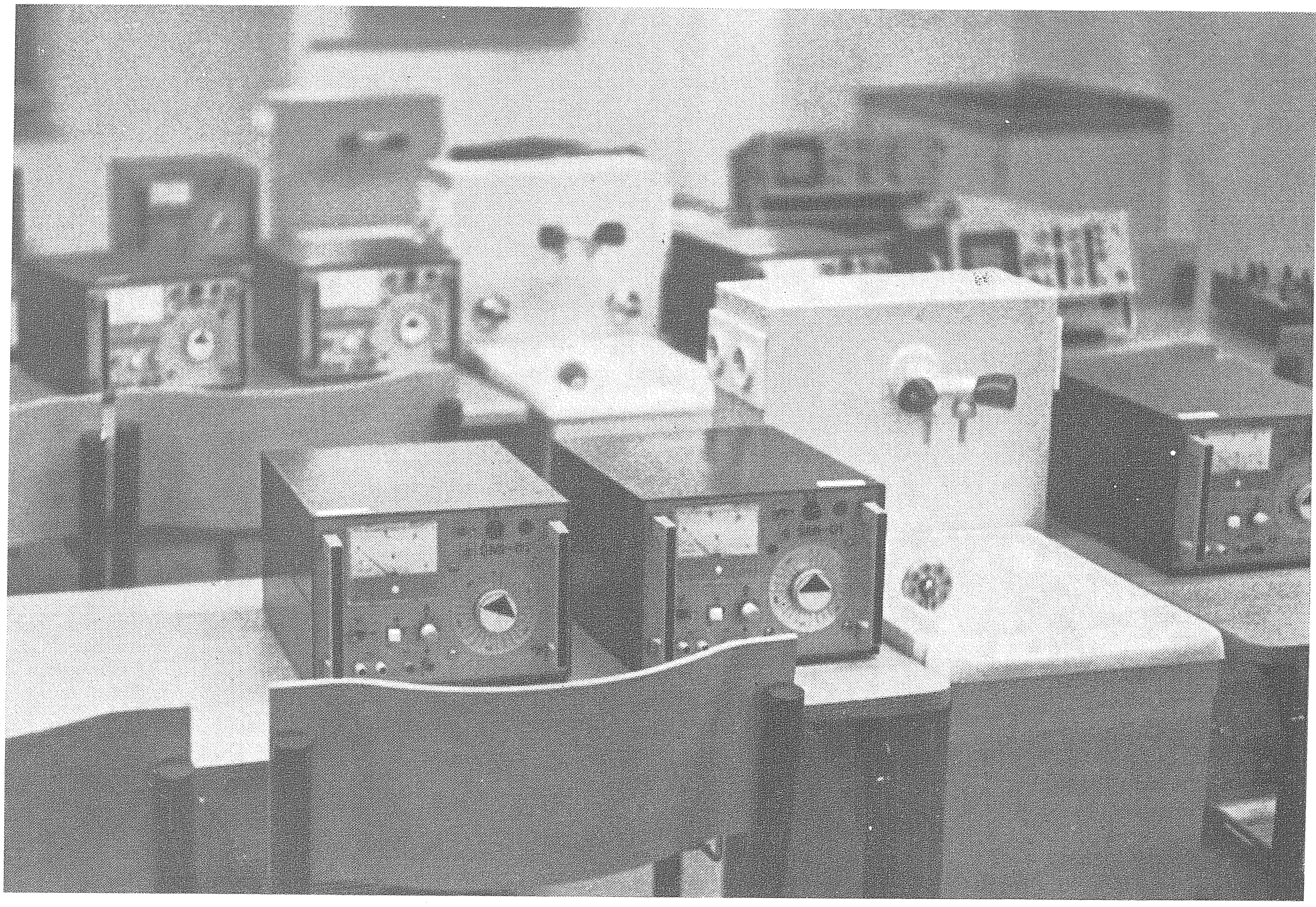
IZDAJA DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SR SLOVENIJE

YU ISSN 0473-7466

1982
Letnik 29
5/6

OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO



LETNIK 29. — ŠTEVILKA 5/6

OBZORNIK ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

LJUBLJANA, OKTOBER 1982

Glavni urednik: Edvard Kramar, **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; jezikovni pregled Marija Janežič, inštitut za slovenski jezik SAZU. Slike je narisal Miha Štalec.

Naročnina: za posameznike 300.— din (za člane društva je že vračunana članarina), za dijake in študente 150.— din, za ustanove in podjetja 500.— din, za tujino 20 $ = 800.— din, posamezna številka 100.— din, dvojna številka 200.— din.

Dopise pošiljajte in list naročajte na naslov: Društvo matematikov, fizikov in astronomov SRS — Komisija za tisk — Obzornik za matematiko in fiziko, 61111 Ljubljana, Jadranska 19, p. p. 6, tel. (061) 265-061/53, žiro račun 50100-678-47233.

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

Izdajo revije sofinancirata Izobraževalna skupnost Slovenije in Raziskovalna skupnost Slovenije.

© 1982 DMFA SRS — 584

Poštnina plačana na pošti 61102 Ljubljana

VSEBINA

Članki
Svetloba v megli (Ivan Kuščer) 129
Težave pri pouku kvantne fizike (Janez Strnad) 141
Fotoelektrične lastnosti polprevodnikov (Peter Gosar) 155
Osnovni delci in osnovne interakcije (Mitja Rosina) 162
Tri leta, dve šoli, ena fizika (Janez Ferbar) 178
Varnost pri pouku fizike (Zlatko Bradač) 189
Prostori, napeljave in osnovna oprema za fiziko (Janez Ferbar, Janez Rovanšek, Tomaž Skulj) 195
Nove knjige
Laue M., Kratka zgodovina fizike, prev. Janez Strnad (Seta Oblak) 140
Kladnik R., Reaktorska fizika (Gvido Pregl) 154
Domače vesti
Priznanja učiteljem — vabilo (Martina Koman) 188
Seminar za učitelje fizike (Seta Oblak) 194
34. občni zbor DMFA SRS — vabilo (Janez Stepišnik) 208

CONTENTS

Articles
Light in fog (Ivan Kuščer) 129
Dificultuies in the teaching of quantum physics (Janez Strnad) 141
Photoelektric properties of semiconductors (Peter Gosar) 155
Elementary particles and elementary interactions (Mitja Rosina) 162
Three years, two schools, one physics (Janez Ferbar) 178
Safety in teaching of physics (Zlatko Bradač) 189
Rooms, instalations and basic equipment for physics (Janez Ferbar, Janez Rovanšek, Tomaž Skulj) 195
New books 140, 154
Home news 188, 194, 208

Na ovitku: Oprema (instalacijski bloki, napetostni izviri, laboratorijska pohištvena oprema) v prostorih za pouk naravoslovja omogoča učencem in učiteljem sodoben eksperimentalni pouk fizike. (Foto Tomaž Skulj)

Obzornik mat. fiz. 29 (1982) 5/6

SVETLOBA V MEGLI

IVAN KUŠČER

UDK 535.36

Difuzijo svetlobe v motnem sredstvu, npr. v megli, opišemo z linearizirano Boltzmannovo enačbo. Globoko v notranjščini homogene neabsorbirajoče megle pa velja difuzijski zakon, ki omogoča poenostavljen opis.

LIGHT IN FOG

Diffusion of light in a turbid medium, e.g. fog, is governed by the linearized Boltzmann equation. Deep in the interior of uniform nonabsorbing fog, a simplified description in terms of the diffusion law is possible.

Nedavno sem se s študentom fizike pogovarjal o svetlobnih pojavih v ozračju. Prejšnji dan je prvikrat v svojem življenju zagledal dve mavrici, vendar ne da bi opazil uklonske pasove, ki obrobljajo vsako mavrico. Zazdelo se mi je, da je nemara šola kriva, da fant ni že prej videl pojavov, ki so se mu že kdo ve kolikokrat kazali na nebu. Mlade ljudi natrpamo s papirnato učenostjo, da dojemajo le še besede, črke in enačbe. Zatremo jim sposobnost samostojnega opazovanja, ki si jo je pračlovek najbrž brez težave pridobil ob domači vzgoji.

Pouk fizike ima po mnenju nekaterih za glavno nalogo, da človeka seznani z matematičnim opisom naravnih zakonov. Drugi pravijo, da je treba spoznati, kako delujejo šivalni stroj, lokomotiva in televizor. Ob vseh teh velikih dolžnostih pozabljamo, da bi bilo treba mladega človeka tudi naučiti, da ne bi hodil slep po naravi, ampak da bi videl pojave in da bi o njih razmišljal. Najlepšo priložnost za neprisiljen pogovor o takih rečeh najdemo na izletu. Oglejmo si torej témo takšnega razgovora, in sicer s stališča učitelja! Seveda bom povedal več, kot bi si upal učencem, in tudi kako enačbo bom zapisal, ki je na izletu ne bi mogel.

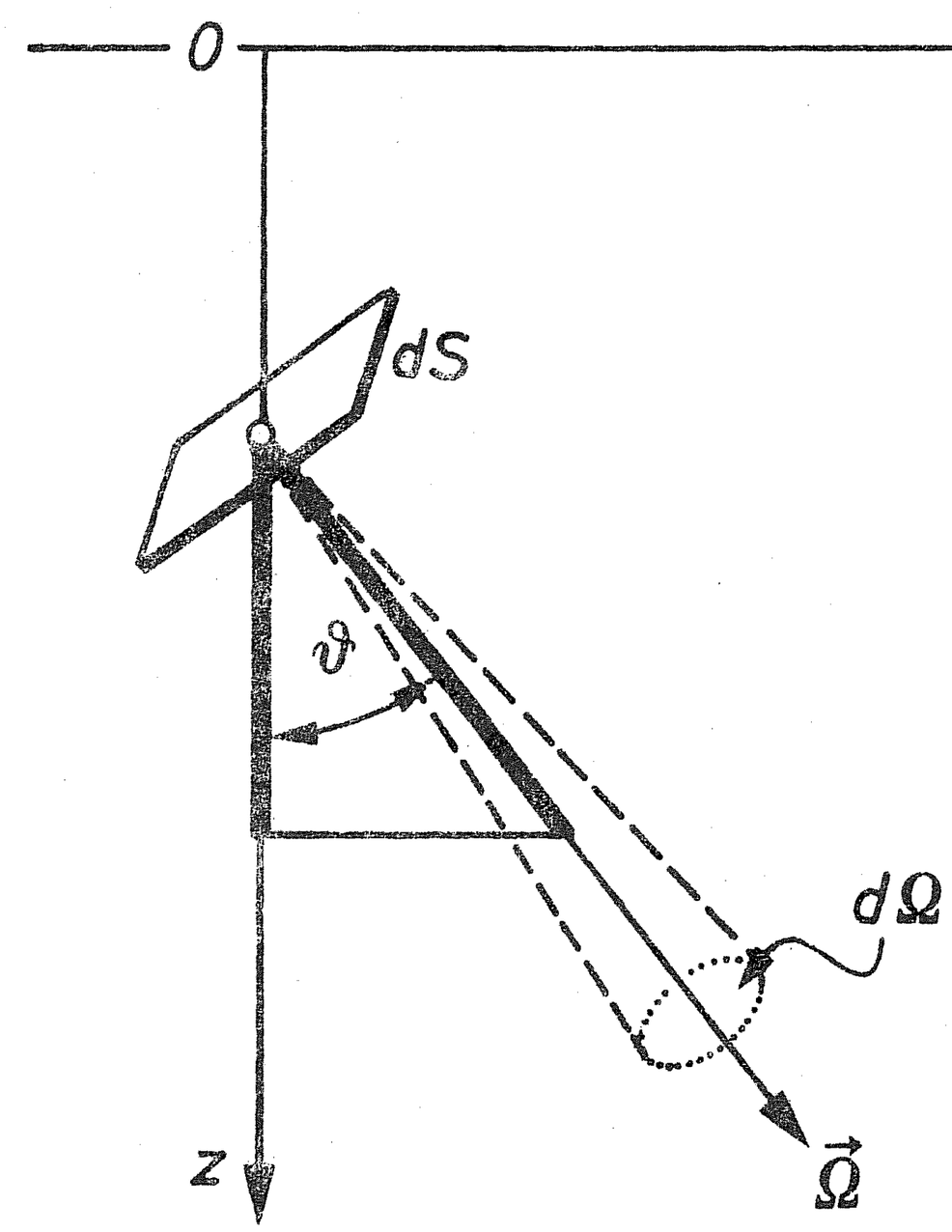
1. Svetlost megle

V jesenskem jutru se peljemo proti Tržiču in izstopimo v Križah, da jo mahnemo navkreber proti Križki gori. Megla je še in vse je zavito v dolgočasno sivi-

no. Prav, pa se pogovarjajmo o megli! Gotovo je več sto metrov debela, kajti Sonca ne vidimo skoznjo. Čudno je pravzaprav, da sploh kaj vidimo. Kako pride svetloba do nas, če naravnost ne more?

Svetloba gre po hudo zveriženih poteh. Na vsaki kapljici se je nekaj razsuje, tako da jo kapljice podajajo druga drugi. V vseh smereh potujejo svetlobni valovi, česar si ni lahko predstavljati. Lahko pa se spomnimo, kakšni so valovi na morju, kadar ob viharju butajo ob obalne čeri. Kdor bi si upal risati žarke, bi moral postreči z nepregledno množico cikcakastih črt od kapljice do kapljice ali od čeri do čeri.

Ali se da tako neurejeno valovanje sploh opisati? Ne da se, če vztrajamo pri natančnem opisu vsake potankosti. Lahko pa napredujemo, če se odpovemo natančnemu opisu in se zadovoljimo s primernimi povprečji. Še marsikje v fiziki tako delamo. Ko govorimo o ravnovesnem stanju snovi, si ne želimo natančnega opisa za termično gibanje delcev, iz katerih je snov zgrajena. Popolnoma zadošča, da poznamo povprečne lastnosti tega gibanja, zlasti temperaturo.



Sl. 1. K pojmu svetlost megle.

Pri svetlobi lahko vprašamo, kolikšen energijski tok gre v povprečju skozi namišljen okvir dS v smereh, ki so blizu pravokotnice in znotraj majhnega prostorskega kota $d\Omega$ (Sl. 1). Vrednost preračunamo na ploščinsko enoto in na enoto prostorskega kota, da dobimo svetlost megle. Saj res, ko buljimo v meglo, se zazdi, kot da gledamo v bel papir z neko svetlostjo. Kadar nam je mar le za energijo, lahko povemo svetlost v wattih na m^2.steradian. Ob poznavanju spektra in z upoštevanjem spektralne občutljivosti očesa bi prišli do "vidnih" wattov na m^2.steradian. Kdor se je voljan podrediti enotarskim kapricam, pa lahko vzame 683-krat manjšo kandelo (svečo) na m^2.

Če nas zanima tudi porazdelitev po spektru, vpeljemo spektralno svetlost, to je svetlost na enoto intervala v spektru (npr. na nanometer, če merimo valovne

dolžine). Še polarizacijo bi bilo treba upoštevati, da bi bila porazdelitev svetlobe do take mere natančno opisana, kot bi jo v načelu lahko preverjali z meritvami. Da ne bo dolgočasnih zapletov, pa se za spektralno porazdelitev in polarizacijo v nadaljnjem ne bomo menili, ampak bomo računali le s celotno svetlostjo.

Ko se vzdigujemo v hrib, se megla prav polagoma svetli. Učenec, ki ima pri svojem fotoaparatu svetlobni merilnik, ugotavlja, kolikšne so spremembe. Ugotovi tudi, da je megla nad nami videti svetlejša kot v vodoravnih smereh. Svetlost megle (I) je torej odvisna od kraja (r) in od smeri sprejete svetlobe. Smer opišemo z enotnim vektorjem Ω, torej

$$I = I(\mathrm{r}, \Omega) .$$

V najpreprostejšem primeru je svetlost megle odvisna samo od navpične koordinate in od naklonskega kota proti navpični osi: $I = I(z, \vartheta)$. S tem primerom se bomo največ ukvarjali.

2. Difuzija svetlobe

Iz svetlosti megle bomo izpeljali dve pomožni količini, ki še bolj grobo opisujeta porazdelitev svetlobe. Poenostavitev sicer zanemari kako potankost, a prispeva k preglednosti.

Svetlobni tok $I dS d\Omega$, ki gre skozi namišljeni okvir dS v prostorski kot $d\Omega$, pomnožimo z dt, da zvemo za energijo, ki pride v času dt skozi okvir in ki je ta hip znotraj prizme s prostornino $dS c dt$, če je c svetlobna hitrost. S tem izrazom delimo, da dobimo prispevek $c^{-1} I d\Omega$ h gostoti svetlobne energije. Samo še po vsem prostorskem kotu moramo sešteti, da dobimo celotno gostoto svetlobe na kraju r,

$$u(\mathrm{r}) = c^{-1} \int I(\mathrm{r}, \Omega)\, d\Omega . \qquad (1)$$

V energijskem merilu je enota za u joule na m^3.

Drugo zanimivo količino dobimo, če namesto prispevkov k energijski gostoti seštejemo kar svetlobne tokove, in sicer jih moramo sešteti vektorsko. Velikost posameznega prispevka je, kot rečeno, $I dS d\Omega$. To pomnožimo s smernim vektorjem Ω in delimo z dS, da dobimo prispevek h gostoti svetlobnega toka. S seštevanjem dobimo celotno gostoto svetlobnega toka (npr. v wattih na m^2),

$$\mathrm{j}(\mathrm{r}) = \int I(\mathrm{r}, \Omega)\, \Omega\, d\Omega . \qquad (2)$$

V megli je ta tok usmerjen od zgoraj navzdol, čeprav morda ne natanko navpično. Reči smemo, da je to neto tok, kajti j samo pove, koliko več svetlobnega toka gre od zgoraj navzdol kot v nasprotnih smereh. Kadar je na tleh sneg, ki vso svetlobo odbija, gre v vsaki plasti megle enako mnogo svetlobe navzgor kot navzdol, tako da je tedaj $\mathbf{j} = 0$. V tem posebnem primeru je znotraj megle povsod enako svetlo, torej $u = \text{const}$.

Zadnja ugotovitev napeljuje na misel o povezavi med obema količinama. Kadar ni snega, je pri tleh bolj tema kot v višjih plasteh megle. Svetloba teče navzdol, da se nazadnje absorbira v tleh. Vektor $\mathbf{j}$ kaže torej v smer, v kateri u pojema. Domnevamo, da velja sorazmernost, ki je znana kot difuzijski zakon,

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = -D \operatorname{grad} \mathbf{u}(\mathbf{r}) . \qquad (3)$$

Kmalu se bomo prepričali, da zakon kar dobro drži v notranjščini enakomerno goste megle. S črko D smo zaznamovali difuzijski koeficient, katerega dimenzijo opišemo z enoto m^2/s.

Prav tak zakon rabimo za opis difuzije v zmesi dveh snovi. Gostota delnega snovnega toka je tu sorazmerna z gradientom delne gostote, $\mathbf{j}_1 = -D \operatorname{grad} \rho_1$. Podobno je pri prevajanju toplote: gostota toplotnega toka je sorazmerna s temperaturnim gradientom, $\mathbf{j}_Q = -\lambda \operatorname{grad} T$. Spomnimo se še, da je pri strižnem gibanju tekočine napetostni tenzor sorazmeren z deformacijsko hitrostjo, to je s simetriziranim gradientom hitrosti, $\sigma = 2\eta \operatorname{def} \mathbf{v}$. Analogija se razodene, ko predstavimo σ kot negativno gostoto toka gibalne količine, ki se prenaša od plasti do plasti. Da bo mera polna, naj omenimo še Ohmov zakon, ki pravi, da je gostota električnega toka v snoveh sorazmerna z električno poljsko jakostjo, torej z gradientom napetosti, $\mathbf{j}_e = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \operatorname{grad} U$. Pri tem je σ električna prevodnost, to je obratna vrednost specifičnega upora.

Nobeden teh zakonov ne velja natančno, a jih kljub temu radi uporabljamo za makroskopski (fenomenološki) opis transportnih pojavov. V prvih treh primerih, kjer imamo opravek samo z gostotami in tokovi ohranjajočih se količin (mase, energije, gibalne količine), govorimo tudi o hidrodinamičnem opisu. To je najbolj grob opis takih pojavov.

3. Boltzmannova enačba

Da bomo prišli do difuzijskega zakona, se moramo vrniti k prejšnjemu opisu svetlobe v megli, ki je za stopnjo bolj podroben. Najprej potrebujemo enačbo, ki se ji pokorava svetlost $I(\mathbf{r},\Omega)$. Še enkrat si oglejmo curek $I dS d\Omega$, ki gre skozi

okvir dS! Ko gremo s curkom za pot ds naprej, se del svetlobe razsuje. Sama ta izguba bi povzročila sorazmerno oslabitev curka, podobno kot pri absorpciji. Po deljenju z $dSd\Omega$ zapišemo ugotovitev takole

$$dI = -Ids/\ell \ , \tag{4}$$

pri čemer je $1/\ell$ tako imenovani ekstinkcijski koeficient. Pretirano nazorno si predstavljamo, da je ℓ povprečna prosta pot fotonov. Bolje rečeno, ℓ je razdalja, na kateri se vzporeden curek e-krat oslabi. Razdalja vidljivosti, ki jo navajajo v vremenskih poročilih, meri kake 4 proste poti.

To še ni vse. Upoštevati je treba, da se curku med potjo pridružuje svetloba, ki se ravno v to smer razsuje iz drugih curkov. Delež tega sipanja je kajpada odvisen od sipalnega kota δ, ki ga oklepata smerna vektorja Ω' in Ω pred sipanjem in po njem, torej $\cos\delta' = \Omega \cdot \Omega'$. Če vpada na kapljico svetloba v smeri Ω', bomo relativni delež sipanega svetlobnega toka, ki gre v prostorski kot $d\Omega$ okrog smeri Ω, zaznamovali s $K(\cos\delta)d\Omega$. S tem smo vpeljali sipalno funkcijo $K(\cos\delta)$. Kdor v mislih šteje fotone, poreče, da je $Kd\Omega$ verjetnost za navedeno sipanje.

Sipane prispevke seštejemo in jih dodamo izrazu (4) za spremembo dI. Po deljenju s potjo ds dobimo iskano enačbo,

$$\partial I(\mathbf{r},\Omega)/\partial s = \ell^{-1}\left[-I(\mathbf{r},\Omega) + \int K(\cos\delta) I(\mathbf{r},\Omega')\, d\Omega'\right] . \tag{5}$$

Na levi je zapisan odvod v smeri Ω, torej

$$\partial I/\partial s = \Omega \cdot \mathrm{grad}\, I = \mathrm{div}(\Omega I) \ . \tag{6}$$

V primeru, ko je $I = I(z,\vartheta)$, je kar $\partial I/\partial s = \cos\vartheta\, \partial I/\partial z$.

V čisti megli brez saj in druge umazanije ni v vidnem spektralnem območju skoraj nobene absorpcije. To bomo radi verjeli, ko bomo z vrha hriba videli bleščeče belo megleno morje. Vsaka kapljica razsuje ravno tolikšen svetlobni tok, kolikršnega prestreže. Drugače povedano: vsota vseh relativnih deležev $Kd\Omega$ je enaka 1,

$$\int K(\cos\delta)\, d\Omega = 1 \ . \tag{7}$$

Iz sipalne funkcije lahko izračunamo, za kolikšen kot se svetloba pri sipanju v povprečju odkloni. Bolj pripravno je, da definiramo povprečni kosinus sipalnega kota — takole:

$$\langle\cos\delta\rangle = \int \cos\delta\ K(\cos\delta)\, d\Omega \ . \tag{8}$$

Kasneje bomo potrebovali ta podatek. Pri megli je $<\cos\delta>$ vselej pozitiven, ker se pri sipanju večji del svetlobe odkloni za oster kot in manjši za top kot *(Mieov pojav).* Vsekakor je sipanje anizotropno.

Ves čas smo molče privzeli, da sta tako ℓ kot K za vse barve enaka. Za meglo to kar dobro drži; saj drugače ne bi bila bela. V bolj splošnem primeru pa bi bilo treba I razdeliti na ozke spektralne intervale, kot smo že omenili, in zapisati enačbo za vsako valovno dolžino posebej.

Zgoraj zapisana integrodiferencialna enačba je ena izmed mnogih inačic *Boltzmannove enačbe,* ki določa krajevno in smerno (in v splošnem še energijsko ali frekvenčno) porazdelitev delcev ali valov, ki se neprestano sipajo. Enačba je posebno pomembna v kinetični teoriji, kjer je z njo uspelo kvantitativno razložiti transportne lastnosti plinov: difuzijo, prevajanje toplote, viskoznost. Ljudje, ki so se ukvarjali z difuzijo svetlobe, so kmalu po Boltzmannu neodvisno prišli do takšne enačbe in z njo obravnavali difuzijo svetlobe skozi mlečno steklo ali skozi meglo ali skozi zvezdno materijo.

Pred dobrim stoletjem, ko je Ludwig Boltzmann odkril svojo enačbo, je bilo to veliko dejanje, ki je za dolgo dobo zaplodilo vnete raziskave na vsakovrstnih področjih. Tudi sicer je bil Boltzmann v znanosti precejšen revolucionar in povrh še filozof. Zlasti je sijajno zabavljal čez druge filozofe.

4. Izpeljava difuzijskega zakona

Ko integriramo obe strani Boltzmannove enačbe po prostorskem kotu, dobimo na desni nič. Na levi zamenjamo integracijo z odvajanjem, nakar sledi tako imenovana kontinuitetna enačba za svetlobni tok,

$$\mathrm{div}\,\mathbf{j} = 0 \quad . \tag{9}$$

Enačba pove, da se svetloba pri difuziji v popolnoma beli megli ohranja. Ime se splošno rabi za diferencialne enačbe, ki izražajo ohranitvene zakone.

V primeru, ko je svetlost megle odvisna samo od ene koordinate (z), se kontinuitetna enačba poenostavi: $dj/dz = 0$. Tedaj je torej celotni svetlobni tok skozi vso meglo enak: j = konst.

Zdaj pa poskusimo, ali se da s kako bolj zvito integracijo izpeljati tudi difuzijski zakon! Po brezuspešnem ugibanju zasumimo, da ta zakon nemara sploh ne velja vedno. Dokazi neresničnih trditev so namreč najbolj trdovratni.

Sum podpremo z namišljenim zgledom. Predstavljamo si, da z veliko lečo zberemo sončno svetlobo v konvergenten curek, ki ga namerimo v meglo. Proti go-

rišču gostota svetlobne energije očitno narašča, čeprav se je nekaj razsuje. Prav tja pa je tudi usmerjen neto svetlobni tok. Teče torej nasprotno, kot bi hotel difuzijski zakon.

Kljub matematičnemu neuspehu fizik še ne da miru z vprašanji: Ali morda vendarle smemo računati z difuzijskim zakonom v primerih, ko ima svetlobna porazdelitev posebno preprosto obliko? Porazdelitev globoko v notranjščini megle je nemara takšne vrste.

