen naslov: *De revolutionibus orbium coelestium*, kar pomeni: *O gibanju nebesnih sfer* ne pa *O gibanju nebesnih teles*, kot to radi prevajajo |3|.

Vendar ni to edino znano Kopernikovo delo. Vsaj že desetletje pred tem je po Evropi krožila v prepisih razprava: *Nicolai Copernici, de hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus (Nikolaj Kopernik, oris njegove hipoteze o nebesnih gibanjih)*, ki pa je bila polna tri stoletja izgubljena. To lažje čitljivo in krajšo razpravo, ki predstavlja razvojno stopnjo v njegovi teoriji, najdemo danes pod naslovom *Komentarji* tudi v prevodih |4|.

Ob tem naslovu se velja zaustaviti pri besedi hipoteza. Mnogi so namreč razlagali, da Kopernik v heliocentričnem sistemu ni iskal "absolutne resnice", temveč le matematičen model za lažji opis gibanja nebesnih teles. Ker najdemo takšno razlago celo v uvodu Kopernikove knjige same, je pozornost še posebej umestna.

Keplerjeva (1571 - 1630) zasluga je bila, da je razkril anonimnega avtorja tega uvoda - meniha Ossiandra. Kopernikov učenec Rheticus, ki je skrbel za natis Kopernikove knjige, mu je prepustil to nalogo 1542 ob odhodu iz Nürnberga, kjer so knjigo tiskali.

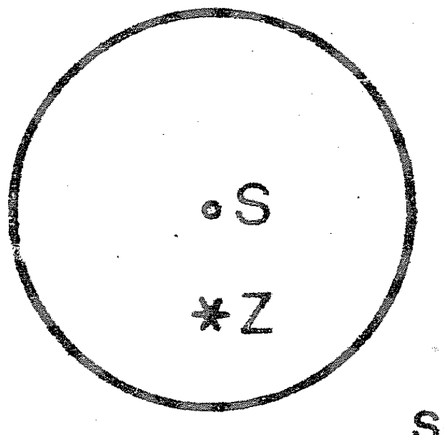
Kopernikovo mišljenje o heliocentričnem sistemu je nedvoumno: poslednja - zvezdna - sfera miruje, Zemlja pa se s svojo sfero giblje okrog Sonca in okrog svoje osi. Zares Kopernik večkrat uporablja besedo hipoteza, ki pa ima zanj drugačen pomen. Uporablja jo namreč za osnovno idejo ali princip, ki izpolnjuje dve zahtevi |5|: Na osnovi hipoteze izpeljani rezultati morajo v okviru merskih napak soglašati z meritvami in se morajo skladati s fi-

zikalnimi aksiomi. Eden od aksiomov trdi, da je vsako nebesno gibanje *enakomerno kroženje*.

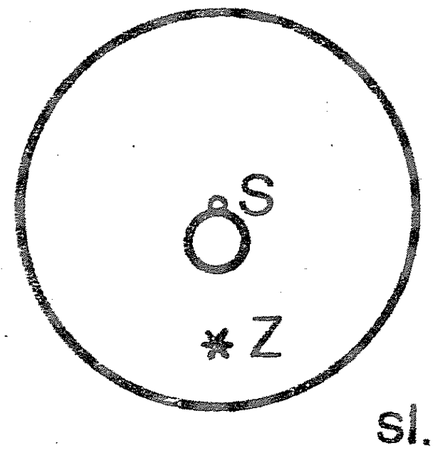
Ker astronomskih podatkov o gibanju nebesnih teles ni bilo mogoče razložiti le s kroženjem okrog enega središča, so že Grki zavrgli zahtevo po koncentričnosti (Hiparh, 2 st. pr. n. š., Ptolemej, 1 - 2. st.). Najprej so Zemljo postavili ekscentrično glede na sončno sfero (Sl. 1a), potem pa so še pripeli središče sončne sfere na novo sfero, ki se je vrtela ekscentrično glede na Zemljo (Sl. 1b). Tudi Kopernik je v *Komentarjih* opisal navidezno letno gibanje Sonca na prvi, v *De revolutionibus* pa na drugi način |7|.

Takšna gibanja opišemo lahko tudi z eno ali z dvema epicikloidama (Sl. 2a) ali pa kombiniramo oba načina (Sl. 2b). V Kopernikovih *Komentarjih* najdemo npr. planetna gibanja opisana z dvema epicikloma, v *De revolutionibus* pa z enim epiciklom in z ekscentrično sfero |8|.

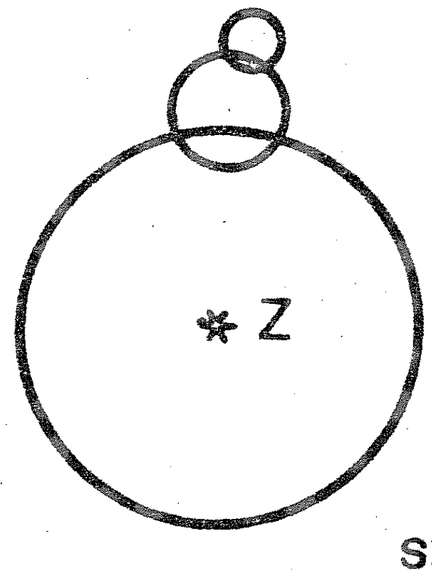
Ptolemejev geocentrični sistem je imel za Kopernika bistveno pomanjkljivost. Tedaj znane merske podatke je bilo namreč mogoče pojasniti v tem sistemu le tako, da nebesna telesa krožijo neenakomerno glede na središče svoje sfere, enakomerno - tako da velja $\varphi = \omega t$ - pa le glede na ekscentrično točko Q (Sl. 3). To je nasprotovalo aksiomu o enakomernem kroženju. Prav to je odločilno vplivalo na Kopernika, da se je odločil za drugačen sistem in prav metafizični aksiom o enakomernem kroženju nebesnih teles je bil za Kopernika bistven pri vpeljavi heliocentričnega sistema. Ta metafizični odnos seveda izključuje kakršnokoli dinamiko in priznava le harmonijo kinematike. Ptolemejev sistem je bil Koperniku preprosto premalo harmoničen.



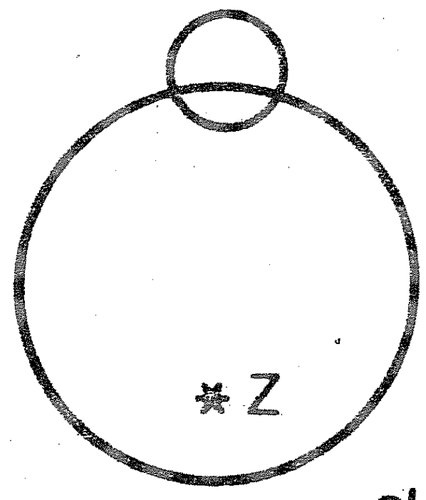
sl. 1a



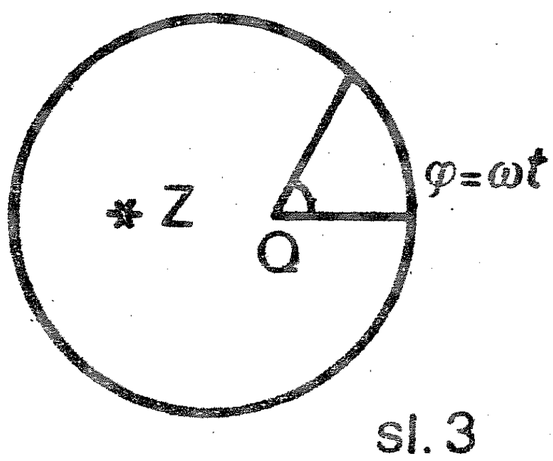
sl. 1b



sl. 2a



sl. 2b



sl. 3

Kopernik je bil prvi, ki je gibanje nebesnih teles računsko dobro obvladal. S tem, da je zaustavil Sonce in pognal Zemljo v tek, je seveda zmanjšal ekscentričnosti planetnih tirov in poenostavil kinematiko nebesnih teles. Število potrebnih sfer se je zmanjšalo za več kot polovico: od približno 80 pri Ptolemejevi razlagi na 32 po Kopernikovi |7|. Tako je bilo lažje natančneje analizirati poti planetov (Kepler) in nato poiskati vzroke za ta gibanja (Newton). Gledano z daljše časovne perspektive je bilo to najbrže večjega pomena kot pa vihar, ki ga je s svojo teorijo sprožil zlasti v cerkvenih krogih. Svet ni osupnil samo zato, ker je Zemlji odvzel vlogo središča vesolja, temveč še bolj nad velikostjo vesolja, ki je po Koperniku mnogo večje, kot so si predstavljali do tedaj. Kopernik pa ni trdil, da je vesolje neskončno, kakor Giordano Bruno, ki je to plačal s smrtjo.

Kopernikova teorija se je le počasi uveljavljala in po tem ni nobena izjema. Pravzaprav niti ni čudno, če je bila mnogim s svojo metafizično zahtevo po enakomernem kroženju bolj matematično ustreznejša delovna hipoteza kot prava slika vesolja, dokler ni postala aktualna dinamika nebesnih teles.

Znamenita in prepričana pristaša Kopernikovega nauka sta bila Galileo Galilei (1564 - 1642) in Johannes Kepler (1571 - 1630). Vendar sama podpora Kopernikovemu nauku najbrže ne bi zadostovala za njegovo uveljavitev, ko se ne bi težišče interesa začelo premikati iz metafizičnega razmišljanja v eksperimentalno proučevanje dinamike. Prvi bistveni korak v tej smeri je napravil Galileo Galilei.

Zelo znan je Galilejev spor z inkvizicijo, ki ga je sprožila knjiga *Dialog o dveh sistemih*, objavljena leta 1632, v kateri Galilei podpira Kopernikovo teorijo. Bronowski |9| lepo opisuje ozadje tega spora in očitno je, da je inkviziciji bilo to delo le povod, ne pa vzrok za spor. Inkvizicija je izpolnjevala Galilejev dosje že več kot dvajset let in je le izrabila priliko, da ga dokončno pokori.

Manj pa je znano, da je Galilei šele v hišnem priporu po tej obsodbi napisal leta 1636 svoje najbolj tehtno delo *Nove znanosti*.

V tem delu je Galilei obrnil pozornost na pojave na Zemlji. Miselno je odstranil in eksperimentalno izravnal sile na telo in ob tem pokazal, da je karakteristično enakomerno in premo gibanje, če na telo ne deluje nobena sila (1. Newtonov zakon). Poleg tega je prvi definiral pospešek. Da vsa telesa na Zemlji padajo z enakim pospeškom g, pa ni ugotovil z eksperimentom, temveč z logičnim sklepanjem. Dokaz (reductio ad absurdum) ni samo značilen za njegov čas, ampak je še danes pedagoško zanimiv. Zato si ga velja ogledati.

Naj telesi z masama m' in m prosto padata. Privzemimo, da telo z večjo maso m' pada z večjim pospeškom: $g' > g$. Položimo težje telo na lažje. Sestavljeno telo ima maso $m'' = m' + m > m'$ in zato pada z večjim pospeškom: $g'' > g'$. Toda hitreje padajoče telo z maso m' mora vendar potiskati počasnejše telo z maso m in zato obe skupaj padata počasneje, ker pač lažje telo zaustavlja težjega. Zato mora biti pospešek g'' manjši od g' : $g'' < g'$. Ker g'' ne more biti hkrati večji in manjši od g', preostane le $g = g' = g''$.

Galilei je s proučevanjem pospešenih gibanj usmeril pozornost porajajočega se naravoslovja na vzroke za pospešek teles in je s tem odprl pot dinamiki. S svojo kombinacijo racionalne intuicije, eksperimenta in matematičnega dokazovanja je po pravici postal oče moderne znanstvene misli. Prav s tem, da je zmanjšal vlogo metafizičnih razmišljanj v znanosti, je škodoval cerkvenemu dogmatizmu bolj kot s podporo heliocentričnemu sistemu.

Galilei pa je še vedno verjel, da je enakomerno kroženje najpopolnejše gibanje nebesnih teles. Zavrnil je možnost premega gibanja nebesnih teles, ker ni verjel v neskončnost vesolja. Prav tako ni spoznal velikega pomena Keplerjevih zakonov za razvoj fizikalne misli.

Kepler (sodelavec Tyha Bracheja v Pragi od 1599 do 1601) je bil mistik. Vse svoje življenje je iskal geometrijske harmonije v vesolju, ker je videl v njej - podobno kot pitagorejci - dokaz božanske modrosti [9]. V iskanju teh harmonij in prepričan o pravilnosti heliocentričnega sistema pa je pazljivo analiziral planetna gibanja.

Toda prav prva dva Keplerjeva zakona (*Astronomia Nova*, 1609) sta zlomila dogmo o popolnosti enakomernega kroženja nebesnih teles. Na mesto 32 krogov je stopilo 7 elips. Ironija usode je, da je prav mistik moral zgradbi vesolja odvzeti pečat božanske popolnosti in tako evropski znanstveni misli sneti spone dvatisočlet stare dogme. Dogmi o popolnosti kroga je sicer treba priznati pozitivno zgodovinsko vlogo. Vendar bi lahko bil razvoj resno zavrt, če bi se je Evropa ne znala pravočasno otresti. Kopernik, Galilei in Kepler so vsak po svoje prispevali k temu. Posledice njihovega dela so bile daljnosežnejše ali celo drugačne kot so si sami lahko predstavljali ali želeli.

Kopernikov sistem vsebuje še aksiom o Soncu kot središču vesolja. Z Newtonovo definicijo absolutnega in fizikalnega prostora se je ta prvič zamajal. Ker telesa določajo le fizikalni prostor, se Sonce prav lahko giblje skozi absolutni prostor. Vendar je Newton ta aksiom še obdržal, Leibnitz pa ga je zavrgel in poudaril relativnost gibanja. Po njegovem naj bi bila tako Kopernikov kot Ptolemejev nauk le dva načina opisovanja relativnega gibanja nebesnih teles.

Poudarjanje relativnosti ima seveda svoje meje. Da Zemlja v resnici kroži okrog Sonca lahko dokažemo z merjenjem zvezdne aberacije (Roemer 1676), da Zemlja kroži okrog svoje osi pa s Foucaultovim nihalom (1851).

LITERATURA

|1| K. Vorlander, *Zgodovina filozofije I*, Ljubljana, Slov. matica 1968, str. 36-37.
|2| Bronovski, *The ascent of man* Little, Boston, Brown 1973, str. 194.
|3| J. Ferbar - F. Plevnik, *Fizika za 8. razred*, Ljubljana, DZS 1978, str. 58.
|4| E. Rosen, *3 Copernican Treatises*, New York, Dover Publicationa Inc. 1959.
|5| Prav tam, str. 22-33.
|6| Prav tam, str. 36.
|7| *Zgodovina človeštva*, UNESCO: L. Gottschalk, *Temelji sodobnega sveta* IV/II, Ljubljana, DZS 1972, str. 288.
|8| Glej |2|, str. 205-218.
|9| Glej |1|, II. str. 76-77.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

NEWTONOV GRAVITACIJSKI ZAKON

MITJA KREGAR

Napredek znanstvene misli v 17. stoletju - v "stoletju genijev" - najbolje kaže Newtonovo delo *Philosophiae naturalis principia mathematica (Matematični principi naravne filozofije)* |1|, ki je prvič izšlo 1687. Med mnogimi dosežki tega časa je gravitacijski zakon. Z analizo njegovega odkritja osvetlimo nekatere probleme, ki so zaposlovali tedanjo znanost.

I. Newton (1642 - 1727) ni bil prvi, ki je premišljal o gravitacijskih silah. Že Kepler je vztrajno iskal vzroke za vedenje nebesnih teles in je začel nadomeščati njihovo hipotetično dušo s privlačno silo. Tako je že okoli 1610 razlagal težo, vpliv Lune na plimo in oseko in spremembe hitrosti v gibanju planetov z gravitacijskimi silami, ki jih je primerjal z magnetnimi silami |2|. (Mislil je, da iz ohranitve ploščinske hitrosti sledi $F' \propto \propto 1/r$. Za pravilno razlago gravitacije je Keplerju manjkalo spoznanje, da je enakomerno kroženje pospešeno gibanje. Tega so se zavedli šele Newton in njegovi sodobniki. Prvi je formulo za centripetalni pospešek krožečega telesa izpeljal Huygens (1659), za njim pa še Newton (1665) |3|. Vendar je Newtonova izpeljava daljnosežnejša, ker sloni na rešitvi dinamičnega problema: S kolikšno povprečno silo deluje krog na telo, ki se prožno odbija od kroga v notranjost? Rezultat $F = mv^2/r$ ni odvisen od tira odbijajočega se telesa in velja tudi za kroženje. Ta dinamična izpeljava centripetalne sile sloni na definiciji za silo $F = dG/dt$.

To formulo bi bilo treba združiti s 3. Keplerjevim zakonom (Kepler, *Harmonicae mundi*, 1619), pa bi izpeljali gravitacijski zakon $F = -k/r^2$, če bi vzeli gibanje planetov približno za krožno. Takšno izpeljavo najdemo dandanes v vsakem elementarnem učbeniku. Poleg Newtona bi to zlahka napravila vsaj še Halley in Hooke (slednji se je kasneje tudi potegoval za očetovstvo gravitacijskega zakona). Zgodovinarji navajajo več razlogov za odlašanje. Navedimo nekatere od njih.

Nihče razen Newtona ni znal dokazati, da takšna sila dovoljuje tudi elipsne tire, kakršne je zahteval 1. Keplerjev zakon. Newtonovo oklevanje povezujejo z znano zgodbo o jabolku in Luni |4|. Če bi namreč jabolko in Luno privlačevala takšna sila, bi za obhodni čas Lune okrog Zemlje veljala preprosta enačba $T = 2\pi R^{3/2}/(rg^{1/2})$, v kateri je R razdalja Zemlja-Luna, r radij Zemlje, g pa zemeljski težni pospešek. Ker v tej enačbi nastopajo le merljive količine, lahko z njo preverimo gravitacijski zakon. Newton naj bi to napravil že 1666, vendar naj bi z Galilejevim podatkom za radij Zemlje dobil za 16% napačen rezultat. Napaka naj bi ga odvrnila od objave zakona. Ta trditev pa je malo verjetna, kajti Newton ni mogel zaupati Galilejevim podatkom. Že Galilejev podatek za zemeljski težni pospešek je bil namreč napačen kar za 50% in ga je Newton sam izmeril zelo natančno z matematičnim nihalom |5|.

Newton tedaj po vsej verjetnosti ni znal upoštevati velikosti Zemlje in ni mogel zapisati enačbe. Kot odločujoč razlog pa navaja Rosenfeld |5|, da Newton tedaj še ni mogel razumeti narave gravitacije. Ni si mogel predstavljati, kako Sonce deluje na Zemljo na daljavo in kaj v vesolju nadomešča vrvico, ki obdrži kamen na krožni poti. Pojem delovanja na daljavo je bil v tem času Newtonu še preveč tuj.

Omeniti je treba, da je tedaj v znanosti prevladovala Descartesova (1596 -

1650) etrska teorija. Descartes - tvorec enega od velikih filozofskih sistemov svojega časa - je popolnoma zanikal možnost delovanja teles na daljavo. Zato je iznašel eter, čutilom nezaznavno snov, k napolnjuje navidezno prazen prostor. Gibanja planetov je opisal z vrtinci etra, ki nosijo s seboj planete. Zemeljsko težnost pa je razlagal talo, da eter, ki se vrti skupaj z Zemljo, vleče navzven, telesa pa padajo navznoter - nekako tako, kot se pesek v posodi z vodo zbere v sredini, če se voda vrti.

Na srečo je Newton - podobno kot prej Galilei - usmeril svojo pozornost na pospešeno gibanje teles. Proučeval je mnoge kontaktne sile in privzel, da je sila sorazmerna s pospeškom telesa. Ko je imel enačbo za silo, je lahko vsaj za nekaj časa pozabil na izvor sile. Lahko je rešil fizikalno zanimive preproste enačbe gibanja in se potem lotil analize gibanja pod vplivom zahtevnejših centralnih sil z obliko $F = - kr^n$. Pri tem je zlahka ugotovil, da se pri centralnih silah vedno ohranja ploščinska hitrost (v skladu z 2. Keplerjevim zakonom). Analitično je izračunal tir za nekatere primere takih sil. Fizikalno zanimiva sta predvsem dva primera. Pri $n = +1$ dobimo gibanje po elipsi okrog središča in obhodne čase neodvisne od oblike tira (matematično nihalo). Pri $n = -2$ dobimo spet gibanje po elipsi, vendar to pot okrog gorišča, kar po 1. Keplerjevem zakonu ustreza gibanju planetov. Do 3. Keplerjevega zakona za elipsne tire ($T^2/a^3 = konst.$ za vse planete) je le še korak. Gravitacijski zakon $F = - GMm/r^2$ dobimo nato z zahtevo o simetričnem pomenu mas učinkujočih teles.

Mimogrede ugotovimo še enakost težke in vztrajne mase. Vsi ti rezultati so naravno sledili iz analize. Ni se bilo več mogoče izogniti zaključku, da silo na planete v celoti opiše gravitacijski zakon. S tem je bila tehnična plat problema rešena. Razumevanju narave gravitacije pa nismo prišli nič bliže.

Rešitev problema planetnih gibanj še ni prinesla rešitve problema zemeljske težnosti. Upoštevati končno velikost Zemlje ni bilo preprosto. Ker nam je ohranjena Newtonova korespondenca s Hookom, vemo, da Newton tega ni znal izračunati vsaj do 1679. Hipotetično padanje telesa v notranjosti Zemlje je opisal s spiralo. Nasprotno pa je Hooke odvrnil, da bi bil tir elipsa, če ne bi upoštevali trenja in če bi veljal zakon $F = k/r^2$. Newton se s tem ni strinjal in je odgovoril, da bi bil tir najbrž nekakšna rozeta. V *Principih* pa je problem že pravilno rešen: gravitacijska sila homogene krogelne lupine je enaka sili mase, zbrane v središču lupine.

Po objavi gravitacijskega zakona je postalo še aktualno vprašanje, kaj povzroča gravitacijo. Očitno so jo nekateri razlagali tako, da je snov sama izvir gravitacijskih sil in ta razlaga je dobila materialističen pečat. Vendar je Newton odločno zavrnil tako razlago. V pismu Bentleyu |6| je zapisal: ".. Včasih govorite o težnosti kot o bistveni sestavini materije. Prosim, da tega ne pripisujete meni, kajti ne domišljam si, da vem za vzrok težnosti..." In spet drugje: ".. Nerazumljivo je, da bi neživa snov brez posredništva česa drugega, kar ni snovno, delovala in učinkovala na drugo snov brez neposrednega dotika..."

V *Principih* najdemo tale Newtonov komentar: "...Doslej smo razložili pojave v vesolju... s težnostjo, toda nismo ji razložili vzroka. Gotovo pa jo povzroča nekaj, kar prodira čisto v sredino Sonca in planetov, ne da bi utrpelo najmanjše zmanjšanje sile, kar ne deluje v sorazmerju s površino delcev, temveč z množino snovi... Toda *ne izmišljam si nobenih hipotez*. Kajti karkoli ni izpeljano iz pojavov, moramo imenovati hipoteza, toda hipoteze, fizične ali metafizične, nimajo mesta v eksperimentalni filozofiji ... In za nas je dovolj, da težnost obstaja in deluje po zakonih, ki smo jih razložili" |7|.

Iz tega pozitivističnega zaključka bi lahko sklepali, da je Newton idejo etra zavrgel. Tako bi tudi lahko sklepali iz uvoda 2. izdaji *Principov* iz 1713, kjer piše: "Tisti, ki si zamišljajo, da je vesolje napolnjeno s snovjo (etrom) brez vztrajnosti, zanikajo vakuum, istočasno pa ga postulirajo.

Kajti takšna snov se ne loči od praznega prostora in potemtakem razpravljajo o imenih, ne pa o bistvu". Toda tega uvoda ni napisal Newton, ampak Cotes, angleški geometer in Newtonov sodobnik.

Da Newton ideje etra ni zavrgel, ugotovimo iz vprašanja v drugi izdaji *Optike* |8|: "... ali ni to sredstvo mnogo redkejše v gostih telesih Sonca, planetov, ... kot pa med njimi? In ali ne postaja gostejše z oddaljenostjo in tako povzroča gravitacijo teh velikih teles ... , ki si prizadevajo, da gredo iz gostejšega sredstva v redkejše?". Pa smo spet pri Descartesovi ideji. Eter naj bi prenašal sile med telesi, telesa pa naj bi bila nekakšni ponori etra. Kako, da se Newton ni mogel otresti te ideje? Rosenfeld je prepričan, da je vzrok tega Newotonov odnos do metafizike.

Očitno razvoj znanstvenih idej ni tako preprost, kot se navadno misli. Fiziki v proučevanju narave često iščejo potrdilo za svoja filozofska prepričanja. Čeprav je Newton kot otrok svojega časa podpiral naravno teologijo, to je teologijo s poudarkom na knjigi narave kot božje stvaritve in s tem vira božjega razodetja |9|, je skušal potegniti mejo med znanostjo na eni strani in metafiziko na drugi. Njegov namen še ni bil odpraviti metafizike, pač pa jo ločiti od fizikalnih raziskav. Prav pri razvoju gravitacijskega zakona lahko lepo zasledujemo to njegovo notranjo borbo. Seveda Newtonov pomen ni le v tem, da je izpeljal ta ali oni zakon narave, temveč predvsem v tem, da je izdelal prvi obsežen hipotetično-deduktivni sistem mehanike.

Newtonova gravitacijska teorija je pri sodobnikih naletela na razmeroma oster odpor. Znani nasprotniki te teorije so bili npr. Leibniz, Berkeley in Huygens. Še 1734 je francoska akademija razdelila vsakoletno nagrado med očeta Johanna in sina Daniela Bernoullija. Prvi jo je dobil za delo, ki je podpiralo Descartesovo gravitacijsko teorijo, drugi pa za delo, ki je podpiralo Newtonovo teorijo |10|.

Poskusov, da bi našli ozadje gravitacijskega zakona, je bilo več. Najbolj znan je poskus Georga Louisa Lesaga (1747). Ta je privzel, da je vesolje polno nevidnih delcev, ki prihajajo iz vseh mogočih smeri, planeti in zlasti Sonce pa jih prestrezajo. Model odpove že, če so tri telesa na isti premici.

LITERATURA

|1| Sir Isaac Newton, *The mathematical Principles of Natural Philosophy* (1729), London, Dawson of Pall Mall 1968.
|2| M. Jammer, *Concepts of Force*, Cambridge, Mass., Harward Univ. Press 1957, str. 81-94.
|3| M. Kregar, *Enakomerno kroženje*, Obzornik mat. fiz. 22 (1975) 38.
|4| Richtmyer and Kennard, *Introduction to modern physics*, New York, McGraw-Hill 1947, str. 21.
|5| L. Rosenfeld, Archive for History of Exact Sciences 2 (1965) 365.
|6| Sir Isaac Newton, *Opticks* (1730), New York, Dover 1952.
|7| Glej 1 , str. 385, zv. II.
|8| Glej 6 , str. 350.
|9| *Zgodovina človeštva*, UNESCO: L. Gottschalk, *Temelji sodobnega sveta* IV/2, Ljubljana, DZS 1972, str. 275.
|10| Prav tam, VI/1, str. 440.
|11| Glej 2 , str. 192.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

RAZVOJ ATOMSKE TEORIJE DO 20. STOLETJA

MITJA KREGAR

Novi vek je podedoval grško predstavo o prostoru, ki ga delno izpolnjujejo snovna telesa. Nauk o atomih, osnovnih gradnikih snovi, čisto majhnih, s čuti nezaznavnih, nedeljivih in neuničljivih telesih, je prvi izoblikoval Demokrit (5. st. pr.n.št.). Ta strogo mehanični svetovni nazor, ki izključuje vsakršno božanstvo, je s krščanstvom padel v pozabo, dokler ga nista obnovila Gassendi (1592 - 1655) in Boyle (1627 - 1691) |1|. Za slednjega, ki ga štejemo za modernega utemeljitelja atomizma, je snov razsežna, neprodirna in deljiva. Z gibanjem se drobi v delce - korpuskule (atome), ki se vežejo v molekule. Delce karakterizirata predvsem prostorski lastnosti: oblika in velikost.

Newton je pojasnil sile med makroskopskimi telesi z gravitacijskim zakonom. Vendar ta ni mogel pojasniti končne velikosti teles. Zato si je Newton predstavljal, da sestavljajo snov razsežni, masivni, trdi, nespremenljivi, gibajoči se delci, različnih oblik in prostornine. Poleg vztrajnosti jim je pripisal še težnost ter sposobnost fermentacije in kohezije |2|.

Ob tem naivnem atomizmu, ki ekstrapolira lastnosti makroskopske snovi v mikrosvet, ostane nerešeno vprašanje, kaj loči delce od praznega prostora, kako delujejo delci po praznem prostoru drug na drugega (mimo gravitacije). Tem vprašanjem se izogne starejša Descartesova (1596 - 1650) teorija. V tej teoriji ni delovanja na daljavo, ampak nastanejo sile samo ob dotiku. Ves prostor je izpolnjen s snovjo. Prostor med vidnimi telesi izpolnjuje nevidna snov - *eter*, ki ima določene mehanične lastnosti. Bolj kot neprodirnost ali lastnosti, ki jih zaznavamo s čutili, je po Descartesu za snov značilna razsežnost. Po njegovem so v razvoju vesolja nastale tri vrste snovi: svetleča snov Sonca, prozorna snov v medplanetnem prostoru in gosta neprozorna snov Zemlje. Pri gibanju se težki, veliki delci Zemlje drobijo v prozorno snov, ki jo sestavljajo manjši okrogli delci. Kar se pri obrabljanju odlušči, je sveteča snov Sonca; sestavljajo jo najmanjši delci, ki zapolnjujejo vse pore |3|.

Pozneje so eter modernizirali. Imeli so ga za breztežno, nevidno snov, ki nosi tudi elektromagnetno valovanje.

Naj se zdijo omenjene razlage še tako naivne, niso nastale le kot plod metafizičnih razmišljanj, ampak tudi kot rezultat kvalitativnega opazovanja in ekstrapolacije izkušenj iz makroskopskega sveta v vesolje in v mikrosvet. Spoznanje, da utegne prehod iz makroskopskega sveta v mikrosvet povzročiti tudi kvalitativne spremembe, še ni dozorelo.

Nasprotje Descartesove teorije snovi je sto let mlajša teorija Ruđerja Boškovića(1711 - 1787) |4|. Da jo bomo laže razumeli, omenimo pomemben paradoks atomizma.

Če trčita dve togi makroskopski krogli, se mora njuna hitrost ob trku nezvezno spremeniti. To pomeni, da se mora informacija o dotiku širiti po kroglah neskončno hitro, sicer bi se deli krogel še premikali, ko bi drugi že mirovali. Drugače se krogli deformirata in nista več togi. Deli krogel spremenijo svojo relativno lego, kar pomeni, da ju sestavljajo bolj elementarni togi deli. Toda pri trku osnovnih delcev še vedno velja, da je sprememba hitrosti nezvezna, kar nasprotuje načelu kontinuitete. Temu para-

doksu se lahko izognemo, če vpeljemo zvezno odbojno silo, ki deluje med osnovnimi delci, še preden se ti dotaknejo.

Bošković je napravil še korak naprej. Zakaj naj bi obstajali delci s končno razsežnostjo znotraj odbojnega zidu? Paradoks lahko do kraja razrešimo le, če si odmislimo vsakršne razsežnosti delcev. Tako ostane Boškoviću točkasto telo-puncta, središče polja sil. To bolj ustreza današnjim nerazdeljivim in neuničljivim osnovnim delcem kot pa atomom. Od vseh fizikalnih idej je ta, o nedeljivi, nerazsežni točki, nosilcu in središču interakcije, najpreprostejša in Bošković je bil prepričan, da je narava v osnovi preprosta. Vsa zapletenost pojavov je po njegovem skrita v sili, ki je privlačna pri velikih razdaljah (gravitacija) in odbojna pri majhnih. Vmes Bošković dopušča še oscilacije (Sl. 1): A in C sta točki stabilnega ravnotežja, B pa je točka labilnega ravnotežja. Z vrsto takšnih točk je Bošković kvalitativno pojasnil mnoge makroskopske lastnosti snovi.

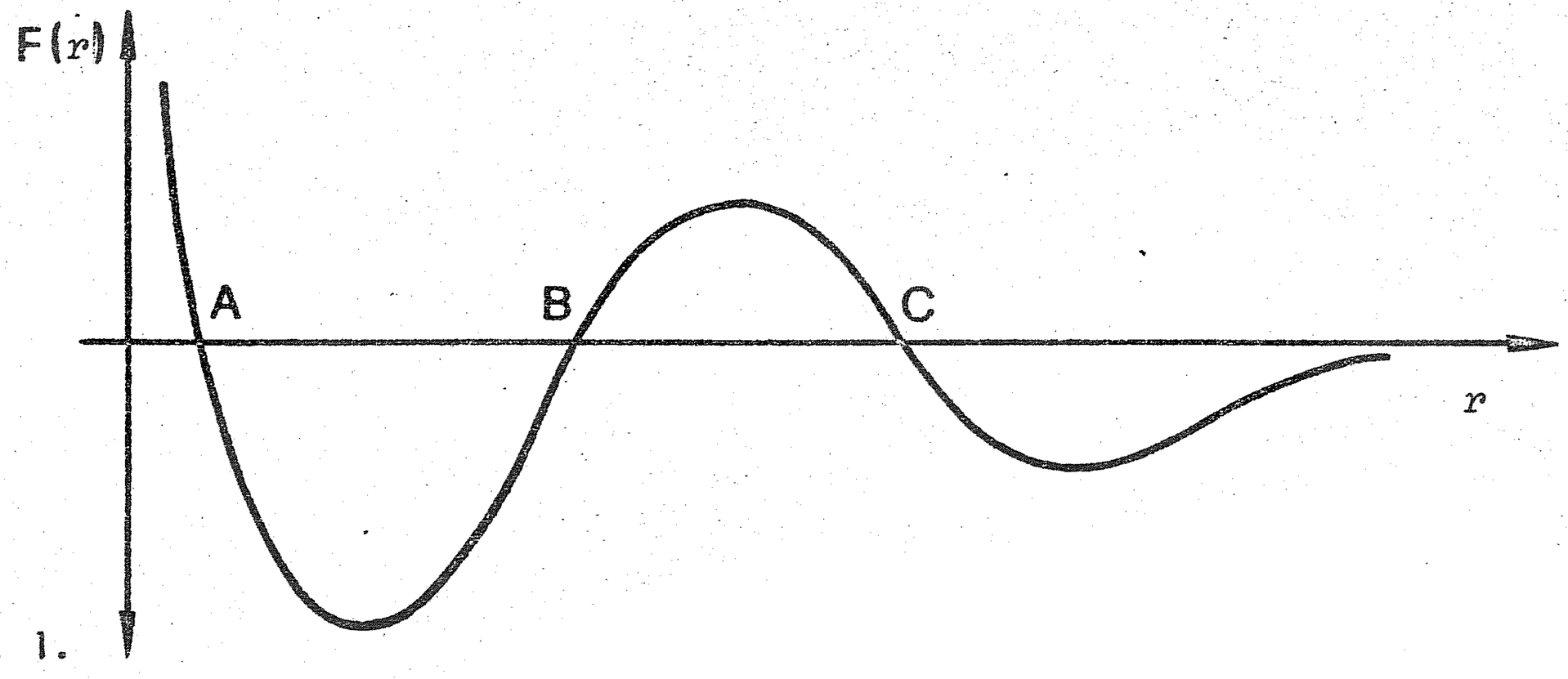
V nasprotju z Descartesom je bil Bošković celo bolj kot Newton prepričan v realnost sil. Boškovićeva sila zagotavlja, da se pri izbrani oddaljenosti točkasta delca približujeta, pri drugi pa oddaljujeta. Pri tem je Bošković zanikal razsežnost delcev. Če je Descartes prostor napolnil s snovjo, ga je Bošković izpraznil.

Kadar se naravoslovje loteva tako osnovnih vprašanj, kot je bistvo snovi ali vesolja, si pogosto pomaga s filozofijo - seveda s filozofijo svojega časa in njenimi prijemi. Tudi obratno je res: filozofija pogosto išče potrdila za svoje teorije v naravoslovju. Pri oceni fizikalnih modelov pa filozofi dostikrat pridejo do popolnoma nasprotnih zaključkov. Boškovićeva teorija je zgled, ki kaže, da takšne ocene ni lahko napraviti.

Ali lahko uvrstimo Boškovićevo teorijo v matematični idealizem? S stališča fizike zagotovo ne. Ker sta neprodirnost in razsežnost v njegovi teoriji podani z zakonom sile, stopi na mesto Newtonovega pojma mase |5| pojem sile. Masa je po Boškoviću le merilo za množico točk, ki sestavljajo telo. Snov se pri njem sicer zreducira na množico geometrijskih točk, zato pa pripiše prostoru zmožnost delovanja s silo kakor v sodobnem fizikalnem polju.

V Boškovićevi teoriji zamenja monistični pojem prostorskih odnosov med diskretnimi točkami dualistični pojem snovi in praznega prostora. Tri osnovne mehanične količine Newtonove dinamike dolžino, čas in maso (L, T, M) prevede na dve (L in T), vendar doda pojem sile. V tehničnem pogledu teorija seveda ni materialistična, narobe pa bi jo bilo zavrniti s stališča naivnega materializma, ki snov vizualizira. Predhodnik Boškovića je bil Leibniz, naslednik pa Kant, vendar je od njih Bošković najmanj obremenjen z metafiziko.

Ob nastanku je Boškovićeva teorija bila bolj dolgoročni program kot pa kvantitativno uporabna teorija. Bošković je za svoj čas segel predaleč. Ven



Sl. 1.

dar je bil njegov vpliv močan v 18. in še v 19. stoletju |5|. Zlasti je vplival na angleške kemike. Tako npr. je Davy 1814 v svoji knjigi razvil Boškovićeve zamisli o zgradbi atomov in je Faraday 1816 pisal: "Kemija je znanost o lastnostih snovi in silah ter o pojavih, ki jih te sile povzročajo" |6|.

V prvi polovici 19. stoletja je imela klasična atomska teorija dva obraza. Za fizike je bil atom tog in nedeljiv gradnik tako snovi kot brezteţnega etra, ki ga karakterizirata še vztrajnost in odbojno-privlačna sila in za katerega veljajo vsi zakoni klasične mehanike. Kemikom je bila nasprotno bližja Daltonova slika, po kateri so atomi nedeljivi gradniki kemičnih elementov, ki se razlikujejo po atomski masi in po obliki. V tem času so določili večino elementov in 1869 je Mendelejev izdelal svojo (še nepopolno) preglednico.

Kljub uspehom atomske teorije se je v 19. stoletju bila huda bitka med njenimi pristaši in nasprotniki. Mnogi nasprotniki so bili namreč prepričani, da so atomi le namišljeni delci, bolj produkt razmišljanja kot pa eksperimentalnih izkušenj in je atomski model le delovna in pedagoška hipoteza. Poincaré je npr. zapisal |7|: "Je še druga vrsta hipotez, ki jih imenujem indiferentne. V večini primerov v začetku računanja privzamemo, da je snov zvezna ali pa sestavljena iz atomov. V obeh primerih bodo rezultati enaki".

Odpor proti dejanskemu obstoju atomov se je v drugi polovici 19. stoletja še povečal. Pojavila se je množica problemov, na katere atomisti tedaj niso mogli najti ustreznega odgovora. Tako npr. niso znali razložiti eksperimentalnih podatkov o specifični toploti nekaterih plinov, temperaturne odvisnosti atomskih spektrov ter paradoksa ireverzibilnosti. Včasih je bil vzrok pomanjkljivo poznavanje kemičnega sestava, največkrat pa prepričanje, da mora biti zgradba atoma preprosta.

Spet je postal aktualen ugovor, da togi in neprožni atomi pri trkih povzročajo neskončne sile. To težavo so sicer Kroenig, Clausius in Maxwell obšli tako, da so toge atome zamenjali s prožnimi. Vendar je pri tem Maxwell negodoval, češ da pripišemo atomom prav lastnosti makroskopskih teles, ki naj bi jih pojasnili z vpeljavo atomov. Podobno je bil Maxwell skeptičen do Boškovićeve ideje točkastih atomov, ker si ni znal pojasniti atomskih nihanj. V ilustracijo nasprotij navedimo še Planckovo izjavo iz 1897, da sta atomizem in kinetična teorija sterilni področji |7|. Prepričan atomist Boltzmann pa je zaradi odpora okolice do njegove statistične teorije plinov celo napravil samomor.

Atomska teorija je prevladala šele s spoznanji o deljivosti atoma na koncu stoletja (katodni žarki, radioaktivnost, fotoefekt). Tedaj so odpadli glavni razlogi proti Boškovićevim zamislim. Ko pa bi morala ta teorija slaviti zmago, pa jo je pokopala nova - valovna - mehanika, ki je ni bilo mogoče uskladiti z Boškovićevo teorijo.

Vendar sodobna teorija polja zopet uporablja nerazsežne delce. Mnoge Boškovićeve zamisli - seveda v sodobni preobleki - prav v zadnjem času spet dobivajo veljavo.

LITERATURA

|1| K. Vorlander, *Zgodovina filozofije I*, Ljubljana, Slov. matica 1968, str. 57.
|2| I. Newton, *Opticks* (1730), New York, Dover 1952, str. 400-401.
|3| B. G. Kuznecov v knjigi: *Očerki razvitija osnovnih fizičeskih idej*, Moskva, AN SSSR 1959, str. 157.
|4| J. R. Bošković, *Teorija prirodne filozofije* (1763), Zagreb, Liber 1974.
|5| M. Jammer, *Concepts of Force*, Cambridge, Mass., Harward University Press 1957.
|6| L. L. White, *Roger Joseph Boscovich*, London, Allen & Unwin 1961.
|7| M. J. Nye, Studies in History and Phylosophy of Science 7, (1976) 245.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

RAZVOJ POSEBNE TEORIJE RELATIVNOSTI

JANEZ STRNAD

V devetnajstem stoletju je doživela Newtonova mehanika velik razmah in si utrdila veljavo osrednje fizikalne teorije. Vse pojave so poskušali pojasniti na osnovi mehanike. 1864 je združil J.C. Maxwell zakone za električno in magnetno polje v pregledne enačbe, ki nosijo njegovo ime. Enačbe so napovedale elektromagnetno valovanje. H. Hertz je v osemdesetih letih odkril radijske valove in potrdil veljavnost enačb. Nekaj časa je trajalo, preden je obveljalo prepričanje, da je tudi svetloba elektromagnetno valovanje. Kot valovanje so obravnavali svetlobo na začetku devetnajtega stoletja Th. Young, A. Fresnel in drugi ter Ch. Huygens že mnogo prej (1690). Svetlobo in pozneje elektromagnetno valovanje so proučevali z enakimi prijemi kot mehanično valovanje.

Tu pa so se začele težave. Svetloba potuje namreč za razliko od mehaničnega valovanja tudi po praznem prostoru, to je po prostoru, ki ni izpolnjen s snovjo. Da bi premagali težave, so si izmislili zelo lahko in zelo malo raztezno snov, ki je nosila električno in magnetno polje in elektromagnetno valovanje. To tajinstveno snov, na katero fiziki niso imeli enotnih pogledov, so imenovali *eter*. Sčasoma je eter vse bolj izgubljal lastnosti snovi in dobival poteze odlikovanega opazovalnega sistema, v katerem veljajo Maxwellove enačbe v znani obliki. V tem opazovalnem sistemu je določena hitrost svetlobe z lastnostmi prostora : $c = (\varepsilon_o \mu_o)^{-1/2}$ - ε_o je influenčna in μ_o indukcijska konstanta, kot je v opazovalnem sistemu, v katerem miruje snov, hitrost mehaničnega valovanja c_m določena z lastnostmi snovi (pri trdnini so odločilne prožnostni konstanti in gostota).

Za Maxwella in njegove sodobnike je bila zamisel o obstoju etra naravna. Tudi nam se zdi naravno, da se širi mehanično valovanje v opazovalnem sistemu, v katerem snov miruje, s hitrostjo c_m, v opazovalnem sistemu, ki se giblje glede na snov s hitrostjo v_o v smeri potovanja valovanja, pa s hitrostjo $c'_m = c_m - v_o$.

Vendar nikoli ni uspelo izmeriti hitrosti Zemlje glede na odlikovani opazovalni sistem - eter. Ne moremo namreč pričakovati, da prav Zemlja miruje v tem opazovalnem sistemu. Od poskusov, s katerimi so skušali izmeriti hitrost Zemlje glede na eter, je najznamenitejši *Michelsonov poskus* s posebnim Interferometrom. Prvi ga je napravil A.A. Michelson sam 1881 in nato skupaj z E.W. Morleyem 1887. Od tedaj so ga ponovili v mnogih različnih izvedbah.

Izid Michelsonovega poskusa in drugih poskusov, s katerimi so zaman poskušali izmeriti hitrost Zemlje glede na eter in ki so dali enaki hitrosti c' in c za svetlobo, nasprotuje *Galilejevemu načelu relativnosti* . To načelo pravi, da veljajo za mehanične pojave enaki zakoni - Newtonovi zakoni - za opazovalca v katerem koli opazovalnem sistemu, ki ni pospešen. Takemu opazovalnemu sistemu pravimo *inercialni opazovalni sistem*. Pribijmo: Če veljajo Newtonovi zakoni in Galilejevo načelo relativnosti, so uporabne Maxweelove enačbe v znani obliki samo v odlikovanem opazovalnem sistemu etru (v njem je svetlobna hitrost c, v drugem opazovalnem sistemu, ki se giblje s hitrostjo v_o v smeri svetlobnega curka, pa je svetlobna hitrost $c' = c - v_o$). Če pa veljajo Maxwellove enačbe v vsakem inercialnem opazovalnem sistemu v znani obliki, ne veljajo Newtonovi zakoni. Prva možnost izključuje drugo in druga prvo. Izid Michelsonovega poskusa in podobnih poskusov podpira drugo možnost in izključuje prvo.

A. Einstein je 1905 postavil *posebno relativnostno teorijo*, v kateri je izbral drugo možnost. Zaradi velikega zaupanja v Newtonove zakone so fiziki le počasi sprejemali novo teorijo. Einstein je zgradil svojo teorijo na *načelu relativnosti*, po katerem veljajo za vse pojave - ne samo za mehanične, ampak tudi za električne - enaki zakoni v vseh inercialnih opazovalnih sistemih. Temu je dodal še načelo o *svetlobni hitrosti* (s tem je mišljena hitrost elektromagnetnega valovanja sploh): svetlobna hitrost v vseh inercialnih opazovalnih sistemih je enaka, če potuje svetloba po praznem prostoru. Prvo načelo je razširitev Galilejevega načela relativnosti, ki se je nanašalo samo na mehanične pojave. Drugo načelo pa je v dokaj tesni zvezi z izidom Michelsonovega poskusa. Einstein je molče privzel še *homogenost časa* in *homogenost* in *izotropnost prostora*: v nespremenjenih okoliščinah zveze med količinami niso odvisne od časa ali od kraja ali od smeri.

Tu ne moremo obravnavati posebne teorije relativnosti v podrobnostih. Omejimo se na tri najznačilnejše sestavine. Spremeniti je treba pogled na *sočasnost*. Pojava, ki se dogodita sočasno na različnih krajih za opazovalca v prvem inercialnem opazovalnem sistemu, nista sočasna za opazovalca v drugem inercialnem opazovalnem sistemu, ki se giblje glede na prvega. Čas ni več *absoluten*, to je za vse opazovalce enak, kot v Newtonovi mehaniki. Opazovalcu se zdi, da teče njegova lastna ura počasneje od gibajoče se ure. Vesoljec, ki se odpravi na pot v vesolje z veliko hitrostjo in se vrne na Zemljo, se manj postara kot njegov brat - dvojček, ki ostane na Zemlji. Ta zanimivi nasledek posebne relativnostne teorije je izzval mnogo razprav, a danes je podprt z izidi merjenj. Razmerje med lastnim časom, ki ga kaže lastna ura, in ustreznim časom, ki ga ugotovimo po dveh urah, glede na kateri se giblje lastna ura s konstantno hitrostjo v_o, je

$$(1 - v_o^2/c^2)^{1/2} = 1 - \frac{1}{2} v_o^2/c^2 + \ldots$$

Svetlobna hitrost je *zgornja meja* za hitrost teles, za potovanje energije in za prenašanje sporočil. Delci z maso ne morejo doseči v nobenem inercialnem opazovalnem sistemu hitrosti c. Kinetična energija delca z maso m in hitrostjo v

$$mc^2[(1 - v^2/c^2)^{-1/2} - 1] = \frac{1}{2}mv^2 + \ldots$$

bi narasla pri svetlobni hitrosti preko vsake meje. Elektromagnetno valovanje ali njegovi delci - fotoni, ki imajo maso nič, se gibljejo v katerem koli inercialnem opazovalnem sistemu s hitrostjo c.

Polna energija in masa sistema teles sta *povezani*. Ne velja ne zakon o ohranitvi mase ne izrek o ohranitvi polne energije za sistem teles, ki je popolnoma neodvisen od okolice. Oba zakona se zlijeta v enega: v *zakon o ohranitvi polne energije*, h kateri moramo šteti tudi *lastno energijo* ("energijo mase") mc^2:

$$W_k + \ldots + mc^2 = W_{k_1} + \ldots + m_1c^2$$

Iz tega sledi

$$W_k - W_{k_1} + \ldots = (m_1 - m)c^2$$

Poleg spremembe kinetične energije je treba upoštevati še spremembe drugih energij, ki prispevajo k polni energiji. W_{k_1} je skupna kinetična energija delcev na začetku, W_k skupna kinetična energija na koncu, m_1 skupna masa na začetku in m skupna masa na koncu. Sistemu se poveča skupna kinetična energija, če se mu zmanjša skupna masa: $m_1 > m$, $W_{k_1} < W_k$. Sistem lahko to energijo odda, če dopustimo, da sodeluje s telesi v okolici. Na račun zmanjšanja mase lahko tedaj pridobimo energijo.

Zaradi povečanja kinetične energije pri pospeševanju telesa do hitrosti 30 km/s se mu poveča masa relativno za $(v^2/c^2)/2 = 5.10^{-9}$. Pri ioniziranju vodikovega atoma z maso $1{,}7.10^{-27}$kg dovedemo atomu energijo 13,6 eV; relativno povečanje mase je pri tem okoli 10^{-8}. Pri mehaničnih in električnih
235 pojavih v laboratoriju torej ni treba upoštevati spremembe mase. V tem pri-

meru velja zakon o ohranitvi mase, saj spremembe mase pri današnjem stanju merilne tehnike ni mogoče zaznati. Pač pa je treba upoštevati spremembo mase, če so pri pojavu učinkovite jedrske sile. Pri razcepu jedra urana s počasnim nevtronom na dve srednje težki jedri in pri zlitju dveh vodikovih jeder v težje jedro se sprosti znatna energija. Razcep izkoriščajo v jedrskih reaktorjih in v uranskih jedrskih bombah, zlivanje pa v vodikovih jedrskih bombah. Z zlivanjem jeder lahkih elementov krijejo svoje energijske potrebe zvezde.

Po vsem tem vidimo, da je treba trditev "1 kg premoga - ali katere koli druge snovi - vsebuje 3.10^{16}J ali malo manj kot deset milijard kWh energije" in podobne trditve sprejeti z nezaupanjem. Trditev sicer ni napačna, a zavaja. Zavedati se moramo, da te energije ne moremo izkoristiti. Še pri jedrskih reakcijah izkoristimo samo majhen del lastne energije, namreč tistega, ki ustreza spremembi mase.

V enačbah posebne teorije relativnosti nastopa izraz v^2/c^2 , pogosto v faktorju $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. Velika telesa se gibljejo v laboraturiju kvečjemu s hitrostjo nekaj deset km/s, tako da se faktor v okviru zanesljivosti pri merjenju ujema z ena. Newtonova mehanika je v tem primeru zelo dober približek za relativistično ali Einsteinovo mehaniko. Einsteinovo mehaniko pa je treba uporabiti za hitre delce iz sveta atomov. Einsteinova mehanika je ob načrtovanju pospeševalnikov in drugih podobnih naprav enako uspešna kot Newtonova mehanika pri načrtovanju mostov in vozil.

Posebna teorija relativnosti je vsekakor pomembna fizikalna teorija, katere glavne nasledke naj bi vsaj v okvirnih črtah poznal vsak učenec. Za vsakdanje življenje je pomembna zveza med maso in polno energijo. Ta zveza je temeljito vplivala na svet, čeprav ima zasluge za to tudi velikanski razvoj jedrske tehnike. Še pomembnejše je spoznanje, do katerega je pripeljala ta teorija: pri raziskovanju narave se ni mogoče vselej opirati na vsakdanje izkušnje. Te so uporabne le na območju, na katerem smo jih dobili.

Med kratkim orisom teorije smo se namenoma izognili nekaterih obrobnih, a zanimivih vprašnja. 1905 je izšel v *Annalen der Physik* Einsteinov članek *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (K elektrodinamiki gibajočih se teles), ki je uvedel teorijo. Članek nima navedb literature in samo zahvalo Einsteinovemu osebnemu prijatelju in sodelavcu na švicarskem patentnem uradu v Bernu. Čeprav morda v tistih časih navajanje literature ni bilo tako razširjeno, kakor je dandanes, je to nenavadno. Ali je Einstein zgradil teorijo sam samcat, ne da bi se opiral na dognanja svojih predhodnikov? Odgovor na to vprašanje se glasi: Ne. H. Poincaré je pred 1905 postavil načelo relativnosti in predlagal svetlobno hitrost za mejno hitrost teles, a zamisli ni izdelal. A.H. Lorentz je pred Einsteinom izpeljal transformacijo za čas in koordinate pri prehodu iz inercialnega opazovalnega sistema v drug tak sistem, vendar ni do kraja zavrgel absolutnega časa in etra. Isto transformacijo je dobil že nekaj let prej J. Larmor, a se je še manj kot Lorentz zavedal pomembnosti odkritja. Einstein je izhajal od teoretičnih privzetkov in mu je bil izid Michelsonovega poskusa bolj pričakovani rezultat kot eksperimentalni podatek. Vseeno je čudno, da ni niti omenil Michelsona. Pred 1905 je Einstein z bernskimi prijatelji sodeloval v študijski skupini, ki je dokazano proučevala neko Poincarejevo knjigo z načelom relativnosti in opisom Michelsonovega poskusa. Einstein je v starosti dajal izjave - vse se med seboj niso skladale - , iz katerih izhaja, da je pred 1905 najbrž vedel za izid Michelsonovega poskusa. Dejal je, da je bil Michelsonov prijatelj in je dal vse priznanje Lorentzu, a Poincaréja ni niti enkrat omenil, kaže, da iz osebnih razlogov. Einsteinu je vsekakor pripravilo pot več fizikov. Vendar ni mogoče zanikati, da je imel samo on dovolj poguma za odločilni korak.

Na koncu omenimo, da je Einstein izdelal še eno teorijo - splošno teorijo relativnosti (1916), ki je teorija gravitacije. Mejni primer te teorije za majhne hitrosti teles in šibka gravitacijska polja je znani Newtonov gravitacijski zakon.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

RAZVOJ KVANTNE MEHANIKE

JANEZ STRNAD

Proti koncu prejšnjega stoletja se je lord Kelvin bal, da bo fizika kmalu mrtva znanost; vse bo že narejeno, le kako konstanto ali snovno lastnost bo mogoče izmeriti nekoliko zanesljiveje. To kaže na veliko zaupanje v *klasično fiziko*, kakor imenujemo danes Newtonovo mehaniko in Maxwellovo elektrodinamiko. Vendar se je na srečo pokazalo, da lord Kelvin ni imel prav. Že pred koncem stoletja so se pojavile težave, ki jim klasična fizika ni bila kos. Prva skupina teh težav je privedla do posebne relativnostne teorije. Druga skupina pojavov pa se je nanašala na atomski svet in je vodila do *kvantne mehanike*, za katero lahko mirno rečemo, da je še pomembnejša kot posebna teorija relativnosti.

Začelo se je s sevanjem črnega telesa, ki absorbira vso vpadlo svetlobo in od vseh trdnih teles najizdatneje seva. Črno telo seva svetlobo z zveznim spektrom, ki ga Maxwellova elektrodinamika ne more pojasniti. Spekter je naposled razložil M. Planck 1900 s privzetkom, da elektromagnetno valovanje ne izmenjuje z okolico energije zvezno, ampak v obrokih. Za tak droben obrok energije elektromagnetnega valovanja se je udomačilo ime *foton* ali *kvant elektromagnetnega polja*. V elektromagnetnem valovanju z izbrano frekvenco so eden, dva, trije,... fotoni ali ni nobenega fotona, ne more pa biti fotonovega dela. Planck se sam ni mogel popolnoma sprijazniti s svojo zamislijo. Sprva je vpeljal konstanto h, ki nosi njegovo ime, z namenom, da jo bo na koncu računov izenačil z nič. Toda pravi spekter je dobil, ko je obdržal končno vrednost $h = 6{,}6.10^{-34}$Js.

Zamisel o fotonu je prvi dosledno uporabil A. Einstein pri razlagi fotoefekta* 1905. Pri fotoefektu izbija svetloba elektrone iz kovine. Vendar uspe fotoefekt samo s svetlobo, ki ima dovolj veliko frekvenco, se pravi dovolj kratko valovno dolžino. V izrazu za gostoto energije elektromagnetnega valovanja v Maxwellovi elektrodinamiki ni frekvence, zato ta ni mogla pojasniti merjenj pri fotoefektu. Einstein je pojasnil pojav takole: foton z energijo $h\nu$, če je ν frekvenca svetlobe, se absorbira in pri tem preneha obstajati. Njegovo energijo prevzame prevodniški elektron v kovini, je del $W_o = h\nu_o$ porabi za delo proti silam, ki ga vežejo na kovino, in izstopi s kinetično energijo

$$W_k = h\nu - h\nu_o = h(\nu - \nu_o)$$

To velja samo za najhitrejše elektrone, ki ne doživijo v kovini nobenega trka. ν_o je mejna frekvenca, pod katero ni fotoefekta. Einsteinovo enačbo je preveril z merjenjem R.A. Millikan 1914.

Velika težava za Maxwellovo elektrodinamiko je obstojnost vodikovega atoma in drugih atomov. V vodikovem atomu se giblje elektron okoli jedra pospešeno. V Maxwellovi elektrodinamiki pa pospešeni nabiti delci sevajo elektromagnetno valovanje in izgubljajo s tem energijo. Elektron v vodikovem atomu bi se moral tedaj vse bolj bližati jedru in naposled pasti vanj. Vodikov atom bi moral sam od sebe sevati svetlobo z zveznim spektrom in sploh ne

* Istega leta je časopis *Annalen der Physik* prinesel tri izredno pomembna Einsteinova dela, poleg članka s posebno relativnostno teorijo in članka z razlago fotoefekta še članek z razlago Brownovega gibanja, to je gibanja drobnih makroskopskih delcev v plinu ali kapljevini.

bi mogel biti obstojen. N. Bohr je 1913 privzel, da se lahko giblje elektron v vodikovem atomu samo po krogih z izbranim radijem in pri tem ne seva. Atom seva samo, ko elektron preskoči z enega dopustnega tira na drugega. S tem samovoljnim privzetkom je Bohr prvič pojasnil črtast spekter vodika, ki ga Maxwellova elektrodinamika nikakor ni mogla pojasniti.

Pokazalo se je, da je svetloba, ki smo jo bili vajeni obravnavati kot zvezno valovanje, sestavljena iz energijskih obrokov. L. de Broglie se je 1925 vprašal, ali ne velja morda tudi obratno: delci iz atomskega sveta, ki smo jih prej obravnavali kot točkasta telesa Newtonove mehanike, morda kažejo lastnosti valovanja. Po zvezi, ki velja za fotone, je napovedal valovno dolžino valovanja, ki ga priredimo delcu z maso m in hitrostjo v:

$$\lambda_B = h/mv$$

1927 sta zvezo potrdila C.J. Davisson in L.H. Germer z interferenco elektronskega curka po odboju na mejni ploskvi kristala. Pozneje so jo potrdili še s številnimi merjenji s curki nevtronov, atomov in molekul in kristali ter s curki elektronov in drobnimi režami.

Tako smo prišli do nepremostljivega nasprotja: v klasični fiziki opišemo pojav kot gibanja telesa ali kot zvezno valovanje. Prva možnost izključuje drugo in druga prvo. V atomskem svetu pa ima valovanje lastnosti curka delcev in curek delcev lastnosti valovanja. (Pojme smo uporabili, kakor jih vpeljemo v klasični fiziki.) Kaj so torej elektroni in sorodni delci: delci ali valovanje? To vprašanje je napak postavljeno in nanj v taki obliki ne poskusimo odgovoriti. Iz zagate se rešimo takole: elektroni in sorodni delci niso ne točkasta telesa ne valovanje iz klasične fizike. So *kvantni delci*, za katere ne velja Newtonova mehanika, ampak nova*- *kvantna mehanika*. Kvantna mehanika je po matematični plati dokaj zahtevna in je nastala proti koncu dvajsetih let. Z njenim nastankom so povezana imena: W. Heisenberg, E. Schrödinger, W. Pauli, P. Jordan, M. Born, P.A.M. Dirac.

Ne moremo se spuščati v podrobnosti kvantne mehanike. Navedemo pa lahko nekaj njenih najpomembnejših sestavin.

Vezani sistemi kvantnih delcev imajo *diskretna energijska stanja*, to je stanja z izbranimi energijami. Vodikov atom v svojem težiščnem stanju ne more imeti katere koli energije, ampak ima samo izbrane *lastne energije*. Zelo poenostavljeno si lahko mislimo, da ustreza elektronu, ki se giblje okoli jedra, nekakšno stoječe valovanje. Kot so pri stoječem valovanju vpete strune možne samo diskretne lastne frekvence, so pri atomu dopustne samo diskretne lastne energije.

Stanje z najmanjšo energijo je *osnovno stanje*, stanja z večjo energijo so *vzbujena stanja*. Sistem prejme energijo, ko preide iz stanja z manjšo energijo v stanje z večjo energijo , in energijo odda, ko preide iz stanja z večjo energijo v stanje z manjšo energijo. Do takega prehoda pride pri trku z delcem iz okolice ali pa pri izmenjavi fotona z okolico. Sistem izseva foton z izbrano energijo in preide iz stanja z večjo energijo v stanje z manjšo energijo ali absorbira foton in preide iz stanja z manjšo energijo v stanje z večjo energijo.

Ni mogoče napovedati, kdaj se bo dogodil kak pojav s kvantnim delcem ali z majhnim številom kvantnih delcev. Ni mogoče napovedati, kdaj bo posamični atom iz vzbujenega stanja prešel s sevanjem v stanje z manjšo energijo. Mogoče je le napovedati, kolikšen delež velikega števila enakih atomov bo v izbranem časovnem razmiku prešel s sevanjem iz danega stanja v drugo dano stanje. Drugače rečeno: povemo lahko *verjetnost za prehod* v izbranem časovnem razmiku ali verjetnost za prehod na časovno enoto za posamični atom.

---

* Bohrovi, de Brogliejevi privzetki in drugi privzetki, ki jih dodamo enačbam klasične fizike pri opisovanju pojavov iz atomskega sveta, sestavljajo zgodnjo razvojno stopnjo – *staro kvantno mehaniko*.

Ne moremo določiti *tira* kvantnega delca. Lahko ostro določimo njegovo lego, a tedaj je njegova hitrost popolnoma negotova; lahko ostro določimo njegovo hitrost, a tedaj je njegova lega popolnoma negotova. To je vsebina *Heisenbergovega načela nedoločenosti* (1927). Navedemo pa lahko verjetnost, da bo delec v majhni prostornini v okolici izbrane točke al verjetnost na prostorninsko enoto, to je *verjetnostno gostoto*.

Opazimo *interferenco*. Če imamo dve rešitvi danega problema, je tudi njuna vsota rešitev (*načelo superpozicije*). Z rešitvijo mis imo pri tem na neko funkcijo - *valovno funkcijo ali funkcijo stanja* -, katere absolutno vrednost moramo kvadrirati, da dobimo verjetnostno gostoto.

Dveh kvantnih delcev iste vrste v kakem sistemu, ki se po kaki značilni lastnosti ne razlikujeta, sploh ne moremo razločevati. Seveda: kvantnih delcev ne moremo zaznamovati z barvo, z lego, s frekvenco radijskega oddajnika.

Dva kvantna delca iste vrste v kakem sistemu se morata razlikovati vsaj po eni značilni lastnosti. To *Paulijevo izključitveno načelo* (1925) pa ne velja za vse kvantne delce; velja za elektrone, za protone, za nevtrone, za fotone pa ne. Elektroni in drugi delci, za katere velja izključitveno načelo, spominjajo na telesa Newtonove mehanike, za katere so včasih navajali zakon o neprodirnosti. Po tem zakonu dve telesi ne moreta biti na istem kraju.

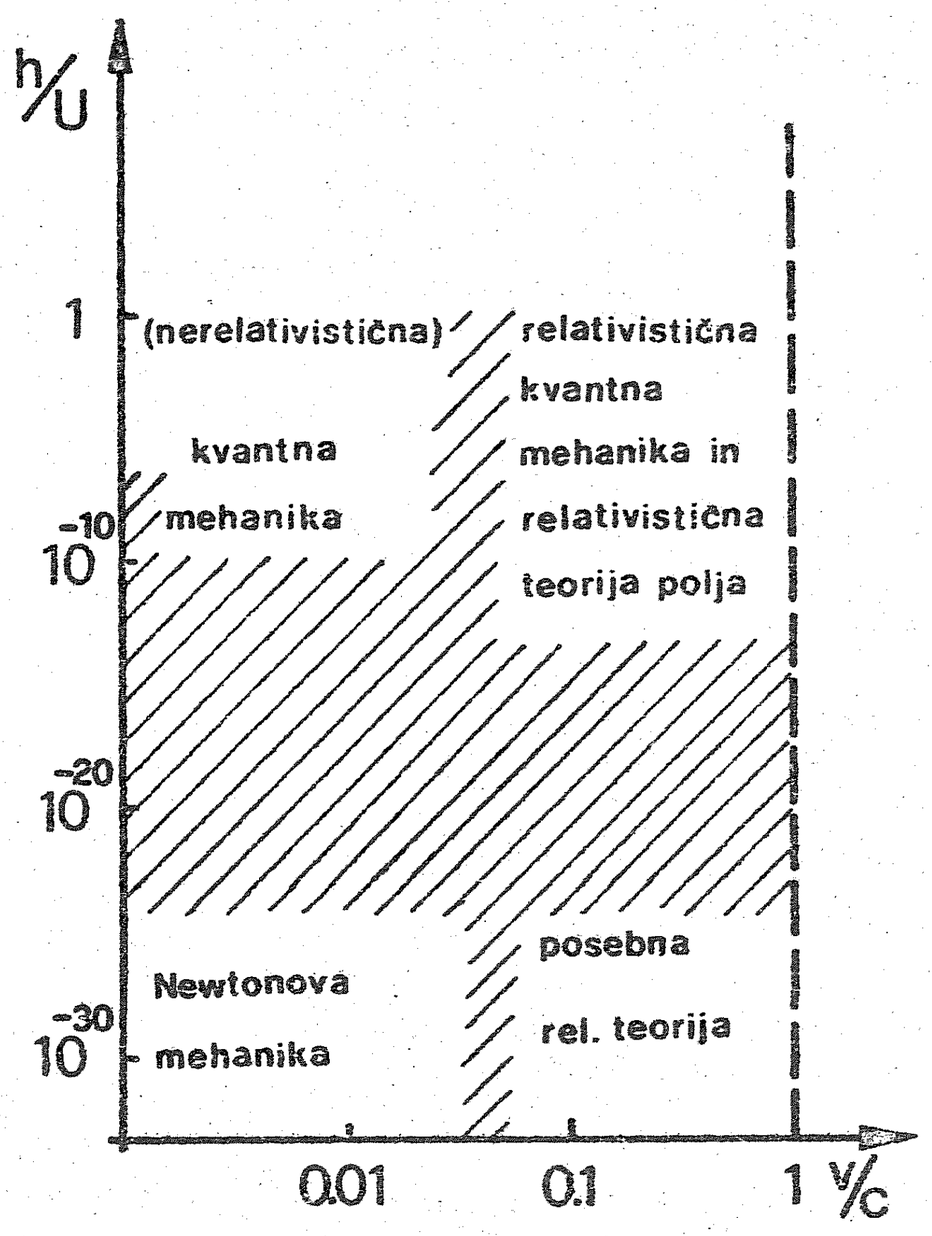
Zaradi trditev, da ne moremo z gotovostjo napovedati izida posamičnega poskusa s kvantnimi delci, so nekateri proglasili kvantno mehaniko za indeterministično, medtem ko naj bi bila Newtonova mehanika deterministična. Vendar je treba biti pri dajanju takih vzdevkov previden. Z raketo z Zemlje ne morejo zadeti Lune, če naknadno ne popravijo njene hitrosti. Zares je tir težišča rakete koristna idealizacija, vendar pri tem privzamemo, da zanesljivo poznamo vse podatke, to je velikost in smer hitrosti, maso rakete, silo Zemlje nanjo itd. Vendar so vsi podatki obremenjeni z merskimi napakami. Za elektron pa tir ni uporaben niti kot idealizacija. Če je elektron zapustil katodo in ga zaznamo na zaslonu, v splošnem nima smisla postavljati vprašanja o vmesnih točkah, ki jih je preletel. To velja tudi, če sta postavljeni med začetno in končno točko dve reži in nastane na zaslonu interferenčna slika. Edino z merjenjem bi lahko ugotovili, skozi katero izmed obeh rež je šel kateri elektron. Vendar v tem primeru na zaslonu sploh ne bi nastala za dve reži značilna interferenčna slika in bi dobili popolnoma drugačen izid poskusa. Merjenje ima v kvantni mehaniki osrednji pomen, ker bistveno zmoti kvantni delec. V kvantni mehaniki ne moremo doseči, da bi kot v Newtonovi mehaniki z merjenjem zaznavno ne zmotili telesa.

Kvantna mehanika opiše pojave, ki se jih udeležujejo kvantni delci z maso, če njihova hitrost ni velika v primeri s svetlobno hitrostjo. Poznati je treba le sile, ki delujejo med delci. Čeprav brez težav zapišemo ustrezne enačbe, naletimo pri sistemih z večjim številom kvantnih delcev na težave računske narave in se je treba oprijeti približkov.

S kvantno mehaniko pojasnimo lastnosti atomov: sevanje svetlobe, energijska stanja in spekter, kemijske lastnosti in periodno preglednico in lastnosti molekul in kristalov. Praktično lahko z njo pojasnimo vse pojave, ki jih opazimo okoli sebe in se jih udeležujejo kvantni delci. Kvantna mehanika je imenitna teorija, ki vsebuje Newtonovo mehaniko kot mejni primer. Newtonova mehanika je uporabna kot približek, če so značilne razsežnosti opazovanega sistema velike v primeri s h/mv. Drugi približek za kvantno mehaniko, ki je uporaben, če so značilne razsežnosti sistema približno tolikš ne kot h/mv, je valovna optika (Newtonova mehanika sedaj nekako ustreza geometrijski optiki).

Kvantna mehanika je pomembna kot zgled za teorijo, v kateri nastopajo tudi količine, ki jih ne moremo neposredno meriti. To velja na primer za valovno funkcijo, katere kvadrat absolutne vrednosti določa verjetnostno gostoto.

Sl. 1. Okvirna ponazoritev območij veljavnosti. Na abscisno os je nanesena značilna hitrost opazovanega delca, deljena s svetlobno hitrostjo. Na ordinatno os je nanesena Planckova konstanta, deljena z značilnim učinkom. Učinek sestavimo na primer kot produkt značilne hitrosti in mase delca z značilno razsežnostjo opazovanega sistema. Meje območij so odvisne od želene zanesljivosti.



Medtem ko lahko verjetnostno gostoto neposredno merimo, omenjene funkcije ne moremo. Po tem vidimo, da je pretirana zahteva, naj v fizikalnih teorijah nastopajo samo količine, ki so neposredno dostopne merjenju. Kot opombo dodajmo tole ugotovitev: kvantna mehanika je dokaj abstraktna teorija, v kateri ne poskušamo vsake količine neposredno izmeriti. S poskusi preverjamo le končne rezultate kvantne mehanike. Glede tega moramo priznati, da je kvantna mehanika mnogo manj nazorna kot na primer Newtonova mehanika. Še stara kvantna mehanika je znatno nazornejša od kvantne mehanike. Pojmi kot Bohrovi tiri, de Brogliejeva valovna dolžina in nekateri drugi so prav nazorni. Vendar je najbolje, če jih pri pouku čim manj uporabljamo, ker moramo na koncu priznati, da so to le zasilna pomagala, ki v resnici ne sodijo v kvantno mehaniko.

Kvantna mehanika ima svoje meje. Ne velja za delce, katerih hitrost ni majhna v primeri s hitrostjo svetlobe, torej ne velja, če smo natančni, za fotone. Kvantna mehanika namreč izhaja iz Newtonove mehanike in je *nerelativistična*. Hitre delce obravnava *relativistična kvantna mehanika*, ki uporablja popolnoma drugačne prijeme. V njej je glavni pojem *polje*, tako da govorimo v tej zvezi pogosto o *kvantni teoriji polja*. *Kvantna teorija elektromagnetnega polja* ali *kvantna elektrodinamika* zajema fotone in elektrone in je za zdaj najzanesljivejša fizikalna teorija. V teoriji polja jedrske sile in polja šibke sile pa so v zadnjem času dosegli več zavidljivih uspehov.

LITERATURA za strani od 234 - 240

1| A. Einstein, Infeld, *Razvoj fizike*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1962.
2| R.E. Peierls, *Zakoni narave*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1960.
3| F. Herneçk, *Albert Einstein*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1966.
4| L.D. Landau, J.B. Rumer, *Pogled v relativnostno teorijo*, Ljubljana, Cankarjeva založba 1966.
5| J. Strnad, *Kvantna fizika*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1969 in Državna založba Slovenije 1974.
6| J. Strnad, *Relativnost*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1969.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

ATOMSKI MODELI

NORMA MANKOČ BORŠTNIK

Kak pojav poskušajo fiziki pogosto razumeti tako, da si zanj zamislijo čim preprostejši model, ki ima bistvene značilnosti pojava. Z dobrim modelom lahko opišejo pojav tudi v razmerah, v katerih ga še niso opazovali. Model vedno znova preskušajo z novimi opazovanji in nemalokrat model ne vzdrži preskusa. Potem je treba model razširiti ali celo zavreči in poiskati novega.

Tudi model o gradnikih snovi - o *atomih* - je doživel v zgodovini korenite spremembe. Stari Grki so menili, da snovi ni mogoče deliti na poljubno majhne dele in da je snov zgrajena iz delcev, ki so nedeljivi. Te delce so imenovali atome. Njihova zamisel o zgradbi snovi ni dozorela v model in lastnosti snovi niso poskušali resno razložiti z lastnostmi atomov. Tako drobnih delcev, kot so atomi, tedaj namreč niso mogli opazovati in zato o njih niso imeli podatkov.

V 19. stoletju so prišli do spoznanja, da je atomov več vrst. Menili so, da so nekatere snovi sestavljene iz atomov ene same vrste, da pa so druge snovi sestavljene iz molekul, v katere se na čisto določen način vežejo atomi.

Maxwell in Boltzmann sta uspela razložiti lastnosti razredčenih plinov z modelom, da je plin sestavljen iz majhnih togih kroglic z določeno maso in določeno velikostjo. Kroglice prožno trkajo druga ob drugo in ob stene posode in vzdržujejo tlak. Da kroglice, ki trkajo ob steno, povzročajo tlak, se prepričamo s poskusom. Vzamemo lahko ploščo in jo obesimo na dve vrvici. Vanjo mečemo v vodoravni smeri drobne kroglice v dovolj kratkih presledkih. Plošča se odmakne in ostane odmaknjena tako, kot da bi jo tiščali s konstantno vodoravno silo. Nič drugače ni, ko trkajo molekule plina ob steno posode. Sila, preračunana na enoto ploskve, je tlak.

Maxwell in Boltzmann sta uspela z modelom pojasniti plinsko enačbo, ki povezuje tlak, temperaturo in prostornino razredčenega plina in ki so jo prej ugotovili s poskusi. Tedaj so že poznali tudi približno velikost in maso molekul ali atomov. Vedeli so, da je masa atoma ali molekule približno enaka celemu mnogokratniku mase vodikovega atoma in da so molekule in atomi nevtralni. Ugibali so, ali je atom nedeljiv najmanjši delec snovi ali je morda sestavljen iz drugih, manjših gradnikov.

S preprostim poskusom lahko ocenimo velikost molekul in atomov. Vzemimo kapljico olja s prostornino približno 1 mm^3 in jo spustimo na vodno gladino. Kapljica se bo na vodni gladini razlezla in prekrila približno 1 m^2 gladine. Debelina plasti olja je približno $1\ mm^3/10^6 mm^2 = 10^{-6} mm = 10.10^{-10} m = 10$ Å. Olje je torej sestavljeno iz gradnikov, ki imajo vsaj tolikšno razsežnost. Olja ne sestavljajo atomi, ampak molekule in tanka plast na vodni gladini morda ni iz ene same plasti molekul. Velikostno stopnjo premera molekul pa smo le ocenili.

Thomsonu je uspelo s poskusi dokazati obstoj *elektronov*. Skozi električno in magnetno polje je usmeril curek negativno nabitih delcev, ki so sestavljali tok po razredčenem plinu, in po tiru določil razmerje med nabojem in maso delca.

Hitro se lahko prepričamo, da so v snovi nabiti delci. Podrgnimo palico iz plastike s krpo in se s to palico dotaknimo dveh lahkih kroglic, ki smo ju

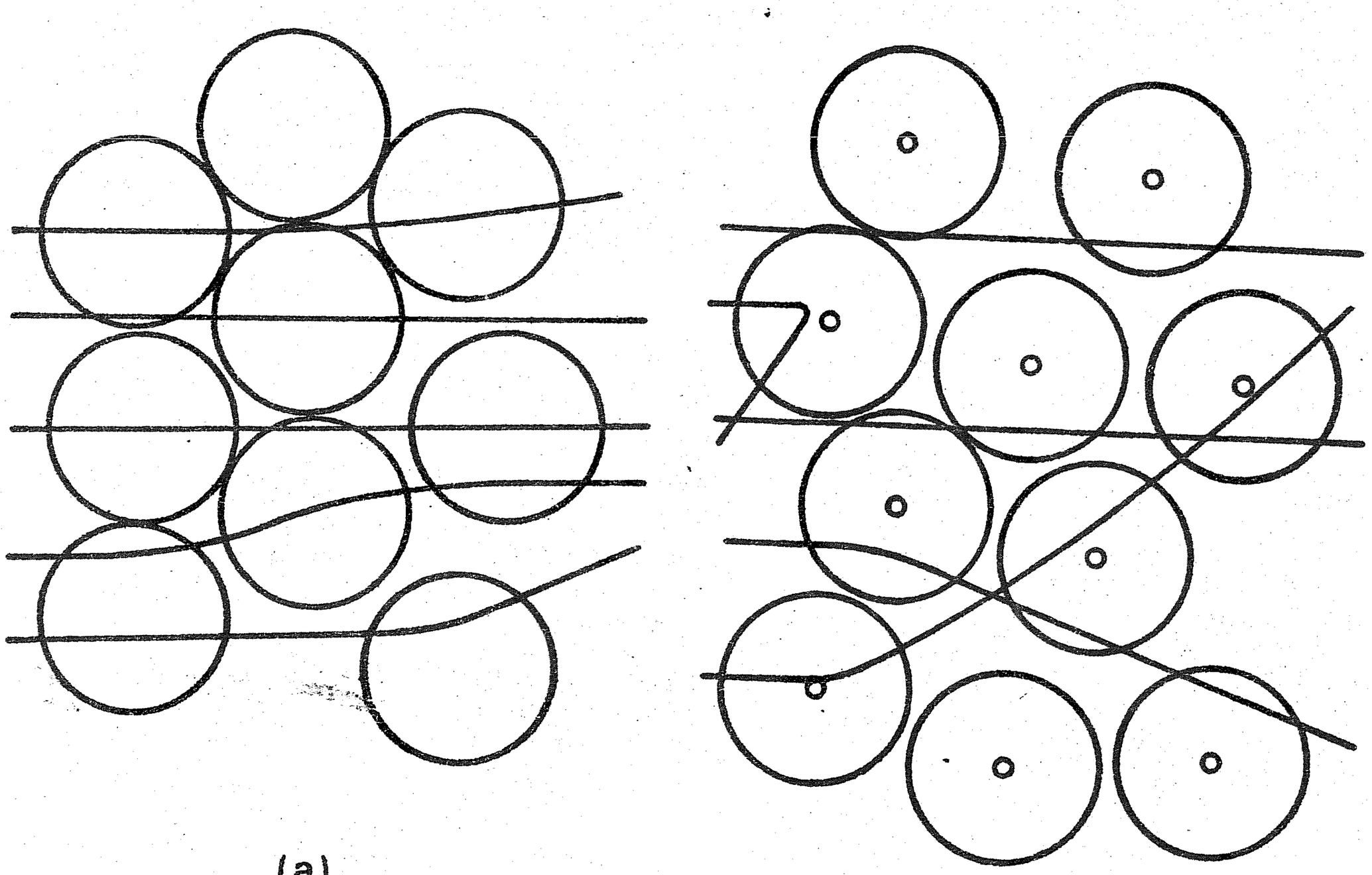
prevlekli s staniolom. Med kroglicama deluje odbojna električna sila. Palica se je nabila ob trenju s krpo in z nje smo privedli naboj na kroglici.

Millikan je meril naboj pozitivno ob negativno nabitih oljnih kapljic ter vedno dobil zanj cel mnogokratnik *osnovnega naboja* e_o. Elektron ima negativni osnovni naboj. Pozitivni osnovni naboj pa ima vodikov atom, ko zgubi en elektron.

Atom je potem zagotovo sestavljen delec. Sestavljajo ga negativni elektroni, od katerih ima vsak komaj dvatisočinko mase vodikovega atoma, in veliko težji pozitivno nabiti delci. Ker je atom navzven nevtralen, mora biti elektronov in pozitivnih osnovnih nabojev enako število.

Kakšen model o atomu so si lahko izmislili na osnovi teh podatkov? V najpreprostejši sliki so pozitivno nabiti delci, ki nosijo večino mase atoma, razmazani po vsem atomu.

Kmalu so poskusi pokazali, da je tak model napačen. Rutherford je obstreljeval atome v tankem kovinskem lističu z delci α, to je s hitrimi atomi helija, ki so izgubili dva elektrona. Rezultati so bili čisto nepričakovani. Delci α se pri prehodu skozi snov niso obnašali tako, kot bi pričakovali, če bi bil pozitivni naboj z veliko maso razmazan po vsem atomu. Večinoma se skoraj niso odklonili, maloštevilni pa so se močno odklonili, nekateri celo v smeri nazaj.



Sl. 1. Thomsonov model atoma (a) in Rutherfordov model atoma (b). Črte kažejo pričakovane tire delcev α (odklon na risbi (a) je pretiran, prav tako delež močno odklonjenih delcev na risbi (b)).

Rutherford je predlagal nov model atoma: v središču atoma je *jedro* iz pozitivno nabitih delcev, ki nosijo skoraj vso maso atoma Premer jedra je skoraj stotisočkrat manjši od premera atoma. Lahki elektroni se gibljejo okrog jedra in določajo velikost atoma. Delci α, ki se približajo jedru, se močno odklonijo. Delci α, ki pa jedro zgrešijo, lahkih elektronov še opazijo ne in pridejo skoraj nemoteno skozi listič.

Nekaj časa so mislili, da sestavljajo jedro samo *protoni*, to so jedra vodikovih atomov. Vendar so ugotovili, da je masa atomov pogosto približno dvakrat večja, kot zahteva ta model. Po tem so sklepali, da so v jedru poleg protonov še nevtralni delci s približno enako maso, kot jo imajo protoni. Imenovali so jih *nevtrone*. V jedru je toliko nevtronov, da je masa atoma približno prava.

1932 so dokazali obstoj nevtronov s poskusom. S tem je model atoma s protoni in z nevtroni v jedru in z elektroni okoli jedra dobil trdno eksperimentalno osnovo. Slika o zgradbi snovi se je močno poenostavila. Namesto iz približno stotih različnih atomov je snov zgrajena iz protonov, iz nevtronov in iz elektronov. Protoni in nevtroni se združujejo v jedra, jedra in elektroni pa v atome. Število elektronov v atomu je enako številu protonov v jedru.

Mera za velikost atomov je razdalja med sosednjima atomoma v trdni snovi ali v kapljevini. Na velikost molekul in atomov lahko sklepamo tudi iz obnašanja plinov. Po vseh ocenah je premer atomov nekaj angstremov. Jedro je okrog stotisočkrat manjše.

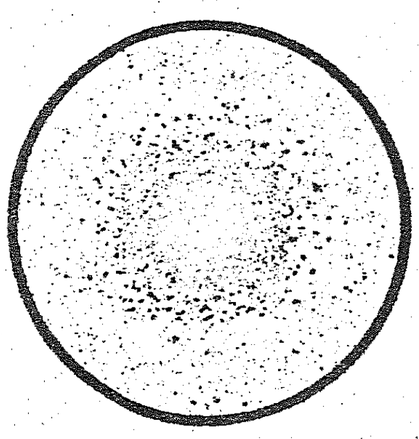
Da si bomo znali predstavljati razmerje med razsežnostma jedra in atoma, si zamislimo, da je jedro veliko kot glava bucike. Tedaj ima atom premer približno 100 m . V tem ogromnem praznem prostoru se gibljejo točkasti elektroni. V vodikovem atomu je en sam elektron, v svinčevem atomu pa jih je 82.

Atom z jedrom in z elektroni, ki krožijo okoli jedra, spominja na Osončje, na Sonce in planete, ki krožijo okrog njega. Planet kroži s tolikšno hitrostjo, da je gravitacijka sila Sonca ravno centripetalna sila. Elektron kroži okoli jedra s tolikšno hitrostjo, da je električna sila jedra ravno centripetalna sila. Gravitacijska in električna sila pojemata obe obratno sorazmerno s kvadratom razdalje. Gravitacijska sila je sorazmerna še s produktom mas planeta in Sonca, električna sila pa s produktom nabojev elektrona in jedra. Zemlja potrebuje za obhod okoli Sonca v razdalji okoli 150 milijonov kilometrov eno leto. Elektron v atomu pa obkroži jedro v razadalji okoli 1 Å 10^{15}-krat v sekundi.

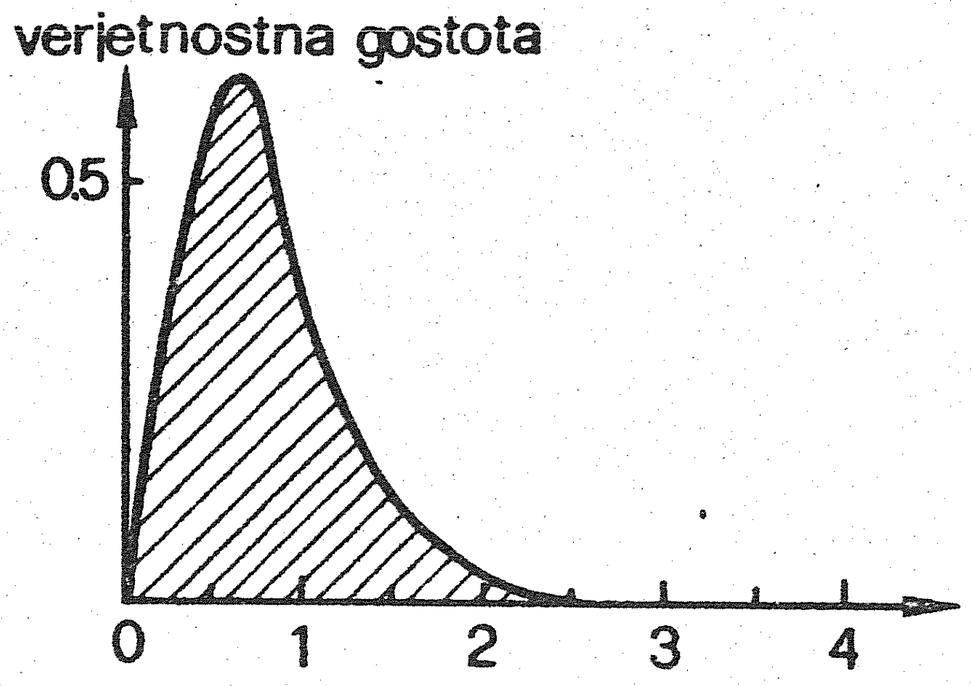
Zakaj kroži elektron okoli jedra v razdalji približno 1 Å ? Zakaj ne kroži v manjši razdalji hitreje ali v večji razdalji počasneje? Planeti v Osončju imajo različne tire, zakaj pa so vsi vodikovi atomi enako veliki? In še nekaj: krožeč nabiti delec seva in izgublja energijo. Če je tako tudi v atomu, bi morali atomi zaradi sevanja elektronov izgubljati energijo in bi elektroni prej ali slej popadali v jedro. To pa se ne zgodi. Atomi ohranijo svojo velikost. Poskusi tudi kažejo, da atomi sevajo, a le, če prej sprejmejo energijo. Atomi ne morejo sprejeti poljubne energije, ampak samo izbrane energije. Atomi tudi oddajo samo izbrane energije. Planetni model torej za atome ni uporaben. Preprosta klasična slika v svetu majhnih delcev odpove.

1913 je Niels Bohr dopolnil planetni model atoma z zahtevo, da krožijo elektroni samo po tirih z izbranimi radiji in določil najmanjši radij. S tem je postavil "kvantni pogoj" za gibanje elektronov okoli jedra. V Bohrovem modelu atom ne more sevati poljubne energije. Energija, ki jo lahko seva, ustreza razliki energij, ki ju ima elektron na tiru z večjim in na tiru z manjšim radijem.

Danes vemo, da tudi Bohrov model ne ustreza in ne pojasni vseh poskusov. Brez dvoma pa je ta model odprl pot v razumevanje sveta majhnih delcev. V tem svetu ne veljajo zakoni gibanja klasične fizike.



a)



b)

Sl. 2. Verjetnostna gostota za elektron v vodikovem atomu v stanju z najnižjo energijo; najpogosteje je elektron v bližini jedra (a). Preglednejša je odvisnost radialne verjetnostne gostote od razdalje od jedra (b). Risba kaže, da lahko naletimo na elektron v razdalji od jedra do 3 Å, najpogosteje pa v razdalji okoli 0,5 Å. Ta razdalja se ujema z radijem, ki ga da za stanje z najnižjo energijo Bohrov model.

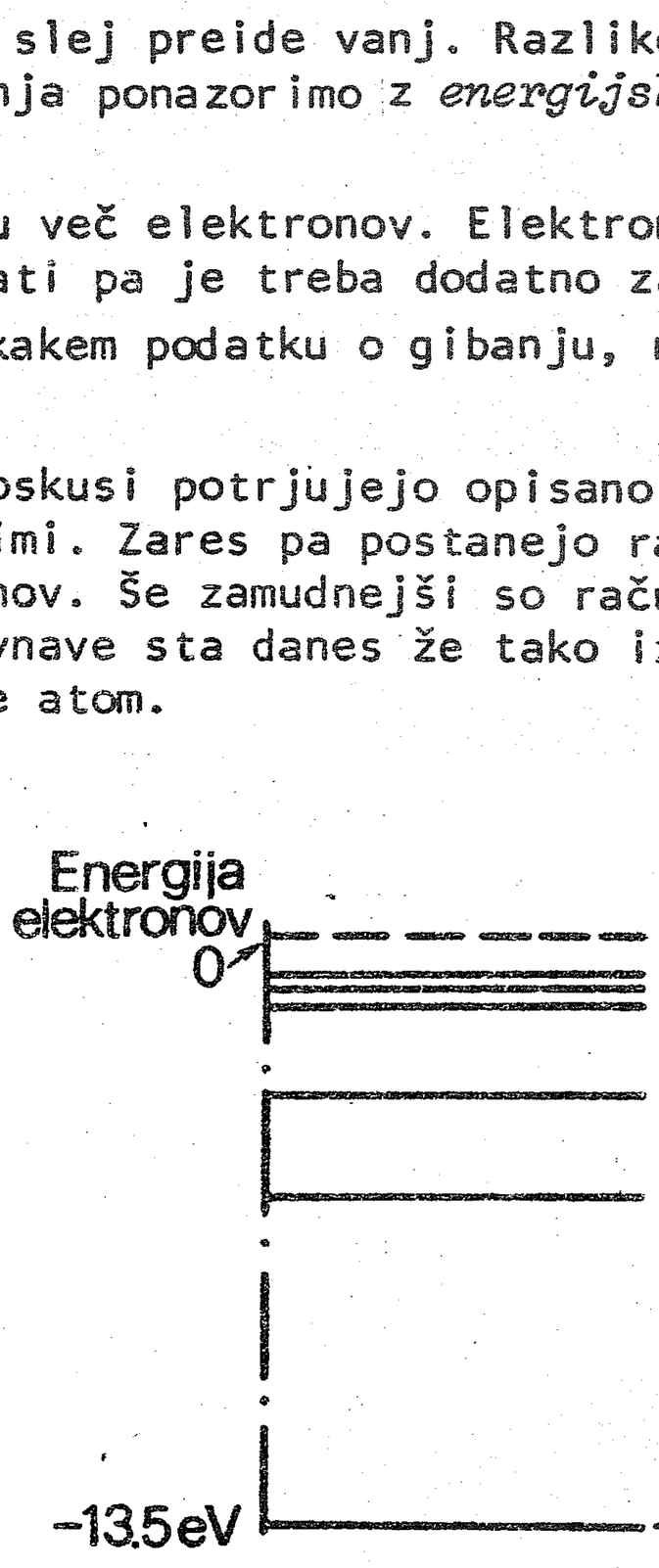
Današnji model atoma ima za osnovo valovno sliko. Elektronu v atomu namreč ne moremo natančno določiti tira. Elektron lahko najdemo kjerkoli v prostoru okoli jedra. Na nekaterih mestih pa ga zalotimo bolj pogosto kot na drugih. Zadovoljiti se moramo samo s podatkom za verjetnostno gostoto.

Kljub temu, da ne moremo elektronu v atomu določiti tira, pa sta energija in vrtilna količina ostro določeni. Elektron ima več možnosti za gibanje po atomu. Tem možnostim ustrezajo različne verjetnostne gostote. Vsaki verjetnostni gostoti pa ustrezata določena energija in vrtilna količina. Pravimo, da je atom lahko v različnih *stanjih*. Stanju z najnižjo energijo pravimo *osnovno stanje*.

Atom, ki ni v osnovnem stanju, prej ali slej preide vanj. Razliko energij navadno prevzame izsevana svetloba. Stanja ponazorimo z *energijskim spektrom*.

Slika se nekoliko zaplete, če je v atomu več elektronov. Elektrone v atomu opišemo z verjetnostno gostoto, upoštevati pa je treba dodatno zahtevo, da dva elektrona, ki se ne razlikujeta po kakem podatku o gibanju, ne moreta biti na istem mestu.

Danes znamo pojasniti vedenje atomov. Poskusi potrjujejo opisano sliko atoma in rezultati računov se ujemajo z njimi. Zares pa postanejo računi zelo zapleteni, če je v atomu veliko elektronov. Še zamudnejši so računi za molekule. Merilna tehnika in teorija obravnave sta danes že tako izpopolnjeni, da zmoremo veliko trše orehe, kot je atom.



Sl. 3. Energijski spekter vodikovega atoma. Vodoravna črta ustreza stanju atoma.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

R A D A R

NORMA MANKOČ BORŠTNIK

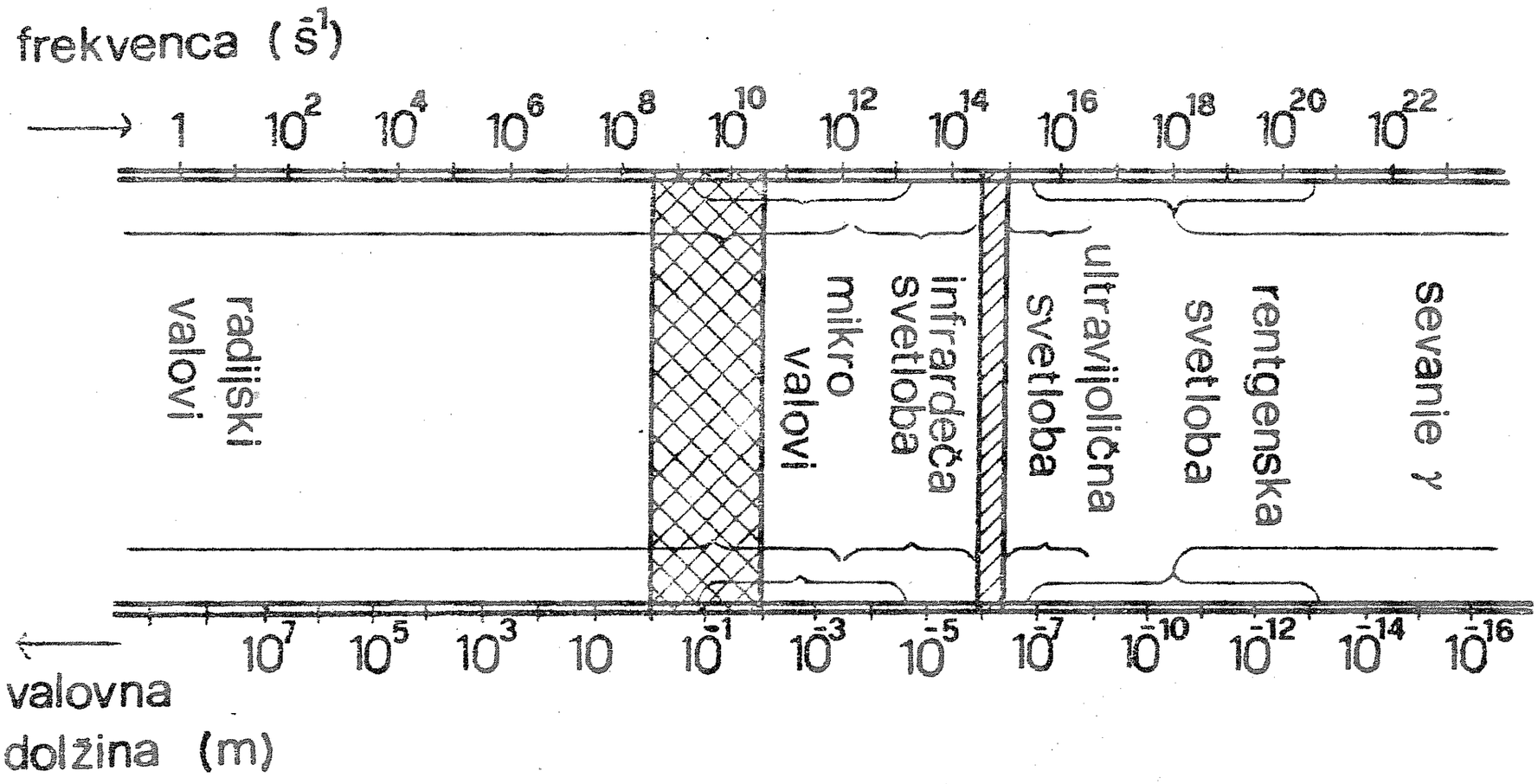
Kako opazujemo okolico in se v njej znajdemo? Predvsem gledamo in poslušamo. V obeh primerih sprejemajo naša čutila valovanja, ki prihajajo od predmetov. Uho sprejema zvok, oko svetlobo.