Poskusimo, ali obstaja takšna rešitev Boltzmannove enačbe, ki je linearna funkcija naklonskega kosinusa:

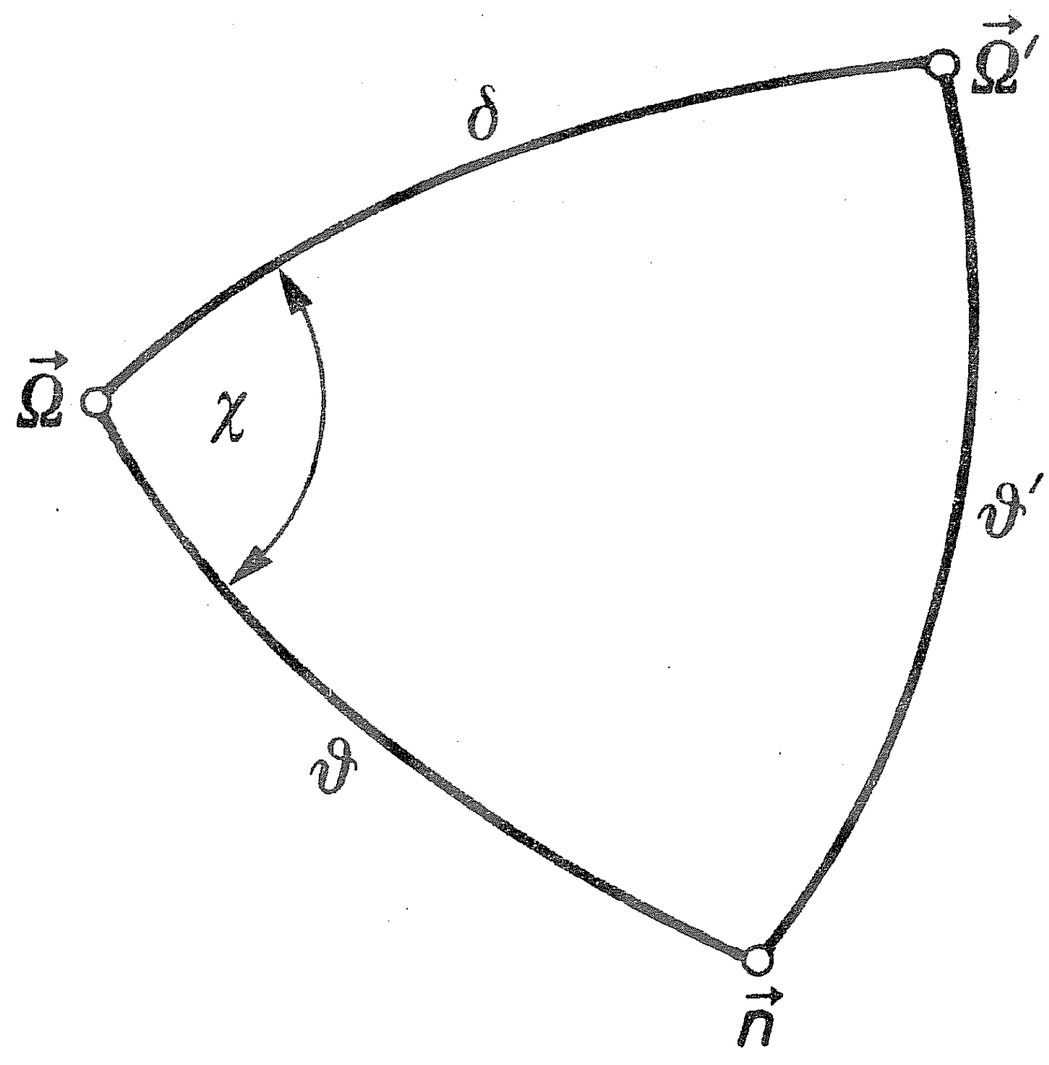
$$I(z,\vartheta) = (c/4\pi)u(z) + (3/4\pi)j\cos\vartheta \ . \qquad (10)$$

Koeficientoma ni bilo treba dajati novih imen, ampak smo uporabili dosedanje definicije. Preskus potrdi, da se u in j ujemata s svetlobno gostoto in z neto gostoto toka, ki ju izračunamo iz domnevnega $I(z,\vartheta)$.

Nastavek (10) uporabimo v Boltzmannovi enačbi. Na levi odpade od koordinate neodvisni člen, na desni pa se zaradi enačbe (7) uničita člena z u. Faktor $\cos\vartheta'$ v integrandu izrazimo s kosinusnim izrekom iz sferne trigonometrije (Sl. 2),

$$\cos\vartheta' = \cos\vartheta\cos\delta + \sin\vartheta\sin\delta\cos\chi \ .$$

(Izrek izpeljemo s skalarnim množenjem vektorjev n in Ω', ki ju poprej izrazimo v koordinatnem sistemu, v katerem je Ω tretja os.)



Sl. 2. Sferni trikotnik, ki povezuje konice enotnih vektorjev Ω, Ω' in n. Slednji kaže v smeri osi z (navpično navzdol).

Integracijo sedaj brž opravimo. Po kratkem premetavanju res sledi difuzijski zakon,

$$j = -D\,du/dz \ , \qquad (11)$$

in sicer z naslednjo vrednostjo difuzijskega koeficienta,

$$D = \ell c/3(1 - \langle\cos\delta\rangle) \ . \qquad (12)$$

Obstajajo tudi rešitve Boltzmannove enačbe z eksponentno krajevno odvisnostjo,

$$I(z,\vartheta) = f(\vartheta)\, e^{-\alpha z} \quad ,$$

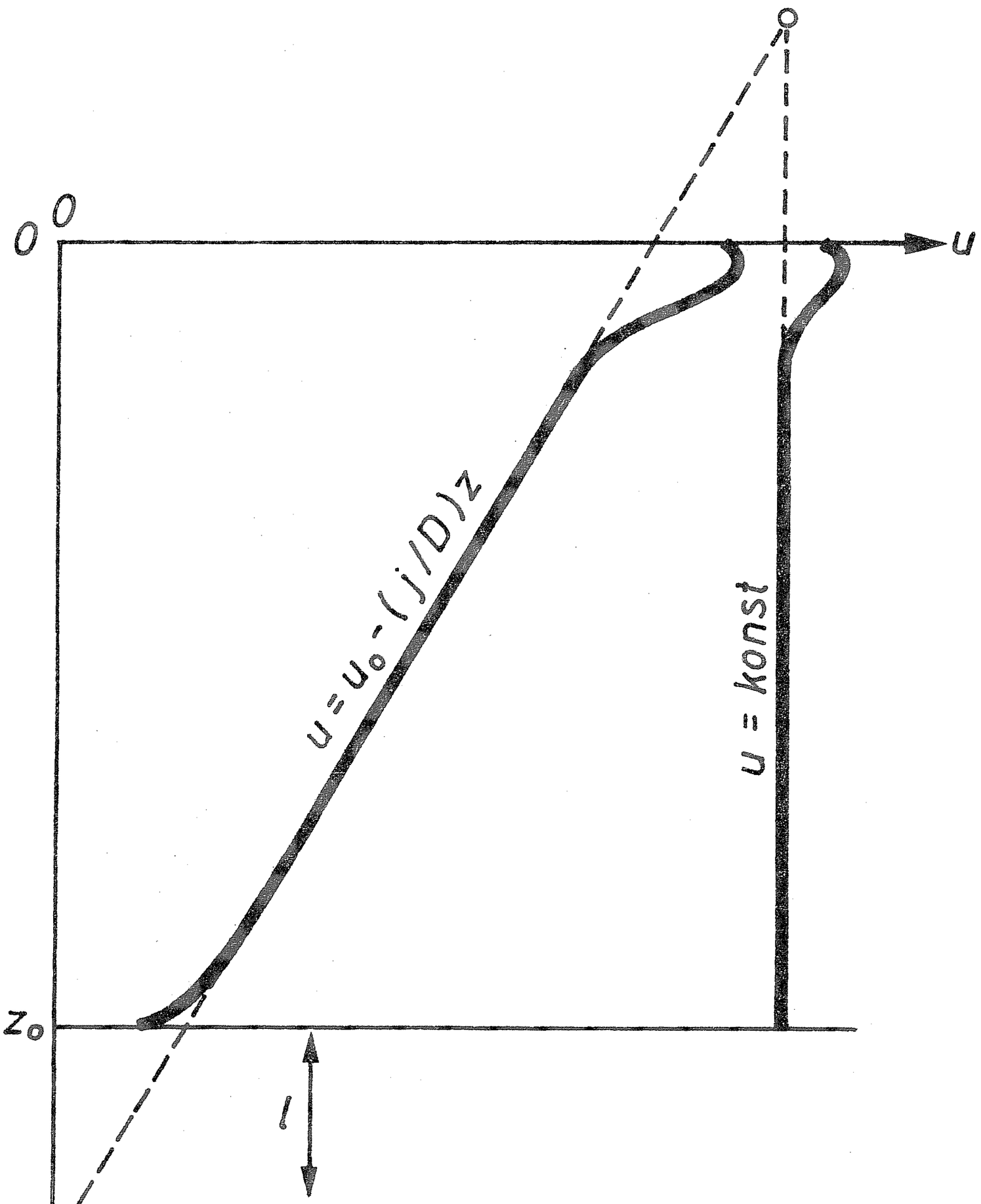
pri čemer ima α najmanj enako stopnjo velikosti kot ekstinkcijski koeficient. Pojemanje je torej tako hitro, da takšna rešitev izgine že po prehodu nekaj prostih poti debele plasti. Zdaj pa pride glavno: Posrečilo se je dokazati, da tvorijo te rešitve, skupaj s tisto iz enačbe (10), dovolj bogato množico, da iz njih lahko sestavimo poljubno rešitev linearne Boltzmannove enačbe. Tudi porazdelitev, ki se ustali v megli, ko jo z vrha osvetljuje Sonce, se da tako izraziti. Eksponentni prispevki k celotni rešitvi so zaznavni samo v površinskih plasteh, ki so po nekaj prostih poti debele; v notranjščini pa popolnoma prevladuje rešitev (10). Zato tam velja difuzijski zakon.

Izraz (12) za difuzijski koeficient lahko primerjamo s tistim iz elementarnih učbenikov kinetične teorije plinov, $D = \ell <v>/3$. Ker vse molekule nimajo enako velikih hitrosti, je treba vstaviti povprečje $<v> = (8kT/\pi m)^{1/2}$. Anizotropije pri sipanju pa ti učbeniki ne upoštevajo; saj vidimo, da manjka faktor $(1 - <\cos\delta>)$ v imenovalcu. Tako izračunani D je zato nekoliko premajhen. Podobni izrazi in podobne pripombe veljajo za kvocienta $\lambda/\rho c_p$ in η/ρ pri prevajanju toplote in pri viskoznosti.

5. Ko zapade sneg

Vsakdo je že opazoval, kako se svetloba na dnu megle ojači, če pokrajino pobeli sneg. Dokler so tla kopna, je pod debelo meglo mračno, da je skoraj potrebna luč. Že po kratkem sneženju pa se zazdi, kot bi se vsak hip hotelo zjasniti, čeprav se megla ni dosti spremenila.

Prejšnja razlaga vse pove. Ker je j = konst, sledi iz difuzijskega zakona $j = -D\,du/dz$, da je svetlobna gostota linearna funkcija globine, $u = u_0 - (j/D)z$. Tok j določa, kako strmo pojema svetlobna gostota. Omenili smo že, da je nad snegom, ki vso svetlobo odbija, celotni tok enak nič. V notranjščini megle je v takem primeru do tal enako svetlo kot blizu vrha: u = konst. Največji svetlobni tok dobimo, če so tla črna. Tedaj je gostota pri tleh prav majhna, kot kaže sl. 3. Z nje približno razberemo, da je kvocient svetlobnih gostot pri tleh v obeh skrajnih primerih približno tolikšen, kolikorkrat debelina megle prekaša razdaljo vidljivosti.



Sl. 3. Gostota svetlobne energije (u) v odvisnosti od globine (z). Desna krivulja je za zasnežena in leva za črna tla. Ravna dela krivulj kažeta, kje velja difuzijski zakon. Primerjava obeh zahteva ekstrapolacijo za razdaljo, ki ima enako velikostno stopnjo kot prosta pot ℓ. Tako pridemo do zaključka, da sneg ojači svetlobno gostoto pri tleh za faktor, ki je nekajkrat manjši kot kvocient debeline megle in proste poti.

Človek komaj verjame, da se da takšno megleno znanje o megli tudi koristno uporabiti. Ko še ni bilo kopirnih strojev kseroks, so si pomagali z navadnim fotografskim papirjem. Z navzdol obrnjeno svetločutno plastjo ga je treba pritisniti na dokument, ki ga hočemo kopirati, in osvetliti s hrbtne strani. Svetloba pronica skozi papir kakor skozi meglo. Na dnu, kjer je namazana svetločutna plast, je gostota svetlobe velika, če je podlaga bela. Ob črki na dokumentu pa se gostota svetlobe občutno pomanjša, tako kot v megli nad črnimi tlemi. Lepše kopije dobimo s to tehniko, če položimo na vrh fotografskega papirja mlečno steklo. "Meglo" smo tako rekoč zdebelili in s tem povečali kontrast.

Na misel nam prihajajo vsakovrstna, na videz preprosta vprašanja. Da imajo kaj opraviti z meglo, pokaže šele premislek.

Zakaj se pisava z mokro kredo na tabli ne vidi? Šele ko se kreda posuši, zagledamo črke. — Po daljšem ugibanju se sporazumemo. Kreda je bela, ker nje-

ni drobci sipajo svetlobo. Plast krede je kakor plast megle nad temno pokrajino. V vodi kredni drobci manj sipajo, ker je njihova odbojnost zmanjšana. To je zaradi zmanjšanega lomnega kvocienta. Odbojnost prozorne snovi je pri pravokotno vpadajoči svetlobi enaka $[(n - 1)/(n + 1)]^2$, kot zvemo iz knjig. Kaolin, iz katerega je kreda, ima proti zraku lomni kvocient 1,55, voda pa 1,33, tako da je lomni kvocient pri prehodu iz vode v kaolin enak 1,55/1,33 = 1,17. Odbojnost krednega drobca v vodi je zato 7,6–krat manjša kot na zraku, kakor brž pokaže žepni računalnik. S tem da mokra kreda manj siplje, pa se prosta pot svetlobe v njej ustrezno podaljša. Zato ni čudno, da je mokra plast krede na tabli v nasprotju s suho dokaj prosojna.

Zraven izvira leži kamen, ki ga je oškropila voda. Mokri del površine je videti temnejši. Zakaj? — Luknjičavost kamna je kriva, mi pravijo. Ko se luknjice v njem napolnijo z vodo, se svetloba vmes manj siplje in zadeva naj bi bila podobna kot prej s kredo.

"Pa vendar ne boš trdil, da je moker kamen prosojen", ugovarja drug učenec. Pokaže na bel kamen, na katerem je razloček med suho in mokro površino dosti manj zaznaven. Poskusa lahko ponovimo doma z belim in sivim toaletnim papirjem. Razloček je vsekakor treba pojasniti, preden bi razlagi zaupali.

Ko smo v belem kamnu podaljšali prosto pot fotonov, s tem da smo ga zmočili, smo naredili nekaj podobnega, kot če bi meglo stanjšali. Toda kamen je za svetlobo zelo debel; saj je popolnoma neprosojen, najsi bo suh ali moker. Pol kilometra debela plast goste megle še vedno odbija skoraj vso svetlobo, enako kot kilometer debela. Belemu kamnu se zato mokrota skoraj nič ne pozna.

Drugače je s sivim kamnom, v katerem se nekaj svetlobe absorbira. Mislimo si, da smo megli primešali nekaj saj! Taka megla, pa če je še tako debela, odbije le del svetlobe. Pa v mislih podaljšajmo prosto poto fotonov, npr. z zmanjšanjem števila kapljic in ob nespremenjeni množini saj! Na daljši cikcakasti poti, ki jo mora svetloba zdaj prehoditi, preden se iz objema megle spet izmuzne, je več verjetnosti za absorpcijo kot poprej. Zato taka megla odbija manjši odstotek vpadle svetlobe. Zato se sivemu kamnu in sivemu toaletnemu papirju krepko pozna, če sta mokra.

Še in še bi se dalo razpravljati. Zakaj je akvarelna barva na papirju videti bolj živa kot potem, ko se posuši? Končno se še spomnim vprašanja, s katerim sem se v študentskih letih zapletel v vse to, kar zdajle pripovedujem: Zakaj je morje modro?

6. Zakaj je megla bela?

V knjigah piše o kapljicah, ki so majhne v primeri z valovnimi dolžinami vidne svetlobe, da močneje sipajo modro svetlobo kot rumeno ali rdečo. Zato je dim od ognja modrikast, skozenj pa vidimo Sonce rumeno obarvano. Pod vplivom vpadajočega svetlobnega valovanja seva katranska kapljica v dimu kakor majhna dipolna antena. Pri tej je izsevana moč (ob stalni amplitudi) sorazmerna s četrto potenco frekvence. Še modrine neba se spomnimo in kako je lord Rayleigh iz nje izračunal velikost molekul v zraku.

Pri megli je drugače, ker so kapljice precej bolj debele kot valovne dolžine vidne svetlobe. Taka kapljica se vede kot cela skladovnica anten. Izkaže se, da je razsuti svetlobni tok v glavnem določen z velikostjo kapljice, ne da bi bil kaj dosti odvisen od valovne dolžine.

Še se najdejo ugovori. Ko dahnemo na šipo ali lepše, če jo potresemo z leskovim cvetnim prahom, vidimo pri pogledu v oddaljeno luč mavrične uklonske lobarje. Včasih se kažejo tudi okrog Lune, kadar jo prekrije tanek in čisto mlad oblak. Postarana megla pa ne kaže nič takega.

Že vemo: v megli niso vse kapljice enako velike in v postarani megli še celo ne, ker se gredo kapljice nekakšen kapitalizem. Površinska napetost namreč sili manjše kapljice, da izhlapevajo, in na njihov račun se debelejše še bolj redijo. Mavrični kolobarji, ki bi jih lahko videli z vsakim velikostnim razredom kapljic posebej, so različno veliki. S prekrivanjem se zlijejo v razmazan bel soj. Samo tak soj vidimo v megli okrog luči. Namesto megle lahko vzamemo šipo, ki smo jo potresli z moko.

Prav tak soj zagledamo okrog Sonca, ki se že blešči skozi tanko preostalo plast megle nad nami. Tako se kaže Mieov pojav, ki smo ga prej omenili: debele kapljice močneje sipajo v smereh naprej kot nazaj. Pojav spominja na večpolne televizijske antene, ki sprejemajo ali oddajajo v ozko omejenih smereh, če so fazne razlike med posameznimi dipoli pravšne.

Z vrha Križke gore se ozremo na megleno morje. Pod Soncem, ki se je že nagnilo na večerno stran, je morje posebno svetlo, vsekakor bolj kot nebo nad njim. Na nasprotni strani neba pa je megla videti siva in precej temnejša kot nebo nad njo. V razliki se zopet kaže Mieov pojav.

Na poti domov vpraša nekdo: "Ali je vse to sploh še fizika? Saj se v nobeni šoli ne učimo takih reči in še manj, da bi jih kdo spraševal". Zasmejemo se, kajti vsem je všeč, da smo se tako nešolsko pogovarjali.

LITERATURA

[1] L. Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie I, II,* Barth, Leipzig 1896, 1898.

[2] L. Boltzmann, *Populäre Schriften,* Barth, Leipzig 1919.

[3] K.M. Case, P.F. Zweifel, *Linear Transport Theory,* Addison–Wesley, Reading, Mass. 1967.

[4] V.V. Ivanov, *Perenos izlučenija i spektri nebesnyh tel,* Nauka, Moskva 1969.

[5] M.M.R. Williams, *Mathematical Methods in Particle Transport Theory,* Butterworths, London 1971.

[6] *The Boltzmann Equation, Theory and Applications* (Proceedings of the International Symposium "100 Years of the Boltzmann Equation"), uredila E.G.D. Cohen in W. Thirring, Springer, Wien 1973.

[7] C. Cercignani, *Theory and Application of the Boltzmann Equation,* Scottish Acad. Press, Edinburgh 1975.

NOVE KNJIGE

LAUE, M., Kratka zgodovina fizike (prev. Janez Strnad). — Ljubljana : DMFA SRS, 1982 — 144 str. — (Knjižnica Sigma). Cena 300,— din (240,— din).

"Prepričljiv dokaz za objektivno resnico fizike je pojav, da se v njeni zgodovini vedno znova samodejno združujejo dotlej popolnoma neodvisne teorije in se zraščajo v prepleteno celoto. To zraščanje bi morali imeti za čudež, če ne bi temeljilo na kolikor toliko obsežnem jedru objekttivne, od človekove dejavnosti neodvisne resnice". Ta Lauejeva misel je rdeča nit v knjižici, ki pripoveduje o razvoju fizike v treh in pol stoletjih. Štirinajst poglavij, ki sledijo uvodu, zajema njene veje od klasične do kvantne mehanike: čas, mehaniko, gravitacijo, optiko, elektriko in magnetizem, opazovalni sistem, osnove termodinamike, ohranitev energije, termodinamiko, atomiko, jedrsko fiziko, fiziko kristalov, toplotno sevanje in kvantno fiziko. Pred bralcem se v zgodovinskem zaporedju razgrnejo fizikalni zakoni, tako da dobi predstavo o tem, kako so vznikali, se razvijali, prepletali in izpopolnjevali do današnje podobe. Vse odlike sorazmerno drobne knjige bo opazil bralec, ki zakone že pozna. Knjigo lahko toplo priporočimo vsem, ki so študirali fiziko, še posebej tistim, ki jo posredujejo dalje, to je učiteljem. Ob branju bodo dobili pregled nad zgradbo fizike še z zgodovinskega vidika. Tako bodo laže posredovali učencem vsaj bežen vtis o neznanskih naporih, ki so bili potrebni, da se je ljudem posrečilo spoznati del narave, v kateri živimo. Vendar bodo tudi srednješolci in drugi, ki jih fizika zanima, radi brali knjigo. Čeprav jim bo morda tu in tam kaka podrobnost ušla, bodo lahko v glavnih potezah sledili razvoju fizike in tako izpopolnili še svoje fizikalno znanje.

Prevajalec je vsebino smiselno skrajšal in priredil, kjer je bila pripoved nekoliko dolgovezna. Sicer se je kolikor mogoče držal izvirnika in se izražal v lepem in preprostem jeziku. Dodal pa je trideset slik in preglednico in s tem dosegel, da je knjižica bolj pestra.

Seta Oblak

Obzornik mat. fiz. **29** (1982) 5/6

TEŽAVE PRI POUKU KVANTNE FIZIKE

JANEZ STRNAD

UDK 530.145

Sestavek na osnovi osebnih izkušenj razčlenjuje nekatere težave pri pouku kvantne fizike. Zavzema se za skrbno uvajanje novih pojmov in navaja razloge proti pojmu snovnega valovanja in proti obravnavanju fotonov kot delcev. Fotoni niso niti nekakšni oblaki niti valovne poteze. Dotakne se mogočih vzrokov za nezadovoljivo stanje pri pouku kvantne fizike in na koncu predlaga pot, ki se izogne spornim pojmom.

DIFFICULTIES IN THE TEACHING OF QUANTUM PHYSICS

Difficulties in the teaching of introductory quantum physics are analysed on the basis of personal experience. New concepts should be introduced carefully. Arguments are presented against the concept of matter waves and against the description of photons as particles. Photons are neither fuzzy balls nor wave packets. Possible reasons for the unsatisfactory situation in the teaching of introductory quantum physics are discussed. Finally, an approach to quantum physics is proposed which avoids the disputed concepts.

1. Elektronov ne opišemo z valovanjem

Nekoč je živel učitelj, ki je učil fiziko v prvem letniku na univerzi. Pri tem je opazil, da nekatere študente močno dolgočasi vsebina, ki se v veliki meri pokriva s srednješolsko fiziko. Da bi vzpodbudil zanimanje teh študentov in tudi srednješolcev za fiziko, jim je poskušal s pisanjem in predavanji približati novejšo fiziko, predvsem kvantno fiziko.

Pri tem se je zaradi nazornosti pogosto skliceval na podobnost med elektroni in valovanjem, denimo elektromagnetnim valovanjem, in je celo vpeljal *snovno valovanje (materijsko, de Brogliejevo valovanje).* Kot dobimo na oddaljenem zaslonu interferenčno sliko, ko se elektromagnetno valovanje uklanja na režah v mrežici, dobimo interferenčno sliko tudi, ko se elektroni "uklanjajo" na režah ali na atomih v kristalu. Povprečna gostota energije v elektromagnetnem valovanju na zaslonu ustreza deležu elektronov na ozkem pasu zaslona. Za množico elektronov vpeljemo s širino pasu deljeni delež elektronov na pasu kot *verjetnostno gostoto.*

Nekoč se je namenil računati kar se da preprosto in je opisal elektron z realno funkcijo $\Psi = A\cos(kx - \omega t)$, kakor se za valovanje spodobi. Vendar se je pri nadaljnjem računanju zataknilo. Tedaj se je učitelj zavedel, da $\cos(kx - \omega t)$ sploh ni rešitev Schrödingerjeve enačbe. Tudi $X(x)\cos\omega t$ in $X(x)\sin\omega t$ nista rešitvi te enačbe. Rešitve Schrödingerjeve enačbe pač ne gre enačiti s potujočim ali stoječim valovanjem. Spodrsljaj, da predaleč sledimo podobnosti klasičnega valovanja in snovnega "valovanja", najdemo celo v znanem učbeniku [1].

Odtlej je učitelj raje poudarjal razliko med opisom klasičnega valovanja in opisom elektrona (Sl. 1). Klasična valovna enačba je realna in vsebuje drugi odvod po času, Schrödingerjeva enačba pa je kompleksna in vsebuje prvi odvod po času. Klasično valovanje opišemo z realno funkcijo. Res da jo včasih zaradi lažjega računanja zapišemo v kompleksni obliki, vendar moramo na koncu vedno vzeti le njen realni del. Funkcijo lahko vsaj v načelu neposredno opazujemo, v vsakem primeru pa si jo znamo nazorno predstavljati. Tako lahko dandanes opazujemo časovni potek jakosti električnega polja v določeni točki prostora na zaslonu osciloskopa celo do mikrovalov s frekvenco okoli $10^{10}\ s^{-1}$ in neposredno merimo frekvenco že do bližnjega infrardečega dela spektra. Kvantna valovna funkcija pa je kompleksna in je ne moremo neposredno opazovati ali si jo nazorno predstavljati. Načelno lahko izmerimo samo kvadrat njene absolutne vrednosti, ki podaja verjetnostno gostoto. Zato lahko globalno fazo valovne funkcije po mili volji premaknemo.

	Schrödingerjeva enačba		klasična valovna enačba
	$-(\hbar^2/2m_e)\partial^2\Psi/\partial x^2 + V(x)\Psi = i\hbar\partial\Psi/\partial t$	$\partial^2 E/\partial x^2 = c^{-2}\partial^2 E/\partial t^2$	
$\Psi = Ae^{i(kx-\omega t)}$	zgled za njeno rešitev pri $V = 0$	$E = E_0\cos(kx - \omega t)$	zgled za njeno rešitev
$k = p/\hbar \quad \omega = W/\hbar$		$c = \omega/k$	
$\Psi(x,t)$	kvantna valovna funkcija, ni neposredno merljiva	$E(x,t)$	funkcija s katero opišemo klasično valovanje, v načelu merljiva
$\Psi^*\Psi = (\mathrm{Re}\,\Psi)^2 + (\mathrm{Im}\,\Psi)^2$	verjetnostna gostota, v načelu merljiva		
elektroni		valovanje	

Sl. 1. Nekateri bistveni razločki med opisom valovanja v klasični fiziki in elektronov v kvantni mehaniki za enodimenzionalni primer.

Energija, ki je v nerelativistični fiziki nedoločena do poljubne aditivne konstante, je v kvantni fiziki sorazmerna s frekvenco. "Frekvenca snovnega valovanja" je potemtakem tudi do poljubne aditivne konstante nedoločena. Kaj je sploh valovanje z nedoločeno frekvenco?

Pri valovanju v klasični fiziki, denimo pri valovanju na vodni gladini, je valovna dolžina za opazovalca, ki miruje glede na vodo, enaka kot za opazovalca, ki se glede na vodo giblje*: $\lambda' = \lambda$. Toda de Brogliejeva "valovna dolžina snovnega valovanja" $\lambda_B = h/p$ je obratno sorazmerna z gibalno količino elektrona. Opazovalec v laboratoriju pa nameri gibalno količino p in opazovalec, ki se giblje v smeri elektronskega curka s hitrostjo v_o, gibalno količino $p' = p - m_e v_o$.

A. Landé je videl v opisanem neskladju tolikšno pomanjkljivost, da je poskušal popolnoma preobraziti kvantno mehaniko. Vendar je ta *Landéjev paradoks* mogoče preprosto razrešiti [2]. Faza $\omega t - kx$ valovanja na vodni gladini se namreč pri Galilejevi transformaciji ne sme spremeniti, saj lahko neposredno opazujemo funkcijo, ki opiše vsakokratni odmik vodne gladine. Preštejemo lahko valove, ki gredo v določenem času mimo dane točke. V kvantni mehaniki pa lahko opazujemo samo verjetnostno gostoto, to je kvadrat absolutne vrednosti valovne funkcije. Zato ne moremo prešteti "valov", ki gredo v določenem času mimo dane točke. Ne smemo se tedaj čuditi, da se faza pri Galilejevi transformaciji spremeni. Sele sprememba faze uskladi transformacijo de Brogliejeve valovne dolžine s transformacijo gibalne količine. Landéjeve "paradoks" prepričljivo opozarja, da kvantnomehanična valovna funkcija ne opisuje nikakršnega valovanja.