Deli zraka ob zvočilu zanihajo in v zraku nastanejo zgoščine in razredčine, ki potujejo s hitrostjo približno 340m/s do naših ušes. Če razmiki med zgoščinami niso znatno večji kot 15 m in ne manjši kot nekaj cm in če so zgoščine in razredčine dovolj izrazite, jih uho sliši kot zvok.

Pri svetlobi in pri drugih vrstah elektromagnetnega valovanja valujeta električno in magnetno polje. Elektromagnetno valovanje se širi po prostoru s skoraj milijonkrat večjo hitrostjo kot zvok. Naše oko je občutljivo le za valovanje z valovno dolžino od približno 4500 Å do približno 8000 Å (1 Å je 1 desetmilijoninka milimetra).

Predmeti iz naše okolice največkrat niso svetila. Vendar jih kljub temu vidimo, če se na njih odbija sončna svetloba ali svetloba drugih svetil. Pri zvoku je drugače. Le redkokdaj pritegne našo pozornost kak predmet, ki ni zvočilo, ker se je na njem odbil zvok v uho. Če pa je tako, pogosto govorimo o odmevu. V gorah zakličemo in slišimo odmev. Če merimo čas od trenutka, ko zakličemo, pa do trenutka, ko zaslišimo odmev, lahko povemo, kako oddaljena je stena, od katere se je zvok odbil.

Kadar predmeti ne svetijo in če v bližini ni svetila ali če predmeti ne oddajajo zvoka, jih ne zaznamo. V temi ali v megli se počutimo zelo nebogljene. Iz izkušnje vemo, da v gosti megli tudi luč ne pomaga dosti.



Sl. 1. Spekter elektromagnetnega valovanja. Označene so valovne dolžine in frekvence od radijskih valov do sevanja γ. Območje radarskih valov je označeno z mrežo.

Drugače je, na primer, z netopirji. Ti se v megli ali celo v popolni temi prav dobro znajdejo. Spretno se izogibajo oviram in opazijo celo napete žice, ki imajo v premeru komaj kak milimeter. Od kod netopirjem ta sposobnost? V enakomernih presledkih oddajajo kratke krike ultrazvoka, ki mu ustrezajo valovne dolžine manj kot centimeter. Teh krikov človek ne sliši, netopirji pa lovijo odmev z velikimi uhlji. Po njem določajo lego in velikost ter obliko predmetov.

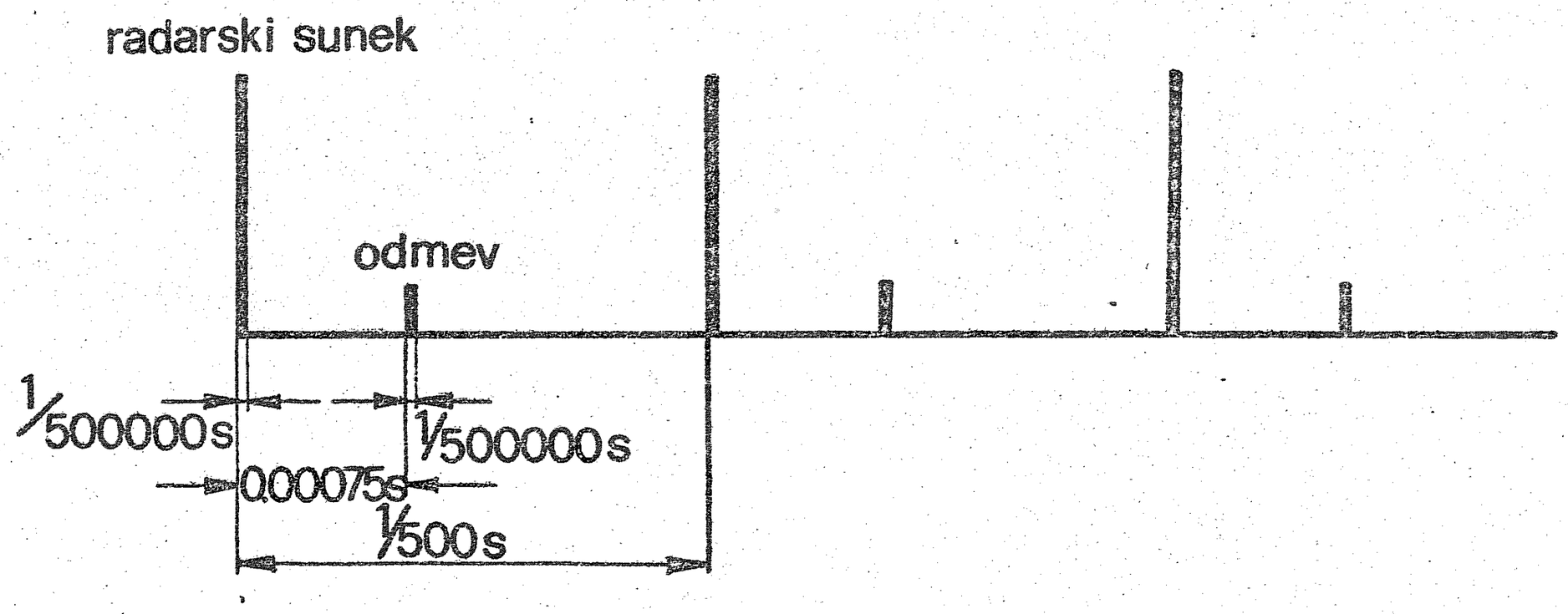
Na podoben način deluje tudi *radar*. V sunkih oddaja valovanje in lovi odmev. *Sonarji* ali *zvočni radarji* oddajajo podobno kot netopirji zvok, navadni radarji pa radijske valove. (*Radar* je kratica za *ra*dio *d*etection *a*nd *r*anging. Po naše bi se reklo približno:naprava, ki z radijskimi valovi odkriva predmete in določa njihovo oddaljenost).

Radar so začeli razvijati pred dobrimi štiridesetimi leti. Prve radarske postaje so postavili 1935 na vzhodni obali Anglije. Z njimi so opazovali nebo in morje. V drugi svetovni vojni so imeli že gosto mrežo radarskih postaj po vsej vzhodni in jugovzhodni obali. Mreža radarskih postaj je v veli ki meri pripomogla k porazu nemškega letalstva v zračni bitki za Anglijo.

Poglejmo si podrobneje, kako je radar narejen in kako deluje. Radarska antena oddaja v enakomernih časovnih presledkih močne sunke radarskih valov. V vsaki sekundi jih izseva približno petsto. Sunki so zelo kratki, navadno približno tisočkrat krajši kot časovni razmik med zaporednima sunkoma.

Poglejmo, kako oddaljene predmete s takim radarjem še opazimo. Radarska antena lahko sprejema odmev le v času med dvema zaporednima sunkoma, to je približno eno petstotinko sekunde. Radarski valovi morajo v tem času do predmeta in nazaj. Dvakratna razdalja do predmeta je tedaj: $2R = tc =$ $= 600$ km. Radar opazi torej predmete, ki niso dlje kot tristo kilometrov. Kako natančno lahko tak radar določi lego predmeta? Natančnost je v zvezi z dolžino radarskega sunka. V petstotisočinki sekunde izseva antena šeststo metrov dolg sunek, v katerem je nekaj tisoč valov. Lege predmeta se ne da določiti dosti bolj natančno, kot je dolžina sunka. Natančnost izboljšamo, če skrajšamo sunke.

Antena majhnega radarja izseva v eni sekundi približno eno vatsekundo energije, antena velikega radarja pa tudi kilovatsekundo in več. Trenutne sevalne moči antene so seveda zelo velike, navadno od nekaj kilovatov do nekaj tisoč kilovatov. Ker antena med sunki, ki trajajo petstotisočinko sekunde, skoraj petstotinko sekunde ne seva, je povprečna moč tisočkrat manjša.



Sl. 2. Tipični časovni razmiki med zaporednimi radarskimi sunki in tipične dolžine sunkov. Antena lovi odmeve med dvema zaporednima sunkoma.

Če bi sevala antena v vse smeri enakomerno, bi bilo razmerje med energijo, ki doseže predmet, in energijo, ki jo antena izseva v enem sunku, enako razmerju med površino predmeta S_p in med površino krogle z radijem R. Z R smo označili razdaljo od radarja do predmeta. Od predmeta se odbije valovanje spet v vse smeri. Do antene se torej vrne le majhen del energije, ki je dosegla predmet. Razmerje določa sedaj površina antene S_a in površina krogle z radijem R; tokrat ima krogla središče v predmetu. Torej je oslabitev $S_p.S_a/16\pi^2R^4$. Če je predmet oddaljen 100 km, ima odmev, ki ga ulovi antena, samo še 10^{-19} energije oddanega sunka. Razmerje nekoliko popravijo tako, da izsevani sunek usmerijo z zrcali. Podobno vlogo imajo zrcala pri žepnih svetilkah ali pri žarometih.

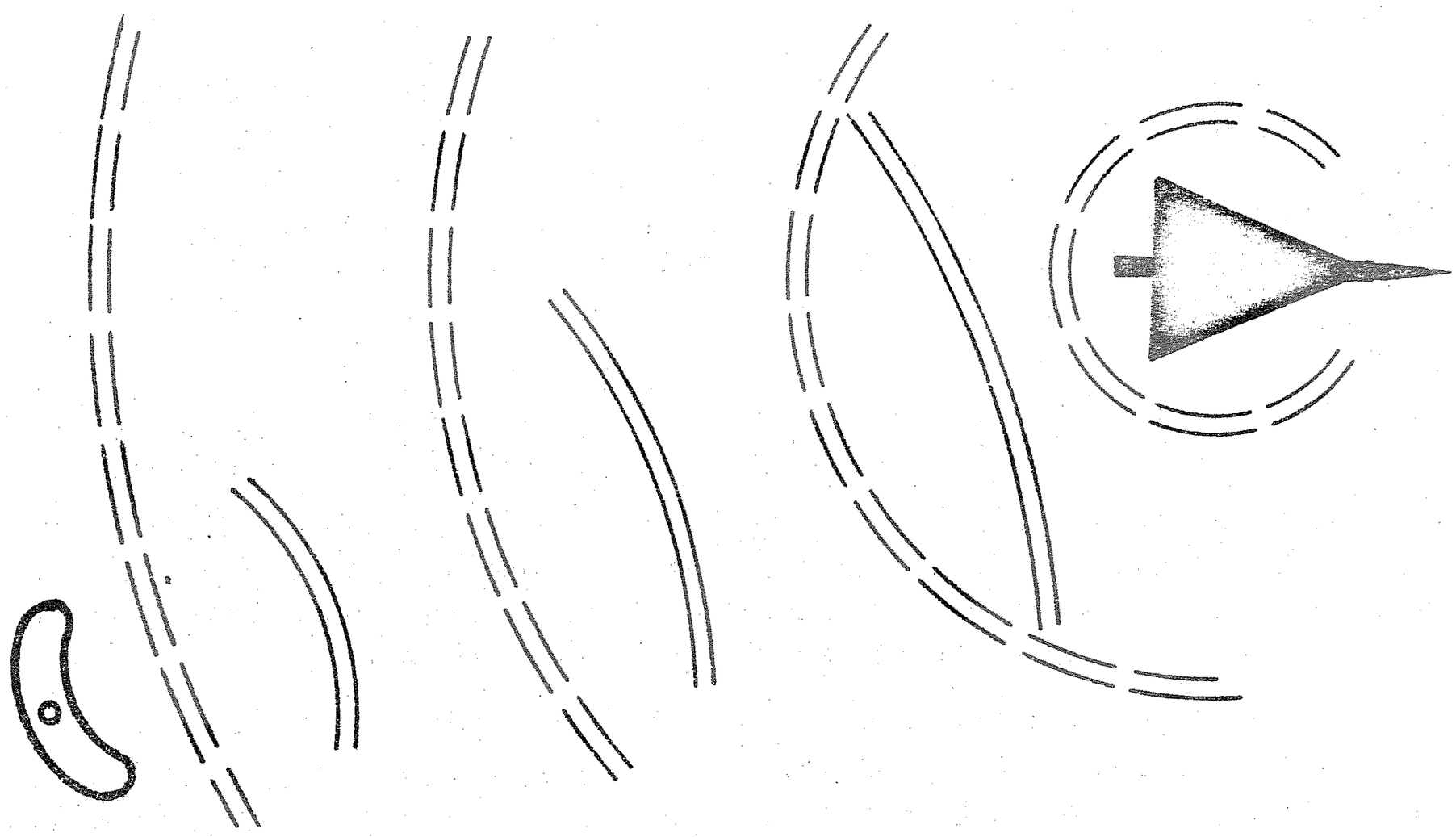
Da si ponazorimo, kako majhen del oddane energije sunka se vrne do antene, primerjamo oddani energijski tok radarskega sunka z vodnim tokom Donave ob izlivu. Sprejetemu odmevu ustreza vodni curek, ki je tanek kot las.

Radarji morajo imeti zelo občutljive ojačevalnike, da ojačijo elektromagnetno valovanje, ki ga sprejme antena. Ojačeni električni sunek se pokaže na zaslonu katodne cevi kot slika predmeta, ki ga opazuje radar.

Antena se skupaj z zrcalom vrti in preišče okolico v vseh smereh. Zato lahko z radarjem določimo poleg oddaljenosti predmeta tudi smer, v kateri je predmet. Zaslon katodne cevi je namreč pogosto narejen tako, da ustreza sredina zaslona legi radarja. Žarek na zaslonu kroži skupaj z radarsko anteno in pusti svetlo sled, ko se vrne odmev. Slika se obnavlja vsako petstotinko sekunde. Ker slika ne ugasne takoj, vidimo ob vsakem trenutku na zaslonu vse predmete v radarjevem dosegu. Razdalja slik predmetov od središča zaslona določa njihovo oddaljenost od radarja, polarni kot pa smer.

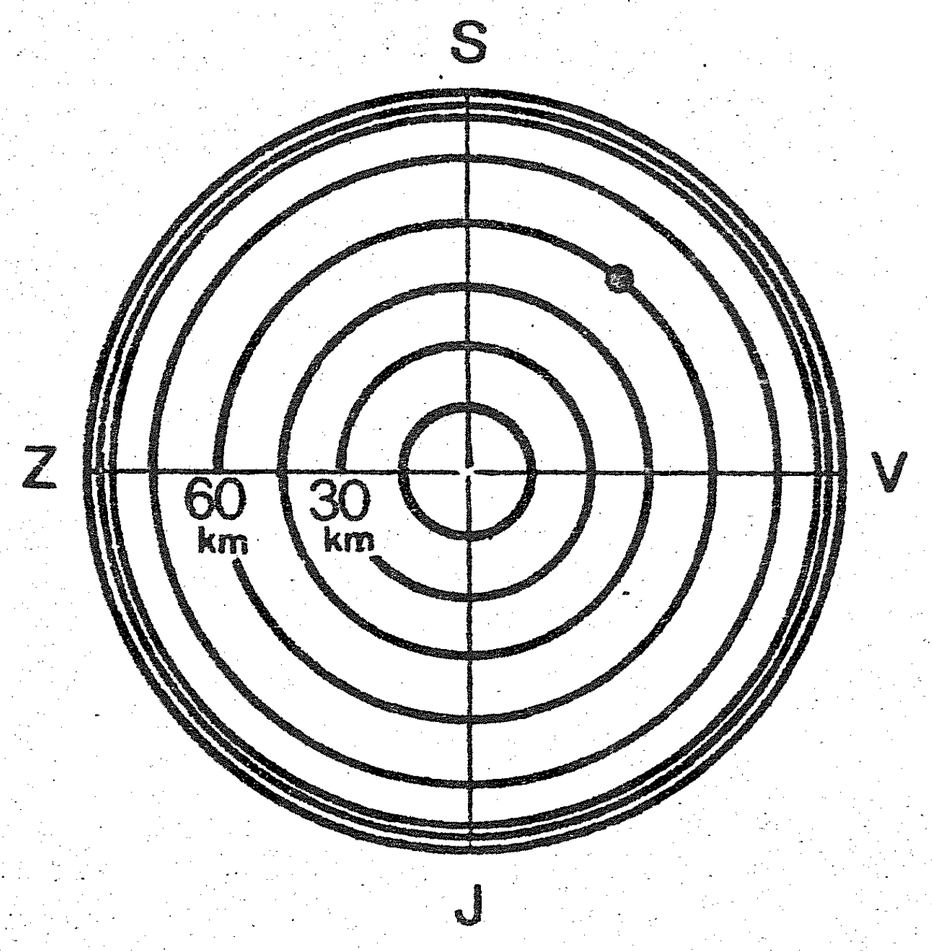
Ko z radarjem opazujemo ladjo na morju ali letalo v zraku, je poleg lege dobro poznati tudi hitrost, s katero se giblje. Hitrost sicer lahko ocenijo, če opazujejo, kako hitro se slika giblje po zaslonu. Bolje in natančneje je opravijo to Dopplerjevi radarji.

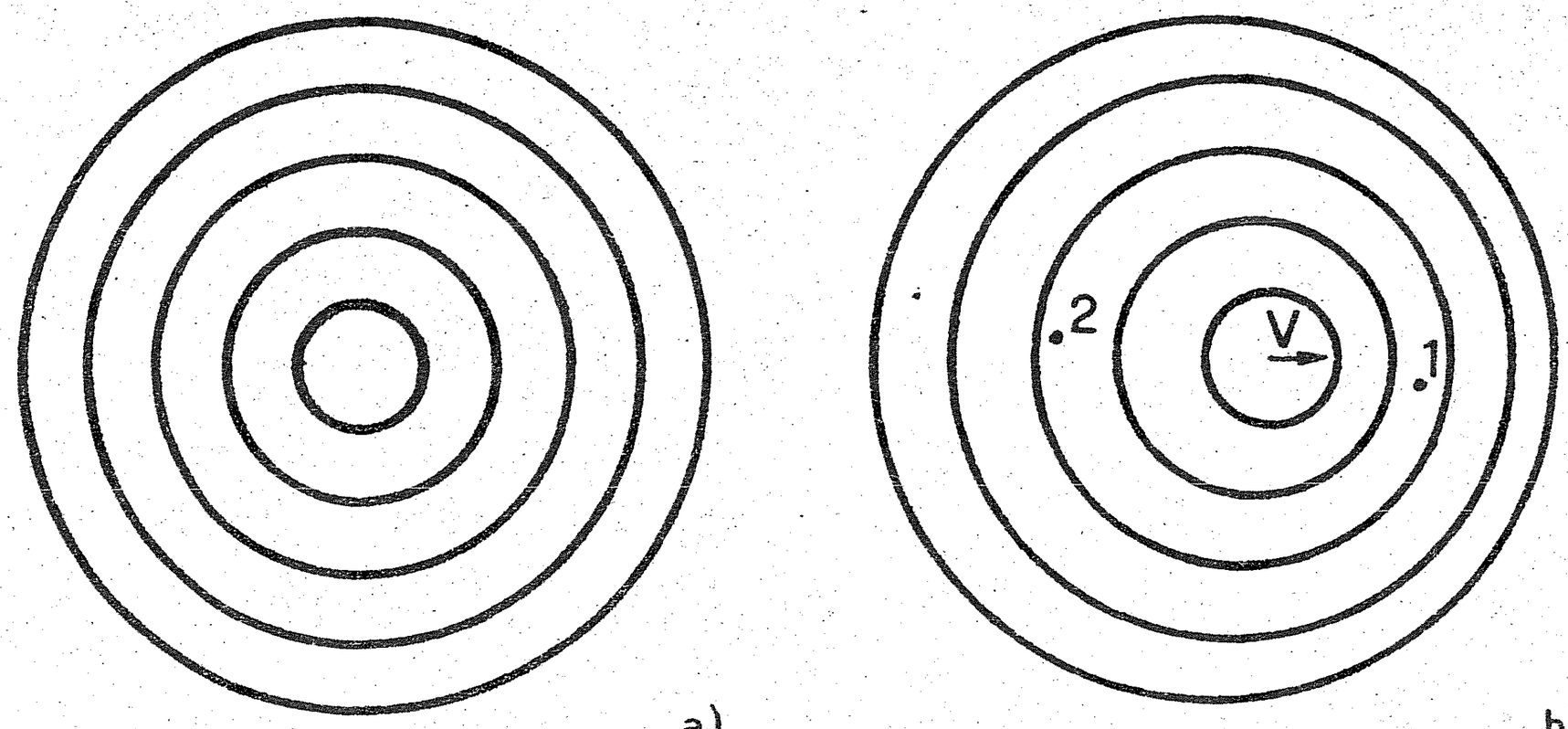
Če se giblje sprejemnik ali oddajnik, se spremeni frekvenca sprejetega valovanja. Sprememba frekvence je tem večja, čim večja je hitrost sprejemnika glede na oddajnik. Sprejeta frekvenca je večja od lastne frekvence oddajnika, če se sprejemnik in oddajnik približujeta drug drugemu, in manjša, če se oddaljujeta.



Sl. 3. Sunki valovanja, ki jih oddaja radar (polne črte), in odmev (črtkane črte).

Sl. 4. Radarski zaslon kaže letalo na severovzhodu v razdalji 60 km





a) b)

Sl. 5. Valovne črte pri mirujočem (a) in gibajočem se oddajniku (b). Oddajnik se giblje s hitrostjo v. Če stoji sprejemnik v točki 1 in se mu izvir približuje, so razmiki med valovnimi črtami manjši in frekvenca višja. Če stoji sprejemnik v točki 2 in se izvir oddaljuje, so valovne črte redkejše in frekvenca nižja.

Radarji lahko merijo razliko med frekvenco oddanega sunka in frekvenco odmeva in na nekaj odstotkov natančno določijo hitrost opazovanega predmeta.

Kje vse uporabljajo radarje? Kontrolorji poletov na letališčih spremljajo na radarskih zaslonih letala med poleti in urejajo zračni promet. Vojaški radarji opazujejo nebo noč in dan. Tudi ladje imajo radarje, s katerimi iščejo ovire na poti in se orientirajo po legi kopnega.

Radarje uspešno uporabljajo v meteorologiji. Radarski valovi se namreč odbijajo od deževnih oblakov drugače kot od oblakov, ki nosijo točo. Tako lahko meteorologi opazujejo premikanje zračnih plasti in napovedujejo nevarnost toče.

V prometu uporabljajo radarje za preverjanje hitrosti vozil.

UPORABA SEVANJA IN RADIOAKTIVNIH IZOTOPOV V MEDICINI

MARJAN HRIBAR

Že dolgo uporabljajo rentgensko svetlobo za diagnozo ir zdravljenje in sevanje radija za zdravljenje. Umetni radioaktivni izotopi pa so omogočili razvoj mnogih novih diagnostičnih metod. Za zdravljenje raka uporabljajo poleg radija in drugih sevalcev γ, zlasti ^{60}Co, tudi izvire sevanja z visoko energijo.

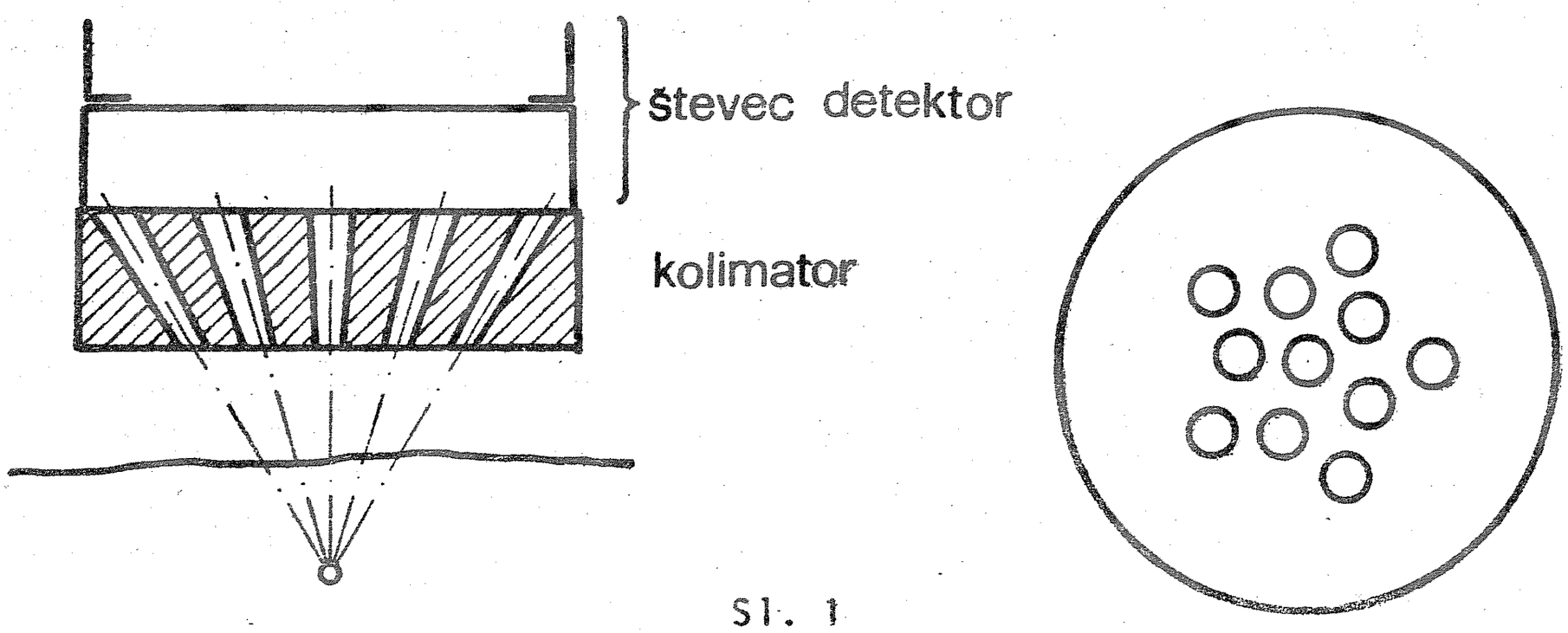
DIAGNOSTIČNE METODE

Izotope uporabljajo še vedno v prvi vrsti za diagnostiko rakastih obolenj. Vedno več pa je tudi preiskav, pri katerih ugotavljamo delovanje posameznih organov. Pri tipični preiskavi vbrizgamo v telo z radioaktivnim izotopom zaznamovano spojino, ki se nakopiči v preiskovanem tkivu ali organu. S števci merimo aktivnost zunaj telesa. Včasih nas zanima časovni potek aktivnosti v krvi. Tedaj merimo aktivnost nad predelom telesa, v katerem se izotop sicer ne nabira. Pogosto merimo tudi aktivnost nad preiskovanim organom. Najbolj običajna je scintigrafska preiskava. S števcem, ki ga avtomatično pomikamo nad telesom sem in tja, preiskujemo razporeditev aktivnosti v telesu. Če naj bo slika verna, mora biti števec narejen tako, da zaznava le sevanje iz okolice merjene točke, ne pa iz celega telesa. Zato imajo števci kolimatorje, ki spominjajo na oči žuželk (Sl. 1)! Sevanje γ ima prosto pot do števca le iz predela telesa, v katerem se sekajo simetrale konič nih lukenj v svinčeni zaščiti. Izračunamo lahko, kolikšna je ločljivost takega kolimatorja.

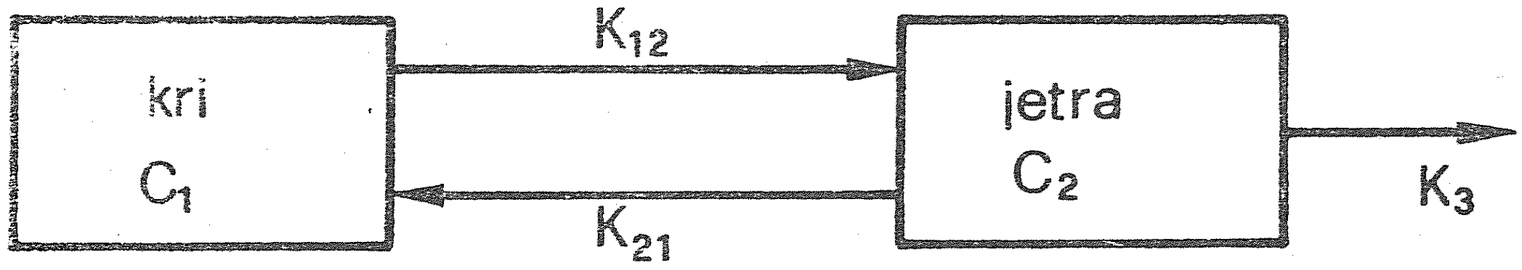
Signale iz detektorja običajno snemajo na magnetni trak, ki ga kasneje računalniško obdelajo. V nazornem prikazu označujejo področja z različno aktivnostjo raznobarvni znaki. Pogosto pa narišejo izodozne črte, ki povezujejo mesta z enako aktivnostjo.

Navedimo še nekaj tipičnih preiskav:

Meritev jetrne funkcije: Rose bengal in bromsulftalein sta barvili, ki se iz krvi izločata skoraj izključno skozi jetra. Zaznamovana z radioaktivnim jodom ^{131}J ju injiciramo v kri in merimo aktivnost v krvi nad glavo. Če so jetrne celice okvarjene, imajo manjšo sposobnost za vezavo barvila. Prav tako se zmanjša hitrost izločanja iz krvi, če so zamašeni žolčevodi. Za presojo kvalitete jeter so si omislili preprost računski model (Sl. 2).



Sl. 1



Sl. 2. Preprost model za delovanje jeter z diferencialnima enačbama. Koeficienti k_{12}, k_{21} in k_3 sami zase nimajo diagnostične vrednosti. Zelo selektivno pa je razmerje med koeficientoma k_{12} in k_{21}

Renografija: Barvilo hipuran se izloča skoraj izključno skozi ledvice. Za preiskave ledvic ga zaznamujemo z radioaktivnim jodom ^{131}J. Z detektorji zasledujejo aktivnost vsake ledvice posebej in aktivnost krvi v predelu glave ali stegna.

Preiskave ščitnice: Ščitnica je žleza, ki uravnava celični metabolizem vsega telesa. Žlezne celice kopičijo jodove ione, ki prihajajo v telo s hrano, in jih vgradijo v hormona tiroksin in trijodtironin. Ta se nalagata v celične folikle. Po potrebi hormona prehajata v kri. Delovanje ščitnice uravnava hipofiza. Če je v krvi premalo tiroksina, pospešuje hipofiza ščitnico k rasti in k izločanju tiroksina. Hipofiza pa ne more uravnavati delovanja obolele ščitnice. Za diagnostiko ščitnice uporabljamo radioaktivni jod ^{131}J. Bolnik popije raztopino, zaznamovano z okoli 30 μC; * $Na^{131}J$. S števcem nad ščitnico merimo, kako se nabira jod v njej. Na koncu posnamemo še scintigram ščitnice. Na scintigramu se kažejo bolni predeli žleze kot mesta z zmanjšano aktivnostjo, saj se nabira v njih manj joda.

Preiskave možganov: Možganske kapilare v zdravih predelih tkiva prepuščajo le malo elektrolitov in organskih snovi. Mnogo večjo prepustnost imajo mesta, ki jih poškodujejo tumorji, vnetja ali degeneracija. Taka mesta odkrivajo s scintigrafijo potem, ko vbrizgnejo v kri tehnecijev citrat, zaznamovan z radioaktivnim tehnecijem ^{99m}Tc. Ta se zelo hitro izloča iz telesa; po daljšem času ostane le še na poškodovanih mestih.

Odkrivanje malignih tumorjev: V mnogih malignih tumorjih se nakopiči in fiksira galijev citrat. Zaznamujemo ga z radioaktivnim galijem ^{67}Ga in ga odkrijemo v tumorjih s scintigrafijo, ko ga je iz zdravega tkiva že odplaknila kri.

Meritve cirkulacije krvi: Radioaktivni ksenon ^{133}Xe, ki ga vbrizgamo v arterijo, hitro difundira v tkiva. Iz tkiv ga odnaša kri s hitrostjo, ki je odvisna od cirkulacije. Na ta način merijo cirkulacijo krvi v možganih.

Za uporabo v diagnostiki izbiramo izotope elementov, ki so biološko pomembni ali se vgradijo v biološko snov. Od njih pa zahtevamo, da so sevalci γ in da ima spremljajoče sevanje β čim manjšo energijo. Zaželen je tudi dovolj kratek razpolovni čas izotopa, da bolnik ni izpostavljen sevanju po končani preiskavi.

TERAPEVTSKE METODE

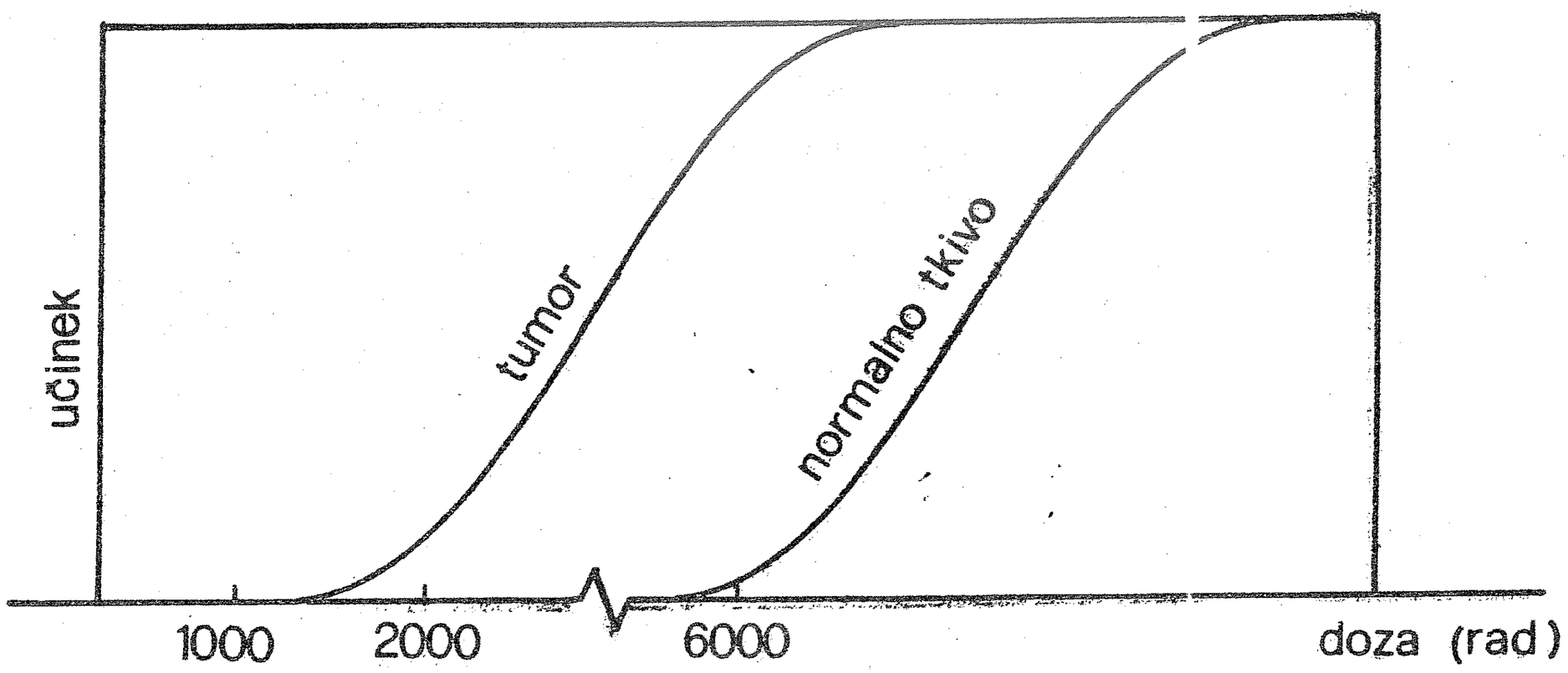
Sevanje predaja svojo energijo tkivu pretežno z ionizacijo in z vzbuditvijo molekul vode:

$$H_2O \rightarrow H_2O^+ + e^- \rightarrow H_2O^+ + e^{-*}$$
$$H_2O^+ \rightarrow {}^{\cdot}OH + H^+$$

Nastali prosti radikali $H^{\cdot}$, ${}^{\cdot}OH$ in e^{-*} (hidratizirani elektron) imajo v celici življenjski čas od 0,1 do 100 μs. Vežejo se v baze molekule DNA, kar lahko povzroči genetske spremembe, še pogosteje pa smrt celice. Dokler se absorbira malo sevanja, si celice še lahko opomorejo, če se absorbira več sevanja, pa ne več.

---

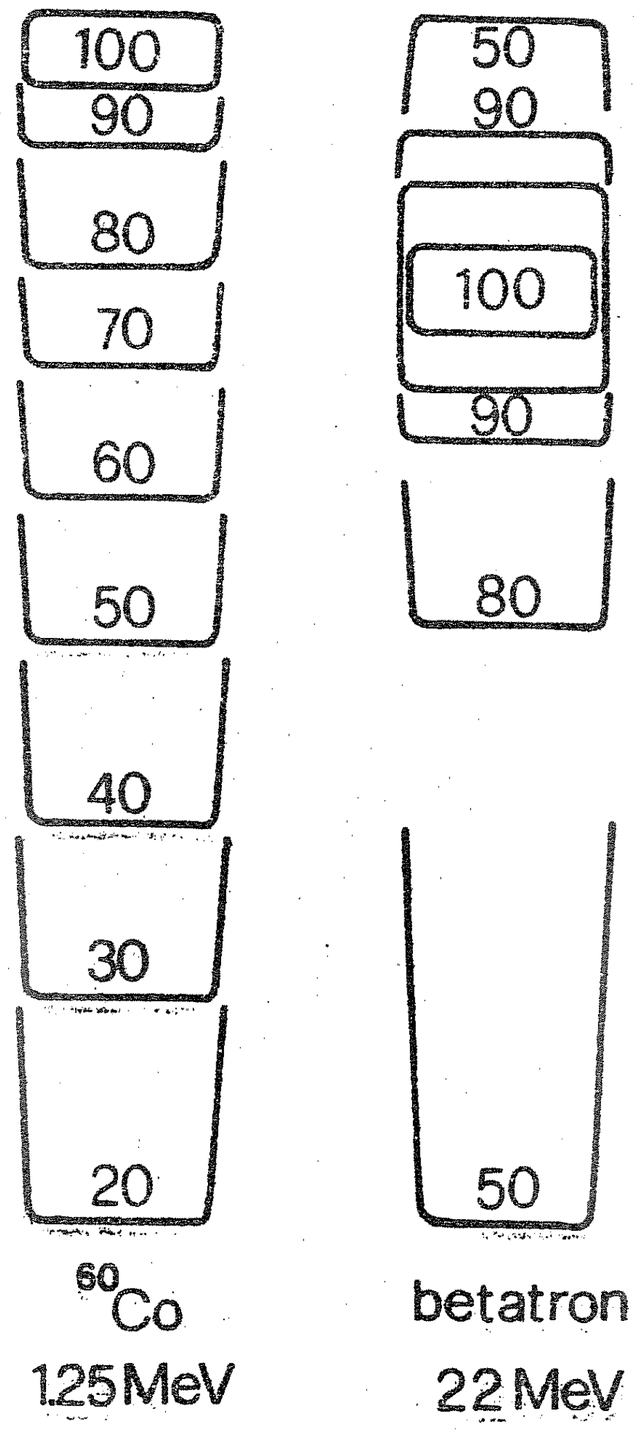
* 1 curie (1 Ci) = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ razpadov/s. (Enota v mednarodnem sistemu je becquerel, to je 1 razpad/s).



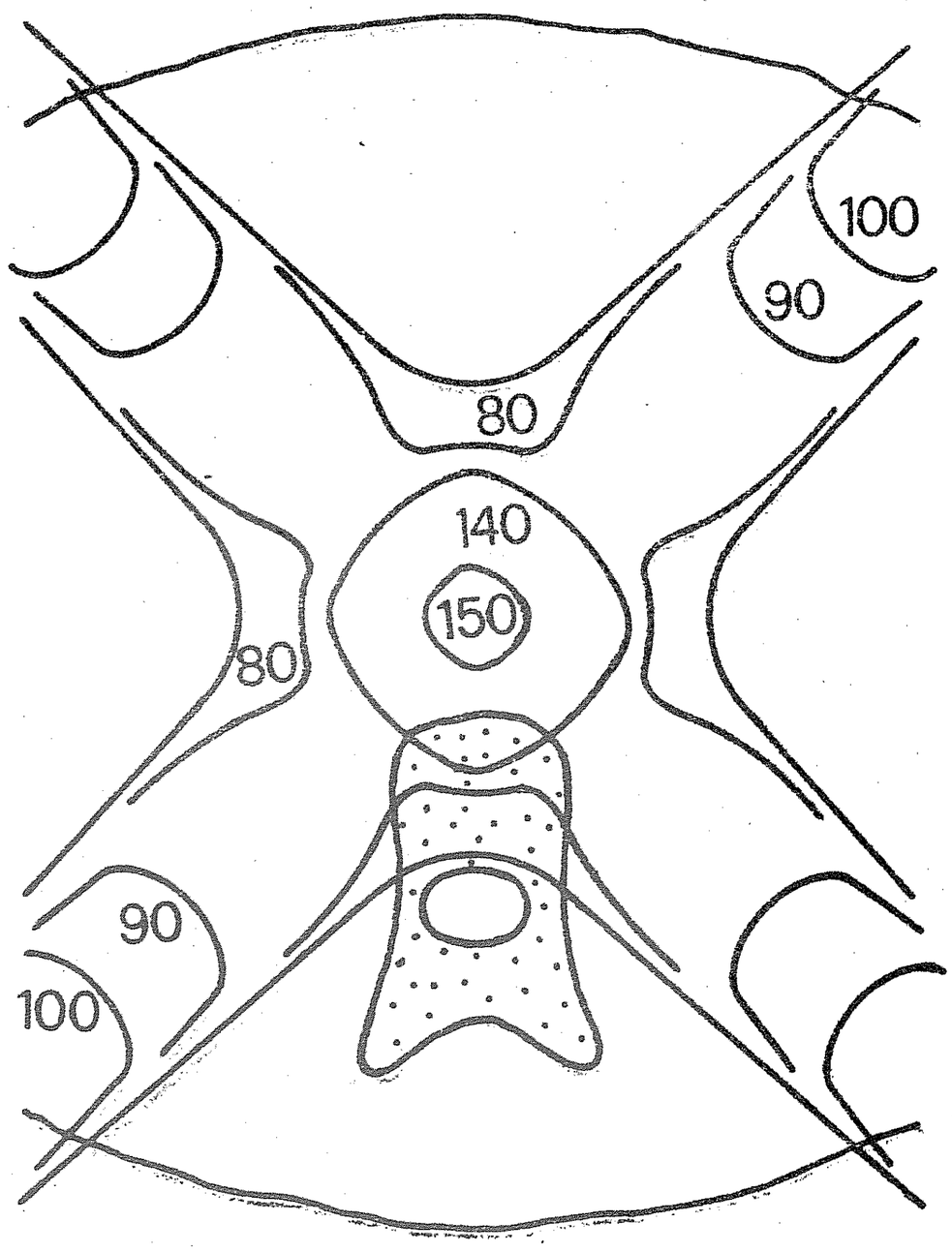
Sl. 3

Absorbirano sevanje merimo z dozo, ki jo navajamo v radih. Doza meri 1 rad, če se v gramu tkiva absorbira energija 100 ergov = 10^{-5} joulov. Za večino celic pri sesalcih velja, da je doza okoli 100 rad smrtna za polovico celic (razpolovna doza). Organizmi kot celote preživijo 4 do 6-krat večje doze. Za uničenje posameznih organov potrebne doze so še večje.

Ker uporabljamo sevanje predvsem za uničevanje rakastih tkiv, nas v prvi vrsti zanima občutljivost tumorskih celic v primerjavi z normalnimi. Z mnogimi eksperimenti so ugotovili, da je razpolovna doza za tumorske celice enaka kot za normalne celice. Kljub temu začno tumorji pod vplivom sevanja propadati mnogo hitreje kot okoliško zdravo tkivo. Slika 3 kaže primerjavo med učinkom sevanja na zdravo in tumorsko tkivo. Občutljivost tumorjev za obsevanje je namreč povezana z zelo živahnim tumorskim metabolizmom.



Sl. 4



Sl. 5

Z obsevanjem želimo uničiti bolno tkivo in čim manj poškodovati zdravo. Tumor lahko obsevamo od zunaj ali pa vanj operativno za nekaj časa vgradimo radioaktivne izvire sevanja.

Za obsevanje od zunaj (teleterapija) uporabljajo curke rentgenskega sevanja iz rentgenskih aparatov, ki delujejo pri napetosti okoli 100 kV in več. Od radioaktivnih izotopov uporabljajo v ta namen izvire kobalta ^{60}Co. Kobalt ^{60}Co seva fotone γ z energijo 1,17 MeV in 1,33 MeV ali v povprečju z energijo 1,25 MeV. Tumorje v večji globini obsevajo s curki sevanja z energijo fotonov nekaj 10 MeV iz elektronskih pospeševalnikov (betatrona, linaka). Sevanje γ z veliko energijo se v tkivu namreč predvsem comptonsko siplje. Pri tem nastajajo elektroni, ki z ionizacijo poškodujejo tkivo. Tik ob površju je comptonskih elektronov in s tem ionizacije tem manj, čim večja je energija fotonov. Največja doza je tem globlje v tkivu, čim večja je energija fotonov. Želimo, da bi bilo to na mestu tumorja. Slika 4 kaže potek doze pri obsevanju s fotoni različnih energij. Zaželeno porazdelitev doze lahko dosežemo tudi na drug način. Slika 5 kaže porazdelitev doze pri obsevanju notranjega tumorja s štirimi curki sevanja γ iz izvira ^{60}Co. Pri takem obsevanju dobi tumor 1,5-krat tolikšno dozo kot najbolj izpostavljeno zdravo tkivo.

Še bolje je, če pri obsevanju vgradimo v tumor za nekaj časa zaprte sevalce γ. Radijske igle, ki so jih uporabljali nekdaj, vse bolj zamenjujejo umetni sevalci γ z manjšo energijo fotonov. S tem je doza bolj lokalizirana v tumorju. Največ uporabljajo zlato ^{198}Au (v obliki zrn, ki jih terapevt injicira v tumor na vnaprej določena mesta), tantal ^{182}Ta (v obliki žic, oblečenih v tanko platinasto srajčko, ki jih terapevt všije v tumor) in iridij ^{192}Ir (v paličicah, vdelanih v plastično nit, ki jo terapevt všije v tumor).

LITERATURA:

M. Erjavec: *Predavanja iz uporabe radioaktivnih izotopov v medicini*, Ljubljana, Višja šola za zdravstvene delavce 1976.

H.E. Jones, *The Physics of Radiology*, Springfield, Charles C. Thomas Publishers 1971.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

UPORABA RADIOAKTIVNIH IZOTOPOV V TEHNIKI

MARJAN HRIBAR

UVOD

Radioaktivne izotope uporabljamo na mnogih področjih tehnike, medicine in biologije. Razpad radioaktivnega jedra je sprememba, pri kateri izseva jedro v prvem koraku helijevo jedro - delec α - ali elektron - delec β. Preostalo jedro je pogosto v vzbujenem stanju, iz katerega preide v osnovno stanje z izsevanjem enega ali več fotonov γ. Sevanje je lahko odkriti in meriti njegovo izdatnost in energijo. Vse tri vrste sevanja - α, β in γ - pri prehodu skozi snov ionizirajo atome in molekule. V geigerskih, proporcionalnih, scintilacijskih in polprevodniških števcih dobimo na račun ionizacije električne sunke, ki jih ojačujemo in štejemo. Sevanje odkrivamo tudi z ionizacijkimi celicami, v katerih merimo majhne električne tokove, ki so posledica ionizacije.

Radioaktivni izotopi so uspešen pripomoček za spremljanje sprememb, ki jih doživljajo snovi med raznimi postopki in pojavi v kemiji, metalurgiji in biologiji. Radioaktivni izotopi omogočajo preprosto kontrolo delovanja organov pri medicinskih preiskavah.

Sevanje se v snoveh absorbira in sipa. Absorpcijski in sipalni koeficienti so odvisni od vrste in energije sevanja in od snovi. Merjenje prepuščenega sevanja da podatke o debelini plasti in o napakah v telesih. Merjenje sipanega sevanja da podatke o površinski obdelavi, o gostoti in včasih tudi o sestavu snovi.

Sevanje vzbudi atome v snovi, da preidejo iz osnovnega stanja v vzbujeno stanje. Pri prehodih v osnovno stanje oddajajo atomi karakteristično sevanje, po katerem lahko sklepamo na koncentracijo elementa.

Sevanje povzroča spremembe v snoveh. Zlasti organske snovi sevanje poškoduje, lahko pa jim tudi spremeni lastnosti. Sevanje uporabljajo za uničevanje tumorjev, za uničevanje škodljivih žuželk in za polimerizacijo umetnih organskih spojin.

Nekaj zgledov za uporabo izotopov v tehniki:
Preglednica navaja tipične zglede za uporabo izotopov v tehniki

merjena količina	tehnika merjenja	uporabljeni izotopi
debelina ali ploskovna gostota	merjenje prepuščenega sevanja	
	- tanke folije	^{241}Am
	- papir, plastika	^{147}Pm , ^{90}Sr
	- kovine	^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir
	merjenje sipanega sevanja	
	- kovinske in plastične prevleke	^{147}Pm , ^{90}Sr
	- železne cevi in plošče	^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir

merjena količina	tehnika merjenja	uporabljeni izotopi
debeline prevlek	merjenje sipanega sevanja	
	β - kovinske in plastične prevleke	^{147}Pm , ^{90}Sr , ^{204}Tl
	merjenje fluorescenčnega sevanja	
	- kovinske prevleke	^{55}Fe , ^{57}Co , ^{109}Cd
gostota	merjenje prepuščenega sevanja	
	α ali β - plini	^{241}Am , ^{147}Pm , ^{204}Tl
	γ - kapljevine	^{60}Co , ^{137}Cs
	merjenje sipanega sevanja	
	γ - merjenje gostote zemljin v gradbeništvu in geologiji	^{60}Co
kemijski sestav snovi	merjenje fluorescenčnega sevanja	
	γ - rude	^{55}Fe , ^{57}Co , ^{109}Cd , ^{238}Pu , ^{147}Pm , ^{153}Gd
	merjenje sipanega sevanja	
	γ - kovine v rudi	^{60}Co , ^{137}Cs , ^{57}Co
	β - določanje razmerja C/H v ogljikovodikih	^{147}Pm
temperatura	merjenje prepuščenega sevanja	
	α ali β - plini v pečeh	^{204}Tl
merjenje nivoja, signalizacija	merjenje prepuščenega ali sipanega sevanja	
	γ - gladina kapljevin v cisternah, nasipov v silosih itd.	^{60}Co , ^{137}Cs

Ilustrirajmo nekaj uporab z opisom poskusov. Uporabimo izvir ^{137}Cs, ki seva delce β z največjo energijo 1,18 MeV in fotone γ z energijo 0,66 MeV (Sl.1).

Detektor - geigerska cev - registrira vse vpadle delce β in le okoli 1% fotonov γ. Med izvir in detektor polagamo kose debelejšega papirja in merimo število sunkov v izbranem času. Najprej število sunkov eksponentno pada, potem pa ostaja skoraj nespremenjeno. To pomeni, da se v papirju absorbirajo vsi delci β, za fotone γ pa je papir skoraj prozoren. Curek fotonov γ oslabi šele, ko položimo med izvir in detektor nekaj mm debelo ploščico železa. Z več ploščicami ugotovimo, da število sunkov zopet eksponentno pojema.

Iz diagrama, ki pokaže preštete sunke v odvisnosti od debeline, razberemo razpolovno debelino $d_{1/2}$. S tem podatkom zapišemo izmerjeno odvisnost takole

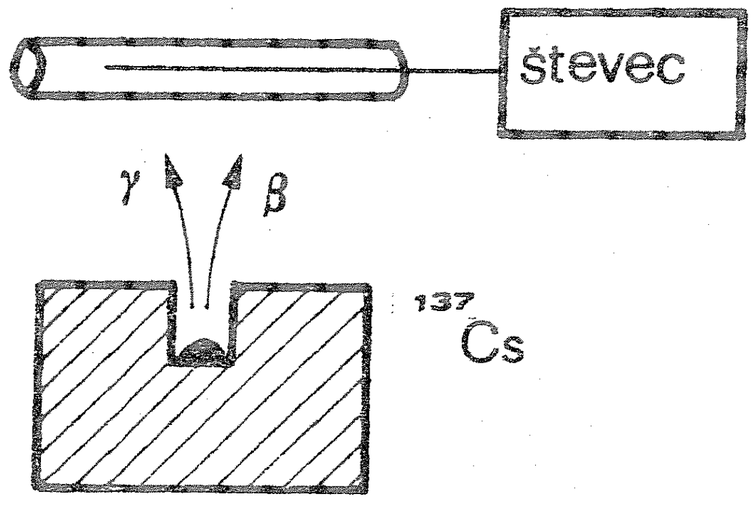
$$I = I_0 2^{-d/d_{1/2}}$$

S spremenjenim poskusom pokažemo še, kako je od debeline odvisno število povratno sipanih delcev β.

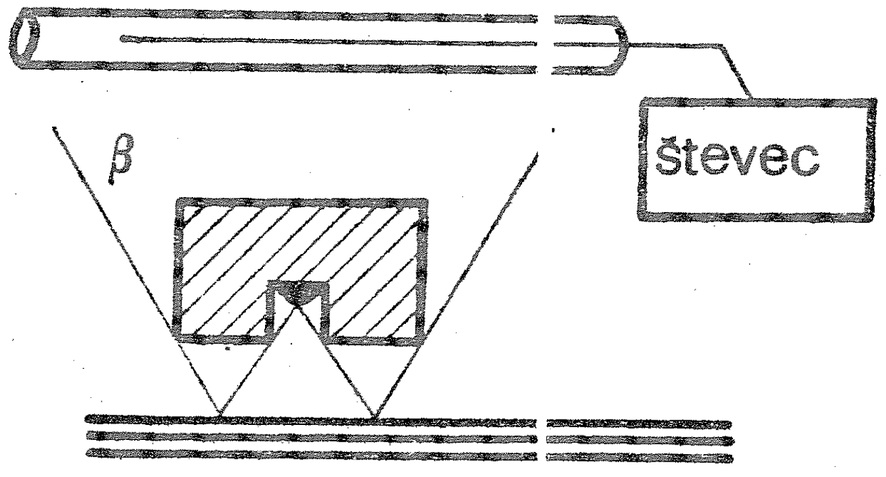
Pod izvir polagamo kose papirja. Število sunkov se veča in na koncu ustali pri I_1. Odvisnost je podobno kot prej:

$$I = I_1(1 - 2^{-d/d'_{1/2}}) \quad ,$$

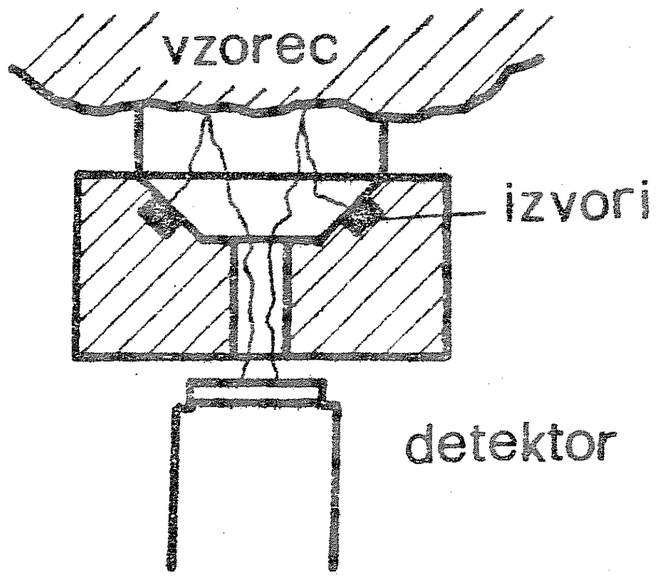
če je $d'_{1/2}$ razpolovna debelina za sipanje.



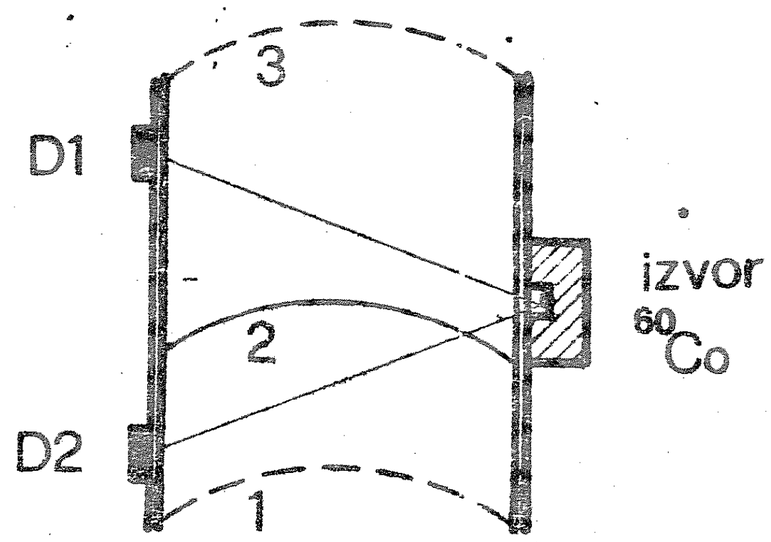
Sl. 1



Sl. 2



Sl. 3



Sl. 4

Poglejmo še uporabo izotopov pri elementni analizi rudnih vzorcev, npr. za določanje koncentracije živega srebra ali svinca (Sl. 3). Radioaktivni kobalt ^{57}Co seva fotone γ z energijo 122 keV in 136 keV, ki lahko ionizirajo lupino K v atomu Hg ali Pb. Vrzel se hitro izpolni in pri tem atom izseva fotone karakteristične rentgenske svetlobe. Število izsevanih fotonov je pri majhnih koncentracijah sorazmerno s koncentracijo merjenca v rudi. Z izbranimi izotopi lahko tako določamo tudi koncentracije drugih elementov v rudnih ali tudi drugih vzorcih. Enako metodo uporabimo tudi pri določanju debeline kovinskih prekritij (npr. Cu, Ni ali Cr na železu).

Ilustrirajmo še nekatere možnosti z drugih področij.

Pri signalnih napravah ali v avtomatiki rabijo izotope za pogon relejev. Sl. 4 kaže uporabo izotopskih relejev, ki uravnavajo višino nasipa v silosih. Detektorja D_1 in D_2 merita prepuščeno sevanje iz izvira ^{60}Co. Če je nivo v silosu pri 1, zaznavata oba detektorja veliko sevanja - silos se začne polniti. Polnjenje se upočasni, ko je nivo pri 2, in se ustavi, ko pride do 3.

Pri raziskavah tehničnih postopkov zaznamujemo opazovano snov s primernim izotopom in zasledujemo njegovo porazdelitev v posameznih fazah postopka.

Izviri radioaktivnega plutonija ^{238}Pu, ki seva delce α, rabijo kot izviri toplote za pogon termoelementov. Ti poganjajo električne naprave v umetnih satelitih in srčnih stimulatorjih.

LITERATURA

Radioactive Isotopes in Industry and Geophysics, Dunaj, IAEA 1966.
Radioisotopes in Physical Science and Industry, Dunaj, IAEA, 1962.
Peaceful Uses of Atomic Energy, Dunaj, IAEA 1972.
J.F. Cameron, C.G. Clayton: *Radioisotope Instruments*, I., Oxford, Pergamon Press 1971.
Radiation Engineering in the Academic Curriculum, Dunaj, IAEA 1975.
Uporaba radioaktivnih izotopov v industriji, Ljubljana, Inštitut J. Štefan 1960.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

SPEKTRALNA ANALIZA IN DANAŠNJE SPEKTROSKOPIJE

JOŽE PAHOR

Vedro proda, ki smo ga zajeli na rečnem bregu, presejemo. Tako ugotovimo, da vsebuje debelejše kamne, drobnejše kamenčke, pesek in mivko. Kot kriterij za porazdelitev po razredih smo v tem primeru uporabili velikost. Namesto po velikosti pa bi lahko zrna proda razvrstili tudi po teži ali po barvi. Namesto da opazujemo prod, bi lahko merili dolžine travnih bilk, tehtali teleta ali ocenjevali znanje študentov. Rezultat vsake take meritve imenujemo spekter. S študijem spektrov se ukvarja spektroskopija.

Do spektrov pridemo tudi z razmišljanjem, ne samo s poskusom. Če na primer mnogokrat vržemo kocko in vsakokrat beležimo, koliko pik je padlo, je rezultat takega niza poskusov spekter ali spektralna porazdelitev. Meritev bi pokazala, da se vsaka izmed ploskvic s številkami od 1 do 6 javlja približno enako pogosto. Eksperiment vsaj v tem primeru nadomestimo z razmislekom, da pri kocki zaradi simetrije ne more biti nobena izmed šestih enakih ploskvic odlikovana. Pri ponavljajočih se poskusih se morajo torej vse kazati z enako pogostostjo.

Nas ne bodo zanimali spektri, ki smo jih omenili. Poiščimo raje nekaj primerov, ki so pritegnili pozornost fizikov. Če govori fizik o spektru sevanja črnega telesa, hoče povedati, kolikšen energijski tok odnašajo posamezne sestavine, ki jih vsebuje svetloba sevajočega telesa. Drugi fizik opazuje delce, ki odletavajo iz jeder pri radioaktivnem razpadu, in ugotavlja, kolikšne so energije posameznih delcev α ali β ali fotonov. Tudi nevtroni, ki uhajajo iz reaktorja, nimajo enake hitrosti. Tretji fizik meri maso atomov in skupin atomov. Našteti primeri sodijo v optično, jedrsko in masno spektroskopijo.

Namesto, da bi naštevali vrste spektroskopij, si bomo skušali pripraviti nekaj metod za eksperimentalno določanje spektrov.

Začnimo z jedrsko spektroskopijo. Podobno kot pri metanju kocke bomo tudi tu opazovali posamezne dogodke, da bomo spoznali spekter. Pri jedrskem razpadu je tak dogodek: jedro A se spremeni v jedro B, pri tem odleti delec. Radi bi izmerili energijo, ki jo nosi ta delec.

Da bomo lahko ocenili težavnost naloge, si pomagajmo s podatkom: energije posameznih delcev gredo le redko preko energijske meje 10 MeV, to je približno 10^{-12}J. To pa je dosti premalo, da bi lahko energijo posameznega delca izmerili s kalorimetrom. 10^{-12}J segreje 1 g vode za manj lot 10^{-12}K. To je brezupno v primeri s temperaturnimi razlikami 10^{-2}K, ki jih danes še dobro merimo.

Se bomo morali jedrski spektrometriji odreči? Ne, le drugo pot bomo morali ubrati. Nabiti delec, ki se giblje skozi snov, jo ionizira. To pomeni, da delec pri trkih odtrga katerega od elektronov in tako izgublja svojo energijo. Na poti srečamo množico elektronov in ionov, kot pravimo oskubljenim atomom. Ker ve-

lja vsaka ionizacija v povprečju 30 eV, ostane na poti delca, ki je vso svojo energijo 1 MeV zapravil, približno 30000 parov elektron-ion.

Če so ti pari znotraj nabitega kondenzatorja, jih vleče električno polje vsaksebi: elektrone k pozitivno nabiti plošči, ione k negativno nabiti plošči. Ko slednjič dosežejo vsak svojo ploščo, se zmanjša prvotni naboj na plošči za vrednost $\Delta e = 3.10^4.2.1{,}6.10^{-19}$As. Spremembi naboja Δe ustreza sprememba napetosti $\Delta U = \Delta e/C$. Pri dovolj majhni kapaciteti C bo prišlo do merljivih sprememb napetosti. Če je C okoli pF, povzroči sprememba naboja za 10^{-15}As spremembo napetosti ΔU za okoli 1 mV, kar že lahko zaznamo. Približno tako deluje ionizacijska celica, eden prvih detektorjev ionizirajočega sevanja.

Da bi sčasoma kondenzatorja ne izpraznili, ga sproti polnimo skozi velik upor. Tako sicer pride do strmega padca napetosti na kondenzatorju v času, ko doteka proti ploščam sproščeni naboj, vendar pa se napetost kmalu vrne na prvotno vrednost. Na kondenzatorju se kot odziv na prehod delcev javljajo napetostni sunki. Višina teh sunkov je sorazmerna z energijo, ki jo delec izgubi med ploščama kondenzatorja. Če je delec ob vso energijo, potem porazdelitev sunkov po višinah ponazarja energijski spekter delcev.

V polprevodnikih je mogoče priti do elektronov ceneje. Namesto 30 eV veljajo približno 1 eV. Tako jih dobimo več za delec z enako energijo in jih laže zaznamo. V zadnjem desetletju so se zato zelo uveljavili polprevodniški spektrometri, na primer germanij-litijev spektrometer.

Podobno kot delce, opazujemo tudi fotone iz jeder. Tudi fotoni lahko izgubijo del energije, včasih tudi vso, v snovi skozi katero se gibljejo. Če torej poskrbimo, da fotone čim uspešneje oropamo njihove energije, postane fotonska spektrometrija zelo podobna spektrometriji delcev.

S spektrometrijo nevtronov je več težav, ker ne ionizirajo in jim s trki ni mogoče posebno uspešno jemati energije. Vsaj v primeru spektrometrije počasnih nevtronov, to je takih s hitrostmi okoli 1 km/s, pa so fiziki iztuhtali zelo domiselno rešitev. Ponazorimo jo lahko s prometnimi razmerami. Vsi poznamo zeleni val. Vozilu, ki pelje po progi s predpisano hitrostjo, se zapored odpirajo semaforji. Vozila s premajhno ali preveliko hitrostjo pa nalete na rdečo luč. Podobno progo pripravimo nevtronom. Hitrejši, srednje hitri in počasnejši se odpravijo po predpisani poti. Hitrejši nalete kmalu na premično oviro: na absorber, kjer obtiče. Ovira pa se odpre, ko pridejo srednje hitri nevtroni. Tako jo ti nevtroni neovirano prečkajo. Za njimi se ovira zapre in ustavi počasnejše nevtrone, ki jo dosežejo z zamudo. Pri naslednji meritvi spremenimo gibanje ovire. Zdaj naj se odpre prej, da prepusti le najhitrejše nevtrone; preostali nalete na zaprta vrata. Tako lahko s primernim gibanjem ovire prepuščamo zdaj take zdaj drugačne nevtrone. Treba je le še izmeriti, koliko je enih, koliko drugih. Nalogo opravimo v dveh korakih. V prvem ločimo nevtronsko druščino po razredih, v drugem ugotavljamo številnost v vsakem od razredov. Od zamisli do realizacije je le korak. Na isto os nataknemo v primernih razdaljah nekaj preluknjanih plošč iz kadmija in sučemo os s konstantno hitrostjo. Nevtroni v curku, ki se gibljejo vzporedno z osjo, nalete na odprto pot ali pa obtiče v kadmijevih jedrih.

Prišli smo do masne spektrometrije. Ker za drobne kroglice-atome ne poznamo nobene tehtnice, na kateri bi jih lahko posamič

tehtali, moramo iskati drugačno rešitev. Tud tu poskusimo delati po korakih. Enoten tok atomov najprej razdelimo na tokove, v katerih so zbrani atomi z enako maso, potem pa ugotovimo izdatnost posameznih delnih tokov. Najprej k prvemu delu naloge, kjer si bomo pomagali z zgledom iz mehanike! Streljajmo s stolpa v vodoravni smeri z različnimi začetnimi hitrostmi. Ne glede na težo letijo hitrejše krogle dlje, preden udarijo ob tla, medtem ko se počasnejše kopičijo blizu stolpa. Tako smo iznašli spektrometer, ki sortira krogle po hitrosti. Nas pa mika, da bi sortirali krogle po masi. Tudi to gre, če zagotovimo izstrelitev, pri kateri dobijo vse krogle enako kinetično energijo. V tem primeru bodo težje krogle počasnejše. Počasnejše, težje krogle se kopičijo ob stolpu, lažje lete dlje. Rešitev, ki bi je bil vesel poveljnik grajskega topništva, moramo prirediti potrebam fizika. Izstrelke imamo. Atomi ali molekule v plinu so že ločeni med sabo. Ioniziramo jih in ionom z različno maso podelimo enako kinetično energijo, tako da jih pustimo preleteti stalno napetost med elektrodama v praznem prostoru. V primerno oblikovanem električnem ali magnetnem polju se poti ionov z različno maso razidejo. Njihove delne tokove ugotavljamo z merjenjem električnega toka. Masni tok 1000 ionov v sekundi je nemerljiv, ustrezni električni tok okoli 10^{-16} A pa znamo dovolj dobro meriti. Pri vseh vrstah spektroskopije je zanimiv podatek, za koliko se morata razlikovati po java, da ju lahko še zanesljivo razlikujemo. Če sta na primer energiji dveh delcev W_1 in W_2, je primerno merilo, ki pove zmogljivost merilne aparature ali določene metode, relativna razlika obeh energij $(W_1 - W_2)/W_1$, ali kar $\Delta W/W$. Ker velja za fotone zveza $W = h\nu$, v kateri je h Planckova konstanta, ν pa frekvenca je kvocient $\Delta\nu/\nu$ enakovreden kvocientu $\Delta W/W$. Značilne vrednosti $\Delta W/W$ za nekatere naprave kaže preglednica:

ionizacijska celica pri jedrski spektrometriji	0,1
polprevodniški detektor	10^{-3}
prizma v optični spektrometriji	10^{-3}
mrežica - "	10^{-}
masna spektrometrija $\Delta m/m$	10^{-5} do 10^{-6}
mössbauerska spektrometrija	10^{-15}

Pomudimo se nekoliko ob zadnji in poglejmo, kaj zmore s svojo izredno ločljivostjo. Imamo izvir fotonov, ki seva na vse strani. Postavimo izvir v pritličje in opazujmo v prvem nadstropju fotone, ki odletavajo navzgor. Potem nesimo isti izvir v prvo nadstropje in v pritličju opazujmo fotone. Se bodo prvi fotoni od drugih razlikovali? Pričakujemo, da se bodo. Fotonu, ki v zemeljskem težnostnem polju pada, se energija veča, fotonu, ki se dviga, pa manjša. Če vzamemo kot maso fotona $h\nu/c^2$, se energija fotona pri padcu za z zveča za $(h\nu/c^2)gz$. To spremembo energije lahko zapišemo tudi kot $h\Delta\nu$ in izračunamo relativno spremembo energije kot $\Delta W/W = \Delta\nu/\nu = gz/c^2$. To pa je okoli 10^{-15} pri vrednosti $z = 10$ m. Tolikšno natančnost sta dosegla Rebka in Pound v znamenitem poskusu s primerjanjem obojih fotonov.

Omenili smo vrste različnih spektrometrij, nekatere od njih smo pa tudi pobliže spoznali. Čemu v fiziki toliko različnih spektrometrij? Povedali smo že, da spekter lahko napovemo z računom, lahko pa ga tudi izmerimo. Računajo teoretični fiziki, merijo pa eksperimentalni fiziki. Če ugotove ujemanje med meritvijo in napovedjo, je najbrž račun pravilen.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

SISTEMI, POVRATNE ZVEZE, REGULIRANJE KOLIČIN, AVTOMATIZACIJA

JOŽE PAHOR

Zima je. Udobno je sedeti v topli sobi. Da bo v sobi toplo, je treba kuriti, ne preveč in ne premalo. Kako bi to dosegli z najmanj truda?

Najprej potrebujemo peč. Da bo naloga lažja, naj bo peč električna. Ko nas torej zebe, vključimo peč. Ta greje s polno močjo vse dotlej, da postane pretoplo. Ko jo ugasnemo, se soba ponovno ohlaja. Spet nas zebe, zato peč vključimo vnovič. Tako temperatura v sobi ves čas niha med dvema mejama: spodnjo, ko nas zebe, in zgornjo, ko nam je vroče. Pravimo da vzdržujemo primerno temperaturo z diskretno regulacijo: peč greje ali pa ne. Če zahtevamo vzdrževanje temperature v ozkem intervalu namesto v širokem, se bomo morali večkrat potruditi do stikala. To pa nam ni všeč. Bolj bi nam ustrezalo, če bi grelec sam vedel, kdaj naj se vključi. Sistem želimo izboljšati. Prišli smo do diskretne samodejne ali avtomatske regulacije. Pri taki pot do stikala ne bo več potrebna.

Samodejna diskretna regulacija ni nova. Srečujemo jo na primer že doma pri termoakumulacijskih pečeh. Nekje na steni imamo škatlico, ki meri temperaturo v sobi in vključi ventilator v peči, kadar pade temperatura v sobi pod predpisano mejo. Ventilator puhne v sobo val toplega zraka in temperatura se dviga, dokler škatlica na zidu ne razveljavi svojega ukaza ventilatorju.

Druga domača naprava s tako regulacijo je bojler. Električni grelec segreva vodo dotlej, dokler ta ne doseže predpisane temperature. Temperaturo je treba seveda izmeriti. V odprtino sredi bojlerja je vložena kovinska palica, ki se daljša, ko se z vodo vred segreva. Neznatni podaljšek te palice (meter dolga palica se podaljša za milimeter, če jo segrejemo za 100°) preko vzvodov prenesemo do stikala. To prekine električni tok in s tem nadaljnje ogrevanje vode. Podoben termometer, običajno bimetalni, najdemo v škatlici na zidu, ki krmili akumulacijsko peč.

Mnogo podobnih regulacijskih sistemov uporabljamo tudi v industriji, tehniki in znanosti. Reguliramo lahko temperaturo, pretok, kislost ali bazičnost raztopin in še vrsto drugih spremenljivk. Čim natančneje želimo vzdrževati želeno vrednost, tem bolj zbližamo obe meji, na katerih vklopimo in izklopimo intervencijo. V mejnem primeru bosta torej vklop in izklop na istem mestu. To pa je pretiravanje, ki se lahko maščuje. Očitno bodo tedaj potrebni zelo pogosti vklopi in izklopi. Tak sistem, ki mu preko stikala dovajamo pogosto sunke velike moči, najbrže ne bo dolgo vzdržal. Zato takih sistemov ne uporabljamo; vedno sta vklopna in izklopna točka vsaj nekoliko razmaknjeni.

Če nismo zadovoljni z natančnostjo, ki jo dosežemo z opisano regulacijo, bo treba pač najti primernejšo. Pri diskretni re-

gulaciji nas je motilo prepogosto vklaplanje in izklaplanje, kadar smo predpisali natančno vzdrževanje želene vrednosti, to rej ozek interval uporabnih vrednosti kontrolirane količine. Da bo beseda lepše tekla, se vrnimo spet k nalogi o ogrevanju sobe. Pogostemu vklaplanju bi se lahko izognili tudi tako, da bi uporabili manj izdatno peč. Ta bi grela počasneje, temperatura bi kasneje dosegla predpisano mejo, vključevanje in izključevanje bi bilo redkejše. Kot kaže, smo na dobri poti.

Ponavljajmo poskus z vse šibkejšimi pečmi. Slednjič najdemo tako, da izključevanje sploh ne bo potrebno. Peč oddaja ravno tolikšni toplotni tok, kolikršen uhaja iz sobe, temperatura v sobi pa je stalna. Navidez smo dosegli idealno vzdrževanje temperature.

Pride večer. Mraz pritisne, tudi v sobi postaja hladneje. Naša peč je pokrivala toplotne izgube čez dan, za noč je prešibka. Jo bomo spet zamenjali? Nevšečnosti so tudi, če gremo preko noči delje ven in izključimo peč. Ko se vrnemo in jo vključimo, bo temperatura v sobi naraščala zelo počasi. Moč pečice je zadoščala za kritje temperaturnih izgub, je pa premajhna, da bi v prikladnem času segrela močno ohlajeni prostor.

Vseh teh težav se lahko znebimo, če razpolagamo z močno pečjo, ki ji lahko poljubno - predvsem zvezno - spreminjamo moč. Za začetno ogrevanje bomo potrebovali veliko moč, preko dneva manjšo, ponoči večjo ... Lepo, a kako bomo ugotovili trenutne in natančne potrebe po moči?

Načelno bi bilo to mogoče izračunati in preveriti s poskusom. Najprej bi upoštevali zunanjo temperaturo. Moč bi morala biti sorazmerna razliki temperatur med zunanjo in predpisano temperaturo. Sorazmernostni faktor bi morali spremeniti zvečer, ko bi spustili zavese in bi se soba manj ohlajala. Meriti bi morali tudi veter zunaj. Ob hudem vetru se soba hladi hitreje, izgube naraščajo in potreba po moči se veča.

Če bi nam torej uspelo izmeriti vse vplive in ugotoviti vse zveze, bi lahko potrebe po moči sporočal majhen računalnik, ki bi mu ves čas nudili podatke o zunanji temperaturi, hitrosti vetra ter o stanju zaves.

Rezultat računalnika pa bi postal neraben, ko bi nekdo pozabil pripreti vrata sobe. Ker bi tedaj uhajalo več toplote, bi bilo treba predvideti tudi meritev odprtosti vrat in oken. Tudi s tem še ni v sobi zagotovljena stalna temperatura. Nehote polijemo kozarec vode, ki izhlapeva in rabi toploto. Bomo tudi to merili in upoštevali pri izračunu potrebne moči? Vse preveč je možnih vplivov na sobno temperaturo, da bi lahko upali na dokončen uspeh.

Zato bomo ubrali drugačno, preprostejšo pot. Ogrevanje je nepotrebno tedaj, ko sobna temperatura ustreza zahtevi, nekoliko potrebno tedaj, ko ugotovimo majhno razliko med merjeno temperaturo in zahtevano temperaturo in zelo potrebno tedaj, ko je razlika velika. Umestno se zdi, da bo moč grelca kar sorazmerna primankljaju:

$$P \propto T_{sobna} - T_{predpisana}$$

Bločno shemo takega regulacijskega sistema kaže sl. 1.

Razmislimo, kolikšen bi naj bil sorazmerni faktor med močjo in temperaturno razliko! Da dovajamo neko moč P, mora obstojati razlika $T_{sobna} - T_{predpisana}$, to pa pomeni, da vzdrževana tem-

peratura ni enaka zahtevani temperaturi. Če se zunanjost ohladi, bo treba nadomeščati večje toplotne izgube. Do večje moči pa bomo prišli šele tedaj, ko se bo soba še nekoliko bolj shladila. Tako lahko zaključimo, da potrebujemo čim večji sorazmernostni faktor *A*:

$$P = A(T_{sobna} - T_{predpisana})$$

Tedaj bomo imeli ob ohladitvi zagotovljene dovolj dodatne moči že pri neznatnem padcu sobne temperature.

Ugotovitev o sorazmernostnem faktorju *A* povemo lahko tudi drugače: ojačenje v povratni zanki naj bo čim večje. Za večino preprostih regulacijskih sistemov ta ugotovitev tudi drži. Takih sistemov pa ni veliko. Tudi naše ogrevanje ne spada mednje. O tem bi se lahko prepričali s poskusom: pri velikem ojačenju bi temperatura v sobi močno kolebala. Zakaj?

Naj bo sobna temperatura pod predpisano vrednostjo. Zaradi velikega ojačenja dovajamo veliko moč. Toplota se najprej kopiči v peči, potem se prenaša na zrak, slednjič doseže topel zrak škatlico s termometrom na zidu. Tudi termometer potrebuje nekaj časa, da se segreje in pokaže pravo temperaturo. Ves ta čas pa peč neusmiljeno greje, čeprav je v njej nakopičene dovolj toplote za pokritje primanjkljaja v sobi. Ko slednjič termometer zapove: "Dovolj!", oddaja peč toploto še dolgo, temperatura pa zrase daleč nad predpisano vrednost.

Dogajanje sicer razumemo, natančneje pa bi ga lahko raziskovali šele z računom. Regulacijske sisteme, ki so manj nagnjeni k nihanju, dobimo, če napravimo intervencijo - v našem primeru gretje - sorazmerno integralu odmika (sl.2):

$$P \propto \int (T_{sobna} - T_{predpisana})\,dt$$

Preprosteje rečeno: moč bo velika tedaj, kadar je napaka $T_{sobna} - T_{predpisana}$ velika ali pa tedaj, kadar se sicer majhna napaka javlja dalj časa. Računi pokažejo, da so sistemi z integralno regulacijo marsikdaj ugodnejši od prvih s proporcionalno.

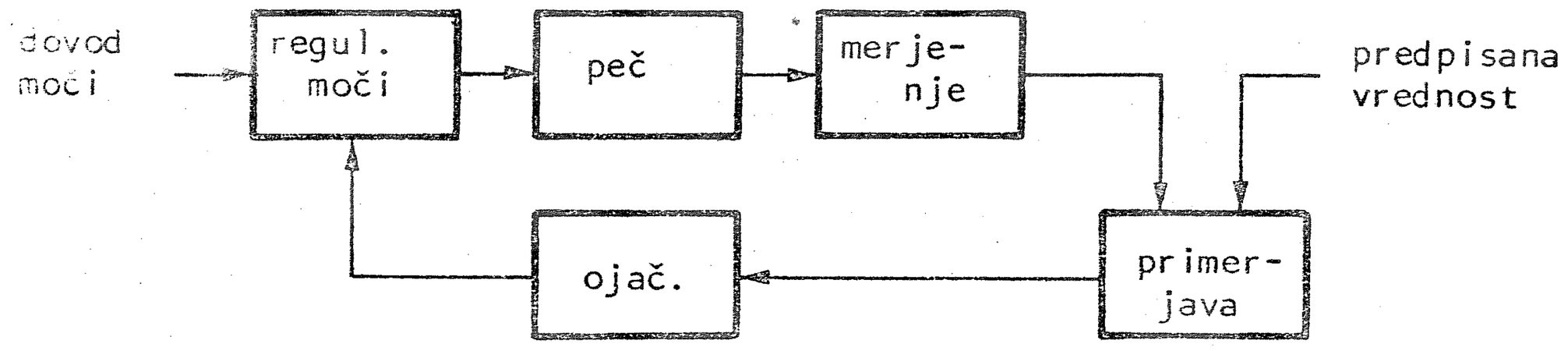
Ponuja se še tretja možnost za stabilizacijo. Stalnost temperature smo doslej zagotavljali tako, da smo upoštevali razliko med merjeno in predpisano temperaturo. Prav tako pa bomo dosegli stalno temperaturo tudi tedaj, če bomo zagotovili, da se merjena temperatura ne bo spreminjala. Ker meri časovne spremembe neke funkcije *f* njen časovni odvod df/dt, bo ta funkcija stalna, če bo ves čas vrednost odvoda enaka 0. Kadar je ta pogoj izpolnjen že sam od sebe, intervencija ni potrebna. Pač pa je treba ukrepati, če je odvod različen od 0. Za naš primer bi bila intervencija taka:

$$P \propto -dT_{sobna}/dt$$

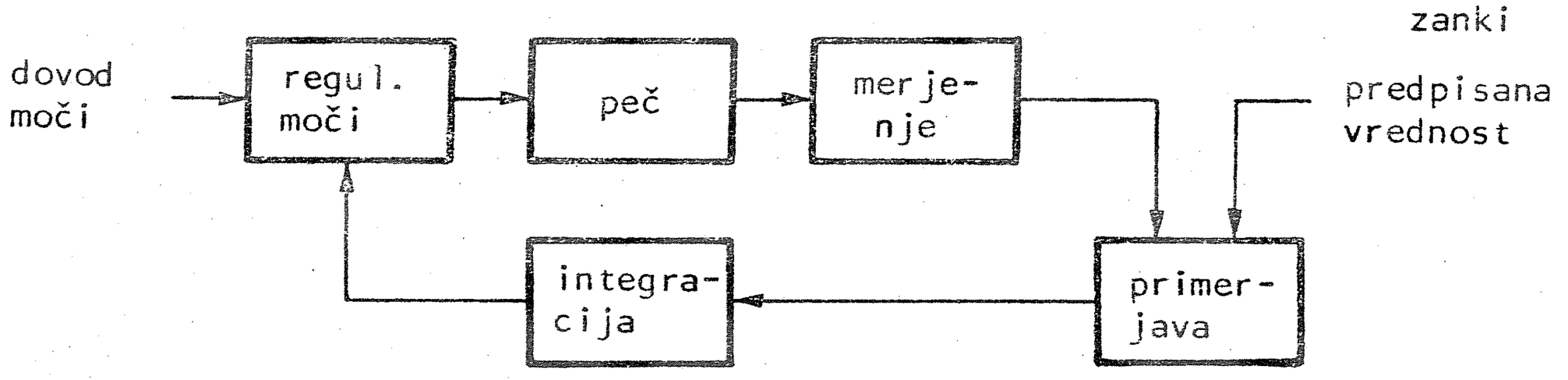
Čim hitreje sobna temperatura pada, tem večjo moč dovaja grelec (sl.3).

O lastnostih in uporabnostih posameznih vrst intervencije ni mogoče soditi brez računov; običajno uporabljamo več vrst intervencije istočasno, izbira pa je odvisna od lastnosti reguliranega sistema.

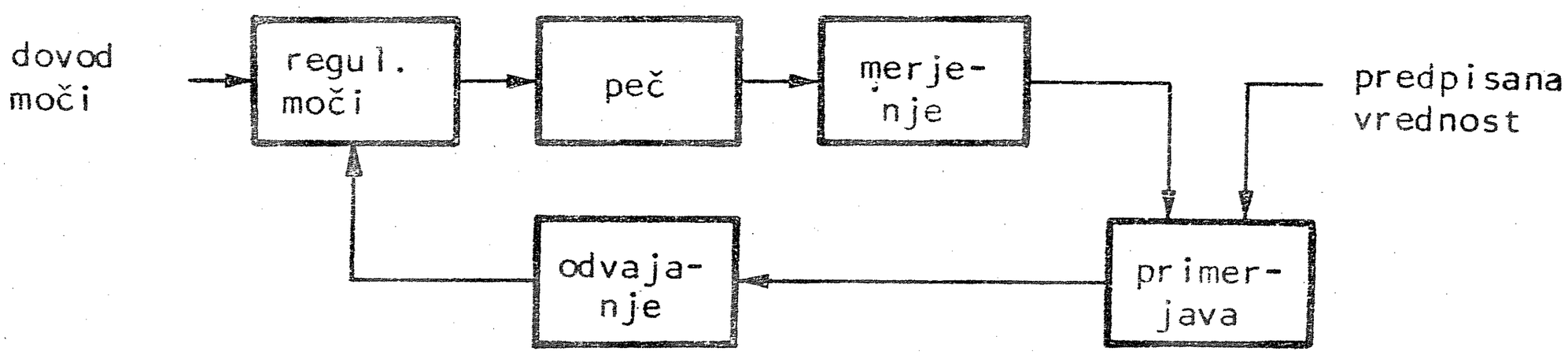
Tudi možnosti, da bi v sistemih vzdrževali zaželeno stanje z ugotavljanjem zunanjih vplivov, ne gre zametavati. Sobna temperatura je bila odvisna od različnih vplivov, nekaterih od



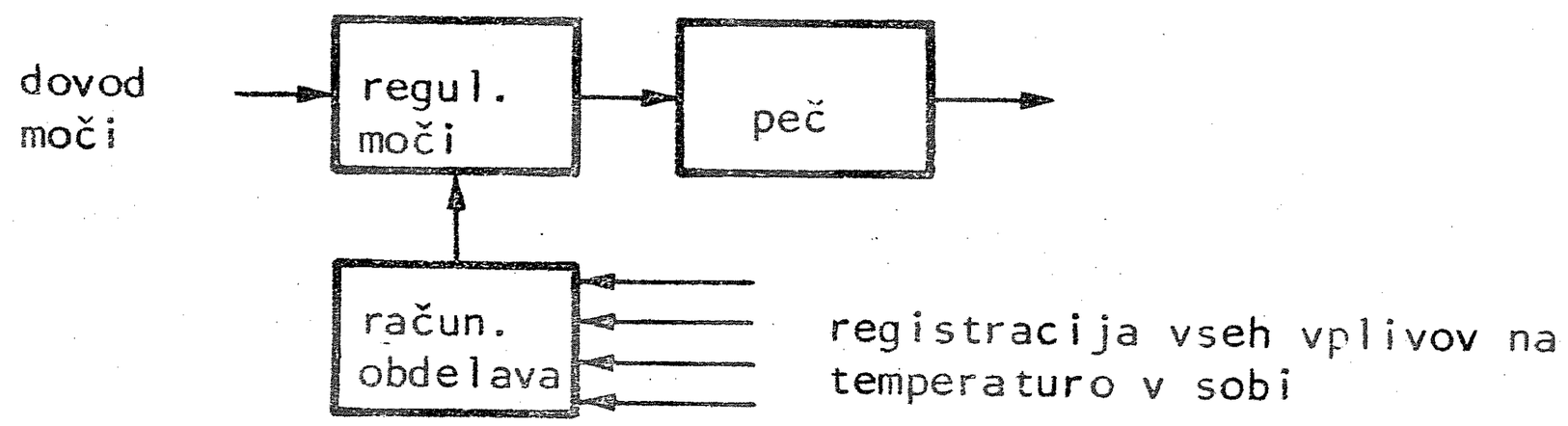
Sl. 1: Sistem regulacije temperature: proporcionalni element v povratni zanki



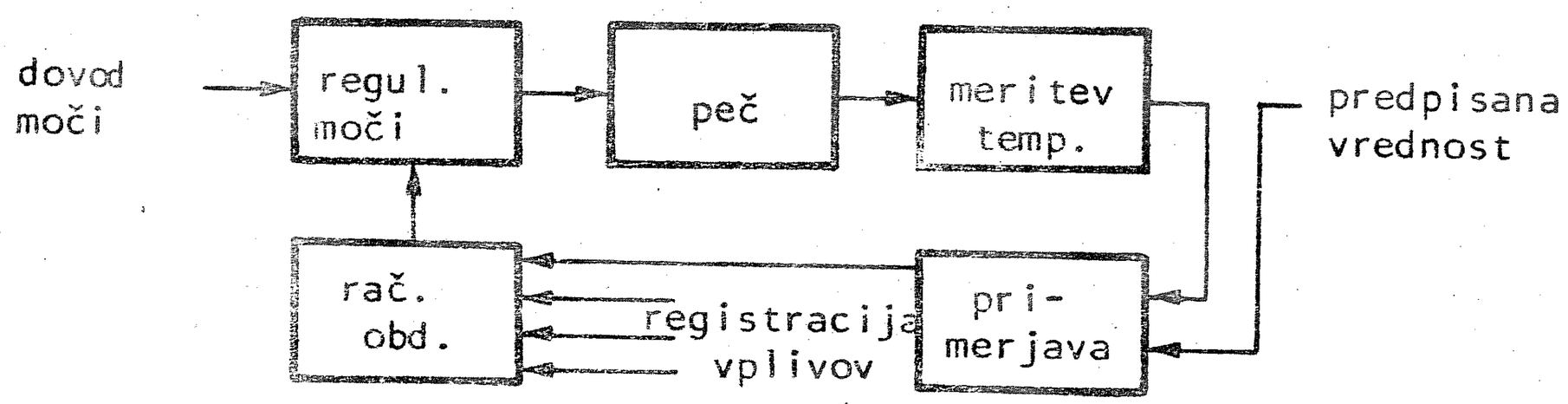
Sl. 2: Sistem temperaturne regulacije: integracija v povratni zanki



Sl. 3: Sistem temperaturne regulacije: odvajanje v povratni zanki



Sl. 4: Regulacija temperature s korektorjem



Sl. 5: Kombinirana regulacija: korektor in povratna zanka

teh pa ni bilo mogoče natančneje predvideti. Tedaj se regulacija s korektorjem, kot ta način regulacije imenujemo, res ne obnese. Dostikrat pa je takih vplivov le malo in so natanko znani. Tedaj je regulacija s korektorjem (sl.4), ki mu včasih pomaga še sistem s povratno zanko, idealna rešitev (sl.5).

Po vsem tem ne preseneča, da je mogoče danes vzdrževati različne fizikalne spremenljivke z relativno natančnostjo 10^{-5} do 10^{-8}. Natančnost je odvisna predvsem od natančnosti referenčne vrednosti. Če pa opazujemo vrednost odvoda df/dt, ne potrebujemo niti referenčne vrednosti in lahko dosežemo celo boljšo stabilnost, kot bi jo imela referenčna vrednost.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

POLPREVODNIKI

PETER GOSAR

Junija 1948 so v Bellovih laboratorijih v ZDA predstavili javnosti majhno napravo, ki naj bi bila odlično nadomestilo za elektronke. To je bil *tranzistor*. Zaradi majhne prostornine, izredno majhne porabe moči in zelo dolge življenjske dobe je tranzistor vzbudil v tehniških in industrijskih krogih veliko zanimanje. Danes vemo, da pomeni izum tranzistorja začetek nove dobe v elektroniki.

Pri elektronkah poteka vse dogajanje v vakuumu med elektrodami, pri tranzistorju pa v ploščici iz polprevodnika silicija ali germanija. V tem sestavku bomo obravnavali tisti del fizike polprevodnikov, ki je potreben za razumevanje delovanja diod in tranzistorjev.

Polprevodnikov je v naravi zelo mnogo. Najpomembnejši elementarni polprevodniki so germanij, silicij in selen. Od polprevodniških spojin naj omenimo le galenit (PbS), ki se je nekdaj uporabljal v detektorjih, in dibakrov oksid (Cu_2O), ki je bil znan kot dober material za izdelavo usmernikov.

Silicij in germanij imata kot štirivalentna elementa 4 valenčne elektrone. Valenčni elektroni se v trdni snovi, na primer v kristalu silicija, povežejo z valenčnimi elektroni sosednjih silicijevih atomov po dva in dva v elektronske pare. Valenčna vez med dvema sosednjima atomoma v kristalu je kovalentna. Silicij, pa tudi germanij, v diamantni kristalni strukturi kristalizirata - tako kot ogljik - kubično. Silicijev atom v kristalni mreži obdajajo štirje sosednji atomi, tako da je med atomi polovico toliko vezi, kot je valenčnih elektronov. Pričakovali bi, da bo silicij ali germanij izolator, ker so vsi valenčni elektroni vezani. Vendar ni tako. Kemijska vez valenčnih elektronov je pri siliciju in germaniju razmeroma šibka. Zato se včasih poruši zaradi toplotnega nihanja atomov. Energijo vezi merimo v eV in je pri siliciju 1,1 eV, pri germaniju pa 0,75 eV. Kinetična energija atomov je sicer v povprečju mnogo manjša in je pri sobni temperaturi samo 0,026 eV. Če pa upoštevamo fluktuacije, vidimo, da se lahko nakopiči na posameznem atomu toliko energije, da nihajoči atom poruši kemijsko vez, ki jo tvorita dva elektrona. Vez se pretrga, to se pravi, da se en elektron iztrga iz objema drugega in se začne prosto gibati. Dobili smo torej prost elektron, ki prispeva k povečanju prevodnosti materiala. Tudi drugi ostanek pretrgane vezi, to je mesto v kristalu, kjer v vezavi manjka elektron, se more premikati od atoma do atoma. Gibanje pretrgane vezi ali, kakor jo bomo imenovali odslej - *vrzeli* - , si razlagamo s preskakovanjem elektronov iz popolnih sosednjih vezi v vrzel. Če vrzel ujame elektron, se s tem izpolni in nastane zopet normalna kemijska vez. Zato pa nastane pri sosednjem atomu vrzel. Zunanji učinek takega preskakovanja elektronov je navidezno prosto gibanje vrzeli v kristalu.

Vrzel se obnaša pod vplivom električnega polja tako , kot da bi bila pozitivno nabit delec z nabojem, ki je po velikosti enak naboju elektrona. Da imamo tu res opraviti s pozitivnim nabojem, je lahko razumeti. Če namreč združimo elektron in vrzel, postane kristal na tistem mestu povsem normalen, to je v prostorskem povprečju neelektričen. Pod vplivom zunanjega električnega polja se vrzeli gibljejo v smeri polja. Preskoki elektronov so namreč bolj pogosti iz vezi v smeri polja, gledano z mesta vrzeli, kot iz obratne smeri, ker električno polje olajšuje take preskoke. Iz tega sledi, da tudi vrzeli prispevajo k prevajanju električnega toka.

V kemijsko čistem polprevodniku, ki nima napak v kristalni zgradbi, je število prostih elektronov vedno enako številu vrzeli. To število pa je močno odvisno od temperature. Če temperaturo zvišujemo, povečujemo nihajno energijo atomov in s tem verjetnost, da se posamezne valenčne vezi v kristalu pretrgajo. Z naraščanjem temperature zelo hitro narašča gostota prostih elektronov in vrzeli, s tem pa tudi prevodnost materiala. Pri polprevodnikih v splošnem upornost pada z rastočo temperaturo. Ker je pri siliciju kemijska vezava močnejša kot pri germaniju, je pri njem manj prostih elektronov in vrzeli. Zato je tudi upor čistega silicija večji kot upor germanija.

Drugi, še važnejši vzrok za to, da silicij in germanij nista izolatorja, je v tem, ker so njune električne lastnosti močno odvisne od kemijskih primesi. Pri izdelavi diod in tranzistorjev dodajo skoraj popolnoma čistemu siliciju ali germaniju prav minimalne količine, okoli 10^{-5} % , raznih drugih elementov. Kljub tako majhni količini povečajo te primesi prav izredno prevodnost in vplivajo tudi na druge električne lastnosti. Kot primesi uporabljajo elemente tretjega ali petega stolpca periodne preglednice. Atomi teh elementov se vgradijo v kristalno mrežo na mesta, ki bi jih sicer zasedel atom sllicija ali germanija. Zaradi majhne koncentracije pride približno na vsakih 10^7 atomov polprevodnika po en tuj atom, ki zato ne more bistveno vplivati na kristalno strukturo. Pač pa taki tuji atomi prispevajo proste elektrone ali vrzeli in s tem povečujejo prevodnost materiala. Če je vgrajeni atom peterovalenten, na primer P ali As, ima na zunanji obli pet valenčnih elektronov, od katerih se lahko le štirje povežejo v kemijske vezi s sosednjimi atomi. Preostali elektron pa nima partnerja, s katerim bi se združil, in tudi ni močno vezan na svoj atom. Zato se z lahkoto odtrga od atoma, ki mu pripada, in postane prost. Tako dobimo toliko prostih elektronov, kot je primešanih peterovalentnih atomov.

Podobno se zgodi, če imamo opraviti s primesmi trivalentnih elementov, na primer In, Al in B. Pri trivalentnem atomu manjka en elektron, da bi se lahko tvorile vse štiri vezi s sosednjimi atomi. Ena vez ostane neizpolnjena, tako da imamo na mestu dodanega trivalentnega atoma vrzel. Vrzel je le šibko vezana na svoj atom in se lahko zaradi toplotnega nihanja kristalne mreže odtrga in postane prosto gibljiva na način, ki ga že poznamo.

Primesi, ki dajejo proste elektrone, se imenujejo *donorji*, primesi, ki povzročajo nastanek prostih vrzeli, pa *akceptorji*. Da bo predstava o izrednem vplivu donorjev in akceptorjev na prevodnost bolj nazorna, navedimo podatke za silicij. Kemijsko čist silicij ima pri 0^oC svojski upor nad 600 ohm.m. Če mu dodamo 5.10^{-4} utežnega procenta B, pade svojski upor že na $1,5.10^{-3}$ ohm.m, pri dodatku 5.10^{-3}% B pa na 3.10^{-4}ohm.m in pri 1% B na 2.10^{-6}ohm.m. Tako močna odvisnost prevodnosti od minimalnih količin primesi je splošna lastnost polprevodnikov.