Ali je tedaj smiselno v šoli uvajati snovno valovanje in razpravljati o dualizmu valovanje—delec, ko pravimo, da je elektron zdaj valovanje in zdaj delec? Ali ne povzroči to pri učencih nepotrebnega občutka negotovosti in dvoumnosti? Kvantna mehanika je vendar celovita teorija brez notranjih nasprotij, s katero uspešno in nedvoumno opišemo in napovemo zelo raznolične pojave v svetu atomov. Res je, da uporablja drugačne prijeme kot klasična mehanika in ne more napovedati izida poskusa s posameznim elektronom; natančno pa napove izid za množico elektronov. Na to mislimo, ko govorimo o *statističnem* ali *verjetnostnem opisu.*

Elektrone moramo obravnavati v kvantni mehaniki. Samo v posebnem primeru smemo uporabiti kot približek klasično mehaniko. Pogoj je $m_e vx \gg \hbar$, če je

---

*Morali smo presedlati od elektromagnetnega valovanja k mehaničnemu. Kvantna mehanika je namreč zgrajena na nerelativistični (Newtonovi) mehaniki in se oblika njenih zakonov ne spremeni pri Galilejevi transformaciji, elektrodinamika pa je usklajena s posebno teorijo relativnosti in se oblika njenih zakonov ne spremeni pri Lorentzovi transformaciji.

v značilna hitrost elektrona x najmanjša značilna dolžina pri danem poskusu in $\hbar$ z 2π deljena Planckova konstanta. O tem nas prepriča že gledanje televizije. Odprtina v Wehneltovem valju katodne cevi ima premer z velikostno stopnjo milimetra. Elektrone, ki izhajajo iz drobne katode, preslikamo z elektronskimi lečami na zaslon. Hitrost elektronov, ki jih pospeši napetost dobrih 10 kV, meri okoli $5 \cdot 10^7$ m/s. Produkt $m_e vx = 9 \cdot 10^{-31}$ kg $\cdot 5 \cdot 10^7$ ms^{-1} $\cdot 10^{-3}$ m $= 5 \cdot 10^8$ $\hbar$ je mnogo večji od Planckove konstante, deljene z 2π. Zato v tem primeru uporabimo klasični približek s tirom in napovemo, kje zadene elektronski curek zaslon v danem trenutku. Samo zaradi napak pri preslikavi je pega na zaslonu nekoliko razmazana.

2. Fotoni niso kot elektroni

Ko je ravno pisal sestavek proti snovnemu valovanju, je učitelja iz naše zgodbe prešinilo, da je to samo polovica problema. Ali ne velja podobno tudi za fotone in za dualizem foton—valovanje? Dotlej je učitelj na začetku kvantne fizike pri fotoefektu vpeljal fotone kot delce z energijo $\hbar\nu$, gibalno količino $\hbar\nu/c$ in maso 0. Zdaj pa so se mu porodili pomisleki. Zagotovo fotonov ne moremo opisati tako, kot opišemo počasne elektrone, saj imajo vselej hitrost c. Ali pa jih je mogoče opisati na podoben način kot hitre elektrone?

Če hitrost elektronov ni majhna v primeri s hitrostjo svetlobe, se jih moramo lotiti relativistično. Na relativistični mehaniki je zgrajena relativistična kvantna mehanika, kot je na Newtonovi mehaniki zgrajena Schrödingerjeva nerelativistična kvantna mehanika. Na tem mestu se ne moremo spuščati v nadrobnosti, ampak omenimo le bistvene poteze, v katerih se relativistična kvantna mehanika razločuje od nerelativistične. V nerelativistični kvantni mehaniki dopušča zveza nedoločenosti $\delta x \delta p_x \approx \hbar$, da govorimo o poljubno ostro določeni koordinati ($\delta x \to 0$, $\delta p_x \to \infty$) ali o poljubno ostro določeni komponenti gibalne količine ($\delta p_x \to 0$, $\delta x \to \infty$) v danem trenutku. V relativistični kvantni mehaniki pa ni tako. V njej nastopa še svetlobna hitrost c kot zgornja meja hitrosti in v njej lahko nastajajo pari elektron—pozitron. Iz tega sledi za nedoločenost koordinate elektrona končna spodnja meja, tudi če je gibalna količina še tako nedoločena.

Ob elektronu neprestano nastajajo pari elektron—pozitron. Za nastanek takega para je potrebna vsaj lastna energija $2 m_e c^2$. Če energije ni dovolj, si jo par ukrade, vendar le za tako kratek čas, da ga pri tem z merjenjem ne moremo zasačiti. Ta čas je določen z zvezo nedoločenosti v obliki $\delta t \delta W \gtrapprox \hbar$, če vanjo postavimo za nedoločenost energije $\delta W \approx m_e c^2$, torej $\delta t \gtrapprox \hbar / m_e c^2$. V tem času se nastala elektron in pozitron oddaljita od prvotnega elektrona kvečjemu za $\delta x \approx c \delta t$, saj

se ne moreta gibati hitreje kot svetloba. Pozitron se nato lahko anihilira s prvotnim ali z novo nastalim elektronom, tako da preostane novo nastali ali prvotni elektron. Nedoločenost koordinate elektrona zaradi tega ne more biti manjša kot

$$\delta x \approx c\hbar/m_e c^2 = \lambda_C/2\pi \ . \qquad (1)$$

$\lambda_C = h/m_e c^2 = 0.0024$ nm je Comptonova valovna dolžina elektrona.

Tudi nedoločenost komponente gibalne količine ima v relativistični kvantni mehaniki spodnjo mejo. Vzemimo, da elektron najprej miruje in ga potem med merjenjem, ki traja čas τ, pospešimo do kinetične energije $W = \frac{1}{2} p^2/m_e$. Njena nedoločenost je v zvezi z nedoločenostjo gibalne količine $\delta W \approx p\,\delta p/m_e = v\,\delta p$. Čeprav smo računali nerelativistično, velja končni rezultat tudi v relativistični mehaniki. Iz zveze nedoločenosti $\delta t\,\delta W \approx \hbar$ sledi za spodnjo mejo nedoločenosti komponente gibalne količine

$$\delta p_x \approx \hbar/c\tau \ ,$$

če upoštevamo za hitrost mejo c. V klasični fiziki ni zgornje meje za hitrost, zato lahko v kvantni mehaniki ostro določimo gibalno količino ob poljubno kratkotrajnem merjenju. V relativistični kvantni mehaniki pa je spodnja meja za nedoločenost komponente gibalne količine odvisna od časa, ki je na voljo za merjenje. Le če je ta čas dovolj dolg, je spodnja meja dovolj majhna.

Enačbe, ki so usklajene s posebno teorijo relativnosti, pri Lorentzovi transformaciji ne smejo spremeniti svoje oblike. Iz tega izhaja prvič, da morajo v enačbah produkt ct in koordinate $x, y, z,$ nastopati enakopravno. V relativistični kvantni mehaniki koordinatam ne priredimo operatorjev, ampak jih obravnavamo kot parametre, enako kot čas. V nerelativistični kvantni mehaniki obravnavamo na tak način samo čas. Drugič: v relativistični kvantni mehaniki morajo verjetnostna gostota in tri komponente gostote verjetnostnega toka sestavljati četverec. Za primerjavo se spomnimo, da sestavljajo gostota električnega naboja in tri komponente gostote električnega toka četverec $(c\rho_e, j_{ex}, j_{ey}, j_{ez})$. Iz tega že izhaja, da fotonov ni mogoče opisati z verjetnostno gostoto. Verjetnostna gostota se transformira kot komponenta četverca, se pravi tenzorja prvega ranga, elektromagnetno polje pa opišemo s poševno simetričnim tenzorjem drugega ranga. Iz tenzorja drugega ranga pa ni mogoče dobiti tenzorja prvega ranga. Na to sta že pred dobrimi petdesetimi leti opozorila L.D. Landau in R.E. Peierls [3]. Trditev, da določa kvadrat jakosti električnega polja v elektromagnetnem valovanju "verjetnostno gostoto fotonov", in trditev, da se vedejo elektroni podobno kot svetloba, sta potemtakem zgrešeni.

"Namesto, da bi postavili E^2 sorazmeren s številom fotonov v enoti prostornine, mora biti E^2 sorazmeren z verjetnostjo, da je foton v enoti prostornine".

P.A. Tipler, *Foundations of Modern Physics,*
Worth, New York 1969, str. 208.

"Obstaja pa srečna okolnost, da se elektroni obnašajo prav tako kot svetloba ..."

R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures in Physics, Quantum Mechanics,* Addison–Wesley, Reading, Mass. 1965, str. 1–1.

3. Fotoni niso oblaki

Po teh spoznanjih je učitelj začel nasprotovati trditvi, da so fotoni delci, in je izdelal popravljeno pot v kvantno fiziko [4]. Uvidel je tudi, da sodijo fotoni v kvantno elektrodinamiko, kot pravimo teoriji, ki prilagodi klasično elektrodinamiko zahtevam kvantne fizike. Ob študiju kvantne elektrodinamike pa je učitelj sprva nasedel napačni trditvi. Zvezo (1) je namreč uporabil za fotone

$$\delta x \gtrapprox \lambda/2\pi \qquad (2)$$

Tako nastane vtis, da si je mogoče predstavljati foton kot nekakšno razmazano tvorbo, oblak z razsežnostjo dela valovne dolžine. To napelje na misel, da je lega fotona vsaj v približku dopusten pojem [5]. Vendar ni tako.

Če je najmanjša značilna dolžina pri kakem poskusu precej večja od $\lambda/2\pi$, smemo uporabiti geometrijsko optiko kot približek za valovno optiko, ki je v tem pogledu del klasične elektrodinamike. Preden smo sploh prišli do geometrijske optike, smo morali vsekakor preiti iz kvantne elektrodinamike v klasično elektrodinamiko. Ta prehod formalno izvedemo tako, da v enačbe kvantne elektrodinamike postavimo $\hbar \to 0$. S tem pa zgubimo fotone, saj je tudi $\hbar\nu \to 0$, kar pač ustreza predstavi, da se energija elektromagnetnega polja v klasični elektrodinamiki spreminja zvezno. Tako zveza (2) ne more povedati nič o nedoločenosti lege fotona.

V kvantni elektrodinamiki pojem lege pri fotonu nima pomena. Mislimo si struno, ki niha s svojo lastno frekvenco. V klasični teoriji se lahko njena energija spreminja zvezno, v kvantni teoriji le v skokih po $h\nu$. V nobeni od obeh teorij pa ne moremo spraševati, na katerem delu strune je energija. Energija je zvezno porazdeljena po vsej struni in je last vse strune. Podobno je foton obrok energije v elektromagnetnem polju z dano frekvenco in je last vsega prostora, kjer obstaja elektromagnetno polje.

"Delčne lastnosti svetlobnih kvantov so vsebovane v ... zvezah med gibalno količino in energijo. Nič pa ne kaže, da bi imel pojem lege svetlobnega kvanta (ali verjetnosti za lego) kak preprost fizikalni pomen".

W. Heitler, *The Quantum Theory of Radiation,*
Clarendon Press, Oxford 1957, str. 60.

"Fotoni so kvanti danega (enobarvnega) lastnega nihanja sevalnega polja in v votlini niso lokalizirani pri določeni legi ali v določenem trenutku kot kake razmazane žoge, ampak so razširjeni po vsej votlini. Ni zadovoljive kvantne teorije fotonov kot delcev. Na drugi strani pa kvantna teorija sevanja presenetljivo zadovoljivo pojasnjuje zelo širok krog pojavov in v resnici sploh ni potrebe po delčni teoriji fotonov".

M. Sargent III, M.A. Scully, W.E. Lamb Jr.,
Laser Physics, Addison–Wesley, Reading
Mass. 1974, str. 228.

Prepričanje, da je smiselno govoriti o približni legi fotona, izvira morda iz napačnega premisleka. V okviru kvantne mehanike lahko določimo lego ob danem času, spremembo gibalne količine in spremembo energije za sistem elektronov in jeder, ki izseva ali absorbira foton. Edino omejitev narekujeta zvezi nedoločenosti: $\delta x \delta p_x \approx \hbar$ in $\delta t \delta W \approx \hbar$. Na prvi pogled se zdi, kot da podatki za sistem določajo tudi lego ob danem času, gibalno količino in energijo fotona ter nedoločenost teh količin. To je res za gibalno količino in energijo, ker se skupna gibalna količina in energija ohranita. Ni pa res za lego in čas, saj za ti količini ni ohranitvenega zakona

4. Foton ni valovna poteza

Ko se je izjalovila predstava o fotonu kot oblaku, si je učitelj nekaj časa predstavljal foton kot valovno potezo. Pri tem ga je zapeljal *polklasični približek,* v katerem opišemo elekrone in jedra v okviru kvantne mehanike, elektromagnetno polje pa v okviru klasične elektrodinamike. V tem približku je mogoče uspešno obravnavati pojave, ki se jih udeležuje elektromagnetno valovanje: fotoefekt, absorpcijo in stimulirano sevanje, zavorno sevanje in celo Comptonov pojav. Vendar lahko temu približku očitamo notranjo neubranost, saj obravnava elektrone in jedra kvantno, valovanje pa klasično. V tem približku tudi ni mesta za fotone: odpovemo se jim, brž ko obravnavamo elektromagnetno valovanje klasično.

V kvantni elektrodinamiki so razmere veliko bolj zapletene. Tukaj povejmo le to, da v njej ni mogoče hkrati ostro določiti jakosti električnega polja in go-

stoto magnetnega polja v dani točki in v danem trenutku. Produkt obeh nedoločenosti $\delta E\,\delta B$ ima spodnjo mejo, podobno kot jo v kvantni mehaniki predpisuje zveza nedoločenosti za produkt $\delta x\,\delta p_x$. V kvantni elektrodinamiki moramo jakosti električnega polja in gostoti magnetnega polja prirediti operatorja, kot smo ju priredili v kvantni mehaniki koordinati in gibalni količini.

Takoj se pojavi vprašanje, kaj ustreza v kvantni elektrodinamiki elektromagnetnemu valovanju klasične elektrodinamike. Zadovoljni bi bili, če bi se v kakem stanju polja povprečni vrednosti jakosti električnega polja in gostote magnetnega polja ujemali z ustreznima količinama v klasičnem valovanju. Najprej se zdi, da je to težko doseči: povprečni vrednosti jakosti električnega polja in gostote magnetnega polja v stanju z enim, dvema ali tremi ... fotoni, sploh v stanju z določenim številom fotonov, sta enaki nič, četudi je število fotonov zelo veliko.

Vendar lahko sestavimo stanje z želeno lastnostjo kot linearno kombinacijo stanj z različnim številom fotonov. Podobnih sestavljenih stanj pri elektronih nismo vajeni, a pri fotonih so smiselna. Fotoni imajo lastno maso 0 in zlahka nastajajo, ker pri nastanku ni treba kriti njihove lastne energije, ter prav tako zlahka izginjajo. Za fotone ne velja izključitveno načelo, kot velja za elektrone, in je lahko v danem stanju več fotonov. *Koherentno stanje* sestavimo tedaj tako, da na poseben način izberemo kompleksne uteži, ki podajajo zastopanost stanj z določenim številom fotonov v sestavljenem stanju. Kvadrati njihovih absolutnih vrednosti, se pravi verjetnosti, da naletimo v koherentnem stanju na določeno število fotonov, dajo Poissonovo porazdelitev po številu fotonov.

V koherentnem stanju sta povprečni vrednosti jakosti električnega polja in gostote magnetnega polja taki, kot sta jakost električnega polja in gostota magnetnega polja v ravnem enobarvnem valovanju. Koherentno stanje torej ustreza elektromagnetnemu valovanju klasične elektrodinamike. V laserju je treba sevanje v votlini opisati s koherentnim stanjem.

"Slika o svetlobi kot o fotonih je prevladovala v kvantni teoriji svetlobe do odkritja laserja. Danes kaže , da so fiziki preveč poudarjali predstavo o posameznih fotonih pri obravnavanju takih pojavov. Pri tem se v glavnem niso ozirali na to, kako bi povezali fotonsko sliko s stališčem valovne optike in koherence".

H. Haken, *Light,* Vol. 1, *Waves, Photons, Atoms,*
North–Holland, Amsterdam 1981, str. 17.

Število fotonov n v koherentnem stanju ni ostro določeno. Pač pa je določeno povprečno število fotonov $\bar{n}$ in je nedoločenost števila fotonov $\delta n = \bar{n}^{1/2}$, kot je značilno za Poissonovo porazdelitev. Glede na stanje z določenim številom

fotonov, v katerem je $\delta n = 0$, smo tedaj v koherentnem stanju nekaj izgubili. Kot pokaže podrobnejši račun, pa smo hkrati nekaj pridobili. V koherentnem stanju je namreč smiselno govoriti o fazi. Faza $\phi = 2\pi\nu t - kx + \phi_o$ določa v klasični elektrodinamiki – poleg amplitude – trenutno vrednost polja v dani točki, na primer $E(x,t) = E_o \cos\phi$. V koherentnem stanju je faza določena z nedoločenostjo $\delta\phi \approx 1/\bar{n}^{1/2}$, v stanju z določenim številom fotonov pa o fazi sploh ni smiselno govoriti. Tako sta nedoločenost števila fotonov in nedoločenost faze povezani v nekakšno zvezo nedoločenosti

$$\delta n\, \delta\phi \gtrapprox 1 \qquad (3)$$

Za koherentno stanje velja spodnji znak. Zvezo smo navedli, ne da bi jo utemeljili. Sploh so z njo težave: če jo poskušamo dobiti po neoporečni poti, nas dolg račun privede do drugačne oblike, obliko (3) pa dobimo po preprosti poti, ki zdaleč ni neoporečna*.

Zvezo (3) smemo uporabiti za kvalitativna razglabljanja. Če opišemo sevanje, ki ga odda atom, natanko z enim fotonom, je število fotonov ostro določeno, faza pa popolnoma nedoločena. Zato v sevanju ni mogoče v dani točki navesti trenutne vrednosti jakosti električnega polja in gostote magnetnega polja ali njune trenutne slike. Slike te vrste so napačne [6].

Pri tem naj nas ne skrbi, da s fotoni v okviru kvantne elektrodinamike ne bi mogli zajeti interference. V stanju z enim fotonom na primer interferira foton sam s seboj. Pri tem je odločilna fazna razlika, ki ima pač glede na zakasnitev v dani točki ali glede na razmik v danem trenutku določeno vrednost, čeprav faza sama ni določena.

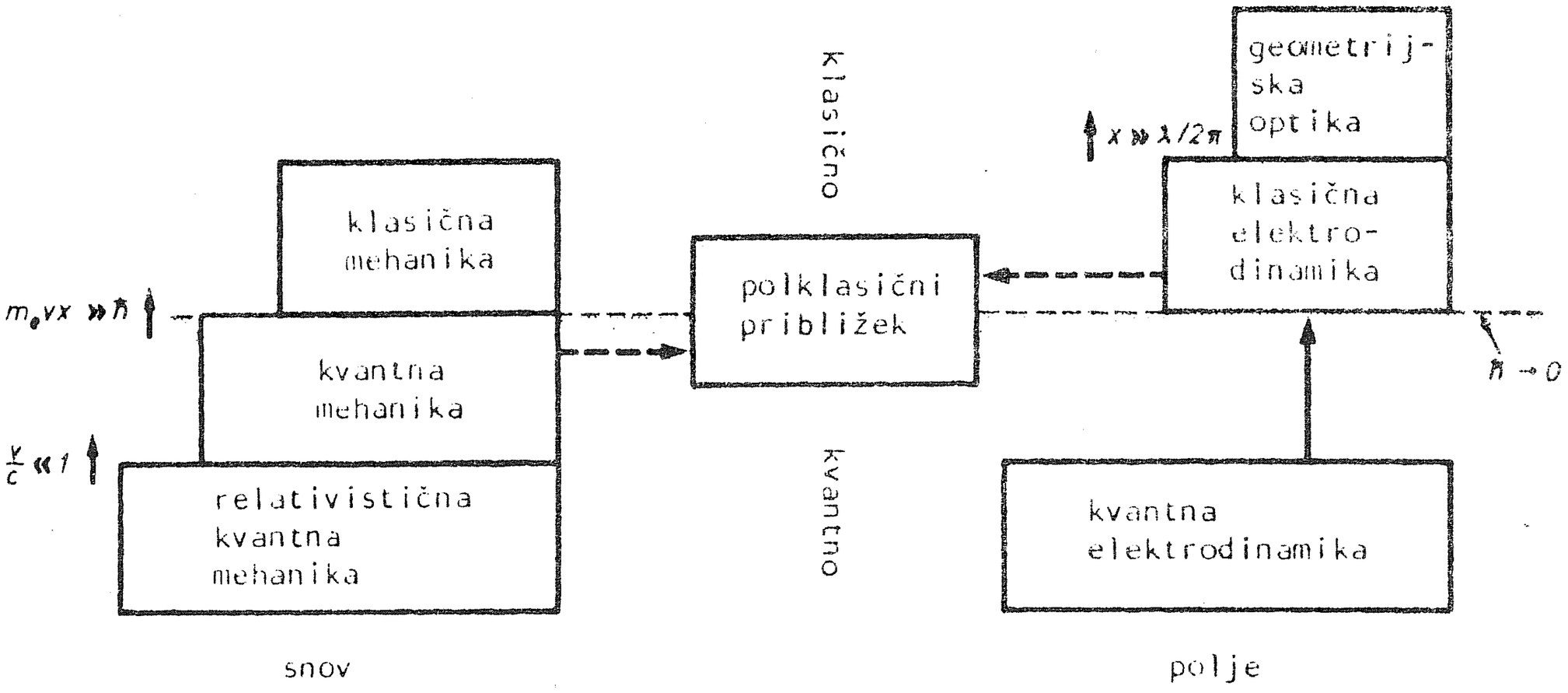
> "Vsak foton interferira torej samo s samim seboj. Nikdar ne pride do interference dveh različnih fotonov".
>
> P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics,*
> Clarendon Press, Oxford, str. 9.

Po vsem tem se vsilita vprašanji, ali je smiselno uvesti v šoli fotone kot delce in razpravljati o dualizmu foton–valovanje. Ali tudi to ne povzroči pri učencih nepotrebnega občutka negotovosti in dvoumnosti? Ali ni bolje trditi, da sodi-

---

*V marsikateri knjigi, na primer D. Marcuse, *Engineering Quantum Electrodynamics,* Hartcourt, Brace & World Inc., New York 1970, str. 77, jo izpeljejo tako, da v zvezi nedoločenosti $\delta t\, \delta W \gtrapprox \hbar$ za sevanje z ostro določeno frekvenco izrazijo nedoločenost energije z nedoločenostjo števila fotonov $\delta W = h\nu\delta n$ in nedoločenost časa v izbrani točki prostora z nedoločenostjo faze $\delta\phi \approx 2\pi\nu\delta t$.

jo fotoni v kvantno elektrodinamiko in predstavili osnove te teorije v najpreprostejši inačici? Potem rečemo: pogosto shajamo s klasično elektrodinamiko kot s približkom. V klasični elektrodinamiki po prehodu $\hbar \to 0$ seveda ni fotonov, ampak le klasično elektromagnetno valovanje. V posebnih primerih, ko velja $x \gg \lambda/2\pi$, lahko uporabimo še preprostejši približek – geometrijsko optiko, če je x najmanjša značilna dolžina pri danem poskusu.



Sl. 2. Kvantna mehanika in kvantna elektrodinamika ter njuni približki.

5. Odkod težave pri pouku kvantne fizike

Veliko težav pri pouku kvantne fizike ima bolj pedagoške in didaktične korenine kot fizikalne. Ogrodje kvantne fizike je dobro znano in se ni skoraj nič spremenilo, odkar sta W. Heisenberg in E. Schrödinger izoblikovala kvantno mehaniko (1926) in odkar so P.A.M. Dirac (1927) ter W. Pauli in P. Jordan (1928) kvantizirali elektromagnetno polje. Kvantna mehanika in kvantna elektrodinamika pa sta po računski in posebno po predstavni strani zahtevni teoriji. Pri pouku nastanejo težave zaradi neizogibnih poenostavitev. Tudi za pouk kvantne fizike veljajo verzi, ki jih navajajo za pouk termodinamike.

"Pri pouku toplote
je kot pri pesmici;
zaideš v zmote,
ko se nameniš po bližnjici".

Prost prevod po M.W. Zemansky, *The Use and Misuse of the Word "Heat" in Physics Teaching,* Phys. Teacher 8 (1970) 295.

Za nekatere spodrsljaje lahko krivimo tudi zgledovanje po zgodovinskem razvoju. A. Einstein je vpeljal fotone, ki naj bi bili lokalizirani v točkah (1905), čeprav je pozneje to hevristično pomagalo sam zavrgel.

"Vseh teh 50 let zavestnega premišljevanja me ni približalo odgovoru na vprašanje 'Kaj so svetlobni kvanti?'. Dandanes marsikdo misli, da pozna odgovor, a se moti".

A. Einstein v pismu M. Bessu, leta 1951.

Kvante je vpeljal M. Planck (1900) pri razlagi sevanja črnega telesa. V prvi teoriji je privzel, da oscilatorji v steni črnega telesa sprejemajo in oddajajo energijo v kvantih $h\nu$. (V poznejši drugi teoriji je omejil skokovito izmenjavanje energije le na sevanje oscilatorjev. Ni se namreč mogel sprijazniti s predstavo, da bi vso energijo, ki jo oscilator skokovito izseva in ki se razširi po valovnem čelu, skokovito absorbiral drug oscilator. M. Planck je nasprotoval Einsteinovim kvantom v elektromagnetnem valovanju, a ga je zaradi njegove "zmote" jemal v zaščito pred drugimi.)

L. de Broglie je vpeljal snovno valovanje iz simetrijskih razlogov (1923) in E. Schrödinger je razvil svojo obliko kvantne mehanike kot teorijo tega valovanja.

Fiziki, ki delajo na primer z elektronskimi ali nevtronskimi interferencami ali fotonskimi korelacijami in v visokoenergijski fiziki, uporabljajo tudi pojme, kot so snovno valovanje in fotoni kot delci. Njim to ne škodi, saj dobro vedo, za kaj gre. Prenašanje takega načina izražanja v pouk pa utegne biti precej neprijetno za začetnike, ki se ob novih in nenavadnih spoznanjih že tako borijo s težavami.

Pouk kvantne fizike bi bil manj težaven, če bi skrbno vpeljali pojme in si prizadevali, da en pojem ne bi v dveh različnih zvezah pomenil dveh različnih stvari. S tem pa so težave, saj ni fizika ali učitelja fizike, ki bi si želel nakopati očitek, da je izrazoslovni prenapetež. Razvoj jasnega izrazja in izdelava pretehtanega načrta za pouk kvantne fizike v srednji šoli in v prvih letnikih visokih šol je dolgotrajen proces. Pri tem se bo treba otresti zgledovanja po zgodovinskem razvoju.

"Čas še ni zrel za jasen in preprost pouk kvantne mehanike. Posebej še ni v celoti razvit poučevalni slovar".

E.M. Rogers, *Comments on the Future of Quantum Mechanics Teaching* (1969), ponatisnjeno v *Quantum Mechanics in School*, ur. G. Marx, R. Eötvös University & IUPAP, Budapest 1981, str. 3.

"Na drugi stopnji [razumevanja kvantne mehanike] začne študenta skrbeti, ker ne razume, kaj je delal. Skrbi ga zato, ker v glavi nima jasne fizikalne slike. Zmedejo ga brezuspešni poskusi, da bi se dokopal do fizikalne razlage za vsako od matematičnih umetnij, ki se jih je naučil. Zelo trdo dela, a pogum mu jemlje to, da se mu zdi nemogoče jasno misliti. Ta stopnja traja pogosto šest mesecev in več in je utrudljiva in neprijetna. Potem se popolnoma nepričakovano začne tretja stopnja. Študent si nenadoma reče: "Razumem kvantno mehaniko" ali pravzparav "Razumem, da tu ni kaj razumeti". Težave, ki so se zdele tako hude, čudežno izginejo. Ne da bi se zavedal, se je naučil misliti kar v kvantnomehaničnem jeziku in ne kliče več na pomoč predkvantnih pojmov".

F.J. Dyson, *Innovation in Physics,* Scientific American 199 (1958) 74.

6. Kako naj uvedemo kvantno fiziko?

V srednji šoli in v začetnih letnikih na univerzi se ni mogoče omejiti samo na Schrödingerjevo kvantno mehaniko ali njen del, ampak je treba od vsega začetka vključiti tudi elektromagnetno sevanje, ki sodeluje pri vseh merjenjih Planckove konstante. V nadaljevanju je na kratko orisana ena izmed mogočih poti. Najprej se na osnovi poskusov s sipanjem počasnih elektronov prepričamo o diskretnih energijskih stanjih atomov. Med temi stanji ne pride do prehodov samo pri trkih, ampak tudi pri sevanju in absorpciji; pri tem prevzame energijsko razliko elektromagnetno valovanje. Pri prehodih med diskretnimi stanji so tudi energijske razlike diskretne. Črtasti emisijski in absorpcijski spektri plinov nas napeljejo na misel, da je frekvenca valovanja sorazmerna z energijsko razliko. Iz Franck–Hertzovega poskusa lahko določimo Planckovo konstanto.

V tem duhu je mogoče obdelati tudi fotoefekt in zavorno sevanje. Za vse to zadostuje polklasični približek z dodatno zahtevo o zvezi med energijsko razliko in frekvenco sevanja. Nekateri učitelji, ki so se začeli zavedati težav s fotoni, predlagajo, da bi pri tem tudi ostali [7]. S tem ne bi presegli okvira prve Planckove teorije. Vendar je na primer pri razlagi Comptonovega pojava v polklasičnem približku nekaj predstavnih težav. Ta pojav mnogo preprosteje obdelamo kot prožni trk fotona s prostim elektronom. Že to je najbrž razlog za vpeljavo fotonov.

S tem se dotaknemo kvantne elektrodinamike. Ko iščemo njeno najpreprostejšo inačico, pomislimo na možnost, da bi klasični elektrodinamiki dodali zgolj zahtevo: Energija elektromagnetnega sevanja v vsem prostoru, kjer je sevanje, naj se spreminja le v skokih po $h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \ldots$. V nasprotju s tem se v klasični elektrodinamiki energija elektromagnetnega polja v valovanju lahko spreminja zvezno.

"Potem zavzame energija oscilatorja lahko le diskretne vrednosti $W_n = h\nu(n + \frac{1}{2})$. Te dovoljene vrednosti priredimo elektromagnetni energiji

$$\int \frac{1}{2}\epsilon_o |\underline{E}(\underline{r},t)|^2 dV = h\nu(n + \frac{1}{2})$$

Očitno kvantizacijski pogoj omeji velikost amplitude jakosti električnega polja. Toda za zdaj ni treba upoštevati teh posledic. Polje obravnavamo kot klasično količino in postavimo kvantizacijski pogoj samo za energijo polja. Na višji ravni pa moramo obravnavati elektromagnetno polje kot kvantni sistem".

R. Loudon, *The Quantum Theory of Light,* Clarendon Press, Oxford 1973, str. 7

Ko smo tako vpeljali fotone kot obroke energije v valovanju, lahko neprisiljeno govorimo o njihovi energiji in gibalni količini. (Enačbo $p = W/c$ je mogoče izpeljati tudi v okviru klasične elektrodinamike.) Po teh lastnostih spominjajo fotoni na delce; po tem, da ni mogoče govoriti o njihovi legi, pa se od delcev bistveno razločujejo.

Priznati moramo, da predlagana pot preko dodatne zahteve o energiji elektromagnetnega sevanja ni brez pomanjkljivosti. Če se jim hočemo izogniti, pa moramo v naslednjem koraku vpeljati operatorja za jakost električnega polja in gostoto magnetnega polja. Šele to privede po neoporečni poti do kvantizacije energije v elektromagnetnem sevanju. Dolgo so začenjali kvantizacijo preko vektorskega potenciala v potujočem valovanju. Preprosteje pa je začeti z jakostjo električnega polja in gostoto magnetnega polja v stoječem valovanju. Pri tem načinu, ki je v navadi v kvantni optiki pri obravnavanju laserjev [8], ni treba poznati vektorskega potenciala. Postopek je mogoče še poenostaviti tako, da sploh ni treba navesti Maxwellovih enačb v eksplicitni obliki [9]. To je za srednjo šolo še vedno prezahtevno, a utegne biti primerno za študente, ki bodo poučevali fiziko v srednji šoli.

Ni upanja, da bi se v kratkem uveljavila kakšna korenito spremenjena pot v kvantno fiziko. Vendar lahko razmišljanje v nakazani smeri vzpodbudi učitelje k bolj kritični rabi pojmov na običajni poti.

LITERATURA

[1] D. Halliday, R. Resnick, *Physics,* Parts 1 & 2, Wiley, New York 1966, str. 1207, *Physics,* Part 2, Wiley, New York 1977, str. 1124.

[2] J.–M. Levy–Leblond, *Quantum Fact and Classical Fiction: Clarifying Landé's Pseudo-Paradox,* Am.J.Phys. 44 (1976) 1130.

[3] L.D. Landau, R.E. Peierls, *Erweiterung des Unbestimmtheitsprinzips für die relativisti-*

sche Quantentheorie, Z. Phys. 69 (1931) 56.

[4] J. Strnad, *Kvantna fizika za začetnike,* DMFA, Ljubljana 1980;
Quantum Physics for Beginners, Phys. Education 16 (1981) 88;
Mala kvantna fizika, Školska knjiga, Zagreb (v tisku);
Pitfalls in the Teaching of Introductory Quantum Physics, Eur. J. Phys. 2 (1981) 250.

[5] V.B. Berestetskii, E.M. Lifshits, L.P. Pitaevskii, *Relativistic Quantum Theory,* Addison–Wesley, Reading, Mass. 1977.

[6] G. Henderson, *Quantum Dynamics and a Semiclassical Description of the Photon,* Am.J.Phys. 48 (1980) 604.

[7] G. Simonsohn, *Der Photoeffekt im einführenden Unterricht,* Physica didactica 7 (1980) 3.

[8] M.O. Scully, W.E. Lamb, Jr., *Quantum Theory of an Optical Maser,* I. General Theory, Phys. Rev. 159 (1967) 208.

[9] J. Strnad, *Quantenelektrodynamik für Anfänger,* Physik und Didaktik (v tisku).

[10] J.–M. Levy–Leblond, *Classical Apples and Quantum Potatoes,* Eur. J. Phys. 2 (1981) 44–47.

NOVE KNJIGE

Rudolf KLADNIK, Reaktorska fizika, Ljubljana: DMFA SRS, 1982, 188 str. — (Zbirka izbranih poglavij iz fizike; 19). Cena 300.— din (240.— din).

V uvodnih poglavjih avtor pregledno podaja pojme iz atomske in jedrske fizike, ki so potrebni za razumevanje dogajanj v jedrskih reaktorjih. Sorazmerno obsežno poglavje je posvečeno vplivom sevanja na snov in dozimetriji.

Težišče teksta je na opisu porazdelitve nevtronov v reaktorskih sistemih in iz nje izhajajočih zakonitostih, ki določajo obnašanje reaktorjev. Avtor dosledno uporablja difuzijsko teorijo — z redkimi izjemami — v enogrupnem približku. Bralcu, ki se prvič srečuje z reaktorsko fiziko, odpira takšen pristop brez detajlov in dolgih matematičnih izpeljav nenaporno pot do osnov tega danes zelo razvejenega področja. Čeprav knjiga nima namena posredovati napotke za projektiranje jedrskih reaktorjev, bi jo krajše opisno poglavje o večgrupnih metodah lepo zaokrožilo.

Reaktorska fizika R. Kladnika je izšla kratek čas po začetku obratovanja prve jedrske elektrarne v Sloveniji. S tem in načrtovanjem novih jedrskih elektrarn se širi krog tehničnih strokovnjakov različnih strok, ki se bodo pri svojem delu srečevali z reaktorsko fiziko. Vsem tem bo knjiga dobrodošel pomočnik. Koristila pa bo tudi študentom in diplomantom fizike, ki se bodo poklicno usmerili na področja, povezana z jedrsko tehnologijo.

Gvido Pregl

Obzornik mat. fiz. 29 (1982) 5/6

FOTOELEKTRIČNE LASTNOSTI POLPREVODNIKOV

PETER GOSAR

UDK 621.383

Članek obravnava električne in optične lastnosti polprevodnikov, ki vplivajo na občutljivost fotoelektričnih senzorjev in energijskih pretvornikov. Podrobneje razpravlja o gibljivosti elektronov, o optičnih prehodih in rekombinaciji parov ter o direktnih in indirektnih optičnih prehodih.

PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF SEMICONDUCTORS

Electrical and optical properties of semiconductors which influence the efficiency of photoelectric sensors and energy converters are discussed. Mobility of electrons, optical transitions and electron — hole recombination, and direct and indirect optical transitions are considered.

1. Uvod

Večina trdnih snovi je neprozornih za vidno svetlobo. Fotoni se v njih absorbirajo in povzročajo prehode elektronov z nižjih na višje nivoje. Prehod je lahko tudi tak, da je v vzbujenem stanju elektron prost in zapusti snov. Tedaj imamo opraviti z običajnim fotoefektom. Proste elektrone dobimo najpogosteje pri osvetljevanju kovin z vidno ali ultravijolično svetlobo. Zaznamo pa jih kot fotoelektrični tok v fotocelicah. Pri izolatorjih in polprevodnikih govorimo o fotoefektu tudi, kadar fotoni svetlobe povzročijo prehode elektronov iz valenčnega v prevodni pas. To je notranji fotoefekt. Elektroni in vrzeli, ki nastanejo pri taki absorpciji, prispevajo k povečanju prevodnosti materiala in so izvor raznih fotoelektričnih pojavov. V članku [1] smo že obširno govorili o fotoprevodnosti, fotoelektromagnetnem in fotonapetostnem pojavu. Tu pa bomo podrobneje obravnavali nekatere električne in optične lastnosti polprevodnikov, ki vplivajo na občutljivost in izkoristek polprevodniških fotoelektričnih senzorjev in pretvornikov.

2. Gibljivost elektronov

Pri svetlobnih senzorjih na osnovi fotoprevodnosti imajo prednost materiali z veliko gibljivostjo elektronov. V tem pogledu se odlikujejo intermetalne spojine

kot indijev antimonid InSb, indijev arzenid InAs in svinčev telurid PbTe, pri katerih je gibljivost elektronov μ izredno velika. Tako je pri prvem približno 70 000 cm^2/Vs pri 300 K. Primerjava z gibljivostjo bakra 35 cm^2/Vs pokaže, da se elektroni mnogo lažje gibljejo v polprevodniku kot v kovini. Kako to? Elementarna teorija gibljivosti elektrona izhaja iz privzetka, da se elektron obnaša v kristalu v dovolj kratkih časovnih intervalih τ_r kot navidezno prost delec. Električno polje E da elektronu pospešek $e_o E/m^*$, kjer je m^* navidezna masa elektrona. Hitrost, ki jo pridobi elektron v času τ_r, je tedaj

$$v = e_o E \tau_r / m^* \qquad (1)$$

kar pomeni, da je

$$\mu = e_o \tau_r / m^* \qquad (2)$$

Pri običajnih kovinah se navidezna masa elektrona ne razlikuje dosti od mase m elektrona v praznem prostoru, pri polprevodnikih m^* pa je pogosto dosti manjši. m^*/m je pri germaniju 0,12, siliciju 0,26, indijevem antimonidu 0,014 in indijevem arzenidu 0,03. Majhna navidezna masa močno vpliva na povečanje gibljivosti elektronov. Poleg tega pa je tudi transportni relaksacijski čas τ_r pri polprevodnikih v splošnem eno ali več velikostnih stopenj daljši kot pri kovinah. Pri bakru je pri temperaturi 300 K $\tau_r = 2 . 10^{-14}$ s. Vzrok za to je kvantnomehanske narave. τ_r je pri višjih temperaturah in dovolj kvalitetnih kristalih z malo primesmi odvisen le od sipanja na nihanjih kristalne mreže ali krajše na fononih. Kvantnomehansko opisujemo elektrone kot valovanja. V kovinah so elektroni zelo hitri, njihova kinetična energija ϵ je več elektronvoltov, pri bakru kar 7 eV na Fermijevi površini. Zato je ustrezna valovna dolžina valovanja λ, ki jo izračunamo z izrazom

$$\lambda = h(2m^* \epsilon)^{-1/2} \qquad (3)$$

zelo majhna. Pri bakru je za elektrone na Fermijevi površini valovna dolžina 0,465 nm, torej le malo večja od razdalje 0,255 nm med sosednjimi atomi. Pri polprevodnikih pa obravnavamo elektrone v prevodnem pasu kot običajen klasični plin s poprečno kinetično energijo $\frac{3}{2} kT$. Pri sobni temperaturi je kT le 0,025 eV. Ker je tudi m^*/m v splošnem dosti manjše kot 1, je valovna dolžina elektronov v prevodnem pasu polprevodnika več kot desetkrat daljša kot valovna dolžina elektrona na Fermijevi površini v kovini. Dolgi valovi manj občutijo nehomogenosti v kristalu, ki jih povzročajo mrežna nihanja. Zato se tudi manj sip-

ljejo. Preprost račun pokaže, da je verjetnost za sipanje v časovni enoti sorazmerna s $T\epsilon^{1/2}$.

Tudi sipanje elektronov na primeseh in napakah v kristalih ima pomemben vpliv na prevodnost pri kovinah, vendar le pri temperaturah do nekaj 10 K. Pri polprevodnikih pa se ta vpliv lahko pozna prav do sobne temperature, če je koncentracija primesi dovolj velika. Verjetnost za sipanje na nevtralnih primeseh je sorazmerna z $\epsilon^{1/2}$, za sipanje na ionskih primeseh, na primer na donorjih in akceptorjih v polprevodnikih, pa sorazmerna z $\epsilon^{-3/2}$.

Iz povedanega sklepamo, da je pri kovinah v okolici sobne temperature gibljivost sorazmerna s T^{-1}. Prevodnost kovine z rastočo temperaturo pada. Pri polprevodnikih pa moramo skoraj vedno upoštevati tako sipanje na fononih kot sipanje na ionskih primeseh. Ker je energija elektrona v polprevodniku $\frac{3}{2}\,kT$, dobimo naslednjo temperaturno odvisnost gibljivosti

$$\mu^{-1} = A\,T^{3/2} + B\,T^{-3/2} \qquad (4)$$

A in B nista odvisna od temperature. Prvi člen ustreza sipanju na fononih, drugi pa na ionskih primeseh. Pri zelo čistih kristalih in visokih temperaturah prevladuje prvi člen. V tem primeru gibljivost raste s padajočo temperaturo. Pri indijevem antimonidu je pri 77 K že nad $5 \cdot 10^5$ cm^2/Vs. Še kratek komentar k izrazu (4). Gibljivost je sorazmerna s τ_r ali obratno sorazmerna z verjetnostjo za sipanje. Če imamo različne procese sipanja, moramo verjetnosti za posamezne procese sešteti, da dobimo celotno verjetnost. Zato lahko le μ^{-1} zapišemo kot vsoto prispevkov posameznih procesov sipanja elektronov, nikakor pa ne μ.

3. Optični prehodi in rekombinacija parov

Pomemben faktor pri fotoelektričnih pojavih predstavljata rojevanje in rekombinacija parov elektron – vrzel. Tako sta na primer velikost in hitrost odziva fotoprevodniških senzorjev odvisna od življenjskega časa τ parov elektron – vrzel. V neosvetljenem polprevodniku z neravnovesno koncentracijo elektronov n in vrzeli p se koncentraciji n in p spreminjata s časom po enačbi

$$dn/dt = dp/dt = -rnp + g \qquad (5)$$

kjer produkt rnp predstavlja število rekombinacij in g število na novo nastalih parov zaradi rojevanja, oboje v enoti prostornine in časa. r je rekombinacijska konstanta. V temperaturnem ravnovesju je $n = n_0$, $p = p_0$ in $dn/dt = dp/dt = 0$. Od-tod zveza

$$r = g/n_i^2 \tag{6}$$

Tu je n_i koncentracija elektronov oziroma vrzeli v polprevodniku brez primesi. Velja namreč $p_o n_o = n_i^2$. Zaradi ohranitve električne nevtralnosti mora biti $\Delta n = n - n_o$ enak $\Delta p = p - p_o$. Pri dovolj majhnih odstopanjih od ravnovesja, $\Delta n \ll (n_o + p_o)$, lahko enačbo (5) poenostavimo takole

$$d\Delta n/dt = -\Delta n/\tau \; ; \qquad \tau = n_i^2/g(n_o + p_o) \tag{7}$$

τ je življenjski čas elektronov in vrzeli.

Želeli bi zvedeti nekaj o tem, kakšni procesi določajo g in s tem τ. Rojevanje parov poteka na več načinov. Najprej bomo poskušali kvantitativno oceniti, koliko prispevajo k rojevanju parov optični prehodi. Prostor, ki ga zavzema polprevodnik, je napolnjen s fotoni črnega sevanja, ki ustreza temperaturi polprevodnika. Fotoni črnega sevanja, katerih energija je večja od energije praga E_g, se v kristalu stalno absorbirajo in s tem rojevajo pare. Če iz meritev poznamo absorpcijski koeficient za svetlobo $\alpha(\nu)$ in njegovo odvisnost od frekvence ν, razmeroma lahko ocenimo prispevek fotonov črnega sevanja k rojevanju parov.

Mislimo si v kristalu tok fotonov v izbrani smeri, ki jo označimo s koordinatno osjo x. Gostota toka fotonov $j_\nu(x)$, ki imajo frekvenco ν, pojema z razdaljo x po enačbi

$$dj_\nu(x)/dx = -\alpha(\nu)\, j_\nu(x) \tag{8}$$

Gostota toka fotonov je sorazmerna z njihovo koncentracijo $n_\nu(x)$. Fotoni se gibljejo v kristalu s hitrostjo $c/n(\nu)$, kjer je $n(\nu)$ lomni količnik. Iz (8) sklepamo, da je število absorbiranih fotonov v enoti prostornine in časa

$$c\alpha(\nu)\, n_\nu(x)/n(\nu) \tag{9}$$

Skoro vsak absorbirani foton ustvari par elektron—vrzel. Pri črnem sevanju je gostota fotonov v frekvenčnem intervalu $(\nu, \nu + d\nu)$

$$8\pi c^{-3} n^3(\nu) [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}\, d\nu \tag{10}$$

Iz (9) in (10) sledi za g

$$g = 8\pi c^{-3} \int_0^\infty \alpha(\nu)\, n^2(\nu)\, \nu^2 [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}\, d\nu \tag{11}$$

K integralu prispeva le ozek frekvenčni pas nad pragom $h\nu_o = E_g$. Pri $\nu < \nu_o$

je $\alpha(\nu) = 0$. V področju $(\nu - \nu_o) \gg kT$ pa je vrednost integranda majhna, ker $\exp(h\nu/kT)$ s frekvenco hitro raste.

Z izrazom (11) lahko izračunamo g in iz (7) tudi ustrezni τ. Za življenjski čas čistih kristalov, to je kristalov brez donorskih in akceptorskih primesi, dobimo pri siliciju 3 h, germaniju 0,43 s in indijevem antimonidu $6 . 10^{-7}$ s. Ujemanje teorijske vrednosti z eksperimentalno je dokaj dobro le pri slednjem in nekaterih drugih polprevodnikih, na primer galijevem arzenidu GaAs, nikakor pa ne pri germaniju in siliciju, kjer so opazovani življenjski časi krajši za več velikostnih stopenj.

Gornji rezultati nas vodijo do spoznanja, da v nekaterih polprevodnikih absorpcija fotonov črnega sevanja ni glavni vir rojevanja parov. Dobro je tudi znano, da je življenjski čas pri germaniju in siliciju močno odvisen od kvalitete kristalov in še posebej od koncentracije raznih primesi v njih. Če na primer vnesemo v čist kristal germanija z življenjskim časom 10^{-3} s 10^{15} atomov niklja ali zlata na 1 cm^3, pade življenjski čas na 10^{-8} s do 10^{-9} s. Predstavljamo si, da tu poteka rekombinacija in rojevanje preko rekombinacijskih centrov, ki jih predstavljajo vgrajene primesi. Zelo učinkoviti rekombinacijski centri v siliciju so atomi železa in mangana. Kvantnomehansko opisujemo rekombinacijski center z lokalizirano valovno funkcijo na mestu primesi. Energija lokaliziranega nivoja leži v energijski reži polprevodnika, običajno ne daleč od sredine reže. Pri rekombinaciji se prost elektron ali vrzel ulovi v rekombinacijskem centru. Rekombinacijski center predstavlja past za elektron, če je v normalnem stanju elektronski nivo centra nezaseden. Če je nivo centra normalno zaseden z elektronom, pa ta predstavlja past za vrzel. Po ulovitvi na primer elektrona sledi v naslednjem koraku ulovitev vrzeli. S tem je rekombinacijski proces zaključen in center je ponovno v istem stanju, kot je bil v začetku. Rekombinacijski centri delujejo kot katalizatorji za združevanje elektronov in vrzeli.

Rekombinacija elektrona in vrzeli preko rekombinacijskega centra je pravilo-ma neradiacijska. Energija se pri tem sprošča z emisijo fononov. Včasih, še posebej pri nižjih temperaturah, delujejo rekombinacijski centri kot prave pasti, ki dalj časa zadržujejo elektrone ali vrzeli. To se zgodi tedaj, kadar je verjetnost za prehod elektrona oziroma vrzeli med centrom in enim izmed pasov zelo majhna. Dober primer predstavlja kadmijev sulfid CdS. Svojska upornost neosvetljenega CdS je okoli 10^6 Ωcm. Po osvetlitvi tanke ploščice kadmijevega sulfida z vidno svetlobo pade upornost po približno 10 s na okoli 0,1 Ωcm. Če sedaj prekinemo osvetljevanje, ostane prevodnost vzorca kar več minut. Ta čas je tako dolg zaradi dolgotrajnega zadrževanja vrzeli v rekombinacijskih centrih.

Zelo velik vpliv na hitrost rekombinacije imajo pri germaniju in siliciju tudi dislokacije. Področje vzdolž dislokacijske črte predstavlja niz rekombinacijskih centrov, ki imajo močan vpliv na zmanjševanje življenjskega časa. V kristalih germanija in silicija z majhnim številom dislokacij in majhno koncentracijo primesnih rekombinacijskih centrov, ima življenjski čas velikostno stopnjo 100 μs.

4. Direktni in indirektni optični prehodi

V prejšnjem poglavju smo videli, da je le pri nekaterih polprevodnikih povzročitelj rekombinacije spontana emisija fotonov. Tu bomo poskušali razumeti, zakaj je tako. Proces rekombinacije z emisijo fotona je podoben anihilaciji elektrona in pozitrona. Pri takih procesih se ohranjata energija in celotna gibalna količina delcev, ki sodelujejo pri reakciji. Tem zahtevam je mogoče ustreči pri anihilaciji elektrona in pozitrona le, če pride do emisije vsaj dveh fotonov, ki se gibljeta skoraj natančno v nasprotni smeri. Gibalna količina anihilacijskega fotona je namreč dosti večja od gibalne količine počasnih elektronov in pozitronov. Pri elektronu in vrzeli v polprevodniku pa so razmere čisto drugačne. Foton z energijo E_g ima zanemarljivo majhno gibalno količino v primerjavi z gibalnimi količinami elektronov in vrzeli v kristalu. Odtod sledi, da poteka v polprevodnikih rekombinacija le med elektroni in vrzelmi s skoraj enako toda nasprotno usmerjeno gibalno količino. Pri rekombinaciji se tu emitira le en sam foton. Prepričajmo se, da je gibalna količina elektrona ali vrzeli v polprevodniku velika v primerjavi z gibalno količino fotona $h\nu_o n(\nu_o)/c$. Ker je povprečna energija elektrona ali vrzeli $\frac{3}{2}kT$, dobimo naslednjo oceno za gibalno količino p

$$p = (3m^*kT)^{1/2} \tag{12}$$

Neenačba $p \gg h\nu_o n(\nu_o)/c$ torej pomeni

$$m^*c^2 \gg E_g^2 n^2(\nu_o)/3kT \tag{13}$$

Ob upoštevanju tipičnih energij $m^*c^2 = 50$ keV, $E_g = 1$ eV in $kT = 0{,}025$ eV ter $n(\nu_o) = 4$ ugotovimo, da neenačba zelo dobro velja.

Vrzeli v valenčnem pasu imajo najmanjšo energijo pri $p = 0$. Za elektrone v prevodnem pasu pa je to res le pri nekaterih spojinah, kot so indijev antimonid InSb, indijev arzenid InAs, indijev fosfid InP, galijev antimonid GaSb in galijev arzenid GaAs. Pri teh polprevodnikih imajo tako elektroni kot vrzeli majhno gibalno količino, ker se nahajajo v okolici energijskih minimumov. Zato je tu možna rekombinacija z emisijo fotona. Govorimo o direktnih optičnih preho-

dih. Pri germaniju in siliciju in še vrsti drugih polprevodnikov, kot na primer pri galijevem fosfidu in aluminijevem antimonidu, pa so razmere čisto drugačne. Energija elektrona kot funkcija gibalne količine p ima pri teh materialih najmanjšo vrednost v bližini robov Brillouinove cone. Pri germaniju najdemo energijske minimume v smereh (111), pri siliciju pa v smereh (100). Energijska reža polprevodnika je tu podana z energijsko razliko med minimumom pri $p \neq 0$ v prevodnem pasu in maksimumom valenčnega pasu pri $p = 0$. Ker so elektroni v prevodnem pasu vedno v področju energijskih minimumov, je zato njihova gibalna količina pri germaniju in siliciju velika. Iz istega razloga je gibalna količina vrzeli v valenčnem pasu majhna. Enostavna rekombinacija para z izsevanjem fotona tu ni mogoča. Obstaja pa možnost, da sodelujejo pri rekombinacijskem procesu poleg fotonov tudi fononi. Tedaj govorimo o indirektnih optičnih prehodih. Lahko pride na primer do emisije enega fonona z gibalno količino, ki je približno enaka gibalni količini elektrona v prevodnem pasu tako, da se celotna gibalna količina pri procesu ohranja. Pri indirektnih procesih je seveda možna tudi absorpcija fononov. Fononi imajo majhne energije in ne prispevajo dosti k energijski bilanci. Njihova vloga je pretežno le v izmenjavi gibalne količine.

Verjetnost za indirektni optični prehod je v primerjavi z verjetnostjo za direktni prehod majhna. Zato poteka v germaniju in siliciju rekombinacija rajši preko rekombinacijskih centrov kot pa z emisijo fotonov.

Polprevodniki, pri katerih so možni direktni optični prehodi, imajo velik praktičen pomen. Če teče skozi stik P—N električni tok v prevodni smeri, pride do intenzivne rekombinacije parov. Če rekombinacijo spremlja emisija fotonov, deluje stik P—N pri toku v prevodni smeri kot izvir svetlobe. Ta pojav je osnova delovanja polprevodniških svetečih diod. Emisijo fotonov pri rekombinaciji izrabljamo tudi pri polprevodniških laserjih.

Literatura

[1] P. Gosar, *Fotoelektricni pojavi,* Obzornik mat. fiz., 29 (1982) 19 do 26.

[2] V.L. Bonč — Bruevič, S.G. Kalašnikov, *Fizika poluprovodnikov,* Nauka, Moskva 1977.

Obzornik mat. fiz. 29 (1982) 5/6

OSNOVNI DELCI IN OSNOVNE INTERAKCIJE

MITJA ROSINA

UDK 539.126

Sestavek kaže, kako je narava zgrajena iz osnovnih gradnikov — kvarkov in leptonov. Opisane so glavne značilnosti močne, elektromagnetne, šibke in gravitacijske interakcije ter njihova vloga v naravi. Čeprav niso našli prostih kvarkov, eksperimenti nakazujejo, da jih smemo znotraj hadronov obravnavati kot pristne točkaste delce.

ELEMENTARY PARTICLES AND ELEMENTARY INTERACTIONS

It is shown how Nature is constructed from the fundamental building blocks — quarks and leptons. The main features of strong, electromagnetic, weak and gravitational interactions are described and their role in Nature is presented. Even though free quarks have not been found, experiments suggest that inside hadrons they can be treated as genuine point particles.