Donorji in akceptorji porušijo v polprevodnikih ravnotežje med številom prostih elektronov in vrzeli. Z dodatkom donorjev se koncentracija prostih elektronov močno poveča. Istočasno se pa tudi zmanjša koncentracija vrzeli. Tako so v polprevodniku, ki vsebuje dovolj donorjev, skoro edini nosilci električnega toka elektroni. Takemu polprevodniku pravimo, da je *tipa n*, ker vsebuje negativne nosilce toka. Podobno prevladujejo v polprevodniku, ki ima dovolj akceptorjev, vrzeli. V takem polprevodniku so skoraj edini nosilci toka pozitivne vrzeli in pravimo, da je *tipa p*.

Razlikovanje med tipoma p in n je pri polprevodnikih možno le pri dovolj nizkih temperaturah, na primer pri germaniju do 100^o C in pri siliciju nekaj višje, morda do 250^o C. Pri višjih temperaturah je namreč toplotno trganje kemijskih vezi že zelo pogosto in je tako nastalih elektronov in vrzeli več kot onih, ki so jih prispevale kemijske primesi. Tedaj ne moremo več govoriti o tipu n ali p.

Osnove teorije polprevodnikov, s katero smo se seznanili, zadoščajo za razumevanje delovanja polprevodniške diode. Bistveni del diode je polprevod-

niški kristal, ki ima dve področji, eno tipa p in drugo tipa n. Na obe je privarjen električni priključek. Meja med področjema p in n - pravimo ji *stik p-n* - laže prepušča električni tok v smeri od p k n kot obratno. Stik p-n deluje kot *usmernik*.

Tudi ko ni na diodi nobene zunanje napetosti, je v okolici stika p-n močno električno polje, ki ima tako smer, da preprečuje elektronom, da bi se prebili iz področja n v področje p, kjer je elektronov zelo malo. Podobno to polje preprečuje vrzelim, da bi difundirale iz področja p v področje n. To električno polje nastane ravno zaradi delne difuzije elektronov in vrzeli med izdelavo stika p-n. Zaradi difuzije se poruši električna nevtralnost kristala v okolici stika, kar povzroči nastanek močnih električnih polj. Ta polja preprečijo nadaljnjo difuzijo elektronov in vrzeli. Kontaktna napetost na stiku p-n je pri germaniju okoli 0,5 V, pri siliciju pa nekaj več.

Če damo na diodo tako zunanjo napetost, da zmanjša napetost na stiku p-n, začno difundirati vrzeli iz področja p v področje n, elektroni pa v obratno smer. Vrzeli, ki so prodrle v področje n, tam ne "žive" dolgo. Zaradi velike koncentracije elektronov se kmalu združijo z njimi in se tako nevtralizirajo. *Življenjski čas* vrzeli ima velikostno stopnjo 100 μs. V tem času prodrejo okoli 0,1 mm daleč od stika p-n. Podobno se godi elektronom, ki pridejo v področje p. Pri taki zunanji napetosti je upor diode zelo majhen. To je prevodna smer za tok.

Če pa vzamemo tako zunanjo napetost, da povečamo potencialno razliko na stiku p-n, se razmere bistveno spremenijo. Skozi stik p-n sedaj skoraj ne more teči električni tok. Prvotno električno polje v okolici stika p-n in dodatno zunanje polje imata tako smer, da vlečeta elektrone in vrzeli proč od stika p-n. Zato nastane v okolici stika plast kristala, ki ne vsebuje prostih nosilcev naboja. Tam se kristal obnaša kot izolator. Govorimo o *zaporni plasti*. Debelina zaporne plasti raste z napetostjo na diodi. Običajno ima velikostno stopnjo 10^{-4}cm. V zaporni smeri je upor diode zelo velik. Majhen tok, ki kjub zaporni smeri zunanje napetosti teče skozi diodo, si razlagamo s tem, da nastajajo zaradi toplotnega nihanja atomov v zaporni plasti in njeni okolici prosti elektroni in vrzeli, ki kvarijo izolacijsko sposobnost zaporne plasti.

Dioda usmerja električne signale, tranzistor pa ojačuje. Zgradba tranzistorja seveda ni tako preprosta kot zgradba diode. Pri tranzistorju ima polprevodniški kristal tri področja različnih tipov, ki si prostorsko sledijo kot na primer p-n-p. Področja imajo svoja imena *emitor*, *baza* in *kolektor* in so opremeljena z električnimi priključki. Tranzistor je pravzaprav sestav dveh diod, katerih deli so tako blizu skupaj, da dogajanje v eni diodi vpliva na dogajanje v sosednji. Priključitev zunanjih napetosti na emitor, bazo in kolektor je taka, da je stik p-n med emitorjem in bazo postavljen v prevodno smer, stik med bazo in kolektorjem pa v zaporno smer. Napetost med emitorjem in bazo je zelo majhna, med bazo in kolektorjem pa velika.

Okoli kolektorskega stika p-n nastane izrazita zaporna plast. Ker emitorska dioda prevaja, pritekajo iz emitorja vrzeli v bazo. Širina baze ima velikostno stopnjo stotinke milimetra. Zato pretežni del vrzeli, ki jih emitira emitor, prodre do zaporne plasti kolektorja. Tok skozi kolektor naraste. Če spreminjamo emitorski tok, se v istem ritmu spreminja tudi kolektorski tok. Razmerje med prirastkom kolektorskega toka in prirastkom emitorskega toka pri konstantni kolektorski napetosti se imenuje *faktor ojačevanja toka*. Ta je pri dobrih tranzistorjih zelo blizu vrednosti 1. Sedaj je očitno, da lahko tranzistor ojačuje signale. Pri skoraj enakem toku skozi emitor in kolektor je namreč upor na vhodni emitorski strani majhen, na izhodni kolektorski pa velik.

Polprevodniški sestavni elementi so povzročili pravo revolucijo v elektrotehniki šibkih tokov. Poleg diod in tranzistorjev poznamo danes še vrsto drugih polprevodniških naprav, kot so na primer senzorji za infrardečo svetlobo, termistorji, sončne celice, termoelektrični pretvorniki in merilniki magnetnih polj.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

KAJ LAHKO ŠE VIDIMO Z MIKROSKOPOM ?

FRANC CVELBAR

Mikroskop izkorišča pojav, da dobimo z lečo sliko predmeta, ki je večja kot predmet. Svetloba, ki izhaja iz točke predmeta v.dani razdalji od osi leče, se po prehodu združi v točki v večji razdalji od osi.

Slika je tem večja, čim bliže gorišču je predmet. Ko je predmet v gorišču, je slika v neskončnosti in neskončno velika. Že z eno samo lečo bi torej lahko dosegli poljubno velike povečave. S tem bi imeli možnost opazovati poljubno majhne podrobnosti na predmetu ali poljubno majhne predmete. Vendar stvari niso tako preproste.

Spomnimo se, da je svetloba valovanje, ki se ob prehodu skozi odprtino uklo ni. Za režo dobimo značilno uklonsko sliko: izrazito osrednjo progo obdaja več šibkejših prog. Srednja proga je tem bolj razmazana, čim ožja je reža. Pri reži s širino d ležijo za svetlobo z valovno dolžino λ središča temnih prog pod koti Θ_n, ki jih določa enačba:

$$d\sin\Theta_n = n\lambda$$

n je celo število. Če za režo postavimo lečo z goriščno razdaljo f, se središča temnih prog pojavijo na razdaljah D_n od osi:

$$Dn = f\,\mathrm{tg}\Theta_n = nf\sin\Theta_n \simeq nf\lambda/d$$

Pri tem smo upoštevali, da so koti Θ_n zelo majhni. Približno lahko rečemo, da sega srednja svetla proga do središča prve temne proge

$$D_o = f\lambda/d$$

Podobno kot na reži se svetloba ukloni tudi na krožni odprtini leče. V tem primeru obdajajo osrednjo svetlo pego koncentrični manj svetli kolobarji. Za radij pege, ki ga definiramo podobno kot prej razdaljo D_o, dobimo iz razmeroma zahtevnih računov $\rho = 0{,}6f\lambda/R$. To je blizu $0{,}5f\lambda/d$, kar sledi iz enačbe za D_o, če postavimo namesto širine d premer odprtine leče $2R$. Radij pege ρ je tem večji, čim večja je valovna dolžina λ, čim večja je goriščna razdalja f in čim manjši je radij R. Kot Θ_o, ki ga oklepa z osjo leče temenski žarek do roba pege, je dan z enačbo

$$\mathrm{tg}\Theta_o \simeq \Theta_o = 0{,}6\lambda/R$$

V geometrijski optiki bi se vzporedni žarki, ki padajo pod enakim kotom Θ proti optični osi leče, morali združiti v prebodišču temenskega žarka z goriščno ravnino. Toda zaradi uklona ne nastane točka, ampak pega. Vzporedne žarke dobimo od zelo oddaljenih točkastih svetil. Slika točke zelo oddaljenega svetila torej ni točka, ampak pega. Sliki dveh točkastih svetil še ločimo, če njuna temenska žarka objemata kot, ki je večji od Θ_o. Če je kot med temenskima žarkoma manjši, se namreč pegi prekrivata: sliki se zlijeta v eno.

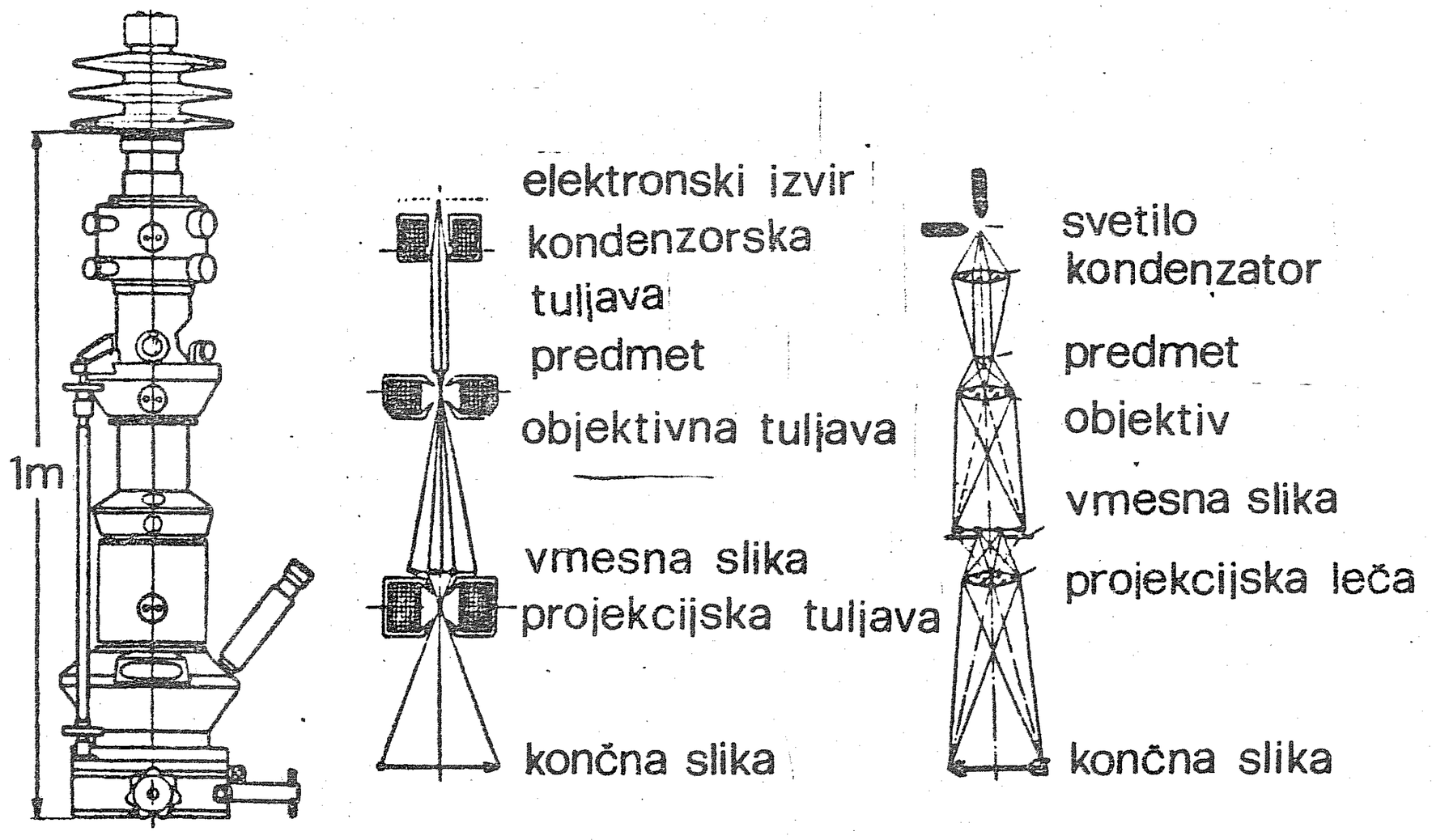
Kako pa je z ločljivostjo pri preslikavah predmetov, ki so blizu leče? Tudi v tem primeru sliki dveh točk še ločimo, če je med njunima temenskima žarkoma kot, večji od Θ_o. Če je predmet v razdalji a od temena leče, ustreza

kotu Θ_o razdalja med točkama

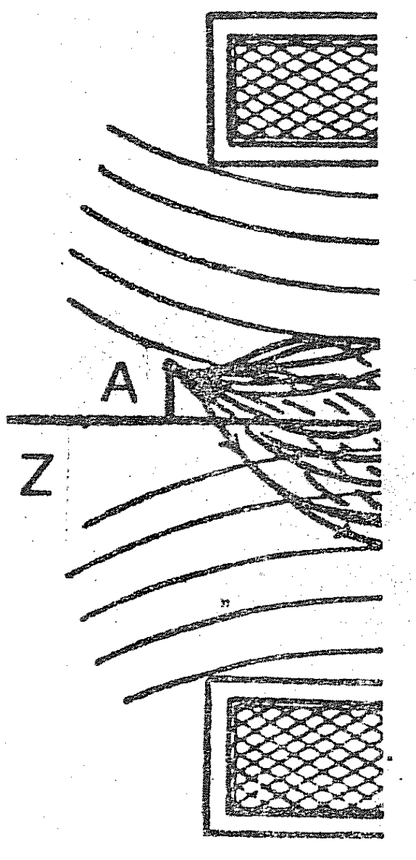
$$y = a\mathrm{tg}\Theta_o = \dot{a}\ 0{,}6\lambda/R$$

To je najmanjša razdalja med dvema točkama predmeta, ki ju na sliki še ločimo. Pri preslikavah je razdalja predmeta približno enaka goriščni razdalji, ta pa je pri običajnih izvedbah približno enaka radiju leče. Torej je $a/R \approx 1$. Najmanjša razdalja med dvema točkama, ki ju na sliki še ločimo, je tedaj enaka polovici valovne dolžine uporabljene svetlobe. V okviru naših privzetkov je ta rezultat (*ločljivost leče*) odvisen le od radija odprtine leče. Molče smo privzeli, da leča nima napak.

Sredina spektra vidne svetlobe ima valovno dolžino 6000 Å. Ločljivost idealne leče je torej okrog 3000 Å. Ker s prostim očesom brez težav razločimo razdalje nekaj 0,1 mm, je smiselna linearna povečava z optično lečo okrog 1000. Ploskovna povečava je pri tem 10^6.



Sl. 1: Elektronski mikroskop z magnetnimi lečami (a), pot elektronov v elektronskem mikroskopu (b) in v optičnem mikroskopu (c)



Sl. 2:

Poenostavljena risba elektromagnetne leče. B.m. - prečni prerez tuljave, A - predmet, B - njegova slika

Pomembno vprašanje pri povečavi je svetlost slike. Ker se svetlobni tok iz predmeta razporedi po milijonkrat večji ploskvi slike, je svetlost slike ustrezno zmanjšana. Velik del svetlobe izgubimo že, če prestrežemo sliko na zaslon, ki ga opazujemo z očmi. Tej izgubi se izognemo, če realno sliko, ki jo dobimo z našo lečo (objektivom), gledamo skozi drugo lečo (okular). Druga leča je v bistvu lupa, kakršno uporablja urar. Sistem obeh leč je mikroskop. Običajno je povečava obeh leč skupaj okrog 1000, lahko je seveda tudi manj. Preparate gledamo tako, da opazujemo odbito svetlobo (metalurški mikroskopi) ali pa prepuščeno svetlobo (mikroskopi za opazovanje krvne slike, živih celic itd.). Pri tem je nad mizico, na katero postavimo preparat, ali pod njo, nameščeno svetilo z dodatno lečo, ki usmeri svetlobo na preparat. Objektiv in okular mikroskopa običajno nista enojni leči, ampak ju sestavlja več leč. Tako se namreč da v veliki meri odpraviti napake leč. Zaradi tega mikroskopi niso poceni.

Ločljivost mikroskopa izboljšamo tako, da napolnimo prostor med predmetom in objektivom s kapljevino z velikim lomnim kvocientom. Velja namreč, da je valovna dolžina v snovi enaka razmerju med valovno dolžino v praznem prostoru in lomnim kvocientom. V ta namen prirejene objektive imenujemo imerzijske objektive.

Boljšo ločljivost kot z mikroskopom na vidno svetlobo bi bilo mogoče doseči z mikroskopom na ultravijolično svetlobo. Pri tem bi morali rešiti vrsto tehničnih problemov. Da bi preprečili absorpcijo svetlobe, bi morale biti leče izdelane iz kremena in prostor med njimi bi moral biti evakuiran. Oko ultravijolične svetlobe ne zazna in bi morali sliko prestreči s fluorescenčnim zaslonom. Zaradi tega mikroskopov na ultravijolično svetlobo ne izdelujejo.

Kaj pa mikroskop na rentgensko svetlobo z valovno dolžino okrog 1 Å? Takih mikroskopov ni, ker za rentgensko svetlobo ni leč.

S tem pa nismo izčrpali vseh možnosti: ostane še *elektronski mikroskop*. Znano je, da z elektronsko lečo usmerjamo curek elektronov podobno, kot usmerjamo curek svetlobe z optično lečo. Tudi pri elektronski leči združimo vzporedni curek elektronov v gorišču. Pri taki leči brez napak je pega več tisočkrat manjša kot pri optičnih lečah. Taka pega je slika zelo oddaljenega točkastega izvira elektronov. Z lečo ne preslikamo samo izvira. Z njo lahko preslikamo tudi obrise drobnih predmetov, ki jih postavimo na pot elektronskega curka.

Elektroni, ki jih v izviru pospeši napetost okrog 10 kV, bi se zaustavili v zraku na razdalji nekaj 10 cm, zato mora biti elektronski mikroskop evakuiran. Elektronsko sliko opazujemo na fluorescenčnem zaslonu. Najboljša ločljivost, ki so jo dosegli z elektronskim mikroskopom, je okrog 3 Å. To mejo v glavnem določajo napake elektronskih leč. Ker elektronom v curku v mikroskopu pripišemo valovno dolžino okrog 0,1 Å, bi pričakovali ločljivost s to velikostno stopnjo. Zaradi omenjenih napak pa take ločljivosti ni mogoče doseči.

LITERATURA

J. Strnad, *Fizika*, II. del (*Elektrika, optika*), Ljubljana, Državna založba Slovenije 1978.

RAZVOJ EKSPERIMENTALNE OPREME IN MERILNIH INSTRUMENTOV

FRANC CVELBAR

Merilni instrumenti in eksperimentalna oprema so raziskovalne naprave, ki bistveno povečujejo obseg naših čutil in zaznavnih možnosti. Z električnimi merilnimi instrumenti npr. izmerimo napetosti, ki jih s čutili ne moremo zaznati. Ura izmeri čas, ki ga z neposrednimi občutki lahko le približno ocenimo. Iz rentgenskega aparata izhaja svetloba, s katero opazujemo notranjost teles, ki pa je ne moremo zaznati s prostim očesom.

Brez eksperimentalne opreme in merilnih instrumentov bi ne bilo naše civilizacije. Če se pokvari televizor, ga pogosto ni mogoče popraviti doma, ker s skromno merilno opremo, ki jo strokovnjak nosi s seboj, ni mogoče odkriti napake. Ob popravilu v servisni delavnici potrebujejo še generator električnih signalov, razne merilne instrumente in osciloskop, na katerem opazujejo časovni potek napetosti.

Še pred tričetrt stoletja so pri postavljanju diagnoze bolezni uporabljali v glavnem termometer, prisluškovalo in morda mikroskop. Danes je opreme za določanje diagnoze toliko, da bi jo v tem kratkem sestavku komaj lahko našteli. Rentgenski aparat pokaže zlomljene kosti, gnilo korenino zoba, razjedo na želodcu, kaverno na pljučih itd. Elektrokardiograf - naprava za merjenje majhnih napetosti, ki se pojavijo ob vsakem srčnem utripu - opozori na nepravilnosti v delovanju srca.

V zadnjem času uporabljajo za diagnostične namene tudi umetne radioaktivne izotope. Za merjenje radioaktivnosti so potrebni detektorji, nekateri od njih so novejše iznajdbe. Z našimi čutili radioaktivnosti sploh ne moremo zaznati.

Poglejmo na kratko, kako je potekal razvoj eksperimentalne opreme in merilnih instrumentov in kako je vplival na razvoj znanosti in civilizacije. Zgodovinsko je človek razvijal najprej merilne pripomočke za količine iz vsakdanjega življenja: dolžinsko merilo, kotno merilo, tehtnico, peščeno uro.

Med opremo, ki je prinesla s seboj pravo revolucijo, je treba omeniti mikroskop in daljnogled. Mikroskop, ki so ga odkrili proti koncu 16. stoletja, je omogočil prodor v svet mikroorganizmov. To je privedlo do spoznanja, da so mikroorganizmi vzrok številnim boleznim. S tem je bilo zvezano spoznanje, da je mogoče s cepivom, ki vsebuje oslabele povzročitelje bolezni, sprožiti le lažjo obolelost, po kateri postane človek ali žival imun. Več kot stoletno proučevanje mikroorganizmov je privedlo do odkritja antibiotikov.

Daljnogled, odkrit v prvi polovici 16. stoletja, je omogočil plovbo po svetovnih morjih, predvsem pa je odprl pogled v vesolje. Z daljnogledom na kotomeru - sikstantom - so z opazovanjem Severnice lahko določili položaj ladje. Pri plovbi preko oceanov so ob uporabi daljnogleda zgrešili cilj le za kak kilometer, medtem ko so prej lahko zašli tudi do 100 km daleč. Po zaslugi večletnih opazovanj Lune s teleskopi za posadko Apolla, ki je stopila na njena tla, ni bilo presenečenj. V preteklosti so bili pomemben raziskovalni pripomoček galvanski elementi, ki so omogočili raziskovanje električnih krogov. Rezultat je bil Ohmov zakon in spoznanje (Oersted 1820), da se žična tuljava, po kateri teče električni tok, obnaša kot magnet in da

se magnetni učinek močno poveča, če je žica navita okrog železa.

Magnet in elektromagnet sta botrovala odkritjem, ki so omogočila, da večino fizičnega dela opravijo stroji. Faraday je 1831 ugotovil, da se na tuljavi, ki se vrti v magnetnem polju, pojavi električna napetost. S tem je dal osnovo za današnje električne generatorje. Ti v elektrarnah spreminjajo kinetično energijo vode ali ustrezno energijo premoga ali lastno energijo uranovih jeder v električno energijo, ki jo daljnovodi vodijo do tovarn, mest in vasi.

Ampere je 1820 ugotovil, da na žico, po kateri teče električni tok, deluje magnet s silo, ki lahko opravi koristno delo. Na tem odkritju sloni delovanje električnih motorjev, ki poganjajo najrazličnejše stroje. Na istem načelu kot elektromotor sloni tudi delovanje kazalčnih instrumentov za merjenje električnega toka in napetosti. Ti instrumenti so še danes nepogrešljiv merilni pripomoček skoraj vsakega raziskovalca.

Medtem ko dajejo galvanski elementi enosmerno napetost, dajejo generatorji v elektrarnah izmenično napetost s frekvenco 50 hertzov. Frekvenca je odvisna od konstrukcije generatorja in od hitrosti vrtenja rotorja. Posebno visokih frekvenc pri tem ni mogoče doseči.

Izmenične napetosti visokih frekvenc, npr. milijon Hz, je bilo mogoče pridobiti kontrolirano šele, ko je Lee de Forest 1906 izumil elektronsko triodo, ki lahko ojači majhne električne signale. Glavno odkritje z visokofrekvenčnim oscilatorjem (ki v prvotni izvedbi še ni vseboval triode) je bilo to, da nanj priključena žica seva radijske valove, ki jih je mogoče pošiljati na velike razdalje. Za detekcijo teh valov služi podobna antena, toda če želimo izmerjene signale spet zaznati, jih moramo ojačiti.

Odkritje triode ne bi bilo mogoče brez vztrajnega raziskovanja električnega toka v evakuiranih sistemih. Za to je dal osnovo razvoj vakuumskih črpalk. To velja tudi za rentgensko cev (Röntgen 1895) in za katodno cev, ki je bistveni sestavni del osciloskopa in televizorja.

Pomembno vlogo kot raziskovalni pripomoček je imela fotografska plošča, saj je Becquerel 1896 z njo odkril radioaktivnost. Opazil je, da počrni fotografska plošča v bližini uranovih soli. Pozneje so izumili še najrazličnejše pripomočke za detekcijo vseh vrst ionizirajočega sevanja: geigerski števec, ionizacijsko celico, meglično celico, scintilacijski števec, polprevodniški števec itd.

V zgodovini človeštva spadajo med najbolj kompliciranе raziskovalne pripomočke pospeševalniki. V teh napravah pospešijo nabite delce do visokih energij in z njimi obstreljujejo jedra različnih snovi. Po jedrskih reakcijah, ki pri tem nastanejo, sklepajo na zgradbo jeder. V zadnjem času gradijo vse večje pospeševalnike. Ker stroški za njihovo gradnjo presegajo možnosti posameznih držav, so evropske države skupaj zgradile v Ženevi tri velike pospeševalnike. Največji od njih - super protonski sinhrotron - pospeši protone tako, kot bi jih pospešila napetost 400 milijard voltov. Protone prisilijo z magneti, da krožijo po 7 km dolgi evakuirani svitkasti cevi in jih pri vsakem od 150 000 obhodov pospešijo, kot bi jih pospešila napetost 2,5 milijona voltov.

Pomembni pripomočki pri modernih raziskavah so računalniki. Njihova hitrost računanja je dobro znana. Bistven korak je bil narejen z odkritjem tranzistorjev, ki so nadomestili triode.

Za zaključek lahko rečemo, da so večini eksperimentalnih odkritij botrovali v tistem času na novo odkrita eksperimentalna oprema in merilni instrumenti. Celice so lahko odkrili, ko so spoznali mikroskop. Odkritja rentgenske svetlobe ne bi bilo brez proučevanja toka v razredčenih plinih. To pa zopet ne bi bilo mogoče brez napredka v vakuumski tehniki in gradnji izvirov visokih napetosti.

 Skoraj vsa velika znanstvena odkritja so rezultat raziskav, katerih glavni

motiv je bilo spoznanje skrivnosti narave ne pa rešitev vsakdanjih problemov človeka ali družbe. Zanimivo je, da so bili rezultati teh odkritij skoraj vedno tudi praktično uporabni, nekateri prej, drugi pozneje.

S tega stališča moramo gledati na osnovne raziskave v našem času. Za nekatere, npr. za proučevanje osnovnih delcev z velikimi pospeševalniki, se danes zdi, da nimajo praktičnega pomena. Kot mi uživamo sadove dela generacij raziskovalcev pred nami, pa bodo zanamci zagotovo praktično izkoriščali marsikatero odkritje našega časa.

LITERATURA

J. Ziman, *The force of knowledge*, Cambridge, Cambridge University Press 1976

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

VELIKI RAZISKOVALNI INŠTITUTI IN MEDNARODNA RAZISKOVALNA PRIZADEVANJA

GABRIJEL KERNEL

V zadnjih nekaj desetletjih si mednarodno sodelovanje v zanosti čedalje moč neje utira pot. Razlogov za to je več; med najpomembnejše spada finančni. Do začetka tega stoletja je bilo mogoče opraviti večino zanimivih fizikalnih raziskav v manjših univerznih laboratorijih. Pozneje - zlasti po drugi svetovni vojni - se je pokazalo, da je potrebno za uspešno delo v marsikaterem primeru združiti sredstva v državne inštitute. Kmalu so pri manj bogatih državah stroški za nekatere vrste raziskav prerasli celo okvire teh inštitutov. Od tod izvirajo pobude za ustanovitev velikih mednarodnih raziskovalnih središč, preko katerih lahko tudi revnejše države prispevajo k razvoju v zahtevnih vejah znanosti. Raziskave v takih središčih slonijo večinoma na zahtevni tehniki, ki bo v široki rabi šele čez leta. Ta tehnika in vzgoja raziskovalcev sta pomembna stranska produkta velikih mednarodnih raziskovalnih načrtov.

Mednarodna raziskovalna središča danes niso več omejena na fiziko jedra in osnovnih delcev, ampak zajemajo tudi druga fizikalna področja. Raziskave v mednarodnih središčih s pospeševalniki so tesno povezane z vprašanjem o sestavu snovi. Slika o najmanjših sestavnih delcih snovi - osnovnih delcih - se iz leta v leto spreminja. Fizika osnovnih delcev je eno od najbolj plodnih področij fizike; zanjo je težko napisati učbenik, ki bi ne bil že pred izidom zastarel. V nadaljnjem poskusimo v skopih obrisih nakazati del teženj razvoja na tem področju fizike.

Začnimo pri Rutherfordovem odkritju. E. Rutherford je iz eksperimentalnih rezultatov svojih sodelavcev sklepal na sestav atomov iz jedra in lahkega ovoja elektronov. Pri sipanju delcev α na zelo tankem lističu zlata so dobili tudi nekaj sipanih delcev v smer nazaj. Iz tega se je dalo sklepati, da gre v tarči za sipalne centre, katerih masa je večja od mase delcev α. Poznejši eksperimenti so prinesli podrobne podatke o razsežnosti jeder in o porazdelitvi gostote v njih. Zelo natančne porazdelitve gostote naboja v jedrih se dobijo z merjenjem kotne porazdelitve prožnega sipanja elektronov. Tu gre za eksperimente, ki so zelo podobni poskusom z uklonom svetlobe na okrogli odprtini. Spomnimo se, da je kot, pri katerem dobimo prvi uklonski minimum, podan z enačbo [1]:

$$\sin\beta = 0{,}61\lambda/R$$

λ je valovna dolžina svetlobe in R radij odprtine. Torej bomo pri jedrih z radijem 10^{-15}m do 10^{-14}m lahko opazovali uklon le pri valovnih dolžinah, ki so manjše od približno 10^{-14}m. Uporabimo še zvezo med valovno dolžino in gibalno količino delca [1]:

$$p = h/\lambda \approx 130 \text{ MeV/c} \quad *$$

*Enota za energijo je 1MeV=10^6eV; 1eV=1,6.10^{-19}J ustreza energiji, ki jo pridobi delec z osnovnim nabojem 1,6.10^{-19}As, ko preleti v praznem prostoru napetost 1 V. Gibalno količino merimo v enotah MeV/c. Pri energijah, o

katerih govorimo, se giblje elektron skoraj s svetlobno hitrostjo, zato velja zveza $W \approx pc$ med energijo in gibalno količino.

Pri sipanju elektronov na jedrih so torej potrebne energije nad 130 MeV. Po temeljitih meritvah sipanja pri več energijah je mogoče sklepati na porazdelitev naboja v jedrih. Dočim je bilo mogoče raziskovati lastnosti atomov in molekul z energijami znatno pod 10^5eV, so za raziskavo jeder potrebne energije z velikostno stopnjo MeV in več. Pri takih energijah je mogoče atomsko jedro razbiti na sestavne dele: električno nevtralne nevtrone in pozitivne protone. Nekaj časa so mislili, da je svet sestavljen iz majhnega števila osnovnih delcev: protona, nevtrona, elektrona, nevtrina (zelo prodoren nevtralen delec z maso nič) in fotona. Vendar to ni trajalo dolgo. Drugega za drugim so odkrili nove delce, najprej med kozmičnimi delci, pozneje pa tudi v laboratorijih s pospeševalniki z energijami več sto MeV. Čim bolj so rasle energije pospeševalnikov, tem bolj se je večalo število novih delcev. Nekaj časa se je zdelo, da je stanje v fiziki osnovnih delcev brezupno. Nove raziskave niso pomagale razjasniti sestava snovi.

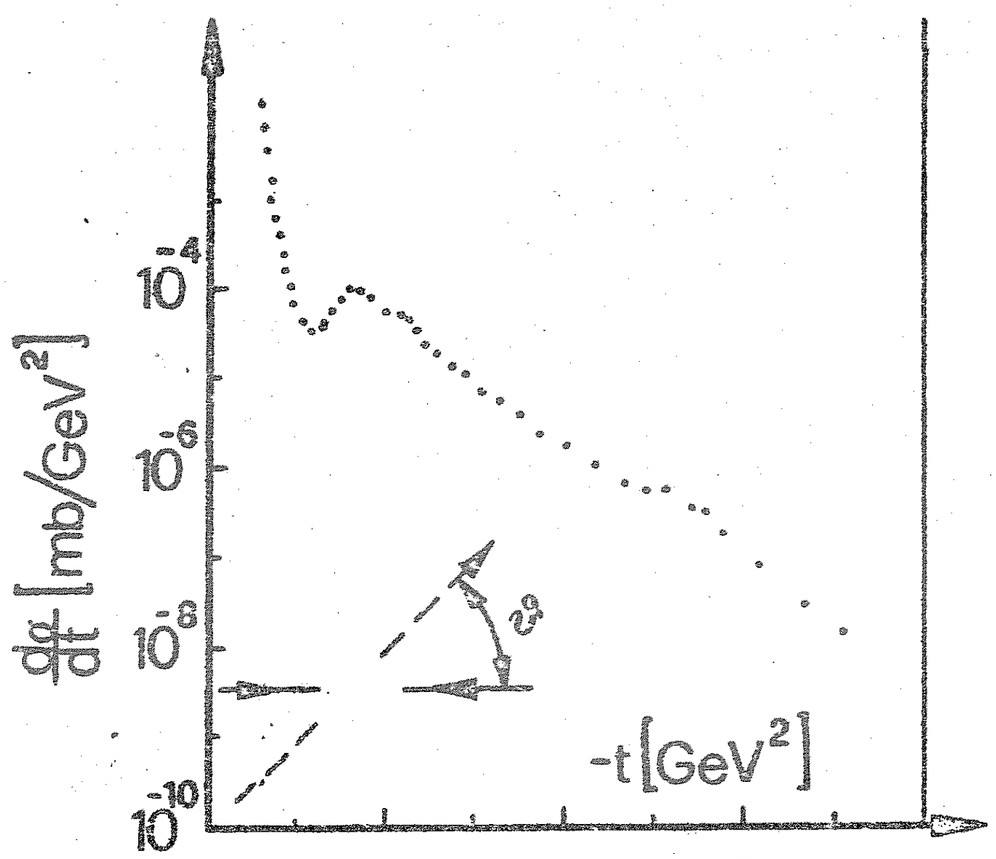
Oglejmo si zdaj podrobneje proton. Pokazalo se je, da proton ni nesestavljen. Da se ga da npr. vzbuditi podobno kot atom in atomsko jedro. Zanimivi so tudi poskusi sipanja elektronov in protonov na protonih. Slika 1 kaže uklonski minimum pri sipanju protonov na protonih[2]. Tako sliko pričakujemo pri prožnem sipanju na homogeni tarči - protonu. Spet se lahko skličemo na podobnost s sipanjem svetlobe na odprtini. Poleg tega se pojavijo produkti sipanja, ki se gibljejo v težiščnem sistemu v prečni smeri pod velikimi koti (tega s sl. 1 ni mogoče razbrati).

Lahko si jih razložimo kot posledico zrnate strukture protonov. Sestavni deli protonov naj bi se sipali drug na drugem, rezultat pa bi bili curki delcev pod velikimi koti. Spomnimo se na eksperiment Rutherfordovih sodelavcev. Tudi tam so se delci α sipali na jedrih pod velikimi koti.

Energije, ki so potrebne za take vrste raziskav, imajo velikostno stopnjo 100 GeV (1 GeV = 1000 MeV). Pri teh energijah je število različnih vrst delcev, ki jih dobimo, ko spustimo curek protonov na tarčo, že zelo veliko (nekaj sto). Pri klasifikaciji teh delcev si pomagamo s proučevanjem sil, ki delujejo med njimi. Razen *elektromagnetne sile*, ki jo poznamo iz vsakdanjega življenja in atomske fizike, opazimo še dvoje vrst sil: *močne sile* (približno 100-krat močnejše od elektromagnetnih) in *šibke sile* ($\simeq 10^9$ krat šibkejše od močnih). Na večino delcev delujejo močne sile. Te imenujemo *hadrone* (primera: proton in nevtron). Izjeme so delci, ki jih imenujemo *leptone* (nevtrini, elektroni, mioni). Na nevtrino, za katerega vse kaže, da sploh nima mase - podobno kot foton - , delujejo samo šibke sile. Njegovo sodelovanje z drugimi delci je tako šibko, da npr. z veliko verjetnostjo nemoteno preleti zemeljsko kroglo.

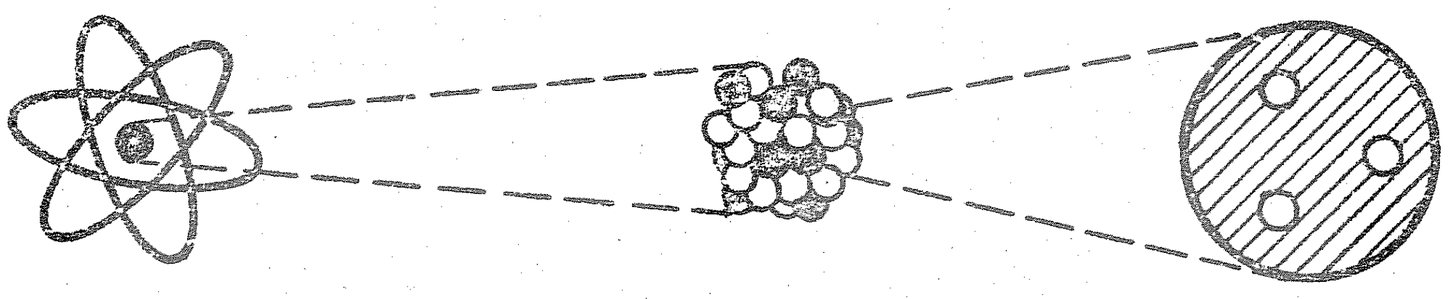
Za leptone se zdi, da so točkasti delci. Za razliko od njih so hadroni bolj zapleteni: vse kaže, da niso točkasti, ampak imajo notranjo zgradbo. Hadrone je mogoče razvrstiti v skupine glede na njihove lastnosti. Še več, dalo bi se jih sestaviti iz majhnega števila gradnikov - *kvarkov*. Tako naj bi bila npr. nukleona (proton in nevtron) sestavljena iz 3 kvarkov (Sl.2). Ta slika se dobro ujema z rezultati sipanja, o katerih smo govorili prej. Prostih kvarkov še nihče ni opazil in čisto mogoče je, da sploh ne obstajajo. Fizikalni model, ki je spet uspel napraviti red med množico osnovnih delcev, pa obeta še nekaj: spraviti pod isto streho vsaj nekatere osnovne sile, ki delujejo med delci.

Zdaj je čas, da se vrnemo k vprašanju o vlogi mednarodnih raziskovalnih središč. Dokler gre za energije do nekaj 100 MeV, si tudi manj bogate države lahko privoščijo raziskave v lastni režiji. Sredstva, ki so potrebna za gradnjo in vzdrževanje majhnih pospeševalnikov, ne presegajo okvirov sredstev za te vrste znanstveno delo. Večina majhnih držav pa si raziskav pri srednjih (od nekaj sto MeV do nekaj GeV) in visokih energijah ne more več privoščiti v lastni režiji. Tu gre pretežno za fiziko osnovnih delcev in le deloma za fiziko jedra. Evropske države so pred približno četrt stoletja spoznale, da bodo morale združiti svoja sredstva, če naj uspešno sle-



Sl. 1: Prožno sipanje protonov na protonih. Na abscisno os je nanesen kvadrat prenosa gibalne količine v težiščnem sistemu p_t^2 , pomnožen z $2(1-\cos\vartheta)$: $t = 2(1-\cos\vartheta)p_t^2$. Na ordinatno os je nanesen sipalni presek, ki je sorazmeren z verjetnostjo za sipanje.

Sl. 2: Razvoj raziskav najmanjših delcev snovi (shematsko).

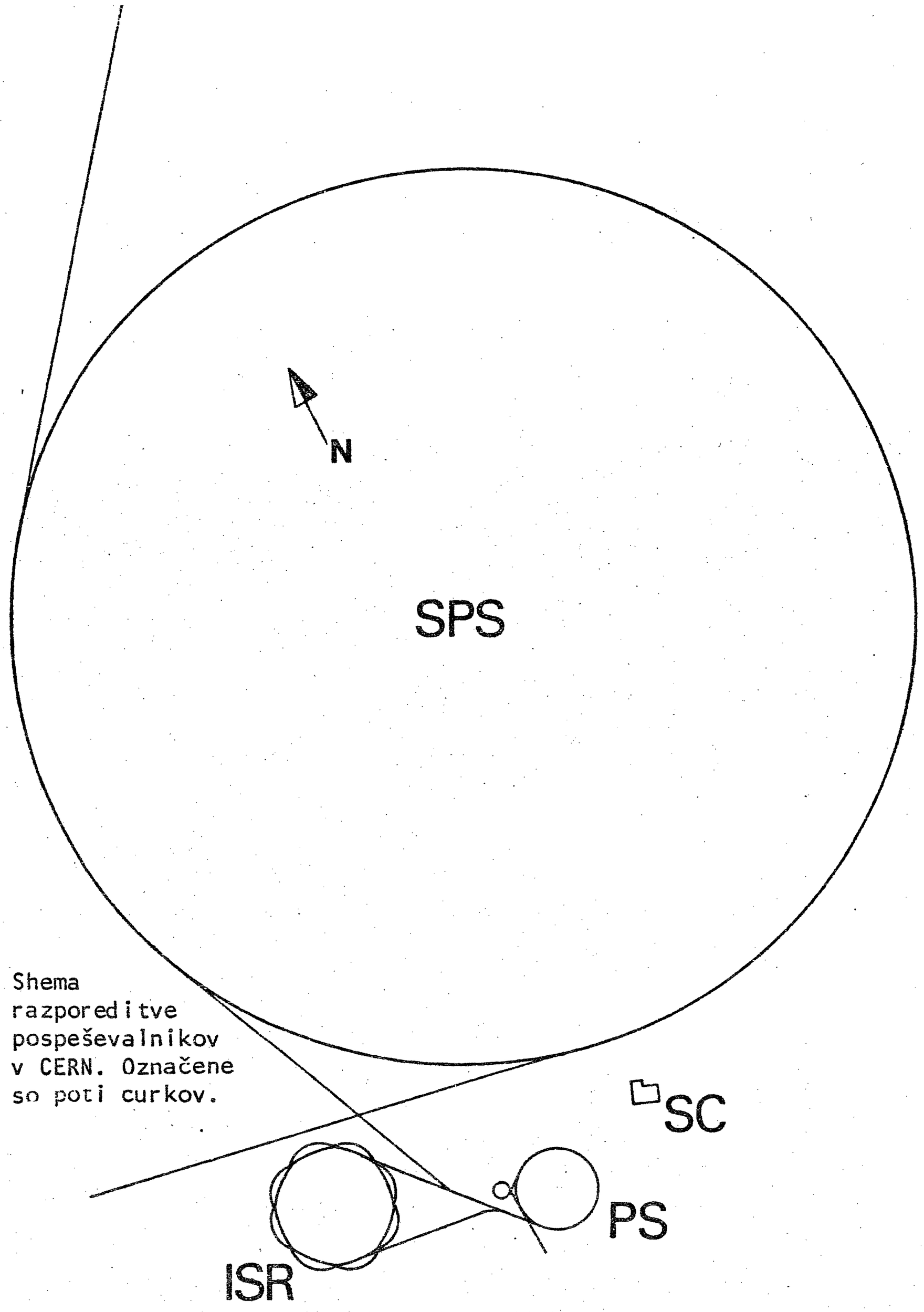


dijo napredku na tem področju znanosti. Tako sta nastali dve mednarodni raziskovalni središči s pospeševalniki: eno v Ženevi (Švica) in drugo v Dubni (ZSSR). Jugoslavija je bila med ustanovitelji CERN v Ženevi, vendar je pozneje izstopila. CERN je zaradi svoje zemljepisne lege (840 km iz Ljubljane z avtomobilom) posebno zanimiv za nas. Zato si oglejmo njegove glavne značilnosti.

Najstarejši in najmanjši pospeševalnik (zgrajen 1957) v CERN je protonski sinhrociklotron za 600 MeV, ki je bil pred kratkim predelan in daje zdaj večji tok (do 10 μA). Uporabljajo ga v največji meri za produkcijo pionov in mionov. Velik del eksperimentov ob tem stroju je povezan z raziskavami lastnosti atomskih jeder. Preostale raziskave pa segajo na področja fizike osnovnih delcev, atomske fizike, trdne snovi, kemije in biologije.

Naslednji po velikosti je protonski sinhrotron za 28 GeV (PS), ki je bil zgrajen 1957 in je bil dolgo časa središče raziskav s področja fizike visokih energij v Evropi. Raziskave so tu osredotočene na osnovne delce in deloma na fiziko jedra. V 1971 je bil protonskemu sinhrotronu priključen še nakopičevalnik (ISR-Intersecting Storage Ring). To sta dve evakuirani cevi v obliki nekoliko deformiranih obročev, ki se na 8 mestih prekrižata. Ti dve cevi napajajo s protoni iz PS. Protonski curki se potem na omenjenih osmih mestih križajo v nasprotnih smereh (glej sliko 3). Tako je mogoče pri sipanju doseči energije, ki so neprimerno večje od energij pri sipanju protonov na mirujočih protonih. V ISR protonov ne pospešujejo, ampak jih z odklonskimi magneti in podobnimi napravami zadržujejo v evakuiranih obročih (sl. 1 je rezultat enega od eksperimentov pri ISR). 1976 je bil dograjen še super protonski sinhrotron (SPS), ki je eden od dveh največjih pospeševalnikov na svetu. Zgrajen je 40 m pod zemljo v tunelu, ki ima obliko obroča z obsegom 7 km. Protoni iz PS dosežejo v njem energijo 400 GeV. Eksperimenti ob njem so povezani s fiziko osnovnih delcev.

Razumljivo je, da pospeševalnike v CERN v največji meri izkoriščajo države članice, ki tudi prispevajo za vzdrževanje (ZR Nemčija 25%, Francija 21%, Velika Britanija 16%, Italija 13% itd.). Vendar je raziskovanje odprto tudi za skupine iz držav nečlanic. Tako sodelujejo še raziskovalci iz Poljske, Španije, Turčije, Izraela. Raziskovalci iz Jugoslavije - razen posameznikov, vključenih v skupine iz tujih laboratorijev - doslej niso kazali velikega zanimanja za delo v CERN. Trenutno je sodelovanje omejeno na eno samo skupino iz Jugoslavije, ki skupaj s sodelavci iz drugih evropskih laboratorijev gradi magnetni spektrometer ob sinhrociklotronu.



Sl. 3: Shema razporeditve pospeševalnikov v CERN. Označene so poti curkov.

Na koncu še za današnje dni obvezno vprašanje: komu koristi tako raziskovalno delo. Zgodovina nas uči, da ima raziskovanje naravnih pojavov - ne glede na takojšnji učinek - skoraj zmeraj dolgoročen koristen vpliv na razvoj človeštva. Po drugi strani vemo, da določenemu delu človeštva po zadostitvi osnovnih življenjskih potreb ostane presežek denarja. Ali ni prav, da del tega presežka rabimo za človekove kulturne dejavnosti, kamor spada tudi raziskovanje naravnih pojavov?