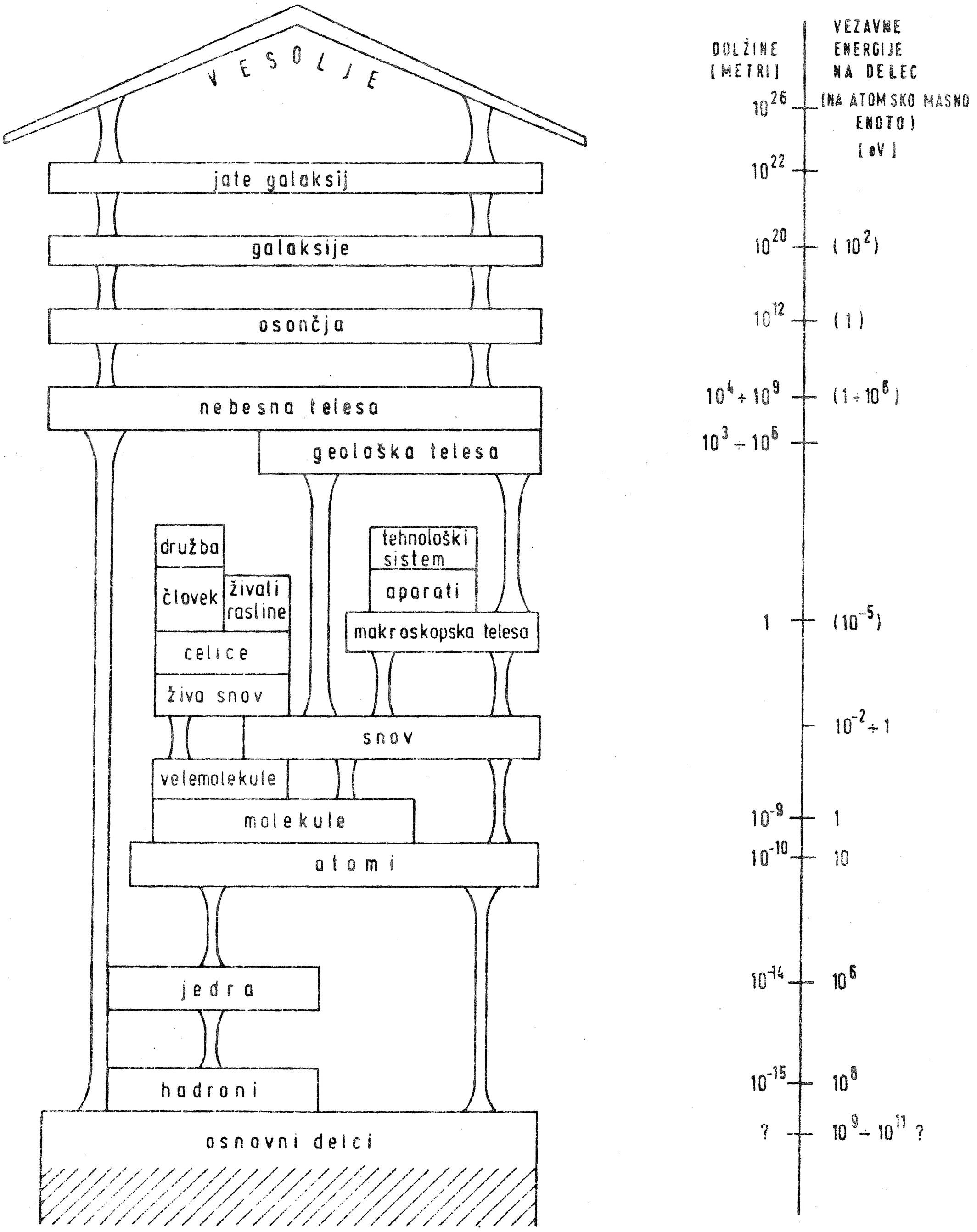
1. Narava je zgrajena v nadstropjih

Eno od pomembnih spoznanj fizike je, da je narava zgrajena v nadstropjih (Sl. 1). Osnovni delci—*kvarki* - se vežejo v *hadrone* *. Ti se naprej povežejo v *atomska jedra,* ta pa se skupaj z osnovnimi delci—*elektroni*-povežejo v atome. Atomi se organizirajo v *molekule,* v *snov,* v *makroskopska telesa* in tako naprej, nadstropje za nadstropjem. Na vrhu te zgradbe so astronomska nadstropja: nebesna telesa, galaksije, jate galaksij in vesolje. Nadstropja so bolj ali manj ločena med seboj. Podrobnosti nižjega nadstropja le malo vplivajo na višja nadstropja in dogajanja v višjem nadstropju le malo motijo nižje nadstropje.

Razloga za takšno samostojnost sta dva. Vsako nižje nadstropje ima za eno ali več velikostnih stopenj manjšo razsežnost od višjega (Sl. 1). Rezultanta sil, ki jih čuti oddaljeni sosed, se zelo malo razlikuje, če se delci v nižjem nadstropju

*Hadroni so vezani sistemi kvarkov. Razlikujemo dva razreda hadronov: mezone (sistem kvark + antikvark) in barione (sistem treh kvarkov). Barione naprej razvrstimo na nukleone (ki so sestavljeni le iz kvarkov u in d) ter hiperone (ki vsebujejo tudi kvarke iz višjih generacij). V družini nukleonov sta proton in nevtron.

premaknejo. Pomaga še dejstvo, da so frekvence kroženja in nihanja v nižjem nadstropju zaradi majhne dimenzije večje kot v višjem nadstropju in čuti odda-



Sl. 1: NARAVA JE ZGRAJENA V NADSTROPJIH

ljeni sosed le neko časovno povprečje, ne pa podrobnosti gibanja v nižjem nadstropju.

Drugi razlog nam pokaže energijska skala. Pri mikroskopskih nadstropjih so v nižjem nadstropju značilne energije (tudi vezavna energija) za več velikostnih stopenj večje. Zato nizkoenergijska dogajanja v višjem nadstropju ne zmotijo dosti čvrsto vezanega nižjega nadstropja. Dolžinska in energijska skala nista neodvisni, povezuje ju Heisenbergova zveza nedoločenosti. Ponekod je skok v dolžinski in energijski skali ogromen (npr. jedra – atomi) in sta nadstropji zelo neodvisni. Ponekod je skok majhen (npr. atomi – molekule) in se nadstropji delno prekrivata.

Avtonomnost nadstropij dopušča, da študiramo vsako nadstropje kolikor toliko neodvisno od drugih. To je mnogo laže, kot če bi se vsi pojavi prepletali. Take razmere so omogočile velik napredek, ki ga doživljamo pri razvoju mikroskopske fizike. Narava nam je delo olajšala. Avtonomija pa ima tu tudi nekaj slabih strani. Fizika se je razdelila na več neodvisnih vej (fizika osnovnih delcev, jedrska, atomska fizika, fizika trdnih snovi itd.) in komunikacija med fiziki često slabi. Vedno bolj se čuti potreba po poenotenju; morda je napočil čas, da smo dovolj nadrobili.

2. Osnovni delci

Kaj so osnovni delci? Ker so nadstropja narave precej avtonomna, smemo v vsakem nadstropju govoriti o drugih osnovnih gradnikih. Za atomskega fizika so osnovni gradniki jedra in elektroni; o jedrih mu ni treba vedeti dosti "tehničnih podatkov": maso in naboj, redkokdaj še magnetni moment ipd. Za astronome so osnovni gradniki zvezde in planeti. Za zidarja so osnovni gradniki opeke, ploščice, cevi itd. Od nekdaj pa je ljudi vznemirjalo vprašanje, kateri delci so "najbolj osnovni", do kod lahko drobimo naravo. Osnovne delce so imenovali pač tiste, do katerih so prispeli. Naši pradedje so razdelili snov na molekule in atome, naši dedje atome na jedra in elektrone, naši očetje jedra na protone in nevtrone, mi drobimo protone in nevtrone na kvarke. V vsaki generaciji sta bila dva tabora: dosegli smo dno narave – ali – še bomo drobili. Tudi danes sta. Morda bodo naši otroci drobili kvarke (spekulativni modeli so že naprodaj), morda je čas, da nehamo drobiti in se lotimo sinteze. (Glas iz občinstva: saj ne bo denarja za še večje pospeševalnike in bo konec drobljenja.)

V tabeli 1 so osnovni delci, kot jih poznamo danes: kvarki (u,d),(c,s),(t,b) in leptoni $(\nu_e,e),(\nu_\mu,\mu),(\nu_\tau,\tau)$. Delcev t in ν_τ še niso odkrili, vendar si težko predstavljamo shemo osnovnih delcev brez njiju. Delce v posameznih okvirčkih imenujemo *generacije.* Narava je sestavljena skoraj izključno iz prve generacije – iz kvarkov

u in d, ki sta gradnika protona in nevtrona, ter iz elektronov e in nevtrinov ν_e. Kakšna je vloga drugih delcev (druge in tretje generacije), še ne vemo. Počutimo se kot otrok, ki je razdrl uro na vijake in koleščke. Poskuša jo ponovno sestaviti, pa mu ostane na mizi še nekaj vijakov in koleščkov. Nekaj je narobe, ura najbrž ne bo šla.

TABELA 1. Osnovni delci

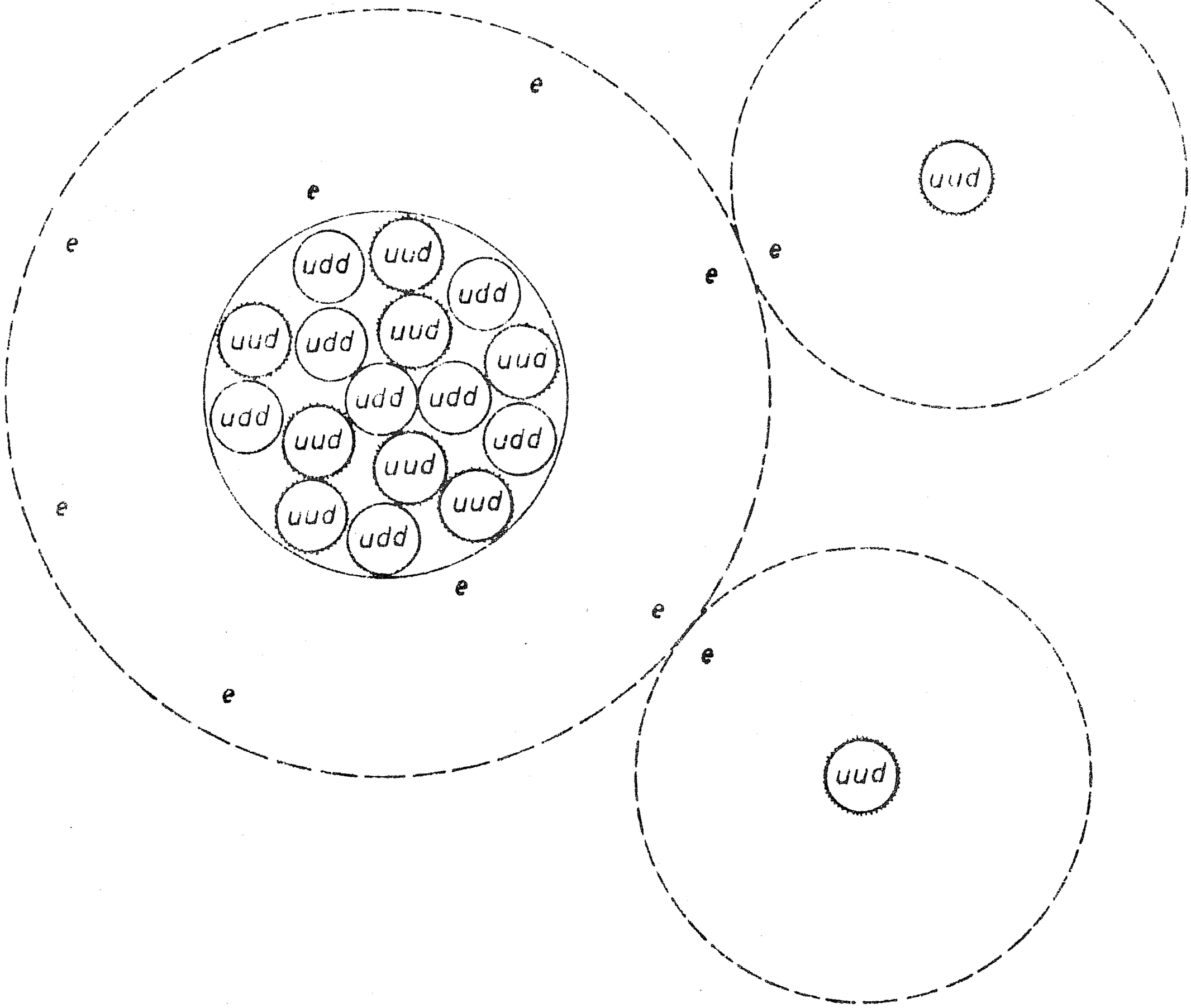
naboj kvarka	barva: rdeč	barva: zelen	barva: moder	brezbarven	naboj leptona
$\frac{2}{3}$	u	u	u	ν_e	0
$\frac{1}{3}$	d	d	d	e	−1
$\frac{2}{3}$	c	c	c	ν_μ	0
$-\frac{1}{3}$	s	s	s	μ	−1
$\frac{2}{3}$	t	t	t	ν_τ	0
$-\frac{1}{3}$	b	b	b	τ	−1

Ne sme nas presenetiti, da imajo kvarki tretjinske naboje – lahko bi pač za osnovni naboj vzeli $\frac{1}{3} e_0$. Vendar za to ni potrebe, ker kvarki vedno nastopajo v kombinaciji s celoštevilčnim mnogokratnikom e_0. Poleg naboja nosijo kvarki še kvantno število *barva.* To ime so dali kvantnemu številu za šalo (po analogiji s trobarvnim gledanjem), sedaj se ga je pa prijelo zares. Pomen barve bomo spoznali v naslednjem poglavju. Značilno za vsako generacijo je, da je vsota nabojev vseh članov enaka* 0. Iz tega lahko skujemo prislovico: ker nastopajo kvarki v treh barvah (leptoni pa v eni sami), si pač kvarki delijo osnovni naboj na tri kose in imajo tretjinske naboje.

Sl. 2 kaže, kako si osnovnodelčni fizik predstavlja molekulo vode. Kemiku si vsega kolesja znotraj atomov H in O ni treba predstavljati, osnovnodelčni fizik pa

*To empirično pravilo napovedujejo moderne poenotene teorije osnovnih interakcij kot izrek iz primerno izbranih prvih načel. Na ta izrek so ponosni.

ne rabi prostrane molekulske okolice okrog jeder. Zanimivo je pa le objeti vso naravo hkrati.



Sl. 2. Molekula vode, kot si jo predstavlja osnovnodelčni fizik. Nadstropja niso narisana v merilu, jedra so 10^5–krat manjša od atomov.

3. Štiri osnovne interakcije

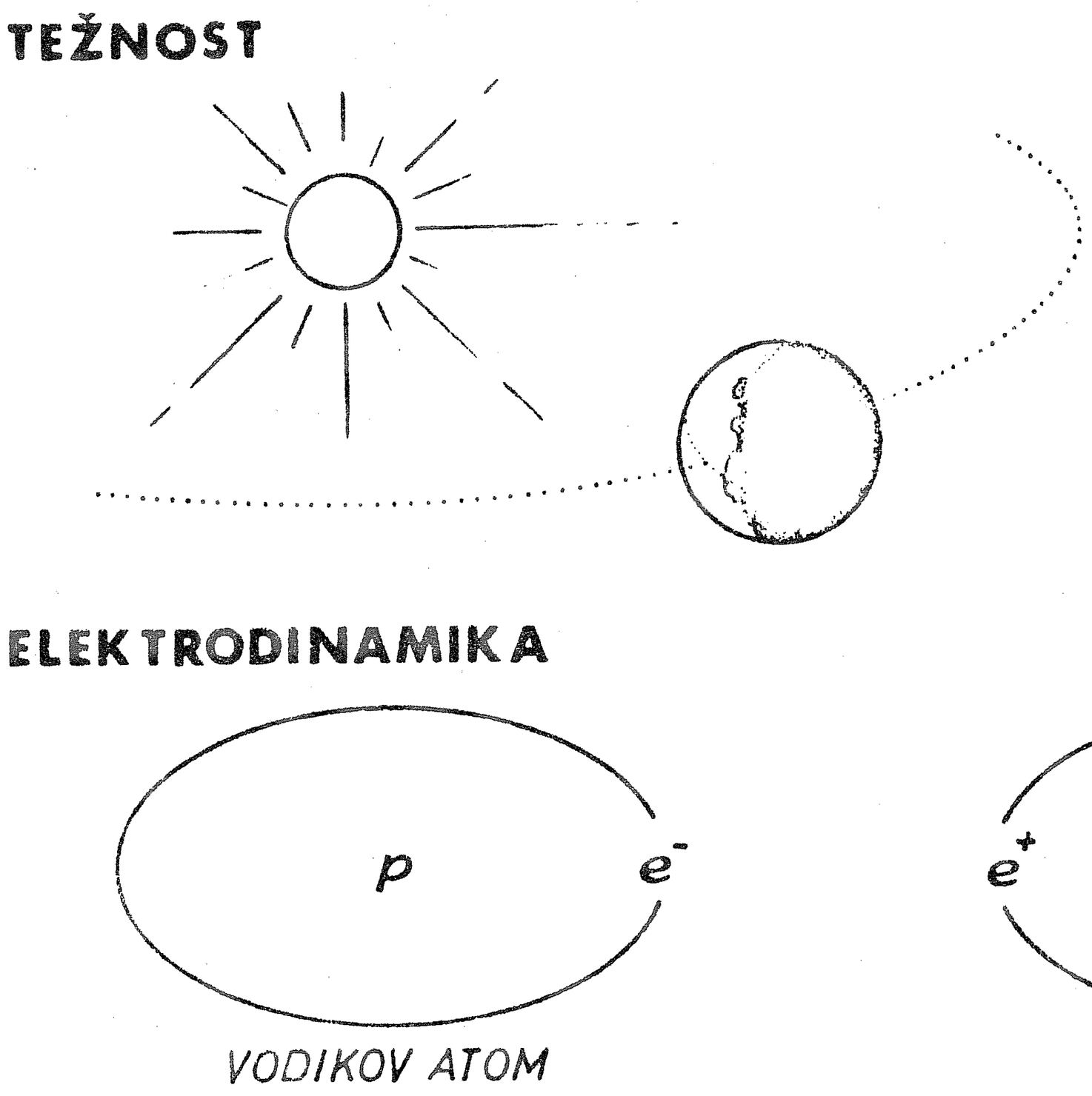
Močna ali *jedrska sila* čvrsto veže kvarke v hadrone in manj čvrsto nukleone v jedra. *Elektromagnetna sila* veže elektrone z jedri v atome ter atome v molekule in snov. *Šibka sila* ne veže, povzroča pa "radioaktivne" spremembe (u $\leftrightarrow$ d), (e $\leftrightarrow$ $\leftrightarrow$ ν_e) itd. *Gravitacijska sila* veže zemeljska in astronomska telesa.

Poleg vezave se manifestirajo sile s spremembo gibanja delcev; povzročajo sipanje projektilov na tarčah. Pri trkih nukleonov in jeder deluje predvsem močna sila, pri trkih elektronov in atomov deluje elektromagnetna sila, pri trkih nevtrinov šibka in pri trkih meteorjev in kometov gravitacijska sila. Pri trkih se lahko delci pregrupirajo v nove gruče: pride do jedrskih in kemičnih reakcij.

Sile lahko spreminjajo tudi notranje stanje delcev, recimo — obračajo spin. Edino šibka sila lahko spreminja tudi ene delce v druge. Lahko spremeni kvark v katerikoli drugi kvark, lepton pa v lepton—partner iz iste generacije ($e \leftrightarrow \nu_e$), ($\mu \leftrightarrow \nu_\mu$); ne pa $\mu \rightarrow e$. Zato šibko silo kljub njeni šibkosti opazimo, saj edina povzroča take procese (razpad beta).

Četrta manifestacija sil je tvorba parov delec—antidelec. Močna in elektromagnetna sila lahko tvorita le delec in *njegov* antidelec: $u\bar{u}$, $e^- e^+$, $p\bar{p} = uud\ \overline{uud}$.

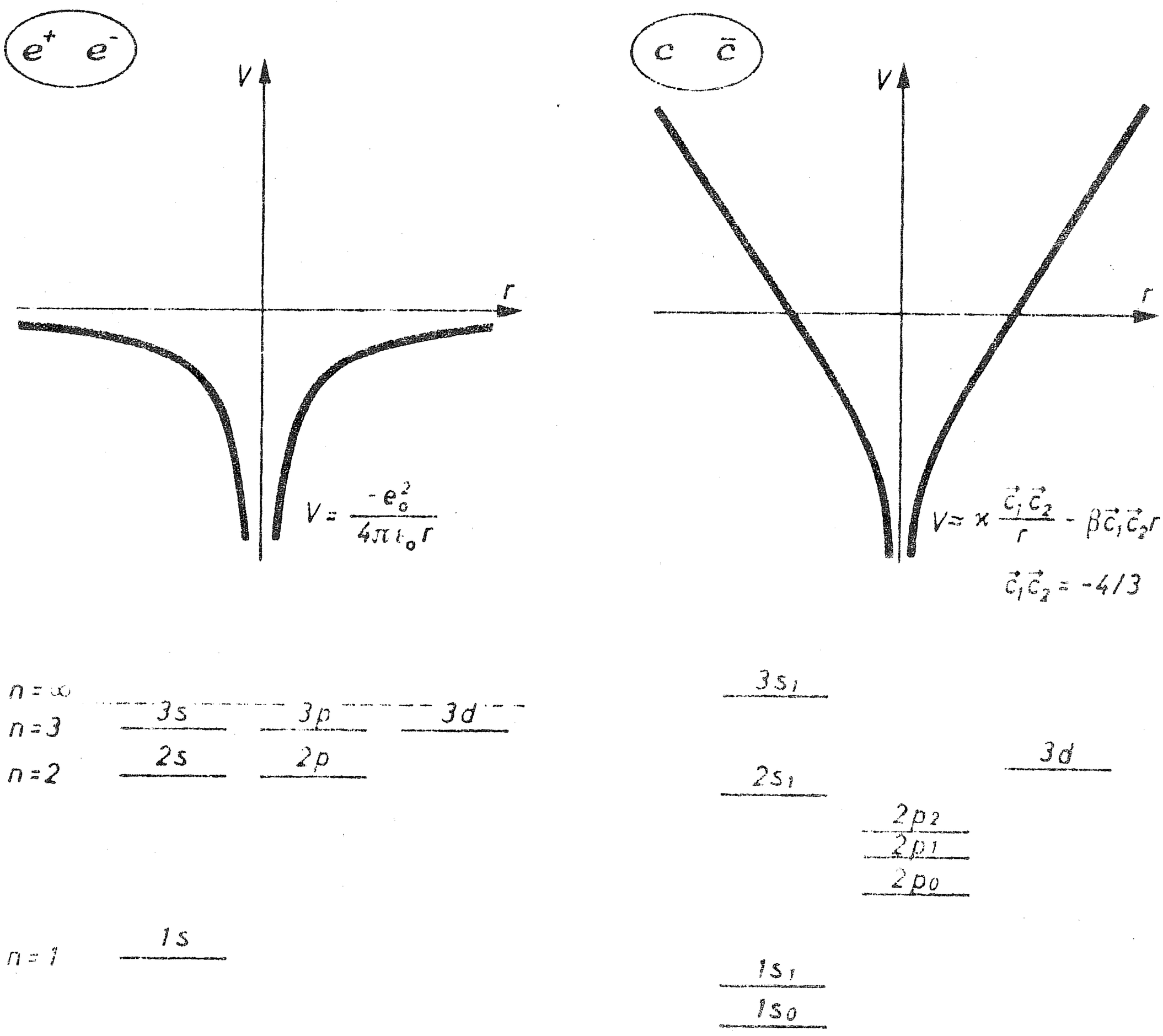
Šibka sila pa lahko rodi različen par, npr. $e^- \bar{\nu}_e$. Pomislimo na običajni razpad beta: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ (podrobneje: $udd \rightarrow udu + e^- + \bar{\nu}_e$, torej $d \rightarrow u$ in rodi se par $e^- \bar{\nu}_e$, preostala kvarka u in d sta gledalca).



Sl. 3. Vezani sistemi dveh teles, ki so nas naučili zakone sil

Polja štirih osnovnih sil so kvantizirana (Tabela 2). O gluonih g, fotonih ν, šibkih bozonih $W^{\pm}$, Z^{o} in gravitonih G lahko govorimo kot o kvantih teh štirih polj ali kot o delcih (bozonih). Izbira je le stvar poimenovanja; obe sta enakovredni. Foton že dolgo poznamo. Za gluone je nekaj eksperimentalnih razlogov pri visokoenergijskih procesih znotraj hadronov. Šibke bozone vneto iščejo z novima pospeševalnikoma v CERN (Ženeva) in Fermilabu (Batavia, Chicago), zlasti v nakopičevalnem obroču za trke curka ob curek. Verjetno bomo dobili odgovor v nekaj letih; zasledujte časopise. Gravitonov najbrž še dolgo ne bomo otipali.

Zanimiva je primerjava jakosti in radialne oblike štirih osnovnih sil. Najučinkovitejše eksperimentalne podatke so dala opazovanja ali poskusi s sistemom dveh teles (Sl. 3). Tak sistem je eksperimentalno laže obvladati zaradi majhnega števila



Sl. 4. Različen spekter kaže na razliko v potencialu

parametrov. Poleg tega znamo problem dveh teles v teoriji analitično rešiti. Newton je za sistem Sonce – planet izpeljal gravitacijski zakon, pa še zakon gibanja povrhu. Iz spektra vodikovega atoma so ugotovili, da velja Coulombov zakon za električne sile tudi na atomskih razdaljah, pa še kvantne zakone gibanja so izluščili. Precej informacije o močni sili je dal študij kvarkonija (mezona), to je sistema kvark – antikvark, še več informacije pa si obetamo v bodoče.

Primerjajmo spekter vodikovega atoma (ali podoben spekter pozitronija) s spektrom čarmonija $\psi = c\bar{c}$ (Sl. 4). Za spekter pri coulombskem potencialu (vodikov atom, pozitronij) je značilno, da so višji nivoji čedalje gostejši in konvergirajo proti končni limiti. Za harmonski potencial je značilen ekvidistanten spekter. Spekter čarmonija pa je nekako med tem skrajnostma. Namiguje na potencial, ki linearno narašča z razdaljo (sila je konstantna). Teoretična razglabljanja in trki pri visokih energijah pa sugerirajo še člen, podoben coulombskemu, $\kappa C_1 C_2/r$, pri čemer izraža C barvo kvarkov. Oblika potenciala, zapisana na sl. 4 in v tabeli 2, je še spekulativna, premalo je še eksperimentalnih in teoretičnih informacij za dokončno teorijo. Oblika potenciala, ki narašča z razdaljo, je dobrodošla, ker pojasni, zakaj ne moremo dobiti prostih kvarkov.

V tabeli 2 je primerjava štirih osnovnih interakcij. Že dolgo vemo, da padata elektromagnetni in gravitacijski potencial kot $1/r$. Ravnokar smo rekli, da ima močna sila člen $1/r$ in člen, ki najbrž narašča linearno z r. Šibka sila ima zelo kratek doseg, današnji eksperimenti kažejo pod 0,01 fm. Poenotena elektromagnetno–šibka teorija, ki predpostavlja približno enako jakost obeh interakcij, napoveduje doseg $r_W \sim 0{,}002$ fm. Sile dolgega dosega posredujejo brezmasni kvanti polj (g, γ, G), kratek doseg pa je znamenje za masivne kvante z maso $m = \hbar/r_W c$. Teorija torej napoveduje mase šibkih bozonov okrog 100 GeV/c^2 ($\sim$ 100 mas protona).

Iz tabele 2 se vidi, da je "coulombski" del močnega potenciala kakih 40-krat močnejši od elektromagnetnega, dodatni člen pa sploh ne pojenja z razdaljo. Gravitacijski potencial med protonoma je 10^{-36} krat šibkejši od elektromagnetnega, torej čisto zanemarljiv v mikroskopskem svetu. Šele na zemeljskih in astronomskih razsežnostih je dovolj delcev, da gravitacijska sila prevlada. Ima namreč prednost, da je med vsemi delci privlačna, torej se je pri velikih telesih veliko nakopiči. Elektromagnetna sila pa je lahko odbojna ali privlačna in se prispevki pri velikih telesih v glavnem uničijo; ostane le majhna rezultanta zaradi rahlih presežkov naboja. Šibka sila ni šibka zaradi majhne jakosti — jakost je najbrž enaka kot pri elektromagnetni — temveč zaradi kratkega dosega. Prešibka je, da bi lahko vezala delce v sisteme.

TABELA 2. Štiri osnovne interakcije

	oblika potenciala	jakost	kvant polja
MOČNA	$\chi \frac{c_1 c_2}{r} - \beta c_1 c_2 r$	$\chi c_1 c_2 \approx 60$ MeV fm $\beta c_1 c_2 \approx 1000$ MeV/fm	g
ELEKTRO-MAGNETNA	$\frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_o r}$	$\frac{e_o^2}{4\pi\epsilon_o} = 1{,}44$ MeV fm	ν
ŠIBKA	$\frac{e_1 e_2}{4\pi\epsilon_o r} e^{-r/r_w}$	jakost je enaka kot pri elektromagnetni $r_W \approx 0{,}002$ fm $m_W = \hbar/r_W c \approx 100\ m_p$	$W^{\pm}$ Z^o
GRAVITACIJSKA	$-G \frac{m_1 m_2}{r}$	$G m_p^2 = 1{,}2 \cdot 10^{-36}$ MeV fm	G

Za zabavo primerjajmo poleg potenciala še silo (Tabela 3). Izberimo za vsako silo značilna telesa in značilno razdaljo med njimi. Zabavno je, da ima sila med nukleoni v jedru enako velikostno stopnjo kot teža človeka na Zemlji. Močna (jedrska) sila, ki veže kvarke, je močna celo za makroskopske pojme (teža 10 ton).

TABELA 3. Štiri osnovne interakcije

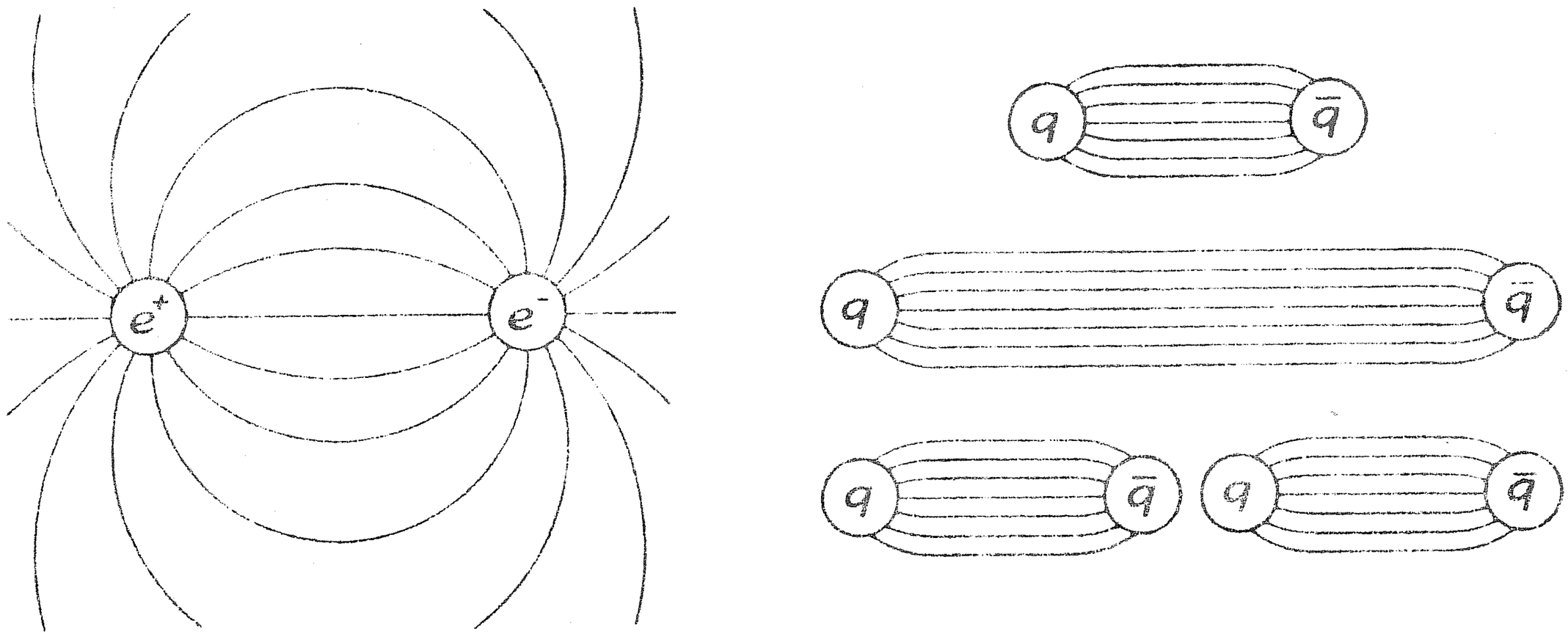
Navedene so tipične vrednosti sile med dvema delcema

delca	q – q	p – p	p – e	človek Zemlja
tipična razdalja	0.5 fm	2 fm	0.1 nm	6400 km
MOČNA	10^5 N	600 N		
ELEKTRO-MAGNETNA	400 N	60 N	2.10^{-8} N	
ŠIBKA				
GRAVITACIJSKA		5.10^{-35} N	1.10^{-47} N	600 N

Vidimo, da se odbojne in privlačne sile med kvarki v različnih nukleonih do 99 % uničijo, le 1 % veže nukleone v jedra. Električna sila med kvarki je zanemarljiva v

primerjavi z močno. Električna sila med protoni v jedru je sicer 10-krat šibkejša od jedrske sile, v jedru urana pa je že tako učinkovita, da ga razžene (razcep jedra, reaktor). Za večino zaključkov pa je primerjava potencialov koristnejša od primerjave sil, ker nas pri procesih običajno zanima energijska bilanca. Sproščena energija, to je delo, pa je sila krat pot; velika sila malo zaleže, če je pot kratka.

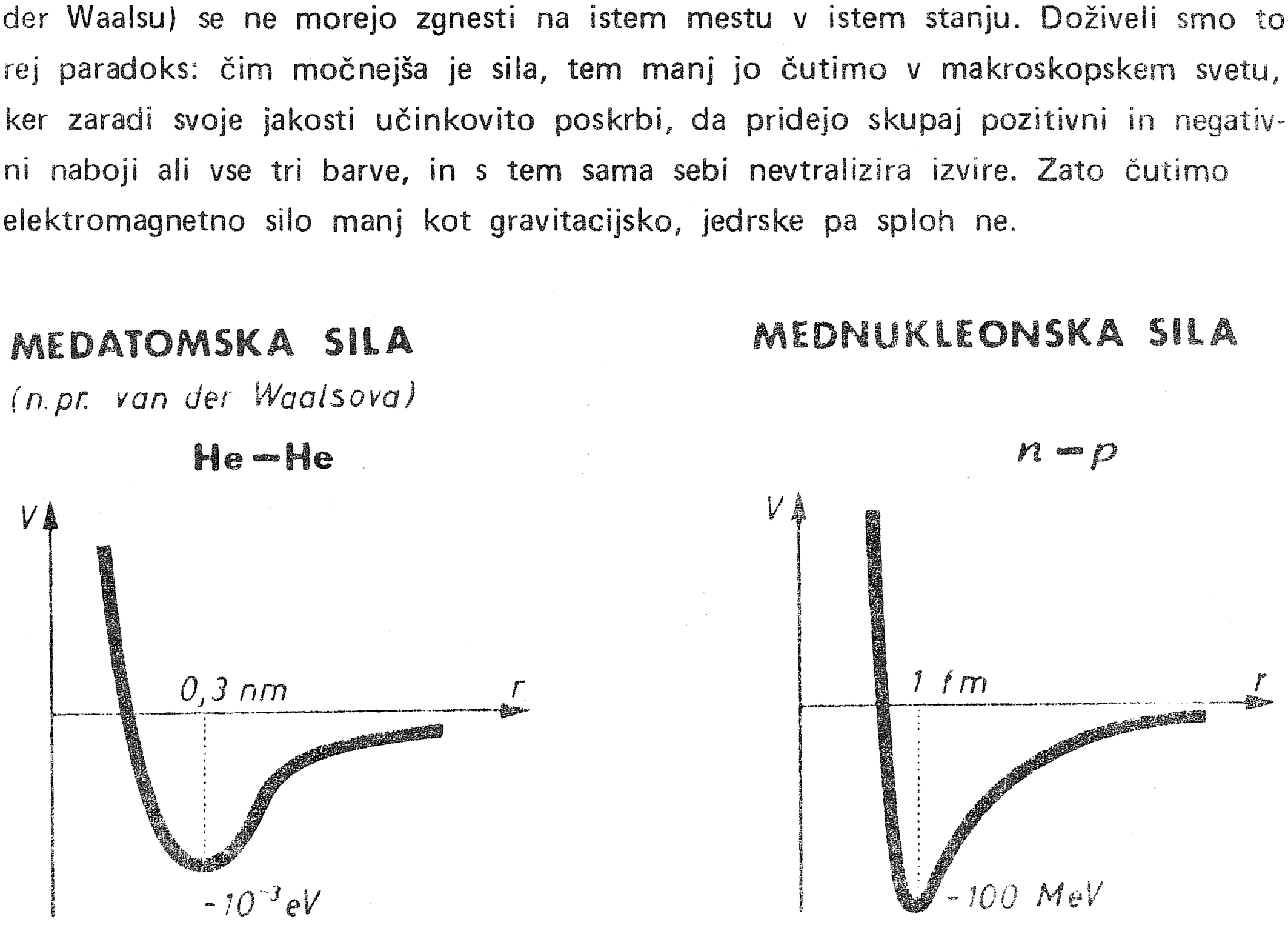
V zadnjih letih je močno napredovala teorija močne (jedrske) interakcije. Novi nauk o jedrski sili se imenuje *kromodinamika,* ker uči, da jedrska sila prijemlje za barvo kvarkov, podobno kot elektromagnetna sila prijemlje za naboje delcev. Izviri jedrskega polja so barve kvarkov, podobno kot so izviri elektromagnetnega polja naboji delcev. Je pa bistvena razlika: medtem ko so fotoni električno nevtralni, so gluoni barvasti, jedrsko polje pa je izvir tudi samemu sebi, zato sila med kvarki ne pojema z razdaljo. Matematično rečemo – jedrsko polje je nelinearno. Po analogiji z Maxwellovimi enačbami za elektromagnetno polje so izoblikovali enačbe za jedrsko polje (Yang–Millsove enačbe), ne znajo jih pa še rešiti – zaradi nelinearnosti in močne sklopitve. V grobem približku so že ugotovili, da potencial med kvarki narašča z r in izračunali silnice (Sl. 5). Pri trkih pri skrajno visokih energijah se da marsikaj izračunati celo s teorijo motenj in dobili so že nekaj potrditev kromodinamike. Kromodinamika predvideva, da je sila med kvarkom in antikvarkom privlačna, če sta navzven barvno nevtralna. Sila med raznobarvnima kvarkoma je privlačna, med istobarvnima pa odbojna.



Sl. 5. Silnice električnega polja med nabojema e^+ in e^- ter silnice močnega (kromodinamičnega) polja med kvarkom in antikvarkom.

Morda nas preseneti, da močne sile ne opazimo v makroskopskem svetu, čeprav ima tako dolg doseg. Ne opazimo je niti v atomskem svetu. Razlog je nasled-

nji. Vsak nukleon je sestavljen iz enega modrega, enega zelenega in enega rdečega kvarka, zato je navzven barvno nevtralen. Privlačne in odbojne sile med kvarki v različnih nukleonih se med seboj popolnoma izravnajo, če sta nukleona daleč. Na razdalji okrog 1 fm rezultanta ni natančno enaka nič. Da nekakšno sekundarno jedrsko silo med nukleoni – podobno, kot je medatomska van der Waalsova sila sekundarna sila (rezultanta privlačnih in odbojnih električnih sil med delci v atomu (Sl. 6). V obeh primerih je sekundarna sila na zelo kratki razdalji močno odbojna zaradi Paulijevega izključitvenega načela: vsi kvarki (ali elektroni pri van der Waalsu) se ne morejo zgnesti na istem mestu v istem stanju. Doživeli smo torej paradoks: čim močnejša je sila, tem manj jo čutimo v makroskopskem svetu, ker zaradi svoje jakosti učinkovito poskrbi, da pridejo skupaj pozitivni in negativni naboji ali vse tri barve, in s tem sama sebi nevtralizira izvire. Zato čutimo elektromagnetno silo manj kot gravitacijsko, jedrske pa sploh ne.



Sl. 6. Sekundarni sili — rezultanti osnovnih sil se skoraj nevtralizirata.

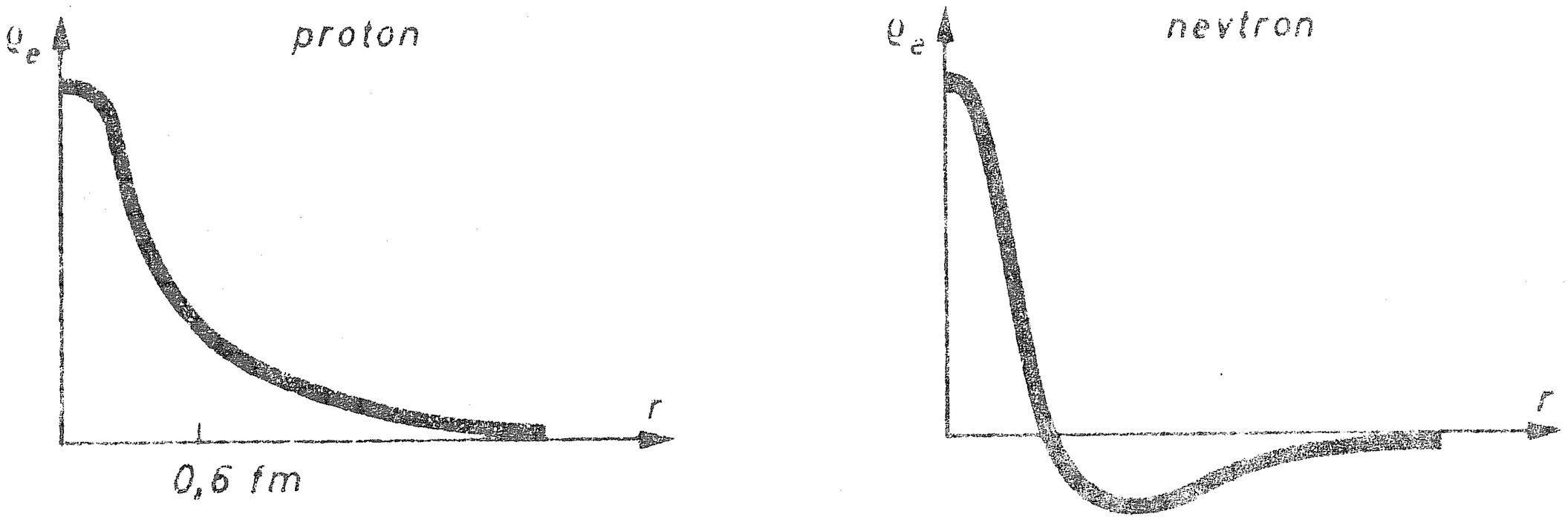
4. Tri spektroskopije. Hadroni so sestavljeni iz kvarkov

Doslej smo nanizali veliko dejstev, toda malo eksperimentalnih potrditev. To in naslednje poglavje pa vsebujeta dokazno gradivo o obstoju kvarkov in njihovih lastnostih.

Če plin segrevamo ali obstreljujemo z delci ali s primerno svetlobo, seva svetlobo s črtastim spektrom. Sklepamo, da imajo atomi diskretna vzbujena stanja.

Iz energijskega spektra atomskih stanj sklepamo na zgradbo atomov in gibanje elektronov v atomih. Trki jeder in jedrske reakcije pokažejo, da ima tudi jedro črtast spekter vzbujenih stanj; iz njega izluščimo gibanje protonov in nevtronov v jedru. Trki delcev pri visokih energijah pa pokažejo črtast spekter vzbujenih stanj tudi pri protonu, nevtronu, mezonih itd. To je vzbudilo sum, da protoni in nevtroni niso osnovni delci, ampak sestavljeni. Kako naj bi imel osnovni, nedeljivi in nespremenljivi delec vzbujena stanja? Podobnost med atomskimi, jedrskimi in hadronskimi spektri je zelo sugestivna (le energijska skala je različna: atomi ~ 1 eV, jedra ~ 1 MeV, hadroni ~ 100 MeV). Model, da so barioni sestavljeni iz treh gradnikov (kvarkov), mezoni pa iz dveh gradnikov (kvarka in antikvarka), je dal dobro ujemanje z eksperimentalnimi hadronskimi spektri. To je vzbudilo upanje, da so kvarki vsaj neke abstraktne prostostne stopnje, če že niso pravi delci.

Sipanje elektronov na protonih in nevtronih je pokazalo, da proton in nevtron nista točkasta, temveč da imata končno razsežnost. To je dodaten argument zato, da sta sestavljena. Oblaki naboja (Sl. 7) so delno oblaki mezonov (zlasti na periferiji), delno prispevki kvarkov. Čim višjo energijo imajo elektroni, tem boljša je ločljivost. Sipanje elektronov si smemo do neke mere predstavljati kot elektronsko mikroskopiranje, ločljivost mikroskopa pa ima velikostno stopnjo valovne dolžine. De Brogliejeva valovna dolžina elektronov je $\hbar/G$, torej je ločljivost "elektronskega mikroskopa" pri sipanju najhitrejših današnjih elektronov (20 GeV) 0,01 fm. Pri nekdanji slabši ločljivosti 0,1 fm (Sl. 7) razločimo le razmazan oblak naboja. Pri današnji ločljivosti 0,01 fm pa lahko ugotovimo, da se sipljejo elektroni na točkastih kvarkih. Ta poizkus spominja na znamenit Rutherfordov poskus s sipanjem delcev alfa na atomih iz začetka stoletja, ki je pokazal, da so jedra skoraj točkasta. S tem je Rutherford ovrgel sliko, da elektroni lebdijo v zelo razsežnem pozi-



Sl. 7. Porazdelitev naboja v nukleonih (ločljivost okrog 0,1 fm).

tivnem naboju in osnoval model atoma s točkastim jedrom v sredi. Kaj zares vidimo? Tako pri Rutherfordovem poskusu (nekaj MeV) kot pri sipanju visokoenergijskih elektronov (20 GeV) je kotna porazdelitev sipanih delcev takšna, kot da se sipljejo na coulombskem električnem polju okrog točkastega izvora. Tudi izrazitost sipanja elektronov ustreza predpostavki, da imamo v nukleonu tri* sipalce z naboji $\frac{2}{3}$ oziroma $-\frac{1}{3}$. To prepričljivo kaže, da so znotraj hadronov točkaste tvorbe (točkast pomeni danes manjši kot 0,01 fm).

Tretja značilnost nukleonov, ki kaže na njihovo sestavljenost, je zapletena oblika jedrskega potenciala med nukleonoma (Sl. 6). Njegova podobnost z van der Waalsovim potencialom med atomoma priča, da je to sekundarna interakcija med gručama delcev, ne pa osnovna interakcija med osnovnima delcema.

Zgodovinsko je prišel do kvarkov Gell–Mann pri razvrščanju mezonov in barionov. Opazil je, da sestavljajo nukleoni in hiperoni oktete in dekuplete, mezoni pa oktete in singlete. Najprej so to obravnavali kot abstraktno teorijo (The Eightfold Way [2]), pozneje pa je Gell–Mann predlagal model s kvarki u,d in s. O sestavljanju mezonov in barionov iz kvarkov, je dosti pisal tudi Obzornik [3]. Opozoriti pa je vredno, da je sestavljanje družin mezonov in barionov iz kvarkov zelo zabavna vaja iz kombinatorike in bi bila zagotovo primerna za fizikalne krožke [4]. Dijaki imajo radi kombinatoriko in bi jih tako zainteresirali še za osnovne delce.

V novejšem času so kvarkom u,d in s dodali še kvarke c in b. Živalski vrt hadronov je dobil nekaj novih družin. Kot rečeno, so morali kvarkom pripisati tudi dodatno kvantno število – barvo, da rešijo Paulijevo izključitveno načelo. V barionu so pri ne preveč vzbujenih stanjih često vsi trije kvarki v istem stanju, kar navidez krši Paulijevo načelo. Če se razlikujejo po novi notranji prostostni stopnji – barvi, je pa spet vse v redu. Reševanje Paulijevega načela s prostostno stopnjo ad hoc je najprej vzbudilo nevoljo. Toda barva je prišla zelo prav kot prijemališče močne sile. Zdaj smo z njo zadovoljni, saj zadene dve muhi na en mah.

5. Prostih kvarkov niso našli – ali kvarki sploh obstajajo?

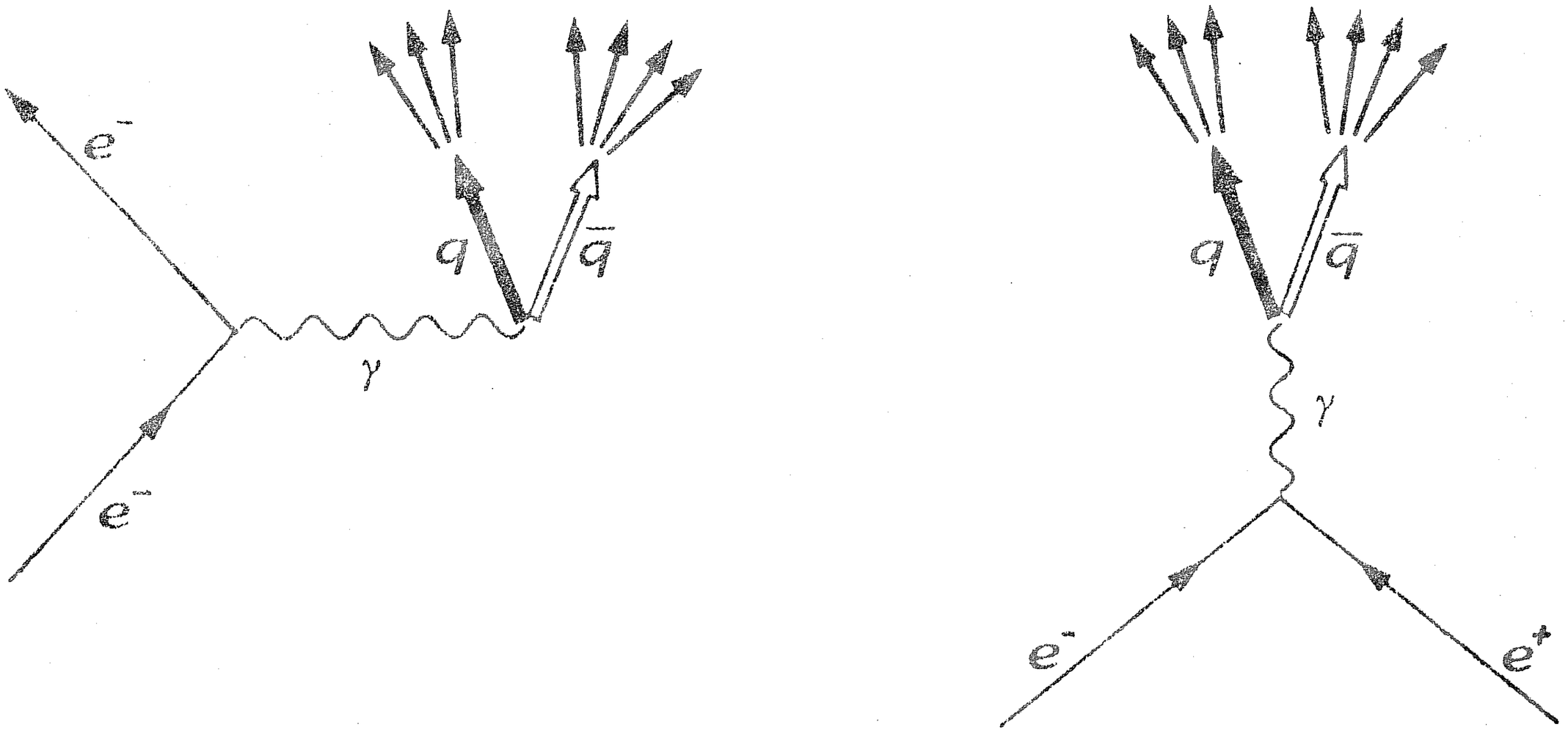
Proste kvarke bi eksperimentalno prepoznali po tem, da imajo tretjino ali dve tretjini osnovnega naboja, vezani kvarki pa so vedno v delcu s celoštevilčno vsoto nabojev. Ker prostih kvarkov niso našli, sklepajo, da so zelo čvrsto vezani. Svojčas so mislili, da imajo ogromno maso (mnogo GeV/c^2) in skoraj enako negativno vezavno energijo, tako da je vsota enaka masi nukleona itd. Menili so, da

*Pravzaprav jih je nekoliko več zaradi dodatnih parov kvark – antikvark v mezonski koroni okrog trojice kvarkov.

bi jih z delom, enakim vezavni energiji, lahko ločili, saj niso pričakovali sile, ki z razdaljo ne pojenja. Danes mnogo eksperimentalnih dejstev kaže, da so kvarki lahki (300 MeV/c^2 ali celo $\sim$ 1 MeV/c^2, odvisno od modela). Kvantna kromodinamika pa namiguje, da sila ne pojenja z razdaljo in zato kvarkov ne moremo spraviti narazen.

Ali pri $r \to \infty$ potencial med kvarki zares narašča v neskončnost (Sl. 4b)? Podobno bi lahko vprašal, ali pri Hookovem zakonu prožnostna energija elastike zares narašča z dolžino v neskončnost. Ne, elastika se strga, diagram se nekje konča. Tudi silnice med kvarki se pri neki razdalji "strgajo". Če krcnemo kvark z visokoenergijskim projektilom iz protona, se silnice raztegnejo. V jedrskem polju se nabere dovolj energije, da se rodi par kvark – antikvark (Sl. 5b). Krcnjeni kvark skupaj z antikvarkom zaznamo kot mezon, rojeni kvark pa dopolni preostala kvarka nazaj v barion. Če ta mehanizem deluje, kvark nikoli ne pride ven sam.

Razčistimo sedaj vprašanje, ali smemo govoriti o kvarkih kot o delcih, če ni prostih kvarkov. Ali so kvarki potemtakem le abstraktna prostostna stopnja barionov? Ali zahteva uklenitev kvarkov, da vpeljemo popolnoma nova fizikalna načela? Pomislimo na poskuse z bakterijami. Tudi poskuse z bakterijami lahko delamo le v tkivu ali epruveti. Na prostem poginejo ali pa se nekako zabubijo. Na prostem torej ne moremo opazovati normalnega življenja bakterij. Kljub temu nihče ne taji, da bakterije eksistirajo in da so žive celice. Tudi za kvarke ni načelne ovire, da jih štejemo za pristne delce, če le lahko delamo z njimi smiselne poskuse znotraj hadronov in če se izkaže, da se pri tem obnašajo kot delci.



Sl. 8. Eksperimentalna "detekcija" kvarkov – pljuski hadronov iz parov kvark – antikvark.

"In vitro" (znotraj nukleonov) so že opazovali tvorbo parov kvark — anti-kvark (SL. 8). Eksperimentalno so opazili dva pljuska hadronov — raznovrstni hadroni so leteli pretežno v dve smeri. Rekonstrukcija dogodkov je pokazala, da je primarni proces tvorba dveh delcev. Kinematika in verjetnost tega primarnega procesa se ujemata s kvantnim kromodinamskim računom za proces $\gamma \rightarrow q\bar{q}$. Račun je podoben elektrodinamičnemu računu za proces $\gamma \rightarrow e^- e^+$. Ta uspeh podpira upanje, da so kvarki podobni drugim delcem in da velja kromodinamika. Opazili so tudi dogodke s tremi pljuski, ki jih razlagajo kot rezultat elementarnega procesa $\gamma \rightarrow q + \bar{q} + g$. Ti naj bi bili prvi eksperimentalni dokaz za obstoj gluonov.