LITERATURA

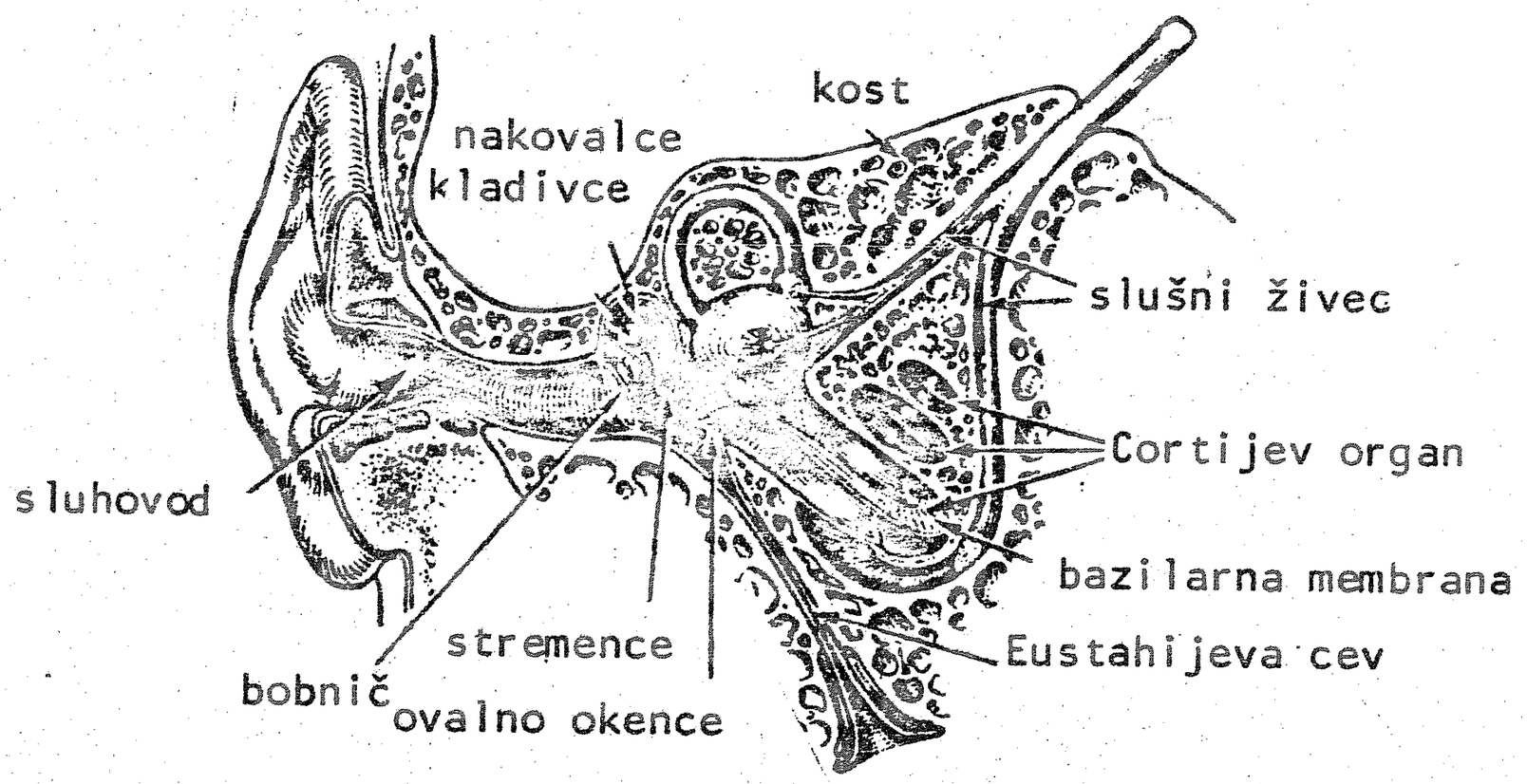
1 J. Strnad, *Uvod v fiziko*, Ljubljana, Univerza v Ljubljani 1971.
2 *CERN Annual Report* (1976).

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

ZAZNAVANJE ZVOKA

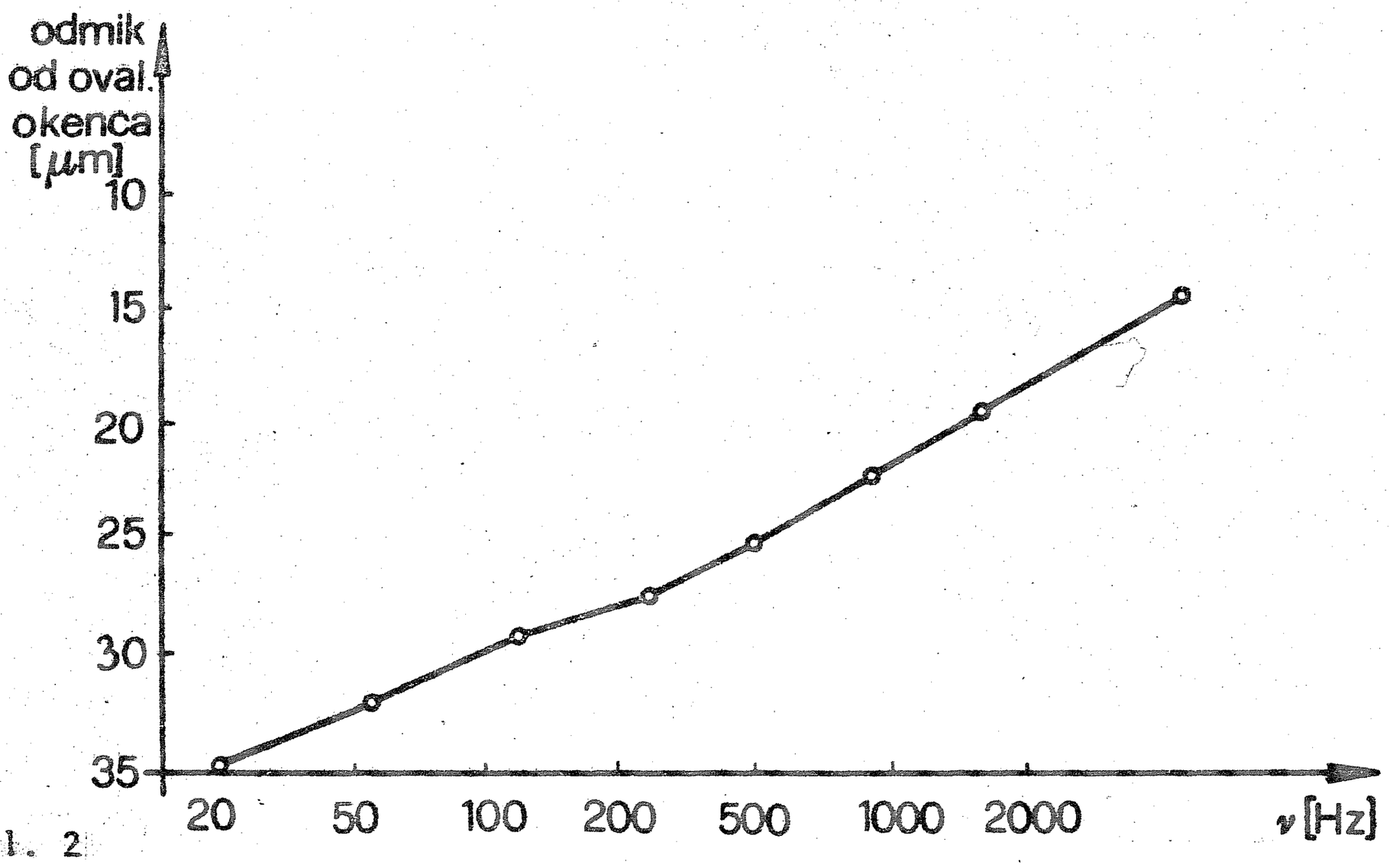
JANEZ ŽITNIK

Človeško uho je zelo zanimiv organ (Sl. 1). Bobnič zaniha, ko ga zadene zvok, z enako frekvenco, kot jo ima vpadli zvok. Nihanje se prenese preko treh slušnih koščic - kladivca, nakovalca in stremenca - v notranjost ušesa in se pri tem primerno oslabi.

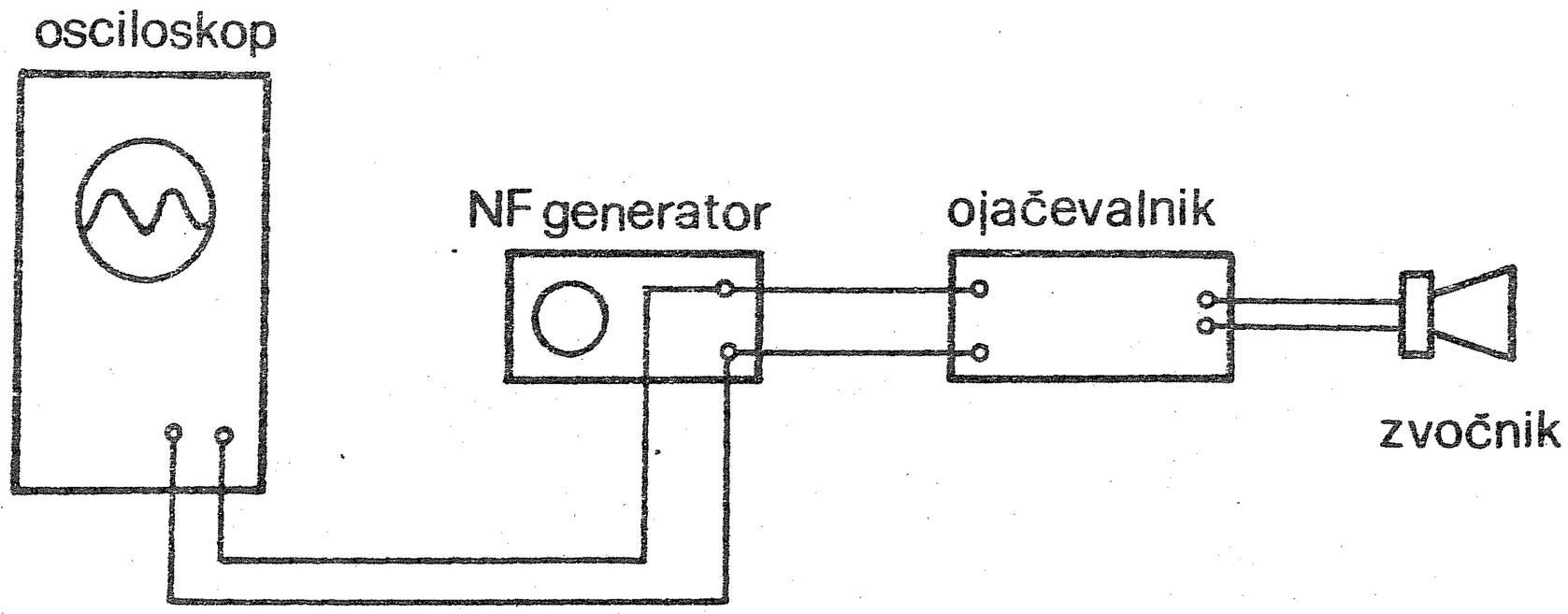


Sl. 1

Premikanje stremenca skozi ovalno okence povzroči, da zaniha tekočina v ušesnem labirintu. Če slušne koščice nihanja ne bi oslabile, bi tekočina premočno zanihala bazilarno membrano, na kateri je nameščen Cortijev organ. Odmiki bazilarne membrane so največji na kraju, ki leži za visoke tone bliže ovalnemu okencu, za nizke tone pa bolj v notranjosti ušesa (Sl. 2).



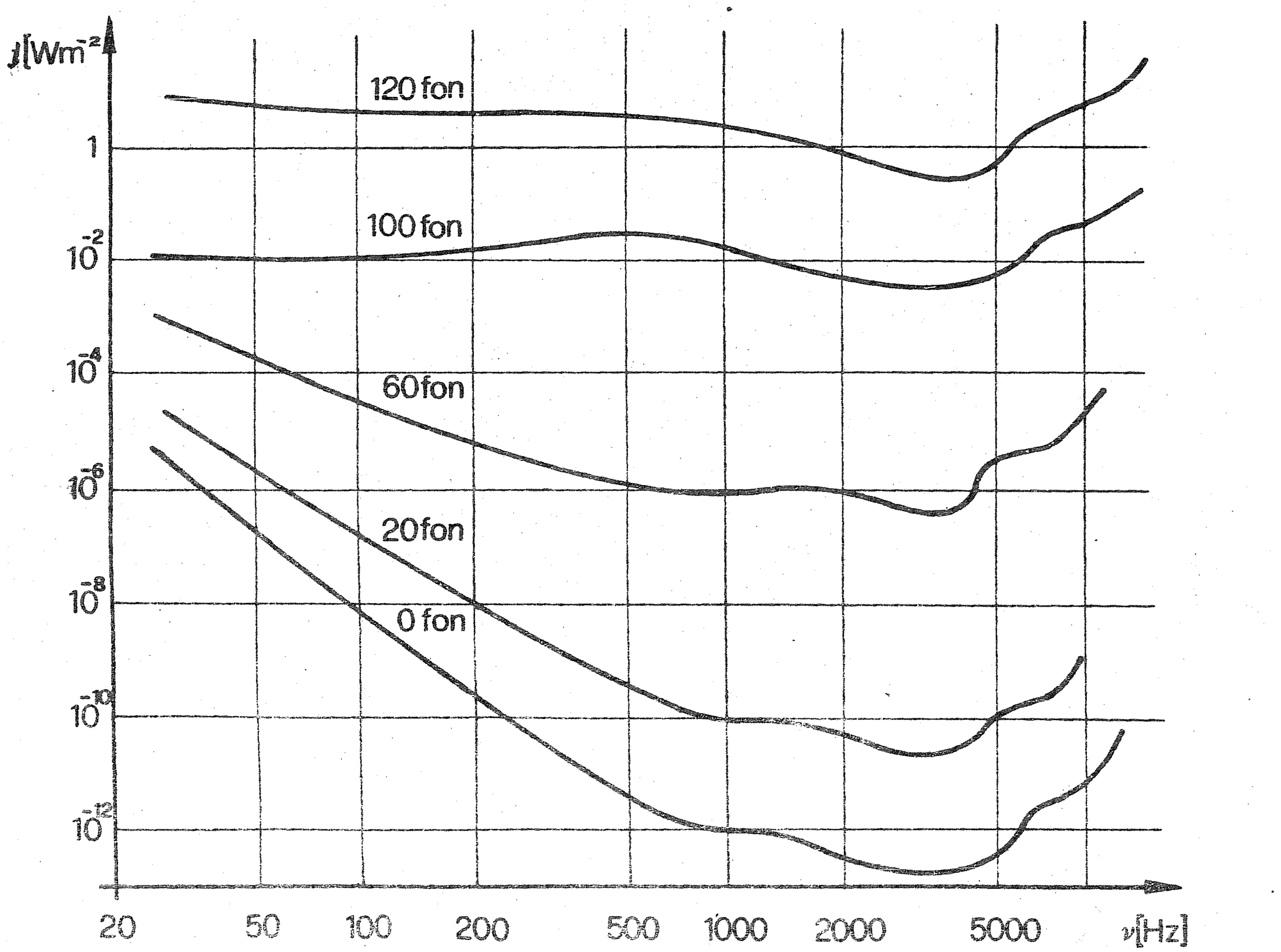
Sl. 2



Sl. 3

Nihanje bazilarne membrane same je zelo zapleteno in ga še ni uspelo natančno opisati. Po novejših teorijah, ki še niso popolnoma izdelane, celice Cortijevega organa mehanske dražljaje analizirajo in jih spremenijo v električne impulze. Slušni živec električne impulze prenese v možgane, ki te impulze prevedejo v slušni vtis ali slušno sliko o sprejetem signalu. Slušne slike so v možganih že vgrajene in jih impulzi, ki pridejo po slušnem živcu, le vzbude.

Človeško uho zaznava zvok s frekvencami na območju med približno 20 Hz in 20000Hz. S starostjo se zgornja slušna meja spušča, ker bobnič izgublja prožnost in ne more več slediti visokim frekvencam. S preprostim poskusom lahko določimo slušno območje (Sl. 3).



Sl. 4

Signal nizkofrekvenčnega generatorja ojačimo z navadnim ojačevalnikom in vodimo na zvočnik ali skupino zvočnikov, ki reproducirajo zvok na širokem frekvenčnem območju. Osciloskop služi le za kontrolo delovanja generatorja in ojačevalnika. Frekvenco signala višamo, dokler zvoka ne zaslišimo. Tedaj smo na začetku slušnega območja. Frekvenco signala nato višamo, dokler zvoka ne slišimo več. Takrat presežemo zgornjo slušno mejo.

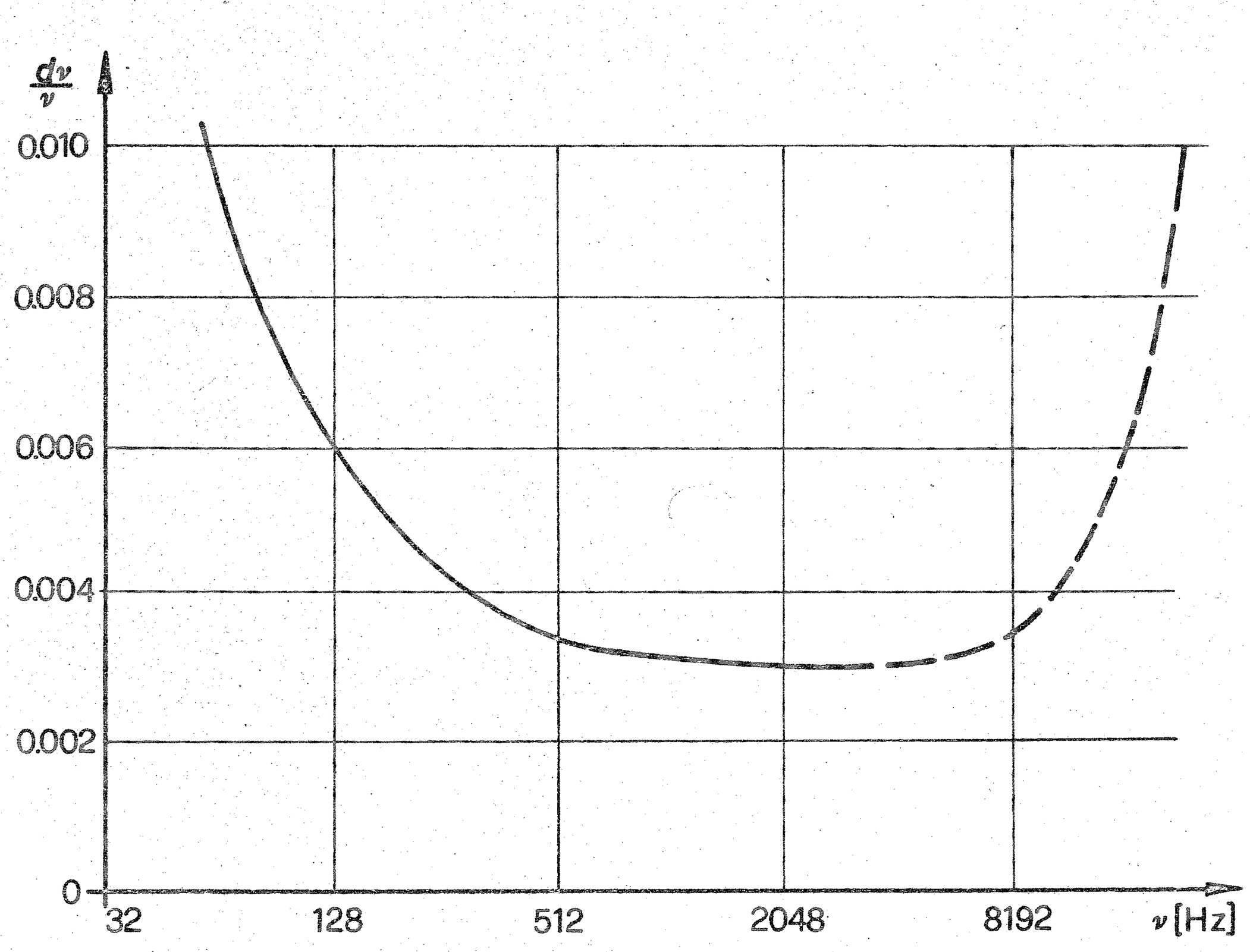
Človeško uho ni linearni sprejemnik. Zvok z dvakrat večjo gostoto energijskega toka ne povzroči dvakrat močnejšega vtisa. *Glasnost* je definirana tako, da vzbudita dva tona z enakima glasnostma v ušesu približno enak občutek. Gostota energijskega toka ali *jakost* j in glasnost sta povezani takole

$$\text{glasnost} = 10 \log(j/j_o)$$

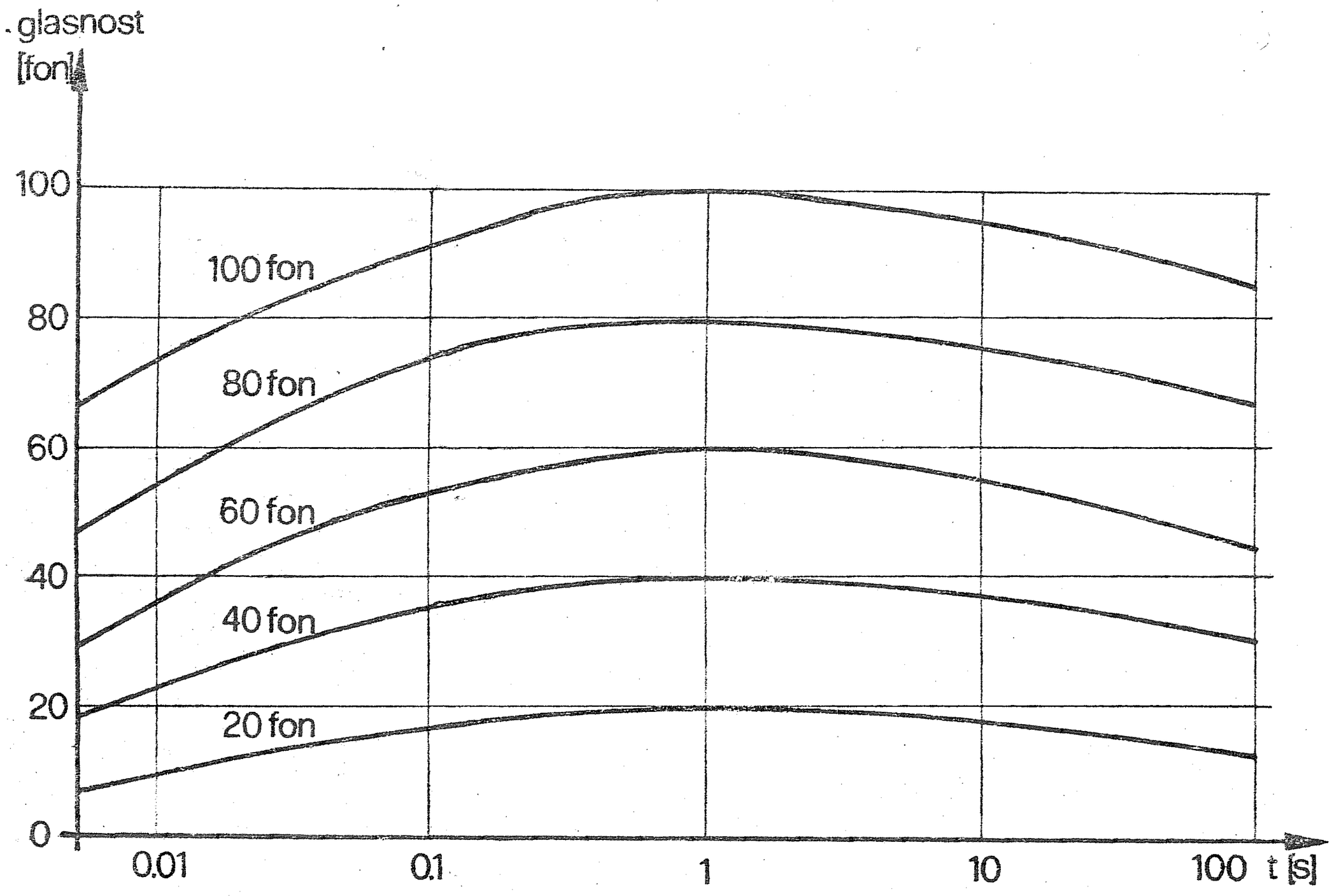
Enota za glasnost je fon. j_o je jakost zvoka, ki ga komaj še zaznamo. Pri frekvenci 1000 Hz meri 10^{-12} W/m^2 in je odvisna od frekvence. Dva tona z enako jakostjo, a različnima frekvencama, se lahko po glasnosti precej razlikujeta. Sl. 4 kaže *Fletcher-Munsonove krivulje* enake glasnosti za poslušanje z obema ušesoma. Spodnja krivulja podaja hkrati še odvisnost jakosti j_o od frekvence. Lepo se vidi, da je človeško uho najbolj občutljivo na območju med približno 1000 Hz in 4000 Hz.

Pogosto računajo glasnost pri tonih vseh frekvenc z najmanjšo jakostjo $j_o = 10^{-12}$ W/m^2. Tako definirana glasnost ni odvisna od frekvence tona in jo merijo v decibelih (dB). Včasih obeh glasnosti z enotama fon in decibel niti ne ločimo. To ni prehuda napaka, saj imamo v življenju navadno opravka s šumi in zveni, ne pa s toni.

S poskusom se lahko prepričamo o nelinearnosti ušesa. Uporabimo kar pripra-



Sl. 5



Sl. 6

ve za prejšnji poskus. Pri določeni frekvenci podvojimo amplitudo signala. Ker je gostota energijskega toka sorazmerna s kvadratom amplitude, bi morali slišati štirikrat glasnejši ton kot prej. V resnici ne slišimo niti dvakrat glasnejšega tona.

Človeško uho je senzor z dobro ločljivostjo. Tako lahko človek zazna v območju med 800 Hz in 3000 Hz relativne spremembe frekvence na 0,003 natančno. Pri zelo nizkih in zelo visokih tonih je ločljivost slabša (Sl. 5).

Grobo ocenjeno zazna človeško uho v povprečju kakih 3000 do 4000 tonov. Prav tako opravi uho frekvenčno analizo zelo hitro, v le nekaj tisočinkah sekunde.

Zanimivo je, da je glasnost odvisna od časa. Ko poslušamo stalen ton, glasnost v kratkem času najprej naraste in začne počasi padati, ker občutljivost ušesa nekoliko pade zaradi privajenosti. Na sl. 6 vidimo časovni potek glasnosti, kot jo zaznava uho za tone različnih glasnosti.

LITERATURA

|1| *Otolaringologija*, Zagreb, Medicinska Naklada 1968.

|2| J. Strnad, *Uvod v fiziko, 1. del*, Ljubljana, Državna založba 1968.

|3| F. Trendelenburg, *Einführung in die Akustik*, Berlin, Springer 1950.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

MOČ ČLOVEKA

MIRKO CVAHTE

Kakor za vsak toplotni stroj se da tudi za človeka izmeriti *moč*, s katero dela, *toplotni tok*, ki ga oddaja in *izkoristek*. V ta namen uporabljamo predvsem *sobni bicikel - ergometer*. Pri tem merimo povprečni navor M, s katerim človek vrti pedale, in frekvenco vrtenja pedalov ν. Moč je $P = M\omega = M2\pi\nu$. Izmerimo lahko *maksimalno moč*, njeno *časovno odvisnost* in *trajno moč*, to je moč, s katero človek dela več ur. Podobne meritve so mogoče tudi pri preprostejših poskusih, npr. pri vzpenjanju po stopnicah, stopanju na stol, dviganju uteži itd. Merimo čas t, v katerem dvignemo maso m za višino h. Moč je $P = mgh/t$.

Meritve z ergometrom so dale za poskusno osebo - 27-letnega moškega - maksimalno moč 850 W in trajno moč 70 W. Sl.1 kaže časovno odvisnost maksimalne moči, izmerjene z ergometrom.

Vrhunski športnik zmore maksimalno moč 1500 W (kolesarjenje, plavanje). S tolikšno močjo lahko dela le okrog 6 sekund. Za dobo 5 ur pa zmore moč približno 150 W. Delavec-težak, na primer rudar, dela ves dan z močjo nekaj manj kot 100 W.

Pri vzpenjanju po stopnicah je potrebovala poskusna oseba z maso 88 kg za višinsko razliko 12 m čas 15 s. Iz tega sledi moč 700 W.

Na 43 cm visok stol je poskusna oseba stopila v 1 minuti 52-krat. Iz tega sledi moč 330 W.

Človeka obravnavamo kot stroj, ki dobiva toploto ob gorenju hrane (sl.2). Ob koncu prejšnjega stoletja so dokazali, da velja tudi za ta primer energijski zakon: $dW_n = dA + dQ$. Pri tem se v celoti notranja energija nič ne spremeni in je $dQ_1/dt = dA/dt + dQ_2/dt$, če je dQ_1/dt dovedena toplota v časovni enoti, to je toplota, ki se sprosti v časovni enoti pri zgorevanju hrane, $dA/dt = P$ oddana moč in $dQ_2/dt = P_Q$ oddani toplotni tok. Zapišemo $dQ_1/dt = P + P_Q$. Toplota, ki se sprosti pri zgorevanju hrane, je odvisna od njene mase in od specifične sežigne toplote: $Q_1 = q_s m$.

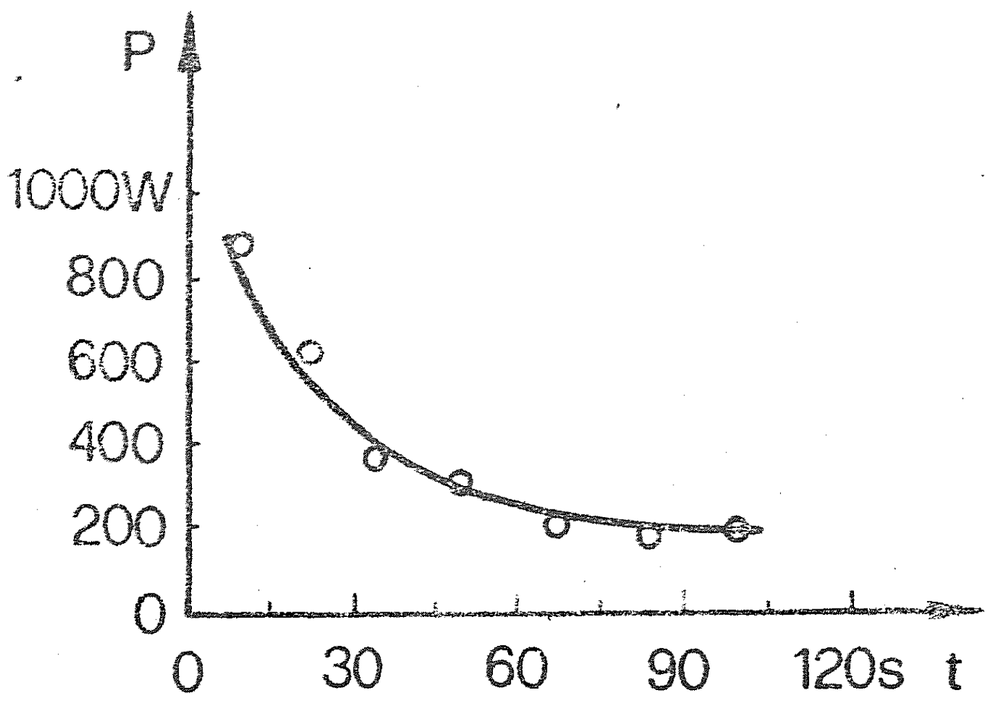
Preglednica 1. Sežigne toplote nekaterih snovi

ogljikovi hidrati	17 MJ/kg	(4000 kcal/kg)
alkohol	30	(7100)
maščobe	39	(9300)

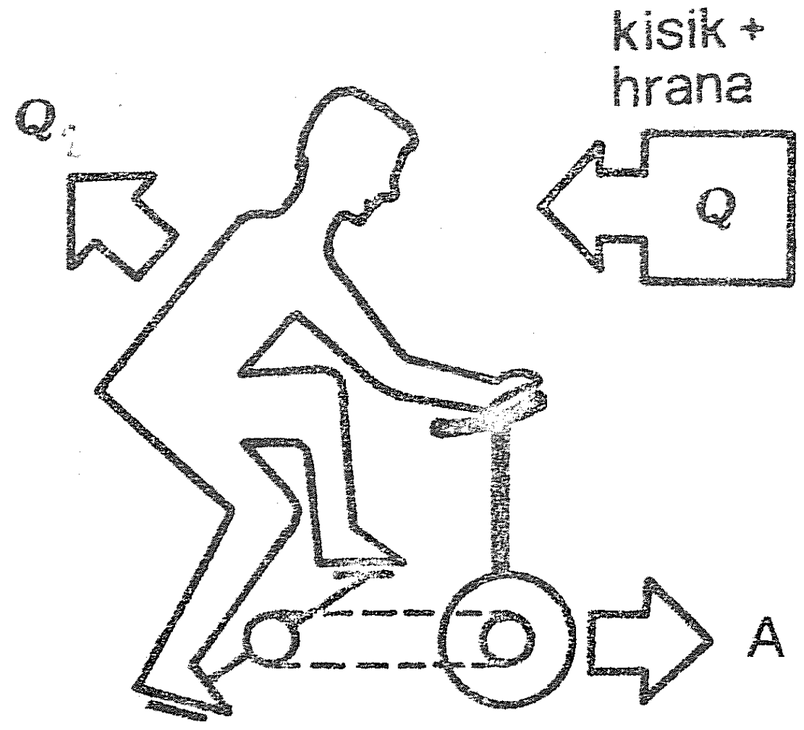
Toploto, ki se sprosti pri zgorevanju hrane, določimo tako, da izmerimo prostornino porabljenega kisika. Poskusi so pokazali, da se pri porabi 1 litra kisika pri temperaturi 20° C in tlaku 1 kp/cm² povprečno sprosti 20 kJ (4,8 kcal) toplote. To imenujemo *toplotni ekvivalent kisika*. Pri različnih vrstah hrane so opazni le majhni odmiki. S posebnimi dihalnimi aparati izmerijo prostornino porabljenega kisika (razlika med prostornino vdihanega in izdihanega kisika) in izračunajo toploto, ki se sprosti pri zgorevanju hrane.

Preglednica 2. Povprečni podatki za dovedeno toploto na časovno enoto dQ_1/dt pri nekaterih dejavnostih

spanje	80 W (70 kcal/h)



Sl.1. Časovna odvisnost maksimalne moči. Merjeno z ergometrom (moški, 27 let, 88 kg).



Sl.2. Človek dobiva toploto pri zgorevanju hrane, opravlja delo in oddaja toploto.

lahko delo (počasna hoja s hitrostjo 3,5 km/h, poučevanje, domača dela)	230 W	(200 kcal/h)
srednje težko delo (kolesarjenje s hitrostjo 16 km/h, lopatanje peska, počasno plavanje)	580	(500)
težko delo (igranje košarke, hitro plavanje)	700	(600)
skrajno težko delo (kolesarjenje s hitrostjo 45 km/h)	1600	(1400)

Razmerje med opravljenim delom in dovedeno toploto je izkoristek:

$$\eta = dA/dQ_1 = P/(dQ_1/dt) \ .$$

Preglednica 3. Izkoristek pri nekaterih delih

	P	dQ_1/dt	η
kolesarjenje	110 W	580 W	0,19
potiskanje avtomobila	100 W	580 W	0,17
lopatanje peska	17 W	580 W	0,03

Navedimo nekaj zgledov. Človek ob lahkem delu zaužije približno za 10 MJ (2500 kcal) hrane dnevno, delavec-težak pa tudi do 21 MJ (5000 kcal). Delavec-težak lahko dela 10 ur dnevno z močjo 100 W, torej opravi 1 kWh = = 3,6 MJ dela.

Človek ob lahkem delu zaužije dnevno približno za 10 MJ = 2,8 kWh hrane, kar je približno toliko,kot odda toplote trikilovatna električna peč v eni uri.

Med spanjem rabi človek približno 80 J toplote na sekundo (dQ_1/dt = 80 W, preglednica 2). Vse to oddaja kot toploto. Torej oddaja približno tolikšen toplotni tok kot žarnica.

Računi nam povedo še nekaj zanimivih stvari. Če pojemo 100-gramsko mlečno čokolado (q_s = 5200 kcal/kg) in se ne želimo nič zrediti, moramo pešačiti približno 2,5 ure ali približno eno uro kolesariti s hitrostjo 16 km/h (glej preglednico 2). Če pa se hočemo znebiti 1 kg odvečne tolšče, moramo prepešačiti po ravnem približno 160 km ali prekolesariti okrog 300 km (glej preglednici 1 in 2).

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

OKO IN BARVE

JELKA LEKIĆ

V *Slovenskem pravopisu* najdemo ob besedi barve množico pridevnikov: žive, nasičene, zamolkle, kričeče, mirne, vsiljive, tople, mrzle, osnovne, vodne, varovalne, mavrične itd.... Že ti pridevniki povedo, da bi lahko o barvah na široko govorili. Toda omejimo se samo na naslednje stvari: kaj so barve teles, kako jih zaznavamo, kaj je barvna slepota in kaj migotanje.

Telesa odbijajo, absorbirajo ali prepuščajo eno ali več barv, ki sestavljajo belo svetlobo. Če telo vso svetlobo absorbira, je *črno*. Telo, ki vso svetlobo odbije, je *belo*. Če telo vse barve enako nepopolno odbije, je *sivo*. Rdeč papir dobro odbija rdečo svetlobo, medtem ko zeleno večidel absorbira. Za to, da barve dobro razločimo, potrebujemo belo svetlobo, v kateri so zastopane vse sestavine vidne svetlobe. V svetlobi, ki ni bela, ali v enobarvni svetlobi predmetov ne vidimo v običajni barvi. Spomnimo se, da si želimo pri nakupu blaga ali obleke ogledati barvo pri dnevni svetlobi. Barvni papirji spremenijo barvo, če jih osvetlimo z rdečo ali modro lučjo. Rdeč ostane rdeč, toda zelen je v rdeči luči videti črn ... itd.

Barva je torej subjektiven občutek in ni neločljivo povezana s predmetom. Kakšno barvo zaznamo, je odvisno od porazdelitve energijskega toka, ki vstopa v oko, po valovnih dolžinah, se pravi od spektra in od odziva sistema oko - možgani na ta energijski tok. Dana porazdelitev energijskega toka po valovnih dolžinah deluje kot fizični dražljaj, ki vzbudi mrežnico. Naslednji korak je odziv mrežnice na ta dražljaj. Celotni barvni vtis je posledica sestavljanja barvnih vtisov na mrežnici. S tremi osnovnimi barvami: rdečo, zeleno in modro lahko pričaramo katerikoli barvni vtis.

Mogoče je, da je odziv mrežnice pri različnih opazovalcih različen. Na srečo se večina opazovalcev odzove na določen dražljaj podobno. Večina ljudi (92%) zaznava barve na enak način. Preostalih 8% ljudi je *barvno slepih*. Ti dojemajo barve drugače kot večina ljudi.

Normalno oko vsebuje dve vrsti sprejemnikov, ki so občutljivi na svetlobo: *paličice* in *čepke*. Ti so povezani preko posebnih celic z vidnim živcem. Paličice so izredno občutljive in se odzivajo že na zelo majhno gostoto energijskega toka, toda barv z njimi ne razločimo. Služijo za gledanje v mraku. Čepki občutijo šele močnejšo gostoto svetlobnega toka in z njimi zaznavamo tudi barve. V čepkih in paličicah so odkrili posebno snov, ki omogoča elektrofiziološki proces vzdraženja in tako spreminja elektromagnetno valovanje v subjektivne občutke barv. V paličicah je ta snov rodopsin, ki se pod vplivom svetlobe razkraja in v temi regenerira. Manj je znano, kaj se fotokemijsko dogaja v čepkih. Ker pa lahko zaznamo vse barvne vtise samo z mešanjem rdeče, zelene in modre barve, privzamemo, da imamo tri vrste čepkov: prve, ki so najbolj občutljivi za dolgovalovno svetlobo (rdeči čepki), druge, ki so najbolj občutljivi za srednje valovne dolžine (zeleni čepki), in tretje, ki so najbolj občutljivi za kratke valovne dolžine (modri čepki). Barvni vtis je odvisen od tega, kako močno vzdraži svetlobne čepke prve, druge ali tretje vrste.

Tri vrste barvne slepote govorijo za teorijo, da vsebuje oko tri različne fotoreceptorje. Medtem ko zaznavajo osebe z normalnim barvnim vidom (*trikromati*) vse tri osnovne barve, si *dikromati* pri dojemanju barv pomagajo samo z dvema vrstama čepkov. Izraz "barvno slep" je nenatančen, ker sloni

na domnevi, da barvni slepec barv sploh ne dojema, kar pa velja le izjemoma. Barvna slepota je nekaj podobnega kot pomanjkanje muzikaličnega posluha pri zaznavanju zvoka. Po nekaterih statistikah je približno 8% ljudi barvno slepih, med njimi so skoraj sami moški.

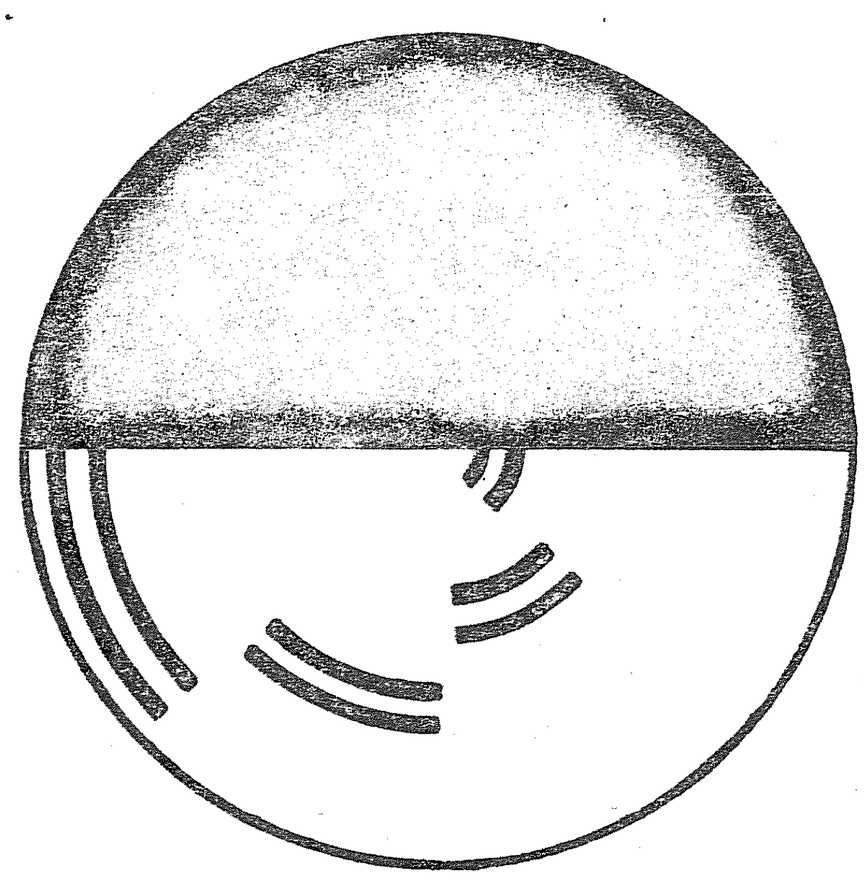
Od treh vrst barvno slepih *protanop* ne more zaznavati svetlobe na območju rdeče barve tako, kakor jo dojemajo drugi. Če mu pokažemo rdečo barvo, ne samo da je ne vidi rdeče, temveč jo zamenja s sivo ali celo s črno. Torej je pri protanopu relativna svetlost premaknjena od dolgovalovnih proti kratkovalovnim sestavinam (vidi samo sivo, zelenkasto, vijolično). *Deuteranop* vidi predvsem sredino barvnega spektra, zato ne more razlikovati med rdečo in zeleno. Zamenjuje rdeče z zelenim ter vidi določen spektralni pas v sivi barvi tj. vidi sivo namesto rdeče in namesto zelene. *Tritanop* ne vidi modrih in vijoličnih barv.

Barvno slepoto je prvi opisal angleški kemik J.Dalton*, ki je bil sam slep za rdeče, in običajno vse tri vrste barvne slepote imenujemo po njem *daltonizem*. Barvno slepoto preizkušamo s Stillingovimi in Ishiharovimi tabelami.

Zanimivo je, da se barvno slepi svoje lastnosti navadno ne zavedajo. Po izkušnji in na podlagi dokaj stalne svetlosti ter barvnega odtenka znajo vsakokratno barvo pravilno imenovati. Zato tudi drugi njihovih težav ne opazijo. Pač pa človek, ki mu ugotovijo barvno slepoto, začne presenečen pripovedovati, da šele sedaj razume, zakaj se je po nabiranju češenj slabo počutil. Redno je namreč naletel na bolj zelene, to je nezrele češnje.

Pozneje se je sicer po izkušnji polagoma navadil bolje razlikovati zrele češnje, a je pojedel nič koliko gnilih. Samo prave, dobre češnje je težko zadel.

Do sedaj smo govorili le o odzivu mrežnice na eno samo barvo. V splošnem vidimo barve v zelo različnih okoliščinah. Oglejmo si samo en zgled: če oko v presledkih dražimo, npr. z vrtenjem takele črnobele plošče, vidimo barvne kroge. Domnevajo, da je razlog za ta pojav različen odzivni čas treh vrst čepkov. Dolgovalovni (rdeči) čepki se odzivajo najhitreje, kratkovalovni počasneje. Ko sprožimo brezbarven dražljaj, je prvotni vtis rdeč, potem se mu pridruži zelen, dokler se ne odzivajo vsi trije hkrati in se vtis zlije v belo barvo.



Sl. 1

LITERATURA

[1] S.J.Edwards, *Physics Education 10*, 1975, 316.

[2] R.P.Feynman, *Lectures on Physics I*, 1970.

[3] A.Trstenjak, *Oris sodobne psihologije*, 1971.

[4] C.G.Mueller, M.Rudolph, *Svetloba in vid*, 1970

*Pripovedujejo anekdoto, da je Dalton - bil je kveker - nekoč prišel k mololilni uri v živordečih nogavicah, ki mu jih je šaljivec zamenjal z njegovimi sivimi.

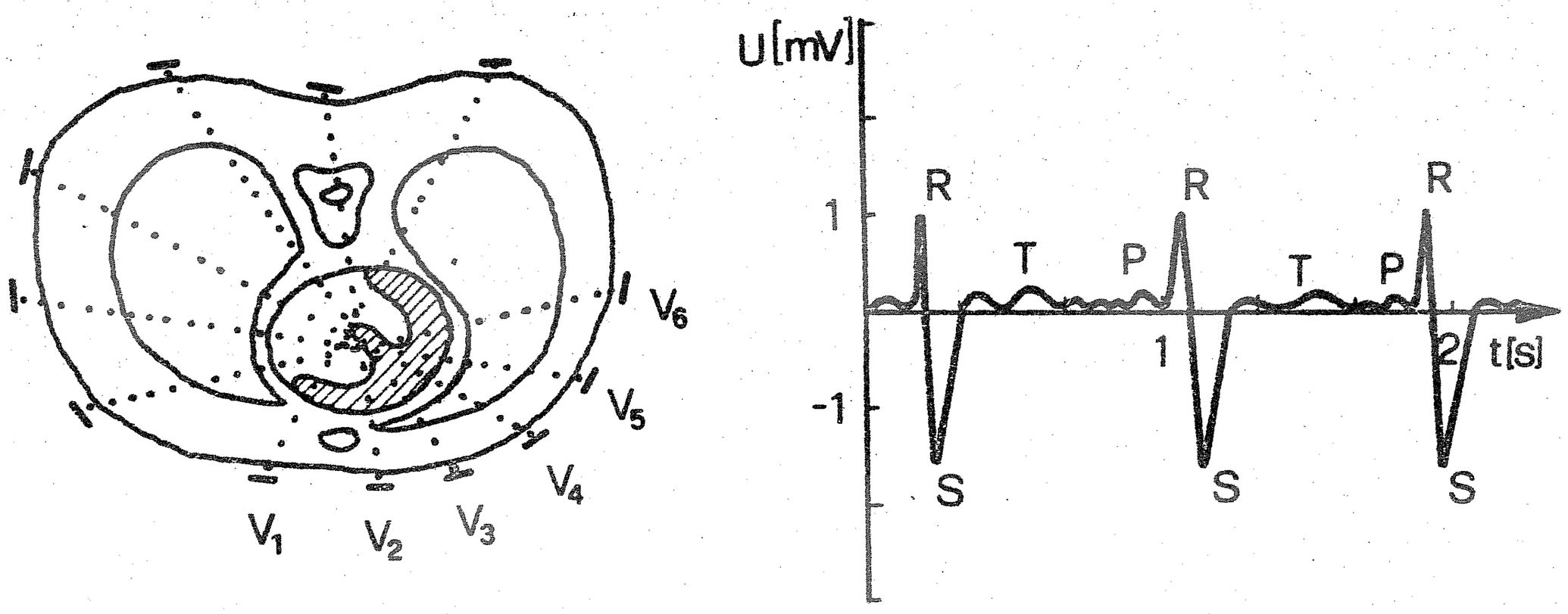
Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

EKG

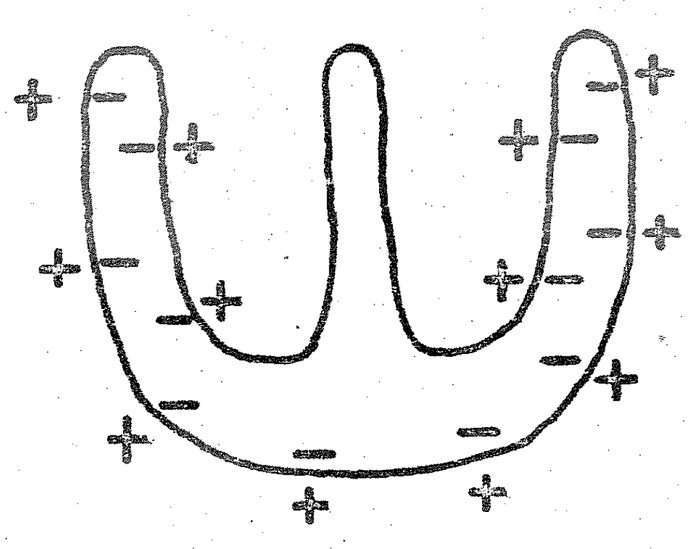
ZLATKO BRADAČ

Po napetosti med točkama človeškega telesa, med katerima je srce, lahko ugotovimo nekatere bolezni srca in orientacijo srčne mišice. Časovni potek te napetosti, ki ga imenujemo *elektrokardiogram* ali kratko EKG (sl.1), je dobrodošel pripomoček pri preiskavah srca. Poglejmo, kako dobimo EKG in ga pojasnimo.