En poskus "in vitro" smo omenili že v prejšnjem poglavju — sipanje visokoenergijskih elektronov. Znotraj nukleona se elektroni obnašajo, kot bi se sipali na točkastem delcu. Za optimiste je torej dokazov dovolj.

6. Ali so kvarki pomembni tudi v višjih nadstropjih narave?

Za zdaj kvarkovske zgradbe ne čutimo *skoraj* nikjer razen pri visokoenergijskih procesih s hadroni in jedri. Kljub temu se je že pojavilo nekaj uporabnikov v najvišjih nadstropjih. Pri težkih nevtronskih zvezdah je tlak v sredini tolikšen, da se zrušijo še nevtroni in snov lahko opišemo kot *"kvarkovsko želatino"*. Mnogo pomembnejši pa so kvarki v kozmologiji, kjer so nepogrešljivi za opis zgodnjih razvojnih stopenj vesolja z velikanskimi temperaturami in ogromnimi energijskimi spremembami. Tedaj so vsi kvarki sodelovali pri krojenju usode vesolja.

Težko je predvideti, kako bodo vplivali kvarki na naše vsakdanje življenje. Tudi ko so študirali elektriko z lisičjimi repi in žabjimi kraki, niso slutili, da bo obogatila naše življenje. Kakšno vlogo bi lahko kvarki imeli v makroskopskem svetu, naj pokaže odstavek znanstvene fantastike. Če bi proizvedli proste kvarke, bi jih lahko praktično uporabili za katalizatorje pri kontrolirani fuziji: $^2H + {}^2H + q \rightarrow {}^4He + q + \Delta W$. Kvark bi pomagal pritegniti oba devterona, ki se zaradi odbojne elektrostatične sile težko približata. Nato bi odletel in bil spet na razpolago za naslednjo reakcijo. Morda bi kar nasuli ščepec praška s kvarki v posodo in voda bi zavrela. Pojavile bi se tudi neslutene možnosti za kemijo. Nove molekule, na katerih bi sedeli kvarki, bi imele tretjinske naboje in jih ne bi mogli nevtralizirati. To bi lahko vodilo do čisto novih kemičnih in fizikalno — kemičnih lastnosti. Verjetno iz te moke ne bo kruha, ker prostih kvarkov ne bodo našli. Nadejajmo pa se drugih presenečenj.

Verjetno bodo imeli kvarki pomembno vlogo pri poenotenju slike o naravi. V enoten okvir so že spravili elektromagnetno in šibko silo, dobro kaže tudi za

vključitev jedrske sile. Precej težav je še z gravitacijo. Nekateri menijo, da je gravitacija glavni vezni člen, hkrati dno in vrh narave, pomembna pri najmanjših in največjih razdaljah v naravi. Če bi želeli zgraditi enotno sliko narave na ravni atoma ali nukleona, ne bi šlo; morda bo šlo na nivoju kvarkov.

Za zaključek ponovimo: naravo smo razdrli na drobne koleščke in vijake. Morda je čas, da nehamo razdirati in se jo naučimo iz vsega tega spet sestaviti celovito in lepo. Tega ne moremo doseči, če se ne seznanimo s kvarki.

LITERATURA

[1] W.K.H. Panovsky, *Fizika fotonov in elektronov pri visokih energijah — zdaj in v prihodnje,* Obzornik mat. fiz. 11 (1964) 105.

[2] J. Strnad, *Mezoni in barioni,* Obzornik mat. fiz. 10 (1963) 159.

[3] J. Strnad, *Kvarki,* Obzornik mat. fiz. 12 (1965) 76; *Čarobni delci,* Obzornik mat. fiz. 24 (1977) 16; *Kvarkonij,* Obzornik mat. fiz. 24 (1977) 214; B. Golli, *Delci ψ v modelu kvarkov,* Obzornik mat. fiz. 22 (1975) 193.

[4] M. Rosina, *Kako sestavimo protone, nevtrone in mezone iz kvarkov,* Presek (v pripravi).

Obzornik mat. fiz. 29 (1982) 5/6

TRI LETA, DVE ŠOLI, ENA FIZIKA

JANEZ FERBAR

UDK 372.853

Vsebina začetnega tečaja fizike v slovenskih šolah je povezana v dva pojmovna spleta. To sta energijski zakon in zgradba snovi.

THREE YEARS, TWO SCHOOLS, ONE PHYSICS

The subject matter of the initial physics course in Slovenian schools is organised into two conceptual schemes: Energy Law and Structure of Matter.

1. Uvod

Začetni tečaj fizike v slovenskih šolah traja tri leta, odvija se na dveh stopnjah šolanja in je enoten za vse učence. Značilno zanj je, da je zasnovan kot fizika za vse in hkrati kot vsa fizika za večino.

Da bi bila fizika za vse, je bilo treba metode pouka na srednji stopnji prilagoditi tistim na osnovni stopnji. V srednjo šolo se namreč zdaj vključi skoraj vsa mladina in ne le njen izbrani del kot nekoč.

Da bi bilo mogoče učencem podati kolikortoliko zaokroženo podobo fizike, se je bilo treba odpovedati zakoreninjenemu ponavljanju vsebin na različnih stopnjah šolanja. Srednješolski del začetnega tečaja fizike je zato vsebinsko nadaljevanje programa zastavljenega v osnovni šoli.

Praktična posledica vsebinske in metodične enotnosti začetne fizike je zahteva po poenotenju okoliščin pri pouku. Zato smo izdelali enotne normative za prostore, napeljave in osnovno opremo za pouk fizike. Poenoten je celo del opreme za eksperimentiranje.

Videti je, da so največje težave v sestavi učiteljev. Le dobra polovica učiteljev na osnovnih šolah je ustrezno usposobljenih za pouk. Položaj v srednji šoli ni boljši. Formalna usposobljenost za pouk fizike seveda še ne zagotavlja, da so učitelji zanj tudi dejansko usposobljeni. Različne oblike izobraževanja ob delu in iz dela ter organizirano in aktivno sodelovanje učiteljev v okviru strokovnih aktivov bodo le počasi izboljšali sedanje stanje. Ker na učitelju sloni in z njim

pade vsak pouk, posebej pa še vsaka prenova pouka, prevzemajo kadrovske šole in strokovne službe pomembno dolgoročno nalogo usposabljanja učiteljev za pouk.

Poleg notranje enotnosti začetnega pouka fizike, kaže pregledati še vlogo fizike v povezavi z drugimi predmeti, ki sestavljajo temeljno vzgojo in izobrazbo vse naše mladine. Predvsem gre za povezave z matematiko, z drugimi naravoslovnimi predmeti ter s proizvodno-tehniško vzgojo. Ne kaže zanemariti tudi manj razvidnih povezav s poukom materinščine in družboslovnih predmetov.

Povezovanje med predmeti poteka na dveh ravneh. Usklajevanje načrtov že ob njihovem nastajanju je koristno in zaželeno, vendar je zaradi časovnih stisk in različnih negotovosti, ki spremljajo prenovo, le redko izvedljivo. Usklajevanje je mogoče izpeljati naknadno z več iteracijskimi krogi, v katerih morajo sodelovati zlasti predstavniki različnih strok, učitelji kadrovskih šol in pisci didaktičnega kompleta. Postopki za poenotenje in boljše povezovanje so često dolgotrajni in neprijetni, vendar nujni. Ni jih mogoče preložiti na upravne organe in ustanove, temveč so in ostajajo dolžnost strokovnjakov in učiteljev kadrovskih šol.

V okviru osnovne šole smo na tak način že usklajevali pouk fizike in matematike ter tehniške vzgoje. Mnogo manj je bilo doslej storjenega za povezavo z drugimi naravoslovnimi predmeti na predmetni stopnji pouka. Boljšo usklajenost med predmeti smo tudi že dosegli v okviru predmetov spoznavanja narave in spoznavanja narave in družbe.

Na stopnji srednje šole je bil že opravljen en iteracijski krog pri usklajevanju fizike z osnovami tehnike in proizvodnje. Pričakovati je, da se bo to delo v prihodnje nadaljevalo. Pokazalo naj bi se seveda predvsem v učbenikih ob ponatisih.

Druga raven usklajevanja med predmeti poteka na šolah. V ta namen kaže vzpodbujati delo strokovnih aktivov matematikov in fizikov in organizacijsko razširjati to delo v aktivih učiteljev naravoslovnih in proizvodno tehničnih predmetov.

Vsebinska enotnost začetnega tečaja fizike

Vsebina začetne fizike je nanizana okrog dveh pojmovnih spletov.

- Materialni svet je sestavljen iz delov – podsistemov. Ti se na različne načine gibljejo in spreminjajo in učinkujejo drug na drugega.
- Za spremembe veljajo v določenih okoliščinah ohranitveni zakoni.

Z deljivostjo snovnega sveta se srečamo, ko posamezen predmet ločimo od njegove okolice. Najenostavneje je to storiti, če je vpliv okolice nanj zanemarljiv. Predmet sam naj se ne spreminja. Ker se v različnih okoliščinah izkažejo za pomembne različne lastnosti predmeta, je smiselno določiti niz lastnosti, ki se ohranijo ali spremenijo. Definicijske lastnosti predmeta se ohranjajo, saj drugače o

predmetu ne moremo govoriti. Lastnosti pogosto želimo zmeriti in jih izraziti s števili. Posebno ugodna je delitev opazovanega sistema na enake podsisteme. Tako kemiki dele snov na atome, fiziki pa atome razdele še na manjše delce.

Deli delujejo drug na drugega. V začetnem tečaju fizike obravnavamo predvsem sile med telesi ter izmenjavo dela in toplote.

Zaradi tega se telesom spreminjajo lega, hitrost in stanje. Lega in hitrost sta določljiva le glede na okolico. V opis stanja pa sodijo vse druge količine, ki jih je mogoče opredeliti in izmeriti brez sklicevanja na okolico. V začetnem pouku fizike so takšne spremenljivke: temperatura, tlak, agregatno stanje, kvalitativno pa govorimo tudi o nekaterih električnih, magnetnih in optičnih lastnostih. Kvantitativno vpeljemo le tiste količine, ki jih v okviru začetnega tečaja učenci tudi sami merijo.

Ohranitveni zakoni so eden od načinov, kako lahko povemo, da je svet spremenljiv. Številne mogoče spremembe v svetu namreč razvrstimo v skupine tako, da povemo, katera količina se pri določeni vrsti sprememb ohranja. Pri tem se pogosto dogodi, da moramo definicijo za količino, ki se pri določeni zvrsti sprememb ohranja, večkrat dopolniti.

Zakon o ohranitvi snovi

Prvi ohranitveni zakon, s katerim se seznanijo učenci, je zakon o ohranitvi snovi. Že na predšolski stopnji preide razumevanje tega zakona več stopenj. Prav majhni otroci ne verjamejo niti v ohranitev posameznega predmeta. Taki lahko verjamejo pravljicam, v katerih predmeti nastajajo iz nič in spet izginevajo. Mera za snov na tej stopnji je kar predmet, ki ga je s čuti mogoče razločiti od okolice. Pozneje, v prvih letih šolanja, se otroci prepričajo, da pri nekaterih spremembah velja zakon o ohranitvi števila predmetov. To velja za orehe in jabolka dokler jih ne stolčejo ali razrežejo. Mera za snov na tej stopnji je število predmetov. Pri oblikovanju plastelina se ohranja prostornina. Zato lahko pri tovrstnih spremembah merimo snov s prostornino. Če pa les zgori in železo zarjavi, se ohranja skupna masa snovi.

Vsaka nova definicija za snov vključuje vse prejšnje kot posebne primere. Z vsako novo lahko ohranitveni zakon za snov formuliramo za širšo skupino pojavov.

Energijski zakon

Katere vrste energije so zaloga dela? Temeljni zakon, ki ga obravnavamo v okviru fizike, je energijski zakon. Najprej ga povemo za točkasto in togo telo kot izrek

o kinetični energiji. Delo vseh zunanjih sil je enako spremembi kinetične energije telesa: $A = \Delta W_k$. Kinetična energija je zaloga dela. Telo s kinetično energijo lahko delo odda.

Med zunanjimi silami je posebno imenitna teža. Če kaka zunanja sila telo dviguje, se ji teža upira. Če telo na začetku in na koncu poskusa miruje, je delo vseh drugih zunanjih sil ravno enako negativnemu delu teže. Dvignjeno telo prejeto delo lahko spet odda. Nova oblika zaloge dela je potencialna energija. Izrek o kinetični energiji dopolnimo takole: $A' = \Delta W_k + \Delta W_p$, če je A' delo vseh zunanjih sil razen teže.

Nato raztezamo vzmet ali prožno vrvico. Ugotovimo, da je prejela delo, kinetična ali potencialna energija pa se ji nista povečali. Gornji zapisani izrek za vzmet ne velja. Lahko pa ga obdržimo, če ga razširimo in vpeljemo novo vrsto energije: prožnostno energijo W_{pr}, ki je odvisna od podaljška vzmeti. Vsem trem vrstam energije je skupno, da so zaloga dela in da so sorazmerne z velikostjo opazovanega sistema. Enolično so odvisne od hitrosti, višine in podaljška. Spremembo energije lahko zračunamo iz podatkov o teh količinah na začetku in na koncu poskusa.

Notranja energija ni zaloga dela. Pri naslednjem poskusu gnetemo plastelin. Plastelin prejme delo, ne spremeni pa se mu nobena od znanih vrst energije. Če hočemo tudi take spremembe vključiti v energijski zakon, moramo definicijo energije razširiti. Ker opazimo, da se pri gnetenju temperatura plastelinske kepe zviša, vpeljemo notranjo energijo, ki je odvisna od temperature. Kvantitativen poskus naredimo z bakrenim valjem, ki ga drgnemo z vrvjo in spremembo notranje energije zmerimo z dovedenim delom.

Širokosrčnost pri razširjanju pojma energije pa se nam zdaj maščuje. Notranja energija ni več zaloga dela. Segreta kepa prejetega dela ne vrne. Pri iskanju opravičila za to, da vse štiri količine poimenujemo s skupnim imenom energija, poudarimo, da so njihove spremembe merljive z dovedenim delom in da so enolično odvisne od drugih spremenljivk. Ko nato s kladivom razbijamo po ledu, da se ga nekaj stali, si ne obotavljamo več reči, da je notranja energija odvisna tudi od agregatnega stanja. Učence moramo pač prepričati, da energija ni odvisna le od spremenljivk, ki se zvezno spreminjajo. Agregatnemu stanju vsaj na začetku ne priredimo kakega števila, tako kot na primer hitrosti ali temperaturi. Različna agregatna stanja označimo le z različnimi besedami.

Toplota. Nato se lotimo nedramatičnega poskusa s segrevanjem bakrenega valja na grelni plošči. Ker temperatura naraste, vemo, da se je valju zvečala notranja ener-

gija. Dela pa valj ni prejel. Energijski zakon kaže primanjkljaj na strani enačbe, na kateri sameva člen A. Dopolnimo torej tokrat to stran. Rečemo: valj je od grelne plošče prejel toploto Q. Ta je enaka spremembi notranje energije valja:

$$Q = \Delta W_n$$

Najdemo tudi zglede, ko se zaradi dovajanja toplote poveča kinetična ali potencialna energija sistema. Energijski zakon ima zdaj obliko:

$$A + Q = \Delta W .$$

Sprememba polne energije sistema ΔW je vsota sprememb vseh vrst energij.

Električno delo. Priključimo žarnico ali elektromotor na baterijo. Žarnici se poveča notranja energija, motorju pa kinetična. In vendar baterija žarnici ne more oddajati toplote, saj ima nižjo temperaturo od nje. Prav tako baterija motorju ne oddaja dela, saj ga niti ne vleče niti ne potiska. Energijski zakon rešimo z električnim delom A_e, ki ga pridružimo mehaničnemu delu.

Ko nas spomladno sonce ogreje, se nam povečajo vse vrste notranje energije zaradi njegove blagodejne svetlobe in toplote. V energijskem zakonu oboje obravnavamo kot toploto Q.

Električna potencialna energija. Podobno kot ima dvignjen kamen v bližini Zemlje potencialno energijo, ima naeleketren papirček ali milni mehurček v bližini krogle van de Graaffovega generatorja električno potencialno energijo. Tu gre zopet za zalogo dela, kakor pri dvignjenem kamnu. Zato se dogovorimo, da gravitacijsko in električno potencialno energijo združimo v enoten člen W_p. Z nekaj previdnosti lahko vključimo v ta člen tudi magnetno potencialno energijo.

Energija polja. Nabit kondenzator izpraznimo preko žarnice, ki za hip zasveti. Vzporedno z žarnico zvežemo v električni krog tuljavo, žarnica sveti še nekaj časa potem, ko izključimo baterijo. Nabit kondenzator in tuljava, po kateri teče tok, sta shrambi za energijo. Energija pa ni v kondenzatorskih ploščah ali v žici tuljave. Ker so se spremenile lastnosti prostora okrog plošč in okrog navitja, ko je tam nastalo električno ali magnetno polje, priredimo poljema električno ali magnetno energijo W_e in W_m. Iz sprememb jakosti polja je mogoče zračunati spremembe energije. Z vpeljavo energije polja smo pojem energije močno posplošili. Energija ni več nujno vezana na snovno telo.

Zdaj lahko energijski zakon zapišemo v dokončni obliki:

$$A + Q = \Delta W .$$

Pomen simbolov je zdaj širši: A je mehanično in električno delo, Q je toplota in svetloba, ΔW je sprememba polne energije, ki lahko vključuje spremembe vseh vrst potencialne energije, kinetične energije, električne in magnetne energije in vseh vrst notranje energije. To je vsebina energijskega zakona, okoli katerega se suče skoraj ves osnovni tečaj fizike. Učenci naj bi ga razumeli vsaj na pol kvantitativno.

Ko smo ga razširjali in dopolnjevali, je raslo tudi razumevanje energije. Nekateri so celo mnenja, da o energiji povemo vse, če oznanimo, da je to količina, ki ustreza energijskemu zakonu. To je najbrž le malce prehudo, saj bi se v tem primeru energijski zakon sprevrgel v golo definicijo.

Zakon o ohranitvi energije. Poseben primer energijskega zakona je zakon o ohranitvi energije. Če opazovani sistem z okolico ne izmenjuje niti dela niti toplote, je sprememba polne energije $\Delta W = 0$. Energija na začetku in na koncu poskusa je enaka. Kljub temu pa se v opazovanem sistemu lahko marsikaj dogaja. Padajočemu kamnu se povečuje hitrost. Pravimo, da se potencialna energija kamna pretvarja v kinetično. Pri popolnoma prožni žogici, ki odskakuje na togih tleh, gredo energijske pretvrobe takole: $W_p \rightarrow W_k \rightarrow W_{pr} \rightarrow W_k \rightarrow W_p$. V obeh zgledih je energija kljub pretvorbam ves čas v istem telesu.

Včasih je treba opazovani sistem razširiti, če naj zanj velja zakon o ohranitvi energije. Zgled je voziček na vodoravni mizi. Poganja ga utež, ki visi na nitki obešeni preko škripca. Voziček se na robu mize zaleti v prožno ravno pero, denimo list za kovinsko žago, ki mu spremeni smer gibanja.

Če opazujemo samo voziček, mu energija narašča. Ohranitveni zakon zanj očitno ne velja. Poskusimo z vozičkom in utežjo. Na začetku je vsa energija sistema enaka potencialni energiji uteži. Nato se potencialna energija uteži manjša, kinetična energija vozička pa veča. Nazadnje je vsa energija sistema v kinetični energiji vozička in uteži. Za energijo velja ohranitveni zakon. Vendar tokrat razen pretvorb energije opazimo še, da se energija seli iz enega dela v drug del sistema.

Ko se voziček zaleti v vzmet, se ustavi. Ustavi se tudi utež in sicer v najnižji legi. Polna energija vozička in uteži je enaka nič. Nato napeta vzmet požene voziček, in se začne gibati v nasprotni smeri. Če naj tudi za odboj vozička od vzmeti uporabimo izrek o ohranitvi energije, je treba k sistemu prišteti še vzmet. Tedaj lahko trdimo, da se je energija v sistemu pretvarjala takole:

$W_{p\ uteži} \rightarrow W_{k\ vozička\ in\ uteži} \rightarrow W_{pr\ vzmeti} \rightarrow W_{k\ vozička\ in\ uteži} \cdots$

Pri pretvarjanju se je energija sicer selila iz enega dela sistema v drug del, v celotnem sistemu pa se je vendarle ohranjala.

Energijske spremembe in pretvorbe*

Dogovorili smo se, da o energijskih spremembah govorimo, kadar sistem z okolico izmenjuje delo ali toploto. Tedaj velja: $\Delta W \neq 0$. Pri energijskih pretvorbah pa je $A + Q = 0$ in torej $\Delta W = 0$. Na opazovani sistem sicer še vedno lahko delujejo zunanje sile razen teže, le da mu ne smejo dovajati dela. Za ilustracijo te razlike si oglejmo spuščanje kepe plastelina najprej na beton, nato pa v vodo. Opazovano telo je vselej plastelin.

Ko pade plastelin na beton, se zaradi sile betona splošči in segreje. Sila betona pa plastelinu ne odda nobenega dela, saj se njeno prijemališče nikamor ne premakne. Zato se energija plastelina pri padcu na beton ne spremeni: $\Delta W = 0$. Energijske pretvorbe gredo takole: $W_p \rightarrow W_k \rightarrow W_n$.
Drugače je, če plastelin pade v vodo. Hitrost se mu v vodi počasi zmanjšuje, dokler ne pristane na dnu, ne da bi se mu spremenila oblika. V tem primeru se je energija plastelinu zmanjšala, saj je ob padanju skozi vodo oddajal delo vodi. Če opazujemo samo plastelinsko kepo, ne moremo govoriti le o energijskih pretvorbah. Res se je najprej potencialna energija pretvorila v kinetično energijo kepe, nato pa je kepa oddala delo vodi in zato se ji je energija zmanjšala. Če želimo tudi pri padcu plastelina v vodo govoriti o energijskih pretvorbah, moramo kot opazovani sistem vzeti plastelin in vodo. Tega recepta se moramo poslužiti vselej, kadar hočemo uporabiti energijski zakon za telesa, na katera deluje trenje ali upor tekočine. Telo, ob katerega se dano telo tare, je treba vključiti v opazovani sistem.

Razmeroma dolgovezna analiza zgledov za energijske spremembe in energijske pretvorbe je imela namen opozoriti na eno od najpogostejših napak v zvezi z uporabo energijskega zakona.

Terminološke zadrege. Med šolske težave, ki so povezane z energijo, sodijo tudi jezikovne. Pravilno je govoriti o energiji teles in polj. Takole moramo reči:
Telesu se energija lahko poveča ali zmanjša, če z okolico izmenjuje delo ali toploto. Nekateri pa se ne drže tega načina govorjenja.

Če se ukvarjamo z atomi, potem govorimo tudi, da si atomi in molekule

---

*To razločevanje je še stvar razprave (opomba urednika za fiziko).

energijo izmenjujejo. Ko govorjenje o izmenjavi energije presadimo v makroskopsko fiziko, se nam rado zareče, da telesa izmenjujejo energijo v obliki toplote ali v obliki dela. Ni gotovo, če takšno povečanje gostote besed pripomore k razumevanju ali ga oteži.

Jezikovne povezave. Med fiziko in jezikom pa najbrž obstajajo globlje povezave. Preprosta poved vsebuje osebek, povedek in predmet: "Kuža gloda kost". Če opredelimo kost kot opazovani sistem, je kuža okolica in fizikalna vsebina navedenega stavka je tale: "Opazovani sistem iz okolice prejema delo".

Če želimo povedati, da se med dogodki s kostjo kaka njena nedefinicijska lastnost ohranja, uporabimo v ta namen glagol biti. Ta ne opisuje sprememb, temveč stalnost. "Kost je težka". Če stavek povemo v kvantitativni obliki, se glasi takole: "Masa kosti je 2 kg". Dodali bi še lahko: "Ne glede na to, kaj vse kuža počne s kostjo, njena masa ostaja konstantna in je 2 kg". Stavki, katerih povedek vsebuje glagol biti, so torej kvalitativni predhodniki ohranitvenih zakonov. Zakon o ohranitvi energije je eden od njih.

Poudariti velja, da so ohranitveni zakoni vselej izjave o nespremenljivosti nedefinicijskih lastnosti snovi. Smiselna je trditev: "Voda je mrzla". Čudno pa je slišati izjavo "Voda je mokra". Mokrost je namreč po vsakdanjih izkušnjah ena od definicijskih lastnosti vode. Tudi o ohranitvi energije kaže govoriti le, če energija ni definicijska lastnost sistema.

Očitki vesti. Naštete težave v zvezi z energijo sicer belijo lase učiteljem in nagajajo učencem, vendar jih je mogoče premagati. V času energijske krize pa lahko naletimo na resnejše kritike. V okviru energijskega zakona se učenci nauče, da energije ni mogoče narediti iz nič ali uničiti. Razen tega slišijo še, da se različne vrste energije pretvarjajo druga v drugo. Kako naj to znanje pripomore k razumevanju energijske krize in kako naj bo vodilo k varčevanju z energijo? Ali niso tisti, ki so se naučili, da se energija ohranja, na slabšem od onih, ki o energijskem zakonu niso nikoli slišali. Ti drugi bodo namreč raje prisluhnili svarilom pred razsipnostjo z energijo. Oni prvi pa bodo zamahnili z roko, češ: "Prazne marnje! Učili smo se vendar, da se energija ohranja".

Za to nimamo dobrega zagovora. Mimogrede namreč omenimo tu in tam, da se notranje energije ne da zlahka pretvarjati v druge vrste energije. Toda to omenimo bolj kot lepotno napako energijskega zakona, ne pa kot temeljno spoznanje. Energijski zakon sam za razumno varčevanje z energijo ne zadošča. V šoli mu bomo morali še nekaj dodati, da bodo ljudje v vsakdanjem življenju razumeli, zakaj moramo varčevati z energijo.

Atomika

Drugi pojmovni splet v začetnem tečaju fizike je atomska zgradba snovi. Misel, da je snov iz velikega števila enakih delcev, spoznajo učenci pri začetnem pouku kemije. Zakone o spajanju elementov je najlaže razložiti z atomsko zgradbo. Zakon o ohranitvi mase dobi v mikroskopskem svetu spet že znano obliko zakona o ohranitvi atomov, ki so pri kemijskih reakcijah nedeljivi.

Zato, da z atomi razložimo še druge lastnosti snovi in pojave, je treba odkriti še njihove druge lastnosti. Tako iz razlik v gostoti sklepamo na to, da so v enakih okoliščinah razdalje med molekulami v plinu okrog desetkrat večje kot v kapljevini ali trdnini. Ker so slednje le malo stisljive, sklepamo, da se v njih atomi skoro tišče drug drugega. Med kapljevinami in trdninami pa je bistvena razlika v razporeditvi atomov. Pravilna zgradba kristalov je namreč dokaz, da so atomi v trdni snovi bolj urejeni kot v kapljevini. Če poskusimo kristalu spremeniti obliko, se sile med atomi temu upirajo. Sile, ki so potrebne za deformiranje kapljevin, so dosti manjše, saj kapljevine lahko tečejo. Še vedno pa molekule čutijo privlak sosed. Zato nastajajo kaplje. Pri plinih pa so molekule v povprečju tako daleč narazen, da druga na drugo skoraj ne vplivajo, razen tedaj, kadar se zadenejo.

Iz energijskega obračuna pri spremembah agregatnega stanja lahko ocenimo, kolikšno delo je potrebno, da se molekule vezane v kristalu ali kapljevini sproste. Na osnovi preprostega poskusa ocenimo velikost molekul iz debeline enomolekulske plasti. Iz tega je mogoče sklepati na število molekul v makroskopskih telesih in na njihovo maso.

Poskusi z difuzijo, osmozo in Brownovim gibanjem nas prepričajo, da se molekule ves čas gibljejo in da je temperatura mera za živahnost tega gibanja. Hitrost gibanja molekul je mogoče oceniti z difuzijo bromovih par v vakuumu ali pa s tehtanjem sile curka etrovih par, ki izhlapevajo iz posodice.