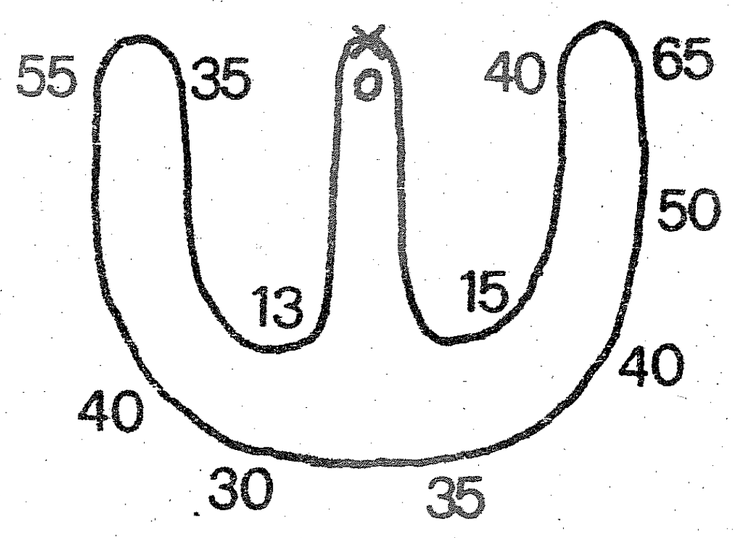
Steno mišičnega vlakna si predstavljamo kot nabit ploščati kondenzator. Zunanja stena je pozitivna (Na^+, K^+) glede na notranjo. Ko se mišica skrči, se napetost skokovito obrne. Sprememba napetosti pri krčenju srčne mišice meri približno 140 mV in traja okoli 0,4 s.



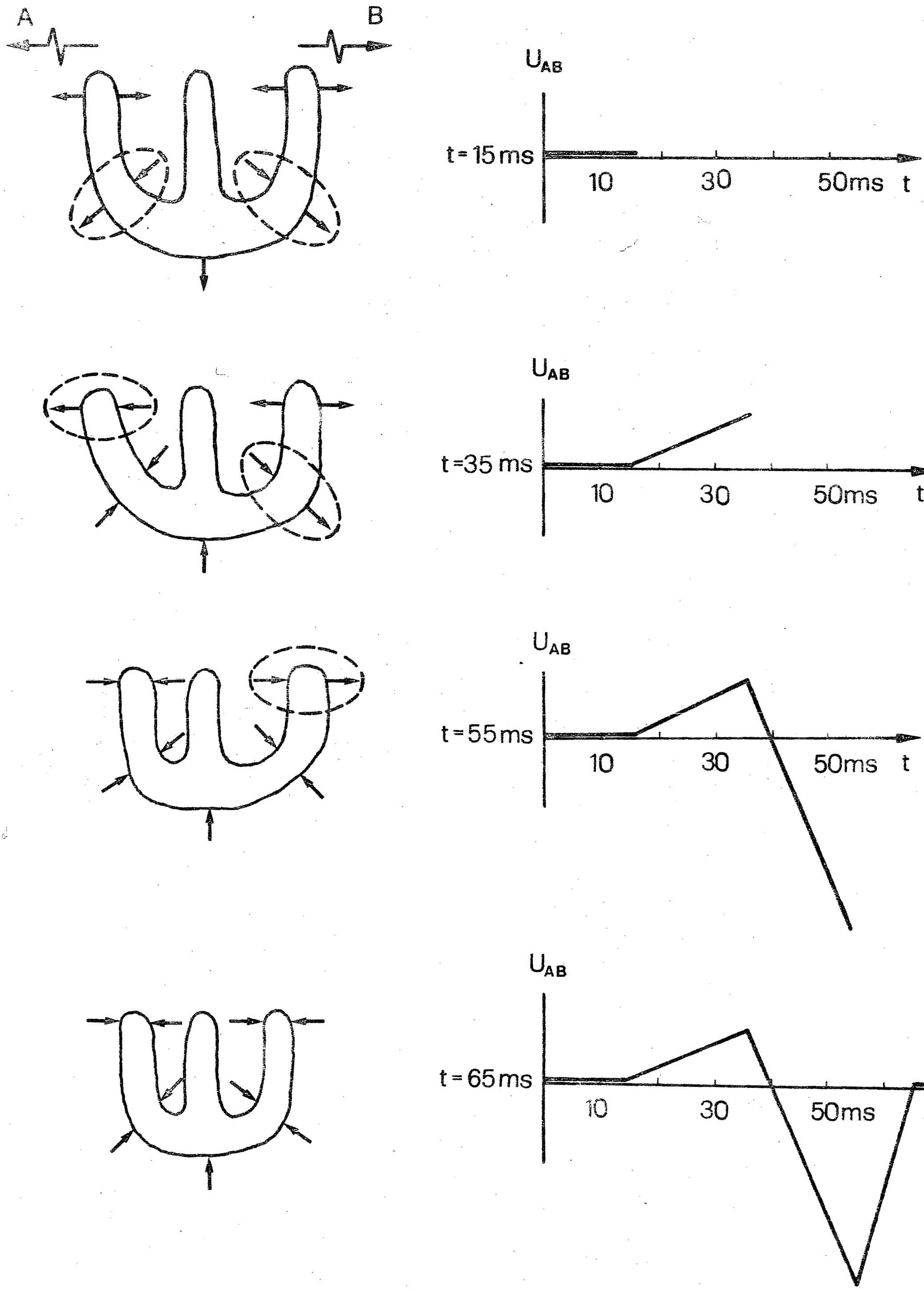
Sl. 1 Prerez prsnega koša (označene so točke, kamor postavimo elektrode pri merjenju EKG, levo) in časovna odvisnost napetosti V_1 (desno).



Sl.2. Porazdelitev nabojev po srčni mišici (prekatu) v mirnem stanju.



Sl.3. Čas v milisekundah, ki poteče od prihoda sunka v točko *AV* do skrčitve dela srčne mišice.



Sl.4. Časovno zaporedje stanj srčnega prekata kvalitativno kaže, kako nastaneta zobca R in S med krčenjem srčne mišice. Obkroženi so dipoli, ki prispevajo k napetosti U_{AB}.

Zanima nas električna dejavnost srca. Srčno mišico (prekata) ponazorimo z majhnimi dipoli. V mirnem stanju kažejo dipoli iz notranjosti mišice, v vzbujenem, skrčenem stanju pa v notranjost. Recimo, da merimo napetost med prsmi (točka A) in hrbtom (točka B) in je srce med tema točkama (sl.2). Ugotovimo, da je napetost U_{AB} med točkama A in B mnogo manjša od 1 mV, ker stojijo dipoli v mirnem stanju paroma nasproti. Tudi v vzbujenem stanju je enako, ker so takrat vsi dipoli obrnjeni. Vsa srčna mišica pa se ne krči sočasno (sl.3). Med krčenjem vsi dipoli ne stojijo paroma nasproti in med točkama A in B zaznamo napetost nekaj mV (zobci QRS). Na posnetku zaznamo še zobec P, ki izvira od krčenja preddvora. Zobec P je veliko manjši od zobcev QRS, ker je preddvorna mišica šibkejša od prekatne.

Sl.4 kaže časovno zaporedje stanj srčnega prekata pri prehodu iz mirnega v skrčeno stanje. Na sliki vidimo, kako nastanejo sunki, ki jih zaznamo na pisalniku. Znatne prispevke k napetosti U_{AB} dajo le tisti dipoli, ki si paroma ne stojijo nasproti. Prehod je po 0,01 s končan. Nato se vsi dipoli vrnejo v prvotno stanje. Ta prehod iz skrčenega v mirno stanje je počasen in približno sočasen, pa meri zato napetost U_{AB} (zobec T) le del mV. Sledi mirovanje, ki traja približno 0,6 s. Ciklus se nato ponovi.

Nenavadna oblika sunkov največkrat opozarja, da pri prehodu ne sodelujejo vsi dipoli ali pa se dipoli obračajo v drugačnem časovnem zaporedju. V prvem primeru je določen del srca električno nedejaven in je tisti del mišice mrtev (infarkt). V drugem primeru se del srčne mišice vzbuja indirektno, preko pomožnih vzbujevalnih centrov, ker je zveza glavni vzbujevalni center - mišica prekinjena (srčni blok).

LITERATURA

[1] D.Dubin, *Brza interpretacija EKG*, Beograd, Sportska knjiga 1977.

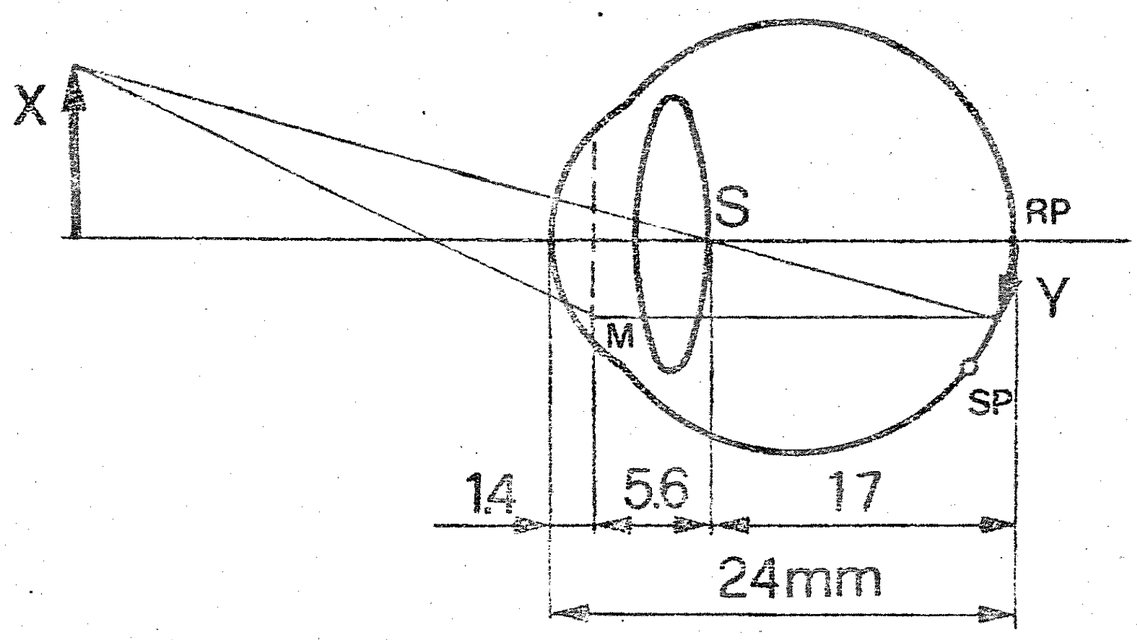
[2] S.Wright, *Applied Physiology*, Oxford, Oxford University Press 1973.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

O K O

FEDOR TOMAŽIČ

Osvetljene predmete vidimo, ker odbijejo v oko del vpadle svetlobe. Preko roženice, prékatne vodice, očesne leče in steklovine potuje ta svetloba do mrežnice, vzburi svetlobne sprejemnike, čepke in paličice. Na tej poti se svetloba večkrat lomi, najmočneje na meji zrak - roženica in na površini leče. Lomni kvocient roženice, prekatne vodice in steklovine je 1,33, lomni kvocient leče pa 1,42. Razmere v očesu poenostavimo z modelom očesa. Vzamemo, da se svetloba lomi le enkrat v krogelni ploskvi z radijem 5,7 mm, ki loči dve snovi z lomnim kvocientom 1 in 1,336. Ta ploskev je v prekatni vodici na razdalji 1,35 mm za roženico. Optično središče očesa je v modelu oddaljeno 7 mm od prednje meje roženice(Sl. 1).



S - optično središče očesa

M - glavna ravnina

RP - rumena pega

SP - slepa pega

Sl.1. Model očesa

Premer normalnega očesa je 24 mm, torej meri njegova goriščna razdalja 17 mm. V modelu ima oko 1/0,017 m = 57 dioptrij.

Izračunajmo velikost slike, ki nastane na mrežnici, če gledamo 1 m visok predmet v razdalji 10 m od mrežnice. S podobnimi trikotniki dobimo

$$1000 \text{ mm}/Y = 10\,000 \text{ mm}/17 \text{ mm}$$

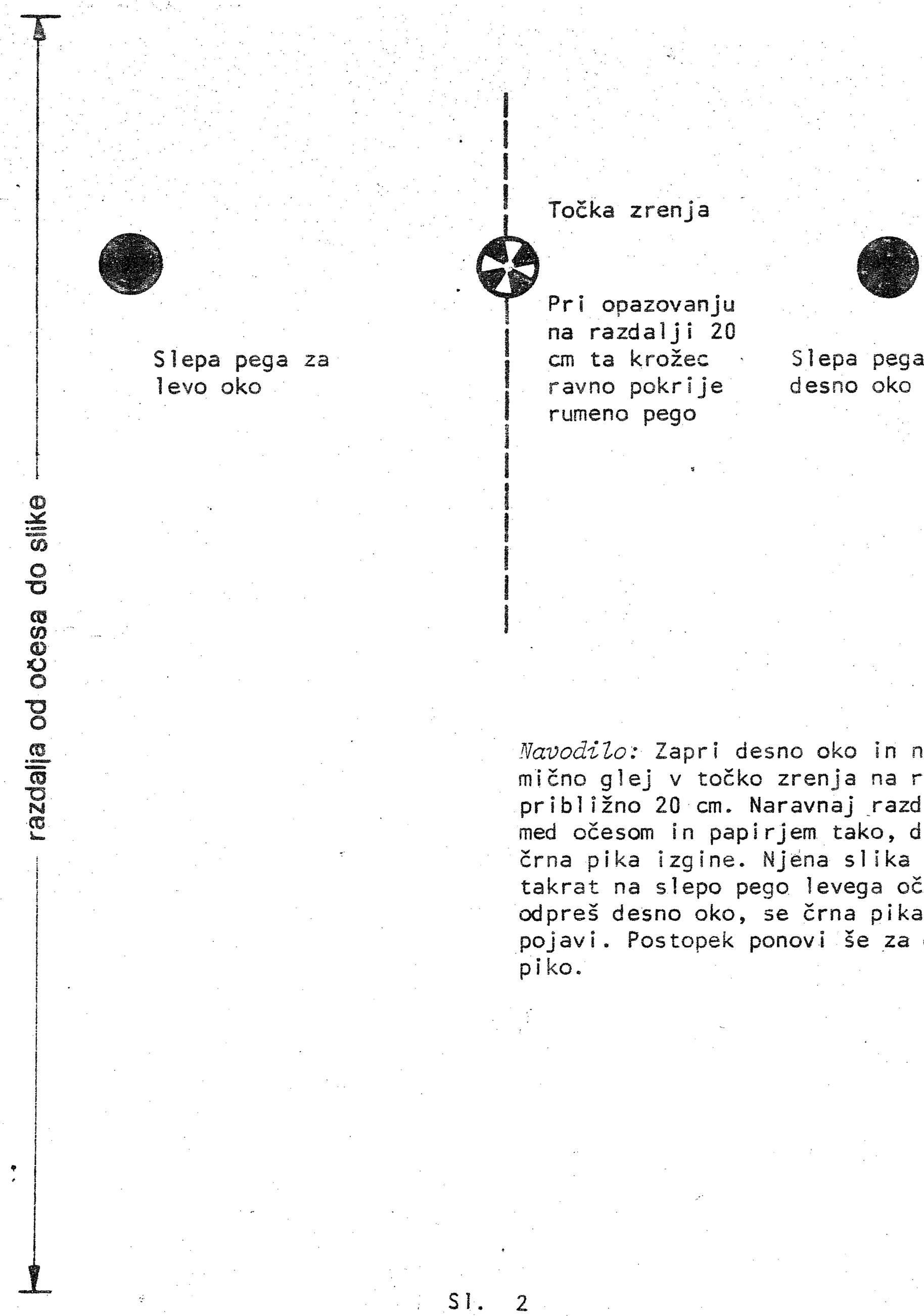
in $Y = 1{,}7$ mm. Slika je najbolj ostra, če pade na mrežnico v področju, ki ga imenujemo rumena pega. Mesto, kjer izstopa vidni živec iz očesa, je za svetlobo neobčutljivo in ga imenujemo slepa pega. Poskusimo ugotoviti razdaljo med rumeno in slepo pego (sl.2).

Vidimo, da je razdalja črnega kroga od točke zrenja 6 cm. Črni krog izgine, kar pomeni, da se preslika na slepo pego, če držimo papir na razdalji okoli 24 cm od očesa. Spet računamo s podobnimi trikotniki:

$$60 \text{ mm}/240 \text{ mm} = \ell/17 \text{ mm}$$

in $\ell = 4$ mm.

Ločljivost očesa je 1', kar pomeni, da oko razloči dve točki, če ju vidi pod tolikšnim zornim kotom. Preprost račun pokaže, da razločimo točki v razmiku 1 cm iz razdalje 35 m. Sliki teh točk na mrežnici sta oddaljeni le 4,5 µm. Ker je premer čepka na rumeni pegi malo manj kot 3 µm, mora biti med dvema čepkoma en nevzburjen, da lahko razločimo dva različna svetlobna

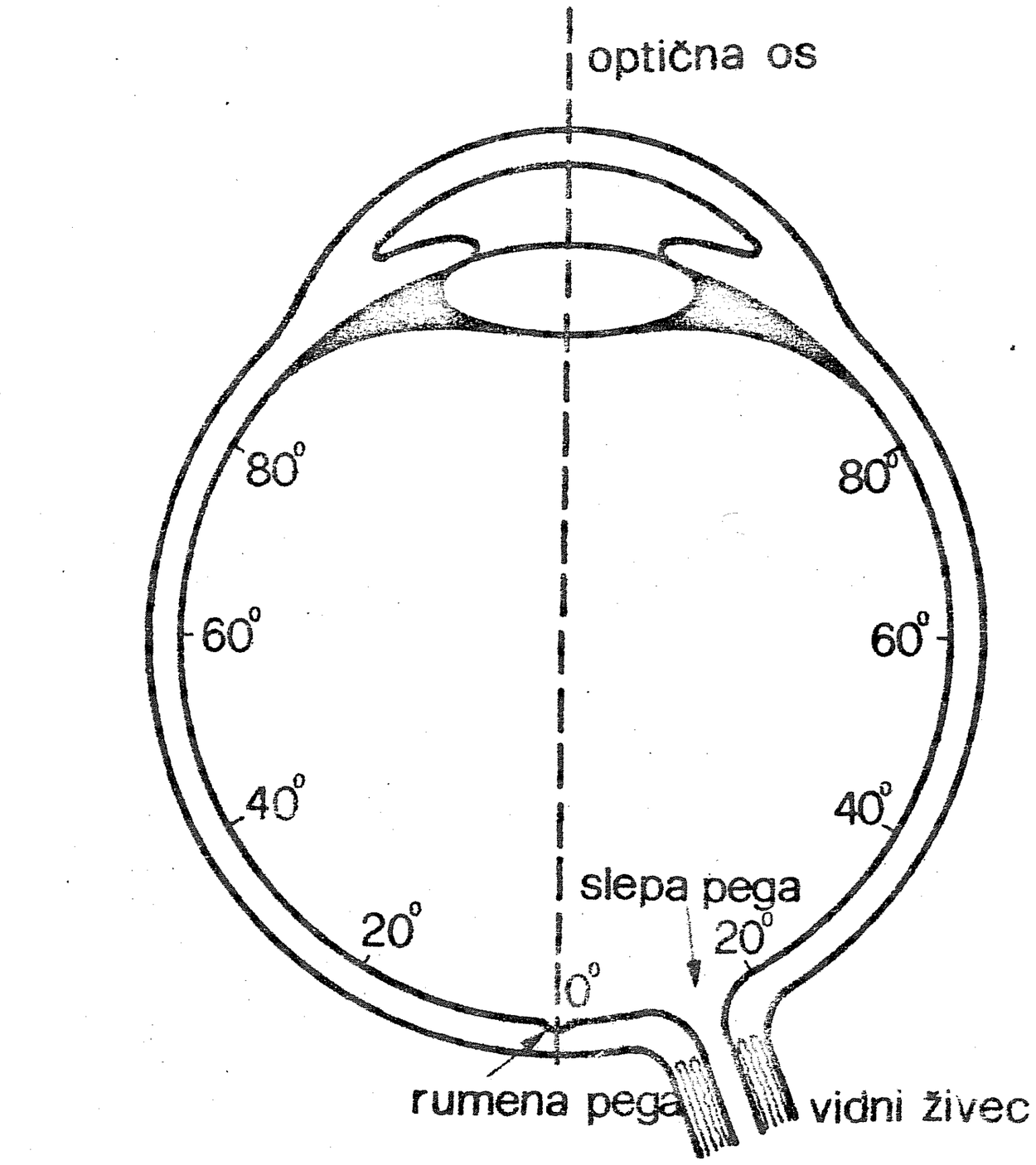


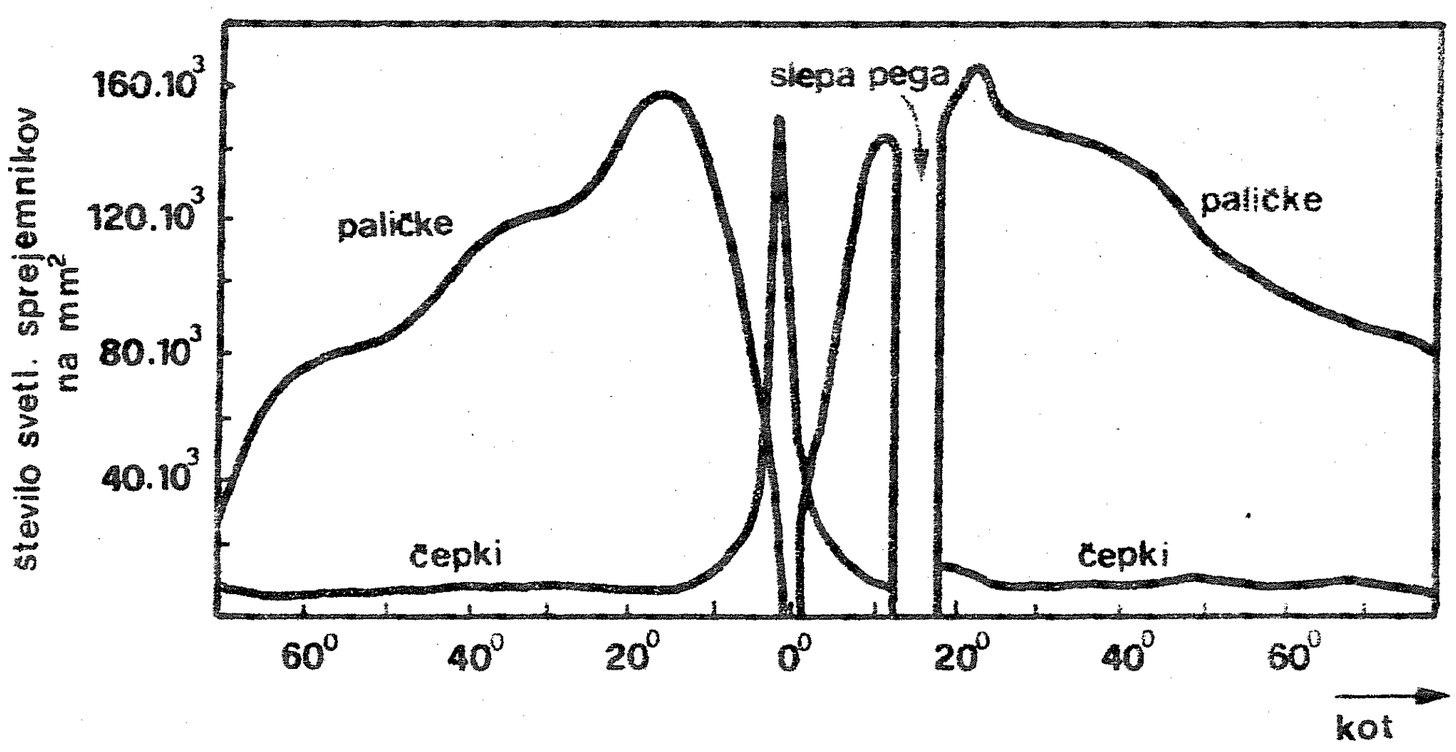
Navodilo: Zapri desno oko in nepremično glej v točko zrenja na razdalji približno 20 cm. Naravnaj razdaljo med očesom in papirjem tako, da leva črna pika izgine. Njena slika pade takrat na slepo pego levega očesa. Če odpreš desno oko, se črna pika spet pojavi. Postopek ponovi še za desno piko.

Sl. 2

signala. Tako dobro ločljivost dosežemo le na rumeni pegi; ob robu ima mrežnica okoli tridesetkrat slabšo ločljivost, ker so tam svetlobni sprejemniki bolj redki(Sl. 3).

Na mrežnici je okoli 6,5 milijona čepkov in okoli 125 milijonov paličic. Paličke so tisočkrat bolj občutljive kot čepki, a z njimi ne zaznavamo barv. Če so predmeti dovolj osvetljeni, vidimo barve, če pa je svetloba prešibka, vidimo vse v belo-sivo-črnih odtenkih in neostro.





Sl. 3. Porazdelitev čepkov in paličic na mrežnici

Oko je zelo občutljiv in prilagodljiv organ. Najmanjši energijski tok, ki zadošča za vidno zaznavo, je okoli 10^{-17} W in je stokrat večji kot najmanjši energijski tok za slušno zaznavo (okoli 10^{-19}W). Tok svetlobe, ki pri gledanju še ne vzbudi bolečine, je okrog 10^{16}-krat večji (0,1 W). Zaradi tega je ugodno, če pri primerjavi povemo kar logaritem razmerja dveh svetlobnih tokov. Ta način so najprej uporabili v akustiki in enoto po Aleksandru Beliu imenovali *bel*. Navadno uporabljamo desetino te enote, *decibel* (dB). Decibel dobimo kot 10 log P/P_o , če je P_o svetlobni tok, ki ga komaj še zaznamo. Poglejmo lestvico in ustrezne psihološke korelacije:

Signal	psihološka korelacija
160 dB	prag bolečine
140	Sonce
120	
100	
80	bel papir v povprečni svetlobi za čitanje
60	TV zaslon
40	spodnja meja za barvno videnje
20	
0	vidni prag za oko, prilagojeno na mrak

Navadno pravimo, da šarenica z zenico uravnava svetlobni tok, ki vstopi v oko. Pri velikih osvetlitvah se zenica zmanjša in pri manjših poveča. Čeprav je obseg svetlobnih tokov, ki jih oko zaznava, zelo velik, so spremembe v velikosti zenice sorazmerno majhne. Največji premer zenice je 7 do 8 mm, najmanjši pa 2 do 3 mm. Ko je šarenica najbolj odprta, je njen presek približno 16-krat večji kot takrat, ko je najbolj zaprta. Sprememba velikosti zenice torej lahko prinese kvečjemu spremembo za okoli 12 dB. Očitno zenica ne uravnava svetlobnega toka, ki pada na mrežnico, ampak je njena glavna naloga usmeritev svetlobe na osrednje področje očesne leče, kjer je fokusiranje boljše. Pomaga torej obdržati dobro globinsko ostrino. Šarenica z zenico vzdržuje nekakšno ravnovesje med ostrino upodobitve in osvetljenostjo mrežnice.

Vidni občutek se ne pojavi v trenutku, ko svetloba pade na sprejemnik. Potrebuje nekaj časa, da se dražljaj preko kemičnih reakcij spremeni v električni živčni sunek. Ko dražljaj preneha, spet mine določen čas, preden se vzpostavi prvotno stanje v sprejemniku. Zato oko "vidi" še kratek čas po prenehanju signala. Oko zadrži svetlobno informacijo okoli 0,15 s.

Mogoče je doseči, da se zdi svetloba, ki utripa, očesu neprekinjena. Vzemimo, da je oko izpostavljeno vrsti zaporednih bliskov. Odgovor na prvi blisk se zgradi in traja več kot 0,1 s. Če pride drugi blisk dovolj kmalu, se odgovor nanj zgradi, preden odgovor na prvi blisk zamre. Tretji blisk pride spet, preden odgovor na drugi blisk zamre. Ti zaporedni bliski torej ustvarjajo neprekinjen vidni vtis. Frekvenco, pri kateri postane utripajoča svetloba za oko neprekinjena, imenujemo *kritično utripalno frekvenco*. Odvisna je od svetlobnega toka in trajanja svetlobnih bliskov. Čim večji je tok, tem večja je tudi kritična utripalna frekvenca.

Utripajoča svetloba naj osvetljuje hrapavo belo ploskev. Če je čas trajanja bliska enak času, ki mine med dvema zaporednima bliskoma, je za oko osvetljenost ploskve enaka polovici osvetljenosti, ki bi jo povzročila neprekinjena svetloba iz istega svetila. S tem smo povedali *Talboltov zakon*. Vidni sistem torej povpreči svetlobni tok po tako imenovanem integracijskem času. Opisane lastnosti svetlobnih sprejemnikov izkoriščamo pri filmu in televiziji.

LITERATURA

|1| N.Lindsay, *Human information processing*, New York, Academic Press 1972.

|2| M.Adlešič, *Svet svetlobe in barv*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1957.

|3| *Svetloba in vid*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1970.

|4| A.Trstenjak, *Oris sodobne psihologije*, 1.del, Maribor, Obzorja 1969.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

DIDAKTIČNE IGRE PRI POUKU FIZIKE

JANEZ FERBAR

V fiziki je treba - podobno kot v drugih znanostih - na začetku raziskave opredeliti *opazovani sistem* in *okolico*. Treba je spoznati sestavne dele in povezave med njimi, se pravi *strukturo* sistema. Materialno, energijsko ali informacijsko spremembo sistema imenujemo *proces*. Strukturo sistema je navadno mogoče spoznati le z opazovanjem procesov, ki se odvijajo v njem. Potem je mogoče sistem poenostaviti in predstaviti njegove dele le z lastnostmi, ki so za dano zvrst procesov bistveni.

Če po takšni analizi resnični sistem predstavimo z nadomestnim sistemom, ki je originalnemu podoben po številu in funkciji podsistemov, pravimo, da smo zgradili *model* sistema. Model je lahko materializiran ali pa zgrajen iz simbolov. Včasih se zadovoljimo s *statičnim modelom*. Pogosto zaradi tehničnih težav strukturo sistema predstavimo z materialnim modelom, procese v njem pa izrazimo simbolično, na primer z besedami. Za zgled omenimo model kristala iz kroglic, porazdeljenih v pravilni prostorski mreži in povezanih s paličkami. Ob takšnem modelu z besedami opišemo različne procese, do katerih lahko pride v kristalu, na primer deformacije kristala ali razširjanje valovanja skozi kristal.

Bolje je, če so *modeli dinamični* in omogočajo *simulacijo (posnemanje)* procesov, ki potekajo v resničnem sistemu. Če v modelu kristala paličke, ki vežejo kroglice, nadomestimo z vijačnimi vzmetmi, lahko pokažemo deformacije ali termično gibanje atomov pri različnih temperaturah, ne moremo pa pokazati na primer taljenja ali prevajanja elektrike. Model je tem boljši, čim več procesov lahko simuliramo v njem. Z didaktičnega stališča mora biti izpolnjen pogoj, da učenci bolj poznajo model kot sistem, katerega predstavlja.

Pri pouku fizike uporabljamo modele in simulacije na dveh ravneh. Na prvi ravni so modeli in simulacije del fizike same in učenci naj ob njih spoznajo, da je fizika organizirano znanje o naravi. Fizika pa je sama tudi proces zbiranja informacij o materialnem svetu, njihovega urejanja, povezovanja, kritičnega vrednotenja, dopolnjevanja, popravljanja in prevrednotenja.

Učenci niso fiziki. Zato jim pri šolskem predmetu "fiziki" ne bomo mogli predstaviti fizike kot znanosti v nobenem od opisanih dveh vidikov. Iz didaktičnih razlogov bomo učencem lahko predstavili le *model fizike* kot organiziranega znanja. Ta model se bo od originala gotovo razlikoval po stopnji abstraktnosti, medsebojne povezanosti, kvantitativnosti, posplošljivosti in napovedljivosti. Čim nižja bo stopnja miselne zrelosti učencev, tem dlje bo učni predmet fizika odmaknjen od fizike kot znanosti.

V zadnjem desetletju je vse večji poudarek na tem, naj učenci pri pouku spoznajo fiziko tudi kot delovno metodo. Učenci naj pri pouku fizike simulirajo delovne metode fizikov. V ta namen je treba šole oskrbeti s primernimi specializiranimi učilnicami in šolskimi fizikalnimi instrumenti. V tem smislu je treba tudi razumeti novodobne zahteve, naj se učenci uče preko lastnih "odkritij", se pravi simulacije odkritij. Mnogi pedagogi in specialni didaktiki menijo, da je le s simuliranjem učnih situacij, v katerih učenec igra vlogo znanstvenika, mogoče doseči, da se bo učenec naučil fizikalnih delovnih metod. Posnemanje dela fizikov naj bi bilo ena od redkih, če že ne edina pot do pridobitve pozitivnih stališč do tega predmeta.

Najbolj vneti zagovorniki novega vala celo trdijo, da ima trajno vrednost in uporabnost le znanje, ki si ga učenec pridobi z lastnim odkrivanjem. To je pretirano, saj s tem praktično zavračajo učinkovitost vsega ekspozitornega učenja, ki je bilo donedavna temelj poučevanja. Vendar moramo priznati, da se je delovnih metod in stališč mogoče naučiti le ob lastnem delu. Samo pomislimo na uk obrti in telesnih veščin. Učenec v šolskem laboratoriju pri poskusu iz elektrike torej *igra* vlogo znanstvenika pri odkrivanju ali upora bi zakonov narave. Ker posnema znanstvenika, je to *posnemalna* ali *simulacijska igra* (simulation game, Simulationsspiel).

Doslej nismo povedali nič novega, le na novo smo poimenovali nekaj, kar v naših šolah že je ali kar nameravamo v kratkem uvesti. Želeli smo le postaviti v pregledno didaktično shemo del tistega, kar se v šolah dogaja in kar mislimo predlagati novega. Če namreč učenec igra vlogo fizika v fizikalnem laboratoriju, je njegovo posnemanje vloge fizika in fizike omejeno na mnogo preozko okolje. Večina učencev namreč kasneje ne bo neposredno uporabljala fizikalnih delovnih metod za odkrivanje novih zakonov. Prav vsi pa bi lahko uporabljali svoje fizikalno znanje in svoje poznavanje fizikalnih delovnih metod kot delavci v produkcijskem procesu in kot samoupravljalci pri vsakodnevnem odločanju in soodločanju. Fizika pogosto skupaj z drugimi znanostmi in s tehniko igra pomembno vlogo v dosti širšem okolju kot v fizikalnem laboratoriju. Če naj učenci spoznajo vlogo fizike v tehniki, gospodarstvu in vsakodnevnem življenju, jim za aktivno uporabo tega znanja ne bo zadoščalo le, da jim pripovedujemo, kako koristna je fizika za vse to. Moramo jim dati priliko, da uporabijo fiziko v takšnem razširjenem kontekstu. Poleg šolskega laboratorija kot modela znanstvenega laboratorija moramo učencem dati na voljo tudi dinamične modele različnih širših materialnih in družbenih okolij, v katerih bodo lahko preko iger *posnemank* uporabili fizikalno znanje na širših družbenih problemih. To je mogoče doseči z uvajanjem posnemank v pouk. Omejili se bomo na posnemanke, čeprav niso edine učnovzgojne igre.

Zgodovina posnemank in njihova sedanja vloga pri pouku

Preden je učiteljevanje postalo poklic, se je mladina učila od odraslih v veliki meri s posnemanjem. Mladi so se učili s posnemanjem ročnih in telesnih spretnosti. Mednje sodi priučevanje v poklicih, ki vključujejo različna ročna dela, vaje pri raznih športnih igrah in disciplinah, zdravniške in učiteljske veščine, vojaška taktika in strategija in drugo.

V sedanjem slovenskem šolskem sistemu zasledimo tudi nekatere novejše poskuse za uporabo posnemank v učnovzgojne namene. Še pogosteje uporabljajo posnemanke v vrtcih, v mali šoli in v posebnih šolah. Kljub precejšnji razširjenosti simulacijskih iger v didaktične namene pa je bilo malo storjenega za teoretično utemeljitev te učne metode. Celo v novejših didaktikah, na primer v Poljakovi, metoda sploh ni omenjena. Vključili bi jo lahko v organizacijsko učno obliko samostojno delo učencev. Bržkone je takšno stanje mogoče pojasniti z neke vrste puritanizmom, po katerem je za človeka pomembno le resno delo. Šola nikakor ni mesto za igranje; v njej naj se učenci uče ob metodah, ki terjajo samoodpovedovanje in disciplino.

Razmere so se spremenile v šestdesetih letih, ko so pedagoški sociologi v ZDA izdelali teoretične temelje za didaktično posnemalno igro. Čeprav so sprva posnemanke uporabljali večinoma le učenci z zelo nizko motivacijo za učenje, se je stališče do današnjega dne že bistveno spremenilo. V zadnjem desetletju so registrirali samo v ZDA preko 2000 posnemank, ki segajo od matematike do politologije in ki so primerne za vse starostne stopnje od vrtca do univerze. Mnoge od njih uporabljajo tudi kot igre za razvedrilo. V Evropo so prodrle posnemanke šele v sedemdesetih letih. Uvedli so jih v Angliji, v ZR Nemčiji in v skandinavskih deželah, ničesar pa ne vemo, kako je s tem v Vzhodni Evropi. V Sloveniji je mogoče zaslediti nekaj zanimanja za to področje. Naše trgovine so neverjetno revne v ponudbi posnemank in

družabnih iger, medtem ko je v Angliji in Nemčiji izbira dokaj bogata. Jezikovne pregrade pa preprečujejo docela neselektiven uvoz, kakršnega opazimo pri klasičnih igračah.

Razvoj celodnevne osnovne šole, razširjanje mreže oddelkov s podaljšanim bivanjem, uvajanje novih predmetov, potreba po dodatnem in počitniškem izobraževanju otrok slovenskih staršev v zamejstvu in na tujem ter drugo terjajo, da iščemo in uvajamo nove učne metode. Čeprav posnemanke niso novost v naši šoli, to učno metodo šele v zadnjem času spreminjamo v pedagoško osveščeno dejavnost. Pri uvajanju posnemank v pouk gre za didaktično inovacijo.

Teoretične osnove didaktičnih iger

Če so igre didaktična novost, je treba najti utemeljitev za njihovo uvedbo v pouk. Kaj je pri igrah boljše ali vsaj tako imenitno kot pri drugih metodah in oblikah pouka?

Notranja motivacija. Bržkone je najpomembnejša razlika med igrami in drugimi načini pouka v rešitvi temeljnega vprašanja pouka, to je vprašanja motivacije. Motivacija za pouk je vse tisto, zaradi česar se nekdo odloči, da se bo izmed množice dejavnosti, ki bi se jih lahko lotil, odločil za dejavnost, ki jo predlaga učitelj. Pomislimo, kaj lahko učenec v šoli vse počne, namesto da bi poslušal učiteljevo razlago o vektorjih, za katere meni, da jih v življenju ne bo nikoli rabil, pa zlahka razumemo, kako zapleteno je vprašanje motivacije. Vrsta dejavnosti, ki je učencu na izbiro doma, ko naj bi se lotil samostojnega učenja, je še dosti pestrejša in vprašanje motivacije toliko hujše.

Klasična rešitev je bila *zunanja motivacija.* Učenci so se učili, da so jih učitelji in starši hvalili, še pogosteje pa zato, da jih niso zmerjali. Kasneje so se učili, da so dobivali zvezdice, čebelice, dobre ocene in veliko pik pri izpitih. Vse te nagrade so k učenju predmeta dodane od zunaj. Seveda si učitelji vedno želimo, da bi se učenci učili fizike zaradi nje same. Vendar si praktično komaj predstavljamo, kako je speljana pot od zunanje do notranje motivacije. Tudi teoretično ta pot še ni izdelana tako, kot bi si želeli.

V ozadju klasičnega načina reševanja vprašanja motivacije za učenje je prepričanje, da je učenje "resno" delo. To običajno vključuje dvoje: da učenje zahteva napor in da je samo zase neprijetno. V takem "resnem" delu ni težko prepoznati odtujenega dela. To je delo, ki se ga človek loteva z nejevoljo in odporom zato, da doseže neke zunanje cilje. Klasična kapitalistična proizvodnja temelji na takšnem odtujenem delu. Vendar odtujenost na srečo ni lastnost dela samega. Vsi vemo, da so opravila, ki se jih lotimo z veseljem, četudi ob koncu ne pričakujemo dodatne nagrade. Narobe; ko je takega dela konec, je konec tudi užitka, ki smo ga imeli ob njem. Cilj razvoja naše družbe je, da bi lahko čim več svojega časa prebili ob takšnem neodtujenem delu.

Igre so dejavnost, ki se je otroci in odrasli lotevamo z veseljem, ne da bi pričakovali dodatne nagrade. Po mnenju mnogih staršev in učiteljev je njihova slaba stran v tem, da od njih ni nobene koristi. Ker nimajo zunanjih ciljev, so le način za prijetno zapravljanje časa. Vprašanje je, če je ta nekoristnost lastnost iger samih in če se prav zaradi te lastnosti igranja lotevamo z veseljem. Če je tako, potem ni izgledov, da bi igro lahko uporabili pri učenju. Vendar ni tako.

Pri vsaki igri se moramo česa naučiti. Ker igra nima zunanjih ciljev, se odvija po pravilih, ki se jih mora igralec prej naučiti. V igri potem ta pravila uporablja v vedno novih in drugačnih situacijah. Za igro torej ne zadošča le pasivno ali verbalno znanje pravil. Pravila je treba znati uporabiti. Prav to pa želimo doseči pri pouku.

Na dlani je, kaj moramo storiti, da igro uporabimo v didaktične namene. Pravila igre je treba prilagoditi tako, da jih bo učenec-igralec lahko upora-

bil tudi v situacijah zunaj igre, to je pri svojem sedanjem in prihodnjem delu. Igre morajo biti torej posnetek situacij iz vsakdanjega življenja.

Priznati moramo dvoje. Trditev, da so učenci navdušeni za igranje in da torej vprašanja motivacije praktično ni, smo naslonili le na dobro vero in vsakdanje izkušnje. Nič nismo povedali o tem, kakšnim pogojem mora igra ustrezati, da je res tako. Tudi se nismo lotili vprašanja, kako motiviranost za igro presaditi na učni predmet in sploh na delo. Pri učenju vsakega predmeta je namreč še dosti nalog, ob katerih je težko najti kak užitek. Za zdaj se zadovoljimo z dvema ugotovitvama. Najprej nam behavioristična psihologija pravi, da se ljudje navzamemo pozitivnih stališč do nove dejavnosti, če jo časovno in krajevno združujemo s kako prijetno dejavnostjo. Povezovanje pouka fizike z igro je zgled za takšno povezovanje. Poleg tega privlačnost kakšne dejavnosti naraste, ko jo globlje spoznamo, če ukvarjanje z njo lahko postane neodtujeno delo. Verjamemo, da velja to za fiziko.

Z motivacijskega stališča so igre pomembne še v enem pogledu. Ker bo večina učencev uporabljala fiziko zgolj instrumentalno in jim bo znanje fizike le v pomoč pri opravljanju njihovega poklicnega in družbeno-političnega dela, je motivacija za učenje fizike zanje po definiciji v znatni meri le zunanja. V tem primeru moramo v šoli rešiti problem, kako dolgoročno motivacijo spremenimo v kratkoročno. Čeprav učitelj fizike morda ve, kako bo znanje fizike lahko uporabil bodoči gradbenik, elektrotehnik, pravnik, ekonomist ali jezikoslovec, je malo verjetno, da bo to mogel in utegnil razložiti učencem, ki so se odločili za te poklice. Pavšalno zagotavljanje, da znanje fizike koristi vsem in vsakomur, je podobno pregovoru, da čez sedem let vse prav pride. Tisti, ki so preživeli že večkrat po sedem let in na svoji koži morda spoznali resničnost pregovora, mu morda verjamejo, učenci pa le redkokdaj.

Z didaktično igro pa je mogoče posnetke različnih situacij, ki zahtevajo tudi znanje fizike, prinesti v razred že danes. Ob igranju takšnih posnemank se bodo učenci zlahka prepričali o koristnosti fizike na področjih, ki na prvi pogled niso v zvezi s tem predmetom. Ugotovitev, da z didaktičnimi igrami lahko spremenimo kratkoročne motivacije v dolgoročne, pa nas spomni še na eno lastnost didaktičnih iger sploh in posebej posnemank. Didaktične igre omogočajo učencem spoznati kak proces ali dejavnost z različnih spoznavnih vidikov.

Spoznavni vidiki, ki jih omogočajo didaktične igre. Učenci spoznavajo razne procese preko različnih vlog, ki jih igrajo v didaktičnih igrah, ki posnemajo te procese. *Pacientska vloga* je običajna vloga, ki jo imajo učenci pri klasičnem ekspozitornem pouku. Učenci poslušajo, berejo, rešujejo naloge... Pripoveduje, piše in zastavlja naloge pa nekdo drug. Zgolj pacientsko vlogo imajo učenci pri igrah na srečo. Igralci pri igrah na srečo ne nadzorujejo nobenega parametra, ki vpliva na potek dogajanja. Njihovo ravnanje je docela podrejeno slučaju. Igre na srečo simbolično predstavljajo tisti delež interakcije med človekom in njegovim okoljem, ki je docela izven spoznavnega in manipulacijskega dosega človeka. Igre na srečo so pogosto povezane z religijami različnih družb.

Aktersko vlogo posebej poudarjajo v vseh sedanjih reformnih tokovih, ki jim gre za samostojnost pri pridobivanju znanja. Samo aktersko vlogo imajo učenci pri telesnospretnostnih igrah in pri igrah, ki smo jih poimenovali *reševanke* (puzzles). Reševanke so lahko na konkretno empiričnem nivoju, ko igralci manipulirajo s predmeti. Takšne so na primer različne sestavljanke ali zložljivke. Na simbolično logičnem nivoju pa je akterska vloga povezana s sestavljanjem križank, rebusov, ugank itd. Reševanke in telesnospretnostne igre sestavljajo tisti delež človekove interakcije z okoljem, v katerem človek nadzoruje vse parametre. Pogosto so neposredno povezane s produkcijskim procesom v določeni družbi.

Strateška vloga je le redkokdaj eksplicitno vgrajena v klasični pouk. Tradicionalna izjema je pouk vojaške strategije in deloma prava. V novejšem

času se njena uporaba pri pouku širi. Vlogo stratega imajo igralci, ko morajo izmenoma vsaj v mislih prevzemati zdaj pacientsko, zdaj aktersko vlogo. Sami nadzirajo le del spremenljivk, ki vplivajo na potek igre, del spremenljivk pa kontrolirajo soigralci, včasih pa še slučaj ali pravila igre. Strateške igre ponazarjajo navadno interakcijo človeka z drugimi ljudmi. Z njimi je mogoče posnemati tudi optimizacijske procese. Posnemanke so gotovo najpomembnejša kategorija strateških iger.

Vse tri naštete vloge: pacientska, akterska in strateška so različne vloge udeležencev v igri ali v procesu, ki ga igra posnema. Poleg udeleženskih vlog pa so za spoznavanje procesa pomembne še *sodniška* in *ocenjevalska vloga*. Sodniške vloge v pouku skoraj ni mogoče zaslediti. V igri pa ima vlogo sodnika (referee, Schiedsrichter) tisti, ki preverja, če igra poteka po pravilih. Sodniška vloga predpostavlja poznavanje vloge stratega. V strateški igri mora igralec izmenoma vsaj v mislih prevzemati vloge pomembnih drugih oseb (soigralcev). Sodnik razsoja o pravilnosti poteka iger s stališča generaliziranega igralca. Očitno je, da postane sodniška igra smiselna šele pri strateških igrah; pri igrah na srečo, pri reševankah in telesnospretnostnih igrah je lahko le obrobnega pomena. Ocenjevalec pa ocenjuje dejavnost ali igro po kriterijih, ki so splošnejši od pravil igre same. Ocenjevanje in vrednotenje lahko temeljita na estetskih, etičnih, ekonomskih in drugih antropocentričnih kriterijih. Vlogo ocenjevalca ima športni novinar, ki zapiše, da je bila nogometna tekma dolgočasna. V pravilih ni nikjer zapisano, da mora biti nogomet kratkočasen. Novinarjev kriterij torej ne sodi v nogometno igro.

Vlogo ocenjevalca ima tudi človek, ki sodi, da so se v bližnji preteklosti fiziki preveč ukvarjali s fiziko delcev, premalo pozornosti pa so posvetili iskanju novih energijskih izvirov. Obe omenjeni področji sta s stališča fizike enako dobri, po ekonomskem pomenu pa se vsaj trenutno bistveno razlikujeta. Kadar tožimo, da je pouk kakega predmeta preveč pozitivističen, mislimo na to, da učencem premalokrat damo priliko, da prevzame vlogo ocenjevalca. Pouk je tem boljši, čim več različnih vlog ima lahko učenec v njem. Le s spoznavanjem neke dejavnosti ali procesa z vseh naštetih vidikov ga lahko učenec dojame v celoti.

Med učitelji je razširjeno mnenje, da otroci lahko vztrajajo pri neki učni snovi le kratek čas in da se ta čas podaljšuje le s fizičnim in miselnim zorenjem. To ni res. Resnica je, da učenci ne zmorejo dolgo v procesu učenja igrati le eno vlogo. Vsi vemo, kako kmalu se naveličajo pacientske vloge poslušalca. Tudi vloga gledalca v kinu ali gledališču nas v dveh urah utrudi. Nič bolje se ne odrežejo moderni zagovorniki aktivnega pouka. Če bodo učenci ves čas postavljeni le v to vlogo, se je bodo preobjedli prav tako kot pacientske. Menjava vlog pa omogoča, da učenci vztrajajo pri določeni snovi mnogo dlje. S tega stališča bi se kazalo lotiti tudi razvpite preobremenjenosti učencev. Posnemanke kot posebna zvrst strateških iger omogočajo učencem prevzemati vse naštete vloge. To je druga prednost, ki jo imajo didaktične igre pred drugimi načini pouka.

Načelo didaktičnih iger "kot da". Posnemanke ponazarjajo resnične procese in dejavnosti. Ponazoritve so lahko različne in so odvisne od ciljev, ki jih želimo s posnemanko doseči. Eno od temeljnih načel pri pouku je, da bi učenca vpeljali v resnično življenje tako, da bi bilo uvajalno obdobje čim manj škodljivo zanj in za njegovo okolje. Gre torej za uresničevanje najsplošnejšega načela varnosti pouka. Posnemanke omogočajo učencem, da poskušajo različne akcije, ki bi v resničnem življenju imele lahko usodne posledice za učenčevo življenje in zdravje, lahko bi bile ekonomsko ali širše družbeno škodljive. S primernimi posnemankami učenec lahko spozna vse te škodljive posledice v obliki simboličnih kazni, ko izgublja točke ali je izločen iz igre. Simbolične posledice njegovih uspehov in napak v igri zadoščajo za usmerjanje pri naslednjih akcijah, za čustveno angažiranje učenca in za formiranje ustreznih vzorcev ravnanj, hkrati pa mu ne škodujejo.

Načelo interdisciplinarnosti. Ni težko sestaviti didaktične igre, pri katerih učenci lahko uporabijo znanje, ki so si ga pridobili pri različnih predmetih. V igro samo pa je mogoče vgraditi še druge procese za pridobivanje informacij. Tako lahko igra zahteva znanje , pridobljeno iz splošnih informacijskih sredstev, iz posebne literature ali pa iz lastnih opazovanj in poskušanj. Didaktične igre so tako lahko pomembno sredstvo za povezovanje različnih znanj in spretnosti.

Socializacijska vloga didaktičnih iger. Didaktične igre vključujejo po definiciji več igralcev. Strateške in posebej simulacijske igre omogočajo spoznavanje soigralcev ne zgolj kot dobro ali zlo usodo. Učenci se nauče delovati v skupini in prilagoditi svoje trenutne želje celotni socialni interakciji v igri. Naučijo se sklepanja zavezništev in socializacije agresivnosti.

Prednosti didaktičnih iger s tem niso izčrpane. Velik vpliv imajo igre na koncentracijo pozornosti, na razvoj sposobnosti za samostojno odločanje, na sposobnost za abstrakcijo in poenostavljanje v kompliciranih situacijah, ob njih se spreminjajo stališča ljudi, itd.

LITERATURA

|1| E.Berne, *Games People Play*, New York, Grove Press 1964.

|2| S.S.Boocock, E.O.Schild, *Simulation Games in Learning*, Bevery Hills, Sage Publications 1968.

|3| P.B.Hounshell, I.R.Trollinger, *Games for the Science Classroom*, An Annotated Bibliography, Washington, National Science Teachers Association 1977.

|4| M.Inbar, C.S.Stoll, *Simulation and Gaming in Social Science*, New York, Free Press 1972.

|5| J.Lehman, *Grundlagen und Anwendungen des pädagogischen Simulationsspiels*, Weinheim , Beltz Verlag 1975.

|6| J.Lehman, G.Portele, *Simulationsspiele in der Erziehung*, Weinheim, Beltz Verlag 1976.

|7| *Simulations and Games, An International Journal of Theory, Design and Research*, Bevery Hills, Sage Publications.

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

FIZIKA IN DRUŽBA

ANTON MOLJK

Na začetku tega stoletja so fiziki odkrivali pojave v atomih, katerih razsežnosti so 10^{-10}m. Sedaj pa raziskujejo zgradbo atomskih jeder in ločijo še razsežnosti 10^{-16}m. V pol stoletja so s kvantno teorijo in teorijo relativnosti prišli do razumevanja pojavov na tem območju razsežnosti in do razumevanja mnogih pojavov iz klasične fizike , na primer lastnosti trdnih snovi.

Nova dognanja, ki so se vedno pogosteje vrstila, so dajala poleg znanja in razumevanja možnosti za številne uporabe. Mnoga so dala osnovo za razvoj novih tehničnih področij in novih panog industrijske proizvodnje. Kar premislite, kaj vse je omogočilo odkritje rentgenske svetlobe ali pa odkritje radioaktivnosti in česa vsega ne bi imeli, če ne bi bilo polprevodnikov ali pa laserjev.

Ni čudno, da je postajala fizika s svojim razvojem vedno pomembnejša. Razvoja seveda niso določale samo osnovne spoznavne težnje fizike ali slučajna odkritja, ampak v veliki meri interes za tista odkritja, ki so obetala uporabe v tehniki, medicini, vojski.

Od nekdaj je bilo tako. Spomnimo se na primer Galileja, ki je leta 1609 naredil daljnogled in je z njim prišel do več pomembnih odkritij o planetih. Ta so koristila Keplerju in kasneje Newtonu. Drug tak daljnogled s 30-kratno povečavo pa je Galilei podaril Svetu Beneške republike. V priloženem pismu je navedel prednosti, ki jih nudi daljnogled za akcije na morju in na kopnem in je pisal: "Odkrili bomo sovražnikove jadrnice in ladje dve uri prej, preden nas bo sovražnik zagledal. Razločili bomo število in vrsto ladij in tako ocenili moč sovražnika in na tej podlagi odločili, ali ga zasledujemo ali napademo ali pa se umaknemo. Podobno lahko vidimo na kopnem taborišča in utrdbe sovražnika z oddaljenih vzvišenih mest in opazujemo premike in priprave sovražnika in razločimo podrobnosti, kar nam daje veliko prednost."

Po tej ponudbi je Svet Beneške republike sklenil imenovati Galileja za rednega profesorja matematike z dvakrat večjimi dohodki, kot jih je imel do tedaj, kot priznanje za njegovo veliko skrb za javno blaginjo.

Fizikalna spoznanja ne zanimajo samo fizikov, ampak so postala interes držav in celo ena od mer za njihovo moč. Države so v zadnjih desetletjih izdatneje podpirale raziskovalno dejavnost, kar je pomagalo napredku fizike. Za razliko od velikih industrijskih podjetij, ki financirajo raje uporabne in razvojne raziskave, podpirajo države tudi temeljne raziskave, ki jim je glavni namen spoznavanje in razumevanje novih pojavov. Nabrano znanje pa prej ali slej pride prav; to se je že velikokrat pokazalo.

Mnoge fizikalne raziskave postajajo obsežne in drage, npr. raziskave elementarnih delcev, zaradi velikega števila sodelavcev ter zahtevnih instrumentov in eksperimentalnih pripomočkov. Mnogi problemi tudi niso več vzeti neposredno iz sveta, v katerem živimo,in raziskave terjajo vedno več teoretičnega znanja. Zato so širši javnosti manj znane. Ker pa je treba pri odločanju o vedno številnejših dragih raziskovalnih projektih upoštevati poleg strokovnih argumentov tudi javno mnenje, gre neznanje lahko v škodo fizikalnim projektom, ki ne kažejo neposredno za življenje pomembnih dosežkov.

Gerald Feinberg pravi v svoji knjigi *Iz česa je narejen ta svet*, da jo je pisal tudi zato, ker se fiziki niso dovolj potrudili, da bi razložili ljudem namene in rezultate raziskav, ki so jih omogočila družbena sredstva. Pravi, da želi v svoji knjigi dati ta pojasnila sodržavljanom, ki niso fiziki. To pa je tudi naloga šole, ki naj vzbuja zanimanje za fiziko in znanost, uči misliti in pomaga razumeti pomembna dognanja.

Ta in podobna vprašanja so postala v zadnjem času del posebnega študijskega področja z naslovom *Znanost in družba*. Fizikalna društva ustanavljajo pod imenom *Fizika in družba* posebne sekcije za študij alternativ razvoja fizike in za širjenje znanja in zanimanja za fiziko. Zaradi pomena fizike ni mogoče prepuščati razvoja slučaju, ampak proučujejo ugodne pogoje za ustvarjalno delo.

V tej zvezi obravnavajo npr. naslednja vprašanja:
- obseg in namen fizikalnega raziskovanja (število in sposobnost fizikov, zasedenost področij, eksperimentalna oprema, finančna sredstva in cena raziskav, delo inštitutov, temeljne, uporabne in razvojne raziskave, vpliv razvoja fizike na preostalo znanstveno in tehnično dejavnost, gospodarski in družbeni pomen raziskav, objavljanje rezultatov, mednarodno sodelovanje),
- raziskovalni program (kaj je pomembno v fiziki, znanstvena politika družbe, alternative razvoja fizike, kriteriji za izbiro programov, znanstvena kritika),
- pouk fizike (šolanje fizikov, vzgoja ustvarjalcev, delež fizike v splošni izobrazbi, obveščanje o novih fizikalnih dognanjih, znanstvena razgledanost družbe, družbena odgovornost raziskovalcev, javno mnenje o vlogi fizike).

V tem prispevku bomo obravnavali le nekaj vprašanj in sicer: današnji obseg in rast fizike, kriterije za izbor in nekaj primerov mednarodnega sodelovanja.

Današnja karta fizike. Dosedanji razvoj fizike od leta 1600 dalje lahko grobo predstavimo na časovni osi s tem, da pripišemo prva 3 stoletja klasični fiziki, naslednje polstoletje atomski fiziki s kvantno mehaniko in relativnostno teorijo, naslednji dve desetletji pa fiziki elementarnih delcev in fiziki kondenzirane snovi. Za prevero znanja lahko izpopolnite sliko in vnesete na časovno os glavna fizikalna odkritja.

Kaj vse pa je fizika danes? Kako lahko predstavimo celotno zgradbo fizike in kako razporejamo nova fizikalna dognanja? Pred dvema letoma je posebna komisija mednarodnega Sveta znanstvenih društev, ki so jo sestavljali uredniki glavnih fizikalnih referativnih časopisov in predstavniki mednarodnih zvez fizikalnih društev, objavila karto današnje fizike. Na karti so ločili osem osnovnih področij in sicer:

0. splošno
1. fizika elementarnih delcev in polj
2. jedrska fizika
3. atomska in molekulska fizika
4. klasična področja pojavov in njihovih uporab
5. tekočine, plazma in električna praznenja
6. kondenzirana snov (zgradba, termične in mehanske lastnosti)
7. kondenzirana snov (elektronska zgradba, električne, magnetne in optične lastnosti).

Navedena področja dele na podpodročja, ta pa dalje na poglavja in podpoglavja. Vseh naslovnih gesel za podpoglavja je 1200. Razdelitev pa še ne obsega interdisciplinarnih področij fizike, niti ne astrofizike, biofizike in geofizike. Karta kaže z gostoto gesel obseg posameznih področij in podpodročij in nakazuje njihovo pomembnost. Karta se seveda menjava. Pred nekaj desetletji bi bila drugačna. Posamezna področja se v določenem času začno, se razvijejo, dosežejo svoj višek in nato preminejo.

Za informacijo je na koncu članka dodan seznam področij in podpodročij, ki jih vsebuje karta. Za vajo preglejte, katerih podpodročij še ni bilo v začetku tega stoletja in katera so bila takrat najbolj zanimiva. Karta naj da sliko fizike, podobno kot da zemljevid predstavo pokrajine. Na podlagi take karte lahko razporejajo nova fizikalna dognanja in urejajo literaturo.

Eksponentna rast. Obseg raziskovalne dejavnosti lahko nakažemo s številom raziskovalcev ali s sredstvi, ki so na razpolago, ali pa z rezultati. Ti so objavljeni v člankih v znanstvenem časopisju ali so o njih poročali na kongresih. Krivulje, ki kažejo časovni potek rasti naštetih količin, so več kot sto let eksponentne s podvojitvenim časom okrog 15 let.

Na novih področjih fizike je rast hitrejša in se znanje v začetku podvoji že v nekaj letih. Sami smo lahko sledili takemu hitremu razvoju na nekaterih področjih, na primer pri fiziki polprevodnikov, laserski fiziki, fiziki plazme, spektroskopskih metodah.

Ker hitrost eksponentne rasti tudi eksponentno raste, pomeni, da je hitrost razvoja pri večji razvitosti večja. Drugače rečeno: bolj razviti svet se hitreje razvija, manj razviti pa za njim vedno bolj zaostaja. Eksponentna rast seveda preneha, ko se spremenijo okoliščine.

Oglejmo si, kakšne so vrednosti naštetih količin za vrsto razvitih držav. Fizikov-raziskovalcev je okrog 200 na milijon prebivalcev. Letni pridelek znanstvenih člankov iz fizike na svetu se ceni na 250000 strani časopisja. Razvite države dajejo sedaj okrog 3% narodnega dohodka za raziskovalno dejavnost. Na fiziko pride okrog 0,1%. Letno je sedaj preko 300 mednarodnih znanstvenih konferenc s fizikalno problematiko s po nekaj sto udeležencev. Ameriški fizikalni inštitut, ki izdaja večino ameriških fizikalnih znanstvenih časopisov, je na primer lani objavil 70000 strani. Referativni časopis *Phycics Abstracts* pa je lani pregledoval 2000 časopisov in je objavljal izvlečke iz 125 fizikalnih časopisov.

Seveda je pomembnost člankov in prispevkov zelo različna. S. Brush je na primer pregledal vse članke iz kinetične teorije plinov, objavljene v prejšnjem stoletju. Zbral je 540 publikacij, samo 39 pa jih je ocenil za pomembne. Ocena pomembnosti publikacij je zahtevno delo. Danes poskušajo pomembnost publikacije nakazati z indeksom citiranja. Ta pove, kolikokrat je bil določeni članek citiran v drugih člankih. Publikacija, ki je večkrat citirana, velja za pomembnejšo.

Kriteriji za izbor. Z rastočim obsegom fizike je vedno teže smotrno izbirati in dimenzionirati področja raziskovanja in utemeljevati pomen raziskav. Pri izbiri pomagajo kriteriji, ki jih lahko ocenijo. Upoštevati pa je treba, zlasti pri temeljnih raziskavah, domiselnost in drugačnost zamisli, pa tudi pogum za tveganje.

Mislite si, da ste v komisiji, ki ima na voljo finančna sredstva samo za en raziskovalni projekt med tremi predloženimi, na primer raziskavo električnih lastnosti polprevodnikov, raziskavo širjenja valovanja v plazmi in raziskavo nelinearnih pojavov v optiki. Kako bi se odločili? Premislite, kako bi vrednotili predloge, da bi lahko en predlog sprejeli, druge pa zavrnili.

Veliko so razmišljali o vrednotenju raziskovalnih projektov. Večkrat so uporabljali za ta namen skupino kriterijev, od katerih so eni notranji, drugi zunanji. Notranji kriteriji so strokovni, na primer: ali je področje pripravljeno za take raziskave, ali so raziskovalci res kompetentni. Ta kriterij je odločilen. Zunanji kriteriji pa opredeljujejo tehnološki pomen (možnosti za pridobitev tehničnih sposobnosti), znanstveni pomen (vpliv na druga področja znanosti in možne povezave), družbeni pomen (prispevek k blagostanju, človeškim odnosom in družbenim vrednotam).

Na zgornjem primeru ste lahko doživeli, da je težko izbirati raziskave na raznih področjih v okviru fizike. Še teže pa je izbirati med projekti, ki imajo različne namene. Recimo, da morate dati mnenje o vrstnem redu treh

raziskovalnih projektov. Eden je iz fizike, npr. nevtrinska spektroskopija, drugi je sodelovanje v vesoljskih raziskavah, tretji pa raziskava raka. Kako boste določili prednostni red? Poskusite točkovati posamezne kriterije za navedene projekte samo z da ali ne, da se boste še bolj prepričali o močni zvezi med raziskovalnim delom in družbenimi interesi.

Mednarodno sodelovanje. Znanstveni izsledki so stvar človeštva in znanstveno raziskovalna dejavnost je po svojem namenu globalna. Meje držav in blokov naj ne bi ovirale znanstvene dejavnosti, ne izmenjave znanstvenih informacij in mobilnosti raziskovalcev. Tako je zapisano v helsinških sporazumih.

Res je vse več znanstvenega sodelovanja med fiziki in med inštituti iz raznih držav. Oblikujejo skupne raziskovalne programe. Ustanavljajo skupne specializirane inštitute več držav , npr. center s protonskim pospeševalnikom, center z močnim nevtronskim fluksom, center za raziskavo plazme, center za teoretično fiziko.

O mednarodnem sodelovanju pričajo tudi vedno številnejše mednarodne konference in vedno številnejši mednarodni fizikalni znanstveni časopisi. Znanstveno sodelovanje je vključeno skoraj v vsak dokument o meddržavnih sodelovanjih.

Poseben primer sodelovanja je uvedba enotnega merskega sistema SI, ki bo olajšal strokovno sporazumevanje in izboljšal preglednost literature brez preračunavanja enot iz enega merskega sistema v drugega. Drug primer pa je mednarodna trgovina z eksperimentalno, merilno in računalniško opremo, ki tudi vpliva na znanstveni napredek. Zdi se, da je vse manj zadržkov za nabavo opreme.

Novice o novih fizikalnih dognanjih se danes hitro zvedo po svetu preko časopisja in konferenc. Žal pa so koristne le za znanstveno razviti del sveta, ki ne presega petine človeštva. Fiziki se zavedajo tega problema in v raznih mednarodnih društvih proučujejo možnosti za hitrejši razvoj manj razvitih in na razne načine pomagajo. Osnova je pouk in vzgoja fizikov s pravilno študijsko usmerjenostjo na perspektivna fizikalna področja v danih okoliščinah.

Nekaj vprašanj o fiziki in družbi je vredno v šoli omeniti, da ne bo fizika sedanjemu življenju preveč odtujen šolski predmet. Za večjo znanstveno razgledanost študentov bomo morali vključevati v učno snov hitreje kot dosedaj tudi sodobne dosežke fizike. S hitrim napredkom se mora spreminjati tudi pouk po vsebini in metodi. Treba pa je vedno bolj tehtati, kaj je vredno znati in česa ne.

LITERATURA

|1| Auger P., *Savremena tendencija naučnog istraživanja*, Beograd, Institut za naučno tehničku dokumentaciju 1966.
|2| Dobrov G.M., *Nauka o nauci*, Beograd, Institut za naučno tehničku dikumentaciju 1969.
|3| Raport S., Wright H., *Physics*, New York, New York University Press 1964
|4| Hund F., *Geschichte der Quantentheorie*, Mannheim, Bibliographisches Institut 1967.
|5| Bernal J.D., *Science and Society*, Bletchley, The open University Press 1971.
|6| Rose H., *Science and Society*, Harmondsworth, Penguin books Ltd 1975.
|7| E. Curie, *Gospa Curie*.
|8| Watson J.D., *Dvojna vijačnica*, Ljubljana, Mladinska knjiga 1975.
|9| A. Weinberg, *Reflections on big science*, Cambridge, Mass., MIT Press 1967.
|10| G. Feinberg, *What is the world made of*, New York, Anchor Press 1977.
|11| V.L. Ginzburg, *O fizike i astrofizike*, Moskva, Nauka 1974.
|12| E. Luescher, *Pipers Buch der modernen Physik*, München, R. Piper 1978.
|13| A. Buzzati, *La sfida della scienza*, Milano, Unesco-Mondadori 1976.
|14| H.B.G. Casimir, *Physics and Society* v knjigi *Trends in Physics*, Geneve, European Physical Society 1973.

MEDNARODNA RAZDELITEV FIZIKE

0 SPLOŠNO

01 obveščanje, izobraževanje, zgodovina in filozofija
02 matematične metode v fiziki
03 klasična in kvantna fizika
04 relativnost in gravitacija
05 statistična fizika in termodinamika
06 znanost merjenja, splošne laboratorijske metode in instrumentalni sistemi
07 posebni instrumenti za splošno uporabo v fiziki

1 FIZIKA ELEMENTARNIH DELCEV

11 splošna teorija polj in delcev
12 posebna teorija in modeli interakcij: sistematika delcev
13 posebne reakcije in fenomenologija
14 lastnosti posebnih delcev in resonanc

2 JEDRSKA FIZIKA

21 zgradba jedra
23 jedrski razpad in radioaktivnost
24 jedrske reakcije in sipanje, splošno
25 jedrske reakcije in sipanje, posebne reakcije
27 lastnosti posebnih jeder
28 jedrska tehnika in študij jedrske energije
29 eksperimentalne metode in instrumenti za fiziko elementarnih delcev in jedrsko fiziko

3 ATOMSKA IN MOLEKULSKA FIZIKA

31 elektronska zgradba atomov in molekul, teorija
32 atomske in molekulske interakcije s svetlobo, spektroskopija
33 magnetne resonance in relaksacija v molekulah: jedrska kvadrupolna resonanca, Moessbauerjev pojav
34 atomski in molekulski trki in interakcije
35 eksperimentalno dobljeni podatki o atomih in molekulah
36 študij posebnih atomov in molekul

4 KLASIČNA PODROČJA POJAVOV IN NJIH UPORABE

42 optika
43 akustika
44 mehanika, elastičnost, reologija
45 dinamika tekočin

5 TEKOČINE, PLAZMA IN ELEKTRIČNA PRAZNENJA

51 fizika tekočin (plini, kinetična in transportna teorija in lastnosti)
52 fizika plazme in električnih praznenj

6 KONDENZIRANA SNOV: STRUKTURA, TERMIČNE IN MEHANIČNE LASTNOSTI

61 struktura tekočin in trdnin: kristalografija
62 mehanične in akustične lastnosti kondenzirane materije

63 dinamika mreže in statistika v kristalih
64 enačbe stanj, fazna ravnovesja in fazni prehodi
65 termične lastnosti kondenzirane materije
66 transportne lastnosti kondenzirane materije
67 kvantne tekočine in trdnine: tekoči in trdni helij
68 površine in vmesne površine: tanki filmi in dlake
69 tehnologija tankih filmov, rast kristalov itd.

7 KONDENZIRANA SNOV: ELEKTRONSKA ZGRADBA, ELEKTRIČNE, MAGNETNE IN OPTIČNE LASTNOSTI

71 elektronska stanja
72 elektronski transport v kondenzirani materiji
73 elektronska struktura in električne lastnosti površin, vmesnih površin in tankih filmov
74 superprevodnost
75 magnetne lastnosti in materiali
76 magnetna resonanca in relaksacija v kondenzirani materiji, Moessbauerjev pojav
77 dielektrične lastnosti in materiali
78 optične lastnosti in spektroskopija kondenzirane materije in druge interakcije materije z delci in svetlobo
79 elektronska in ionska emisija iz tekočin in trdnin: udarni pojavi

Za predstavo nadaljnje razdelitve je prikazano prvo podpodročje 01, ki vsebuje naslednja poglavja in podpoglavja, med njimi pouk.

01 OBVEŠČANJE, IZOBRAŽEVANJE, ZGODOVINA IN FILOZOFIJA

01.10 obvestila, novice in organizacijske dejavnosti
01.30 fizikalna literatura in publikacije
01.30B publikacije konferenc
01.30D ocene knjig, monografij in zbornikov
01.30F bibliografije
01.30H Pregledi in mentorska mnenja

01.40 izobraževanje
01.40C učni načrt
01.40E osnovna in srednja šola
01.40G učne metode in strategije
01.40J izobraževanje učiteljev

01.50 učni pripomočki
01.50D načrt tečaja

01.50F audio in vizualni pripomočki
01.50H uporaba računalnika za pouk
01.50K teorija in metode preizkušanja znanja
01.50M demonstracijski aparati
01.50P laboratorijski poskusi in aparati
01.50Q načrt in organizacija laboratorijskega tečaja
01.5oR laboratorijske spretnosti in metode
01.50T arhitektura zgradb in opreme

01.55 splošna fizika (izobraževalni načrt)
01.60 biografske, zgodovinske in osebne vesti
01.65 zgodovina znanosti
01.70 filozofija znanosti
01.75 znanost in družba
01.85 popravki
01.90 druga splošno zanimiva vprašanja

FIZIKA ZA DRUŽBOSLOVCE

V pedagoških šolah je bil uveden za učence družboslovnih usmeritev predmet *poglavja iz naravoslovja*, ki je za našo šolo novost. Fizikalnemu delu tega predmeta je bil posvečen v februarju 1978 seminar *Fizika za družboslovce*, ki je pokril približno polovico učnega načrta. V tej številki Obzornika so zbrani prispevki s seminarja.

Poglavja iz naravoslovja niso zgolj izbor iz fizike, kemije, biologije in še geologije, astronomije, meteorologije. Odločilni so predvsem učni smotri: gradivo je obdelano z različnih vidikov, pomembnih za družboslovno usmerjene učence. Predmet naj posreduje spoznanja, ki dajejo splošno naravoslovno in tehnično kulturo in so hkrati pomembna za poklicno udejstvovanje. Pokaže naj vpliv fizike na razvoj drugih znanosti, na gospodarski in družbeni razvoj in na širše mednarodne odnose. Učence naj seznani z razvojem fizike in liki nekaterih fizikov, pouči o njihovem času in življenjskem okolju ter o poti do najpomembnejših odkritij.

Učno gradivo je razporejeno na poglavja o energiji, o razvoju fizike, o vlogi fizike pri tehničnem razvoju in o družbeni vlogi. Posebno poglavje zajema nekatere fizikalne zakone v delovanju človeškega organizma. Prvo poglavje obravnava izvire in vrste energije ter pomen energije za gospodarski in družbeni razvoj in za dogajanja v svetu. Omenja pojave v geosferi, vzroke in učinke sproščanja, transporta in porabe energije ter vpliv na okolje. Drugo poglavje zajema razvoj fizike kot znanstvene veje z današnjega stališča. Pogled nazaj naj odkrije predvsem prihodnost in naj osvetli zvezo med razvojem znanosti in razvojem družbe. Pri tem ne gre za enciklopedični zgodovinski predgled fizike, ampak je poudarek na mejnikih v razvoju znanstvene misli, ki so pripomogli k odločilnemu napredku in k spremembi življenjskega okolja. Delo mislecev, značilnih za kako dobo in ustvarjalcev velikih fizikalnih idej naj to le osvetli. Tretje poglavje je posvečeno povezavi fizike s tehniko. Poudarek je na odkritjih, ki so zanimiva s fizikalnega vidika in pomembna za današnji čas in za prihodnost in na povezavi med znanostjo, tehniko in družbo. Zadnje poglavje obravnava družbeni vidik fizike, njen vpliv na družbo in odnos do družbe, zlasti nekatere povezave s filozofijo in drugimi družboslovnimi znanostmi.

Izdajo prispevkov s seminarja so omogočili Raziskovalna skupnost Slovenije, Izobraževalna skupnost Slovenije in Zavod SRS za šolstvo. Zahvaljujem se predavateljem in avtorjem prispevkov, pretežno članom VTO oddelka za fiziko fakultete za naravoslovje in tehnologijo. Zahvalo sem dolžan tudi Društvu matematikov, fizikov in astronomov SRS in njegovi komisiji za tisk ter uredniškemu odboru Obzornika in Janezu Strnadu, ki je prispevke uredil. (Na izrecno željo avtorja pa sta prispevka R. Kladnika objavljena v prvotni obliki.)

Aleksander Kregar

Obzornik mat. fiz. 25(1978)6

POVZETKI

Str.

BRADAČ ZLATKO 285

EKG

UDK 616-073

V prispevku je kvalitativno obdelana električna dejavnost srčne mišice. Infarkt in srčni blok sta bolezni, ki ju ugotovimo iz časovnega posnetka srčne napetosti.

EKG

In the paper the qualitative electrical activity of the heart muscle is considered. Infarct and heart block may be recognized from the time depending heart voltage.

CVAHTE MIRKO 281

MOČ ČLOVEKA

UDK 620.96

Človeka obravnavamo kot stroj, ki dobiva toploto ob gorenju hrane, opravlja pa delo in oddaja toploto okolici. Toploto, ki se sprošča ob gorenju hrane, določimo tako, da izmerimo prostornino porabljenega kisika. Moč človeka merimo z ergometri, oddan toplotni tok pa izračunamo po energijskem zakonu.

POWER OUTPUT OF MAN

We can treat the human body as an engine which gets heat by metabolism. Part of this heat goes into work which the body does on the systems outside it and part of it is transfered as heat of the body. The article also discusses how these quantities can be measured.

CVELBAR FRANC 267

KAJ LAHKO ŠE VIDIMO Z MIKROSKOPOM?

UDK 535.82

Opazovanje majhnih predmetov in podrobnosti na njih je obravnavano s pedagoškega vidika. Posebej sta obdelana optični in elektronski mikroskop.

THE LIMITS OF OBSERVATION WITH MICROSCOPE

The problem of observing small objects or fine details is considered from the pedagogical point of view. The optical microscope and the electron microscope are treated in some detail.

CVELBAR FRANC Str. 270

RAZVOJ EKSPERIMENTALNE OPREME IN MERILNIH INSTRUMENTOV

UDK 53.07(091)

V prispevku je podan kratek pregled bistvenih korakov v zgodovinskem razvoju eksperimentalne opreme in merilnih instrumentov. Poudarjena je korist, ki jo je imelo človeštvo od osnovnih raziskav.

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL FACILITIES AND MEASURING INSTRUMENTS

Essential steps in the historical development of experimental facilities and measuring instruments are briefly reviewed. The benefit to the mankind from fundamental experimental research is pointed out.

ČADEŽ ANDREJ 210

PLANETI NAŠEGA OSONČJA

UDK 523.4

Opisane so nekatere osnovne fizikalne lastnosti planetov Osončja.

PLANETS OF THE SOLAR SYSTEM

Some basic properties of the planets of the Solar system are described.

ČADEŽ ANDREJ 214

SONCE

UDK 523.7

Opisani so osnovni, neposredno merljivi podatki za Sonce in nekateri preprosti sklepi, ki vodijo do ocen o starosti Sonca. Skicirane so tudi nekatere ugotovitve o strukturi notranjih plasti, o konvekciji in o sončnih pegah.

THE SUN

The basic measurable data of the Sun and some simple reasoning leading to the estimates for the age of the Sun are described. The structure of the inner parts, the convection and the sunspots are also briefly discussed.

FERBAR JANEZ 292

DIDAKTIČNE IGRE PRI POUKU FIZIKE

UDK 371.3:53

Vsebina šolske fizike je bila od nekdaj model resnične fizike. Z uvajanjem lastnega eksperimentalnega dela učencev dodajamo šolski fiziki še simuliranje znanstvenih delovnih metod. Didaktične igre pa so primerno sredstvo za posnemanje vloge fizike v družbi. Pri pouku imajo tudi pomembno motivacijsko vlogo.

DIDACTICAL GAMES IN PHYSICS TEACHING

The contents of the school physics courses has been traditionally outlined as a model of real physics. By introduction of student's experimental work the model has been supplemented with the simulation of scientific processes. Didactical games can be used for simulating the role of physics in society. They could be also an important motivating factor in learning physics.

GOSAR PETER 264

POLPREVODNIKI

UDK 621.382

Predstavljeni so osnovni koncepti fizike polprevodnikov. Članek obravnava temperaturno odvisnost svojske upornosti, vpliv primesi na električne lastnosti in usmerjevalne lastnosti stikov p-n. Podana je preprosta slika procesov v diodah in transistorjih.

SEMICONDUCTORS

Basic concepts of the physics of semiconductors are presented. The paper discusses the temperature dependence of the intrinsic conductivity, the effect of impurities on the electrical properties, and the rectifying effect of p-n junctions. An elementary picture of the processes in diods and transistors is given.

HRIBAR MARJAN 253

UPORABA RADIOAKTIVNIH IZOTOPOV V TEHNIKI

UDK 539.16

Opisane so nekatere možnosti za uporabo radioaktivnih izotopov v tehniki. Predlagani so nekateri preprosti poskusi za šolsko rabo.

RADIOACTIVE ISOTOPES IN INDUSTRY

Some examples for the use of radioactive isotopes in engineering are described. A few school experiments are proposed.

HRIBAR MARJAN 249

UPORABA SEVANJA IN RADIOAKTIVNIH IZOTOPOV V MEDICINI

UDK 539.16

Sestavek vsebuje kratek pregled uporabe radioaktivnih izotopov v medicinski diagnostiki in terapiji.

RADIATION AND RADIOISOTOPES IN MEDICINE

The article gives a brief review of the use of radiation and radioactive isotopes in medical diagnostics and therapy.

KERNEL GABRIJEL 273

VELIKI RAZISKOVALNI INŠTITUTI IN MEDNARODNA RAZISKOVALNA PRIZADEVANJA

UDK 53:061.6

V članku je zapisanih nekaj splošnih ugotovitev o mednarodnih raziskovalnih organizacijah. Posebej so v skopih potezah obravnavane osnove raziskovalnega programa CERN v Ženevi.

GREAT RESEARCH INSTITUTES AND INTERNATIONAL RESEARCH ACTIVITY

Some general aspects of international research organizations are discussed. In particular, a brief review of basic ideas concerning the research in the field of elementary particles in CERN (Geneva) is given.

KLADNIK RUDI 199

ČLOVEK IN ENERGIJA

UDK 531.6

Predstavljene so energijske zahteve sodobne družbe za različne energijske vire: energija plimovanja, geotermična energija, sončna (direktna in indirektna) in jedrska energija. Za vsako vrsto energije je podana ocena razpoložljivih energijskih rezerv skupaj s pripadajočimi tehniški mi problemi.

MAN AND ENERGY

Energy requirements of the conteporary human society for different energy sources are discussed. These sources are: tidal energy, geothermal energy, solar (direct and indirect) energy, and nuclear energy. For each source the estimation of the available energy is illustrated together with the associated engineering problems.

KLADNIK RUDI 193

ENERGIJA IN SNOV

UDK 531.6

Podan je kratek pregled energijskega koncepta. Poudarek je na različnih oblikah energije ter na odnosu med energijo in maso. Opisane so nekatere reakcije, pri katerih se del lastne energije pretvarja v koristno obliko energije.

ENERGY AND MATTER

The development of the energy concept is briefly described with special regard for different forms of energy and the relation between the energy and the mass of the matter. Reactions are discussed in wich part of the mass rest-energy is transformed into usefull forms of energy.

KREGAR MITJA 224

KOPERNIKOV HELIOCENTRIČNI SISTEM

UDK 523.4(091)

Članek obravnava nastajanje Kopernikove heliocentrične teorije. Prikazan je vpliv pitagorejske metafizične ideje o popolnosti enakomernega krožnega gibanja na evropsko znanstveno misel od Kopernika do Keplerja.

COPERNICUS' HELIOCENTRIC SYSTEM

The article deals with the origin and basic ideas of Copernicus' heliocentric theory. The influence of the Pythagorean metaphysical idea of harmonious uniform circular mition upon the European scientific thought from Copernicus to Kepler is traced.

KREGAR MITJA 228

NEWTONOV GRAVITACIJSKI ZAKON

UDK 531.51(091)

Analizirano je odkritje gravitacijskega zakona. Osvetljeni so nekateri problemi, ki so povezani z razlago narave gravitacije.

NEWTON'S GRAVITATIONAL LAW

The discovery of Newton's gravitational law is analyzed. Some philosophical problems resulting from the interpretation of the nature of gravitation are discussed.

KREGAR MITJA 231

RAZVOJ ATOMSKE ENERGIJE DO 20. STOLETJA

UDK 539.18(091)

Opisana je zgodovina nauka o atomih od 16. do 19. stoletja s poudarkom na Boškovićevi atomski teoriji. Obravnavane so tudi nekatere filozofske dileme atomske teorije.

THE DEVELOPMENT OF THE ATOMIC THEORY UP TO 20th CENTURY

The development of the atomic theory of matter from 16th to 19th century is described, amphasizing the atomic ideas of Boscovich. Some philosophical dilemmas of atomic theory of matter are discussed.

LEKIĆ JELKA 283

OKO IN BARVE

UDK 535.62

V članku je na kratko obdelano zaznavanje barv. Obravnava barvno slepoto, barvo telesa in nastanek barvnega vtisa. Na koncu je omenjeno migotanje.

THE EYE AND COLOURS

The article gives a brief review of colour vision. Colour blindness, colours of an object and the perception of colours are described. Finally flickering effect is mentioned.

MANKOČ BORŠTNIK NORMA 241

ATOMSKI MODELI

UDK 539.182(091)

Atomski model je doživel nekajkrat v zgodovini korenite spremembe. Zahtevali so jih novi poskusi. Ko sledimo tem spremembam, laže dojamemo današnji model, ki temelji na valovni sliki delcev.

ATOMIC MODELS

Several times in the history new experimental data caused drastic changes of the atomic model. Having in mind these changes one can more easily understand the present atomic model, based on the wave picture of particles.

MANKOČ BORŠTNIK NORMA 245

RADAR

UDK 621.396.96

Radarji oddajajo v sunkih elektromagnetno valovanje in lovijo odmev. Ker je odmev po navadi mnogo šibkejši kot oddani sunek, je izdelava radarja zahtevna.

RADAR

Radar emits pulses of electromagnetic radiation and detects echoes. Since echoes are usually much weaker than pulses, the construction of radars is rather complicated.

MOLJK ANTON 298

FIZIKA IN DRUŽBA

UDK

V prispevku so nakazane vedno močnejše vezi med fiziko in družbo. Poleg obsega in rasti fizike so obravnavani kriteriji za znanstveni izbor in nekateri primeri mednarodnega sodelovanja.

PHYSICS AND SOCIETY

Increasing strength of interaction between physics and society is indicated. The representation of today's physics as well as criteria for scientific choice and some cases of international cooperation are discussed.

PAHOR JOŽE 259

SISTEMI, POVRATNE ZVEZE, REGULIRANJE KOLIČIN, AVTOMATIZACIJA

UDK 62-55,63-3

Obdelane so osnovne misli o reguliranju količin. Regulacijo lahko zagotovimo s povratno zanko ali s korektorjem, s katerim upoštevamo vse mogoče vplive.

SYSTEMS, FEEDBACK, REGULATION, AUTOMATIC REGULATION

Basic ideas about regulation of quantities are considered. The regulation can be achieved either by feedback or corrector where all possible influences are taken into account.

PAHOR JOŽE 256

SPEKTRALNA ANALIZA IN DANAŠNJE SPEKTROSKOPIJE

UDK 543.4, 535.33

V sestavku je vpeljan pojem spektralne porazdelitve in možnosti za njeno eksperimentalno določanje. Opisane metode so ilustrirane s primeri iz vsakdanjega življenja.

SPECTRAL ANALYSIS AND CONTEMPORARY SPECTROSCOPIES

In this contribution the concept of spectral distribution is given and the possibilities for its experimental determination are briefly discussed. All the presented methods are illustrated by means of examples from everyday life.

PETKOVŠEK ZDRAVKO 203

DOGAJANJA V ATMOSFERI Z VIDIKA ENERGIJE

UDK 551.51

Obravnavani so nekateri vidiki kratkovalovnega sončnega in terestičnega sevanja v atmosferi in možnost izrabe sončne energije. Poleg pretvarjanja energije v planetarni cirkulaciji atmosfere je obdelana še energija vetra v kotlinah. 310

ENERGETICS OF SOME ATMOSPHERIC PROCESSES

Some problems of short-wave and terrestial radiation in the atmosphere are treated together with the possible exploitation of solar energy. Energy transformation in atmospheric general circulation is considered as well as the potential energy of winds in mountain regions.

PETKOVŠEK ZDRAVKO 207

ENERGIJA IN VREMENSKI POJAVI

UDK 551.50

V članku so obdelane: energija, ki se sprosti v nevihtnem oblaku ob izdatni plohi, energija nestabilnosti pogojno nestabilne atmosferske plasti in energija, potrebna za razkroj radiacijske megle v srednje veliki kotlini.

ENERGY AND WEATHER PHENOMENA

The energy released in a thunderstorm cloud with considerable shower; energy of instability in conditionally unstable atmospheric layer and the energy needed for dissipation of the radiation fog in a moderate-size basin are presented.

STRNAD JANEZ 237

RAZVOJ KVANTNE MEHANIKE

UDK 530.145(091)

Od začetka našega stoletja so uvajali kvantne zakone, da bi pojasnili spekter črnega telesa, fotoefekt, emisijske spektre plinov, stabilnost atomov, uklon elektronov. Prispevek obravnava glavne rezultate kvantne mehanike in njen položaj v sodobni fiziki.

THE DEVELOPMENT OF QUANTUM MECHANICS

From the beginning of the 20th century quantum laws were introduced to describe black-body spectrum, photoelectric effect, emission spectra of gasses, stability of atoms, electron diffraction. The main results and the meaning of quantum mechanics in modern physics are discussed.

STRNAD JANEZ 234

RAZVOJ POSEBNE TEORIJE RELATIVNOSTI

UDK 530.12(091)

Proučevanje elektromagnetnega valovanja je na prelomu stoletja privedlo fiziko v zadrego, ki jo je rešila Einsteinova posebna teorija relativnosti. Prispevek omeni glavne rezultate teorije in nakaže, kako je Einsteinovo delo povezano z delom njegovih predhodnikov.

THE DEVELOPMENT OF SPECIAL RELATIVITY

The study of electromagnetic waves at the turn of the century led physics into a dilemma that was solved by Einstein's special theory of relativity. Main results of this theory are discussed briefly and the connection between Einstein's work and the work of his predecessors is indicated.

ŠULEK DRAGO 218

SVETLOBA IN LASERJI

UDK 535.374

Članek podaja kratek zgodovinski pregled teorij o svetlobi, obravnava časovno in prostorsko koherenco ter širino spektralne črte. Na koncu se dotakne fizikalnih osnov delovanja laserjev.

LIGHT AND LASERS

The article gives a short historical survey of theories on the nature of light, deals with the temporal and space coherence and with the width of the spectral line. At the end basic ideas about principles of laser construction and action are introduced.

TOMAŽIČ FEDOR 288

OKO

UDK 535.7

Opisan je preprost model človeškega očesa. Z računom dobi učenec podatke o sliki na mrežnici. Navedeni so tudi podatki o občutljivosti očesa, vlogi zenice in kritični utripalni frekvenci.

THE EYE

A simplified model of the human eye is described. By calculation the student gets information about the picture on the retina. The sensibility of the eye, the role of the pupil of the eye and the critical flicker frequency are also described.

ŽITNIK JANEZ 277

ZAZNAVANJE ZVOKA

UDK 534.7

V prispevku so opisane osnove fiziološkega zaznavanja zvoka. Navedeni so tudi nekateri poskusi, primerni za prikaz uvodnih pojmov pri pouku akustike.

PERCEPTION OF SOUND

In the article perception of sound with human ear is discussed and some basic experiments suitable for classroom presentation are described.

VSEBINA OBZORNIKA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO 25 (1978)
št. 1—6, str. 1—312

Članki — matematika

O teorijah (Vladimir Batagelj) 1
Formalna izgradnja logičnega jezika (Niko Prijatelj) 20
Izrek o dedukciji (Izidor Hafner) 34
Izračunljivost in rešljivost (Tomaž Pisanski) 41
Logika in množice v srednji šoli (Janez Rakovec) 55
Znanstveno delo Ivana Vidava (France Križanič) 71
Nekaj o kriptografskih metodah (Jure Zupan) 129
O širjenju epidemij (Jože Andrej Čibej) 161
Sociologija, psihologija in poučevanje matematike (Lars Gårding, prev. Tamara Bohte) 170

Članki — fizika

Kozmični delci (Mirko Cvahte) 97
Merjenje zornih kotov zvezd pri Luninem zakritju (Marijan Prosen) 102
Mikroskopična slika površinske napetosti (Marjan Hribar) 137
Energija in snov (Rudi Kladnik) 193
Človek in energija (Rudi Kladnik) 199
Dogajanja v atmosferi z vidika energije (Zdravko Petkovšek) 203
Energija in vremenski pojavi (Zdravko Petkovšek) 207
Planeti našega Osončja (Andrej Čadež) 210
Sonce (Andrej Čadež) 214
Svetloba in laserji (Drago Šulek) 218
Kopernikov heliocentrični sistem (Mitja Kregar) 224
Newtonov gravitacijski zakon (Mitja Kregar) 228
Razvoj atomske teorije do 20. stoletja (Mitja Kregar) 231
Razvoj posebne teorije relativnosti (Janez Strnad) 234
Razvoj kvantne mehanike (Janez Strnad) 237
Atomski modeli (Norma Mankoč-Borštnik) 241
Radar (Norma Mankoč-Borštnik) 245
Uporaba sevanja in radioaktivnih izotopov v medicini (Marjan Hribar) . . . 249
Uporaba radioaktivnih izotopov v tehniki (Marjan Hribar) 253
Spektralna analiza in današnje spektroskopije (Jože Pahor) 256
Sistemi, povratne zveze, reguliranje količin, avtomatizacija (Jože Pahor) . . . 259
Polprevodniki (Peter Gosar) 264
Kaj lahko še vidimo z mikroskopom? (Franc Cvelbar) 267
Razvoj eksperimentalne opreme in merilnih instrumentov (Franc Cvelbar) . . 270
Veliki raziskovalni inštituti in mednarodna raziskovalna prizadevanja (Gabrijel Kernel) 273
Zaznavanje zvoka (Janez Žitnik) 277
Moč človeka (Mirko Cvahte) 281
Oko in barve (Jelka Lekič) 283
EKG (Zlatko Bradač) 285
Oko (Fedor Tomažič) 288
Didaktične igre pri pouku fizike (Janez Ferbar) 292
Fizika in družba (Anton Moljk) 298

Novice

Prosti kvarki? (Janez Strnad) 90
Milankovićevo teorijo so potrdili (Zdravko Petkovšek) 93
Termični šum (Janez Žitnik) 106

Šola

Šolska astronomska opazovalnica (Marijan Prosén) 94
Študij matematike na moskovski univerzi M. V. Lomonosova (Dušan Repovš) 109
Uporaba analognega računalnika v šoli (Zlatko Bradač) 112
Sij razsežnega svetila (Marijan Prosén) 120
Posvetovanje o matematiki in fiziki v reformirani šoli (Martina Koman, Anton Moljk, Stanko Uršič, Aleksander Kregar, Marija Munda, France Perne, Franc Galič, Anton Moljk) 144

Domače vesti

Šestdeset let profesorja Ivana Vidava (France Križanič) 65
Ob šestdesetletnici Ivana Vidava (Zvonimir Bohte) 87
Letno poročilo oddelka za matematiko IMFM za študijsko leto 1976/77 (Jože Vrabec) 122

Poročilo o seminarju Matematična logika (Martina Koman) 152
Deseto zvezno tekmovanje študentov matematike (Mirko Dobovišek) 154
Razmišljanje o tekmovanju iz matematike (Ciril Velkovrh) 157
Finančno poročilo komisije za tisk DMFA SRS od 1. 9. 1976 do 31. 12. 1977 (Janez Markelj) 177
Ples matematikov, fizikov in astronomov (Katarina Košmelj in Rajko Sabo) 179
Seznam diplomantov prve, druge in tretje stopnje iz matematike in fizike ter resumeji doktorskih disertacij v letu 1977 (Zbral in uredil Ciril Velkovrh) 180
Nagrajenci Sklada Borisa Kidriča v letu 1978 (Zbral in uredil Ciril Velkovrh) 186
Fizika za družboslovce (Aleksander Kregar) 304

Nove knjige
Egon Zakrajšek, Programski jezik PASCAL (Vladimir Batagelj) 96
France Križanič, Liejeve grupe (Peter Legiša) III/2
Dostopnejše nove knjige v matematični knjižnici (Stanislav Zorko) III/2
Publikacije komisije za tisk DMFA SRS v letu 1977 (Ciril Velkovrh) IV/2
Dirk J. Struik, Kratka zgodovina matematike (Zvonimir Bohte) 136
Postdiplomski seminar iz matematike in fizike (Ciril Velkovrh) IV/4
V letu 1977 smo prejeli naslednje revije v zameno za Obzornik za matematiko in fiziko (Stanislav Zorko) III/5

Prejeli smo v oceno
W. Krabs, Optimierung und Approximation (France Križanič) III/1
M. Braun, Differential equations and their applications (France Križanič) . . . III/1
Amorphous semiconductors (Igor Vilfan) IV/1
Bela Andrasfai, Introductory graph theory (Tomaž Pisanski) IV/1
Morris W. Hirsch, Differential topology (Marko Kranjc) 127
K. W. Gruenberg, A. J. Weir, Linear geometry (Janez Rakovec) 127
Proceedings of the summer school on optoelectronics and integrated optics (Boris Vedlin) 128
W. S. Massey, Algebraic topology (Peter Petek) 128
How to write mathematics (Jože Vrabec) III/3
Serge Lang, Complex analysis (Peter Legiša) III/3
C. Berge, Graphes et hypergraphes (Vladimir Batagelj) IV/3
Show Yutze, Modern abstract algebra (Jože Vrabec) 158
Joram Lindenstrauss and Lior Tzafriri, Classical Banach spaces I, Sequence spaces (Peter Legiša) 158
Pal Quittner, Problems, programs, processing (Tomaž Pisanski) 159
Alain Bouvier, Theorie elementaire des series (Tomaž Pisanski) 159
Arlen Brown, Carl Pearcy, Introduction to operator theory I (Gabrijel Tomšič) 159
Sparse matrix techniques (Zvonimir Bohte) 160
Impulse in der Grenzphysik (Janez Strnad) , ... 160
M. H. Protter, C. B. Morrey, A first course in real analysis (Tomaž Slivnik) . . III/4
N. Koblitz, p-adic numbers, p-adic analysis and zeta-functions (Jože Grasselli) III/4
Jack E. Graver, Mark E. Watkins, Combinatorics with emphasis on the theory of graphs (Tomaž Pisanski) 189
Lars Garding, Encounter with mathematics (France Križanič) 190

Bibliografija Ivana Vidava do leta 1977 (Danica Dobrovoljc in Ciril Velkovrh) 67

Vprašanja
111 (Boštjan Hostnik) 96
112 (Dušan Repovš) 151
113 (Tomaž Pisanski) 169
114 (Tomaž Pisanski) 169
115 (Dušan Repovš) 176

Odgovori
108 (Gorazd Cvetič) 121
46 (Dušan Repovš) 188

Utrinki
Nicolas Bourbaki (Dušan Repovš) 105
Fizika in filozofija (Janez Strnad) 108
Evgenij Onegin (Dušan Repovš) 126
Zgodba o rdeči kapici 185

Obvestila — vabila
Obvestilo 101
Tradicionalno srečanje matematikov in fizikov (Rajko Sabo) IV/3
30. jubilejni občni zbor Društva . . . (Ivan Pavliha) III/5