Pri razlagi električnega toka v kapljevinah in plinih ugotovimo, da so atomi vendarle deljivi in da so njihovi deli naelektreni. Ob poskusih v evakuiranih cevh se podrobneje seznanimo z elektroni. Kvantitativna analiza rezultatov elektrolize pa učence prepriča, da ioni nosijo cele večkratnike osnovnega naboja.

Poskusi s curki elektronov v razredčenem plinu prinesejo spoznanje, da je notranja energija atomov kvantizirana. Iz njih je tudi mogoče dobiti ocene velikosti notranje energije atomov in ionizacijske energije.

Ob radioaktivnem razpadu učenci spoznajo, da so tudi atomska jedra sestavljena. Jedrske reakcije pa prinesejo tudi največje presenečenje. Ob njih se namreč izkaže,, da ne veljata niti zakon o ohranitvi snovi niti zakon o ohranitvi energije.

Energija mase privede do sinteze obeh prejšnjih zakonov Zakon o ohranitvi energije izoblikujemo na novo, tako da velja za jedrske reakcije, kemijske reakcije in vse druge spremembe. Oba prejšnja zakona pa se izkažeta kot zelo dobra približka, na primer v mehaniki velikih teles ali za obravnavo kemijskih reakcij.

Delci in polja

Makroskopski pojem telesa temelji na njegovi ločljivosti od okolice. Zato, da telo opredelimo, navadno povemo, kje je. Določljivost koordinat telesa potemtakem sodi k definiciji telesa. Če se telo giblje, lahko povemo še njegovo hitrost in pospešek, torej časovne odvode koordinat. Šele potem, ko je telo ločeno od okolice, lahko sprašujemo po drugih njegovih lastnostih, na primer po velikosti, masi, energiji itd. Makroskopskim telesom v fiziki torej lahko priredimo: koordinate, maso, gibalno količino, energijo. Da telo lahko identificiramo, se mora od drugih teles razlikovati vsaj po eni lastnosti ali po eni relaciji z okolico.

Takšen pojem telesa pa ni vselej najprikladnejše orodje za opis naravnih pojavov. Učenci to spoznajo na primer pri valovanju. Če dele snovi zaznamujemo in opišemo gibanje vsakega posebej, bo opis nepregleden. Prikladneje je opisati gibanje motnje, energije. Zanima nas na primer, kako se giblje valovno čelo.

Z razdelitvijo sveta na atome se zatakne tudi pri opisu medsebojnih učinkov. Sile ob dotiku že lahko razumemo. Gravitacijske, električne in magnetne sile pa delujejo na daljavo. Za opis vpeljemo pojem polja. To je tisti del prostora okrog telesa, kamor še seže njegov vpliv na druga telesa. Hitro opazimo prvo podobnost med polji in delci: oboji nosijo energijo.

Časovne spremembe polj lahko včasih opišemo podobno kot časovne spremembe v snovi. Namesto časovnih sprememb koordinat zaznamovanih delov, govorimo zdaj o časovnih spremembah polja na označenem mestu. Še naprej pa lahko govorimo na primer o gibanju valovnega čela, ki že pri valovanju v vodi ni bilo vezano na zaznamovane dele vode. Tako torej vpeljemo pojem elektromagnetnega valovanja po analogiji z valovanjem v snovi.

Poskuse s fotoefektom uporabimo za to, da učence napeljemo na misel, da je energija elektromagnetnega valovanja kvantizirana. Povečuje in zmanjšuje se lahko samo v diskretnih obrokih — fotonih.

Fotoni nam odpirajo dvoje didaktičnih perspektiv. Tradicionalno je bilo, da smo najprej v okviru atomike nekoliko oklestili klasični pojem delca, nato pa med delce uvrstili še foton. Ker enakih atomskih delcev ne moremo razlikovati, jim odrečemo identiteto. Več miselnih naporov je potrebno, da iz definicijskih lastnosti

delcev črtamo maso in določljivost lege. Preostaneta nam le še številnost in energija. Če smo voljni tako okleščenemu pojmu še nadeti ime delec, potem foton lahko štejemo mednje.

Drugo možnost, ki je v začetnih tečajih manj uporabljena, nam ponuja analogija med kvantizacijo notranje energije atoma in kvantizacijo elektromagnetnega valovanja v votlini. Kvantne stopnice v atomu niso vse enake in najbrž zato tudi nimajo imen. Pri enobarvnem elektromagnetnem valovanju v votlini pa so razmiki na energijski lestvici enaki in se imenujejo fotoni. Če pa je v votlini večbarvna svetloba, je analogija med kvantizacijo energije v njej in v atomu še prepričljivejša.

Naš začetni tečaj fizike ubira v zvezi s povezavo delcev in polj bolj tradicionalno pot, ki pojem polj preko fotonov navezuje na pojem delcev. Učitelj fizike ostaja pri razreševanju tega protislovja razpet med željo po nazornosti na eni strani in željo po predstavitvi neskažene podobe fizike na drugi strani. Želja po nazornosti nas rada zapelje, da vidimo delce tudi tam, kjer jih ni. Abstraktni modeli prave nešolske fizike pa nas spravljajo v nevarnost, da bomo učencem z njimi fizikalno podobo sveta zastrli v preveliki vnemi, da bi jim jo prezgodaj odgrnili.

LITERATURA

[1] J. Ferbar, F. Plevnik, *Fizika za 7. razred,* DZS, Ljubljana 1981.
[2] J. Ferbar, F. Plevnik, *Fizika za 8. razred,* DZS, Ljubljana 1981.
[3] F. Plevnik, *Fizika* 1, Prvi zvezek, DZS, Ljubljana 1981.
[4] D. Šulek, *Fizika* 1, Drugi zvezek, DZS, Ljubljana 1981.
[5] J. Strnad, *Fizika* 1, Tretji zvezek, DZS, Ljubljana 1981.
[6] I. Kuščer, A. Moljk, *Fizika,* DZS, Ljubljana 1966.
[7] J. Strnad, *Kaj je energija ?* Presek 4 (1976/77) 145, 209; *Energijska kriza,* Proteus 41, (1978/79) 211, 243, 291.

PRIZNANJA — Vabilo

Na podlagi Pravil o podeljevanju priznanja učiteljem matematike, fizike in astronomije za delo z mladimi

v a b i m o

podružnice DMFA, aktive matematikov in fizikov na šolah, da do 1. oktobra 1982 predlagajo kandidate za priznanje za delo z mladimi.

Predloge z utemeljitvami pošljite na naslov DMFA SRS, Komisija za pedagoško dejavnost, 61111 Ljubljana, Jadranska 19, p.p. 6.

Martina Koman

Obzornik mat. fiz. 29 (1982) 5/6

VARNOST PRI POUKU FIZIKE

ZLATKO BRADAČ

UDK 53 : 371.3 : 614.8

Prispevek opisuje nekatere specifične nevarnosti pri pouku fizike. Z načrtovanjem varnega pouka moramo te nevarnosti predvideti in odpraviti. Prispevek navaja nasvete za varno delo učitelja in učenca.

SAFETY IN TEACHING OF PHYSICS

Some dangerous situations in the teaching of physics are described. These situations must be avoided by planning. Advices for safety in laboratories are added.

1. Uvod

Življenje postaja iz dneva v dan udobnejše, ob tem pa se srečujemo z vedno več nevarnostmi: od povečanega ionizirajočega sevanja do gostega prometa. Tudi sodobni pouk v šoli je lahko nevaren za učitelje in učence. Posebno pri pouku naravoslovnih predmetov, pri katerih učenci sami delajo poskuse in opazujejo demonstracijske poskuse, preži na učence in učitelja več nevarnosti. Pri načrtovanju pouka naj bo varnost ena prvih zahtev. Nevarne poskuse po možnosti nadomestimo z varnimi, laboratorij opremimo z varnostnimi pripravami itd. Vendar iz skrbi pred nesrečo ne smemo opustiti poskusov pri pouku, kot zaradi varnosti ne opustimo vožnje z avtomobilom.

Učitelj mora biti o nevarnostih pri pouku fizike dobro poučen. Poznati mora varnostne ukrepe in jih upoštevati. Pouk mora organizirati in voditi tako pazljivo, da varuje svoje življenje in zdravje ter življenje in zdravje učencev. Učiti mora učence, da se bodo zavestno varnostno obnašali, ter zagotoviti prvo pomoč in organizirati reševanje ob nesreči.

Učitelj in učenci naj bodo seznanjeni: z nevarnostmi pri pouku, z ukrepi za njihovo preprečevanje, z ukrepi, ki odpravljajo posledice nesreč, to je s prvo pomočjo in s splošnimi varnostnimi ukrepi in normativi.

2. Načrtovanje varnega pouka fizike

Največ nesreč, specifičnih za pouk fizike, se zgodi med eksperimentiranjem. Zato naj učitelj pri načrtovanju poskusa odgovori na vprašanji: katera nesreča se lahko zgodi z največjo verjetnostjo in katera najhujša nesreča se lahko zgodi pri izbranem poskusu. Odgovora na ti vprašanji sta dodatna napotka za varno izvedbo.

Za zgled obdelajmo eksperimentalno vajo *Preverjanje Ohmovega zakona.* Splošni predpisi narekujejo uporabo nizke napetosti, to je usmernik s predpisano zaščito in izhodno napetostjo do 20 V ali baterijo. Najverjetnejša nesreča je nepravilna vezava instrumentov, najhujša nesreča pa to, da učenec samovoljno veže ampermeter na omrežno napetost 220 V. Učitelj naj torej pri razlagi vaje opozori na pravilno uporabo merilnih instrumentov in dovoli vklop le po pregledu vezja. Učence posebej opozori na nevarnosti, ki so lahko posledica samostojnega vklapljanja napetosti. Učencem ne dovoli, da postavijo instrumente blizu vtičnic z omrežno napetostjo; še bolje je, če lahko napetost v teh vtičnicah izklopi s posebnim stikalom.

Vsem takšnim in podobnim ukrepom pravimo *aktivni* varnostni ukrepi. Učitelji in učenci naj jih pri delu zavestno izvajajo. Poleg njih pa naj bodo v načrtu tudi *pasivni* varnostni ukrepi, ki varujejo učence, četudi ravnajo z opremo nestrokovno in nepremišljeno. Takšni ukrepi so na primer: posebno varovanje instrumentov pred preobremenitvijo, centralna stikala, ki jih vključimo s ključem, stikala FID ...

3. Specifične nevarnosti pri pouku fizike

Razen splošnih nevarnosti, ki se jim tudi pri drugih predmetih ne moremo izogniti, so pri pouku fizike nevarni poskusi z električnim tokom, s svetlobo, s toploto in z ionizirajočim sevanjem. Pri nekaterih poskusih uporabljamo nevarne snovi: brom, živo srebro, kisline ... O varnem delu s temi snovmi poučimo učence predvsem pri pouku kemije. Pri pouku fizike pridemo v stik z živosrebrnimi parami, če živega srebra ne hranimo v zaprti posodi, če razbijemo živosrebrni termometer in pri delu z odprtimi živosrebrnimi manometri. Za človeka je nevarno, če vdihava osem ur zrak, v katerem je gostota živosrebrnih par večja od 0,1 mg/m^3 (maksimalna dovoljena koncentracija, MDK). Če pustimo, da živo srebro iz razbitega termometra izhlapi, krepko presežemo MDK. V posebno neugodnih razmerah se celo približamo smrtni dozi 1 g. Zato razlito živo srebro vselej skrbno polovimo, morebitne kapljice v špranjah pa posujemo z žveplom, da nastane živosrebrov sulfid, ki ni nevaren.

Poskuse, pri katerih pokažemo difuzijo, lahko naredimo z bromom. Tudi brom je nevarna snov, sa meri MDK 0,7 mg/m^3, smrtna doza pa okoli 4 grame. Če bromove pare uidejo, učence takoj napotimo iz učilnice in sobo dobro prezračimo.

Vse nevarne snovi hranimo v posebnem prostoru v zaklenjeni omari, da učenci ne morejo priti v stik z njimi.

Nevarnosti pri poskusih z električnim tokom. Najmanjši električni tok, ki ga človek zazna, je 1 mA (za izmenični tok s frekvenco 50 Hz) ali 5 mA (za enosmerni tok). Do mišičnih krčev in s tem povezanega nekontroliranega prijema vodnika pride pri 15 mA ali 70 mA, smrtno nevaren pa je tok 20 mA ali 80 mA. Navedene vrednosti so orientacijske, pri posameznikih so možna tudi večja odstopanja. Tok je odvisen od napetosti in upora: $I = U/R$. K uporu človeškega telesa prispevata največ stika vodnikov s kožo. Upor notranjosti telesa je sorazmerno majhen. Upor stikov pa je močno odvisen od vlažnosti kože in meri preračunano na 1 cm^2 površine od 1 kΩ/cm^2 do 500 kΩ/cm^2. To pomeni, da je v posebno neugodnih okoliščinah lahko smrtno nevarna izmenična napetost nad 20 V ali enosmerna napetost nad 70 V. Tokovi z višjimi frekvencami so manj nevarni glede mišičnih krčev, ostaja pa nevarnost opeklin.

Sunek električnega toka je zaradi sorazmerno kratkega časa delovanja manj nevaren. Vendar velja, da doživimo šok, če prejmemo s sunkom pri napetosti preko 70 V večje električno delo od 0,25 J. Ker je električna energija, ki je shranjena v nabitem kondenzatorju, enaka $W_e = CU^2/2$, lahko za posamezen kondenzator izračunamo kritično napetost. Za kondenzator s kapaciteto 10 μF je ta napetost 200 V. Nevarno je, če pozabimo na mizi nabit kondenzator, ki lahko pride v roke učencem. O kondenzatorju še tole: če zamenjamo priključka elektrolitskega kondenzatorja ali če prekoračimo dovoljeno napetost, lahko kondenzator eksplodira. Zato kondenzator takoj po poskusu izpraznimo in ga kratko sklenjenega shranimo.

Pri poskusih, ki jih delajo učenci, zagotovimo največjo varnost, če učenci uporabljajo napetost do največ 20 V. Učitelj se pri demonstracijskih poskusih ne more vselej izogniti višji napetosti, zato naj bo posebno previden pri delu s Teltronovo zbirko učil, s transformatorji, z ojačevalniki ...

K splošnim varnostnim predpisom spadajo: dobra izolacija vodnikov (najboljši na našem trgu so iz Teltronove zbirke učil), ustrezni priključki, podaljški, ustrezno shranjevanje ...

Nevarnosti, ki jih povzroča svetloba. Nevarno svetlobo oddajajo izviri ultravijolične svetlobe (živosrebrna svetilka, višinsko sonce, obločnica) in laser. Ultravijo-

lična svetloba je posebno nevarna, ker občutimo poškodbo očesa šele čez nekaj ur ali celo dni. Pri poskusih s takšnimi svetili v valovni optiki smemo uporabljati le svetlobo, ki jo prepušča majhna luknjica ali ozka reža v zaslonki. Pri poskusu, s katerim pokažemo fotoefekt na cinkovi plošči, uporabimo svetlobo iz nezastrte živosrebrne svetilke, zato naj bo pri tem poskusu med učenci in demonstracijsko mizo steklena šipa. Poskus naj traja čim krajši čas. Pomožna zaščita za učence in učitelja so sončna očala.

Laserska svetloba je nevarna zaradi velike gostote svetlobnega toka. Poskusi z živalmi kažejo, da lahko nastopijo trajne poškodbe mrežnice, če zenica prepusti laserski curek z energijo 10^{-8} J toliko časa, da zavestno zapremo veke. Ta čas je pri človeku nekaj desetink sekunde. Svetlobni tok šolskega laserja je 1 mW. Če zenica prepusti ves laserski curek, dobi mrežnica v reakcijskem času energijo 10^{-4} J in oko ostane trajno poškodovano.

Vzporedna svetloba, tudi direktna sončna svetloba, je nevarnejša od razpršene svetlobe. Očesna leča namreč močno poveča gostoto svetlobnega toka na mrežnici pri prvotno vzporednem curku svetlobe. Pri poskusih z lasersko svetlobo moramo zato zlasti upoštevati, da vse gladke površine (kovine) odbijajo laserski curek. Prostor naj bo primerno osvetljen, da se zenice opazovalcev delno skrčijo. Nevarno področje naj bo označeno. Laser naj bo trdno pritrjen, da po nerodnosti ne posvetimo na učence. V šoli uporabljamo laserje manjših moči.

Druge nevarnosti pri pouku fizike. Pri poskusih s *toploto* je najverjetnejša nezgoda, da si opečemo prste. Posebno nevarna so vroča trinožna stojala. Tudi poskusi s povišanim ali znižanim tlakom so lahko nevarni, na primer s Papinovim loncem. Posode, s katerimi delamo te poskuse, naj bodo opremljene z varnostnimi ventili. Pred poskusom moramo preveriti pravilno delovanje takšnih ventilov. Špiritni gorilniki niso priporočljivi. Če jih po nerodnosti razbijemo, lahko nastane požar. Vse šole so dobile poseben pravilnik o varstvu pred požarom in učitelj fizike ga mora dobro poznati.

Radioaktivni izviri, ki jih uporabljamo v šoli, pri običajni uporabi niso nevarni. Nevarno pa je, če izvir prijemljemo s prsti in nato nehote s hrano vnesemo v telo radioaktivno snov. Zato se ne dotikajmo radioaktivnih snovi, čeprav imajo majhno aktivnost, po končanem poskusu pa si umijmo roke. Radioaktivne snovi shranjujemo enako kot nevarne kemikalije v zaprti posodi v zaklenjeni omari.

4. Nasveti za varno delo

Vsaka nesreča ima svoj vzrok. Vzroke moramo predvideti in odstraniti. Najpogosteje se pri pouku fizike zgodi nesreča, ker je varnostna vzgoja pomanjkljiva,

ker ni ustreznega nadzora nad učenci, zaradi prevelikega števila učencev v razredu, zaradi napačne in pomanjkljive delovne metode ter pomanjkanja reda.

Naštejmo nekaj nasvetov, ki naj nam pomagajo, da bi se izognili nesrečam in poškodbam pri pouku naravoslovja. Nevarno in občutljivo opremo shranjujemo vselej v zaklenjenem kabinetu. Učenci ne smejo imeti prostega dostopa do prostorov z laboratorijsko opremo. Prav tako ne smemo dovoliti, da bi se učili, delali ali eksperimentirali v laboratoriju brez ustreznega nadzora. Učence moramo poučiti o nevarnostih in varnem delu pri fiziki nasploh. Pred pričetkom eksperimentalnega dela jih poučimo še posebej o konkretnih nevarnostih in varnem delu pri dani vaji. Učencem je treba privzgojiti navade za varno eksperimentiranje in delo. Zbirke pravil za varno ravnanje in vedenje bi morale biti obešene na več vidnih mestih v učilnici za naravoslovje. O teh pravilih bi se morali z učenci tudi večkrat pogovarjati.

Posebno pozornost posvetimo varnosti pri domačem eksperimentiranju učencev. Učenec naj ne dela poskusov z električnim tokom, s toploto, z nevarnimi svetili in z nevarnimi kemikalijami brez nadzora staršev in brez ustreznih navodil.

Zbirke pravil naj obsegajo prepovedi, dovoljenja in nasvete:

1. Učenci smejo opravljati le tiste laboratorijske vaje in delo, za katero imajo navodila in dovoljenje učitelja.
2. Uporabljati smejo le materiale in opremo, kot dovoli učitelj.
3. Skrbno morajo spremljati ustna in pisna navodila ter tudi upoštevati vse spremembe, na katere jih je opozoril učitelj.
4. V laboratoriju ne smejo jesti, piti, kaditi.
5. Primerno morajo biti oblečeni.
6. Skrbeti morajo, da so delovne površine urejene in čiste.
7. Različne odpadke morajo odlagati v ustrezne posode za smeti.
8. Vedeti morajo, kako je treba ravnati z gorilnikom.
9. Vedeti morajo, kako je treba delati s steklovino.
10. Vedeti morajo, kako je treba ravnati z električnimi pripravami, kako je treba sestaviti električni krog.
11. Nikoli naj ne tekajo po učilnici, ker lahko zadenejo osebo, ki ima v rokah občutljivo opremo ali kemikalije.
12. Nikoli naj ne zapuščajo svojega delovnega mesta, dokler poskus teče.

Učitelj mora dobro poznati vso opremo in tudi učilnico. Vedeti mora, kje lahko izključi električni tok, vodo, plin, kje je protipožarna oprema in kako se uporablja, kje je pribor za prvo pomoč, kje telefon za klic na pomoč.

Pomni: prepozno je vse to ugotavljati po nesreči.

LITERATURA

[1] Evert K., Jenkins E.W., *A safety handbook for science teachers,* John Murray, London 1977.

[2] Department of Education and Science, *Safety in science laboratories,* DES Safety Serie No. 2, Her Majesty's Stationery Office, London 1976.

[3] Wolff W., Schwahn M., *Sicherheit im Labor,* Verlag Sauerlander, Frankfurt am Main 1980.

[4] Uradni list SFRJ, št. 27, 1977, *Zbirka predpisov iz zaščite pred radioaktivnim sevanjem.*

SEMINAR ZA UČITELJE FIZIKE

V začetku februarja je Zavod SR Slovenije za šolstvo v sodelovanju z Visokošolsko temeljno organizacijo fizika na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo in Slovenijales Inženiringom organiziral seminar za učitelje fizike na srednjih šolah. Seminar je bil v novem šolskem centru Boris Ziherl v Škofji Loki in se ga je udeležilo 170 učiteljev s 105 šol v Sloveniji.

Glavni namen seminarja je bil usposobiti učitelje za delo v namenskih učilnicah za fiziko, ki jih na šolah opremlja Slovenijales. Zato je delo na seminarju potekalo pretežno praktično in v majhnih skupinah. Učitelji so dobili tudi napotke za delo z učili, ki jih bodo lahko s pridom uporabili pri pouku. Med seminarjem sta bili dve širši razpravi: prva o opremljanju učilnic in druga o didaktičnem kompletu za fiziko za prvi letnik srednjega izobraževanja. Prve razprave so se udeležili tudi predstavniki opremljevalcev in proizvajalcev učil in druge, člani uredniškega odbora za didaktični komplet.

Ob tem je bilo pripravljenih še nekaj predavanj, ki naj bi dala učiteljem poglobljeno znanje iz fizike, jih seznanila z varnostjo pri pouku fizike ter načela vprašanje o ocenjevanju pri fiziki v prvem letniku in povezavo med snovjo osnovne in srednje šole. Ta predavanja so razen enega zbrana v pričujoči številki *Obzornika za matematiko in fiziko.* V imenu uredniškega odbora *Obzornika* se zahvaljujem predavateljem, ki so pripravili svoja predavanja za objavo, ter Iskri, Zavodu SR Slovenije za šolstvo in Slovenijales Inženiringu za posebno denarno podporo *Obzorniku.*

Seta Oblak

Obzornik mat. fiz. 29 (1982) 5/6

PROSTORI, NAPELJAVE IN OSNOVNA OPREMA ZA FIZIKO

JANEZ FERBAR, JANEZ ROVANŠEK in TOMAŽ SKULJ

UDK 371.6:53
53:371.6

Članek obravnava zahteve, ki jim morajo zadoščati prostori, napeljave in osnovna oprema v šoli. Omogočati morajo sodoben pouk, vaje in delo učencev in učiteljev pri fiziki in biti varni za učitelje in učence, didaktično funkcionalni in prilagodljivi. Članek daje pregled nad najustreznejšimi rešitvami za napeljave in opremo.

ROOMS, INSTALATIONS AND BASIC EQUIPMENT FOR PHYSICS

In the article the requirements which should be met by rooms, instalations and basic equipment in school are considered. They should enable modern teaching, exercises and pupils' and teachers' work in physics. Special care should be taken of the safety of pupils and teachers, didactical functionality and flexibility. A review of the most suitable solutions for instalations and equipment is given.

1. Uvod

Za pouk fizike potrebuje šola učilnico, ki je hkrati laboratorij za pouk in eksperimentalne vaje, kabinet, kjer se učitelj metodično–didaktično in materialno pripravlja na pouk in vaje, delavnico za popravilo ali vzdrževanje opreme in shrambo za nevarne kemikalije.

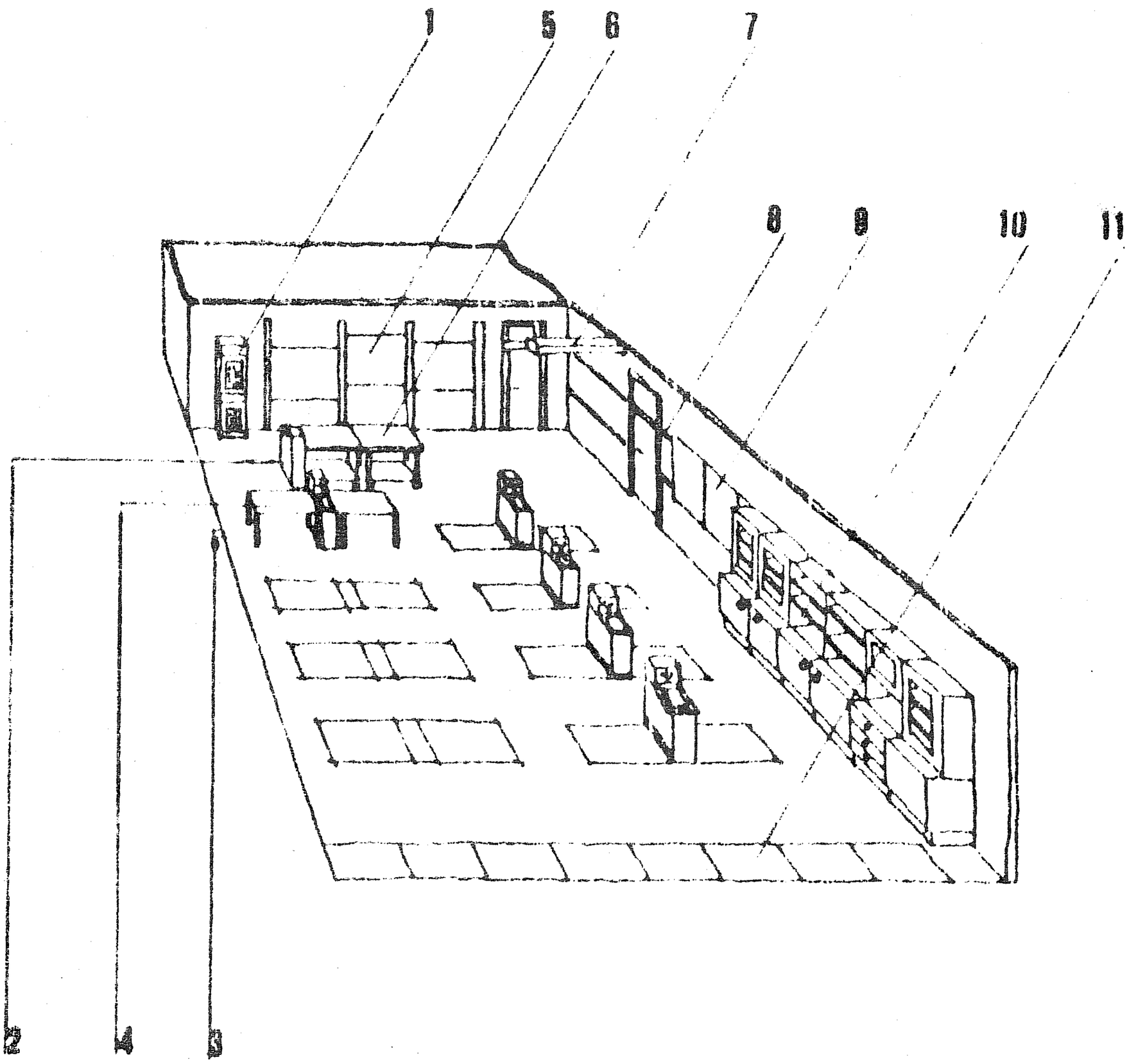
Prostori naj omogočijo učencem in učiteljem pri pouku, vajah in delu naravoslovne delovne metode: opazovanje naravnih pojavov prek demonstracijskih poskusov, lastno eksperimentiranje in delo, teoretično razmišljanje na ravni modelov, študijske naloge in referate, projekte in konference, interdisciplinarne ure in skupinsko poučevanje. V ta namen je treba prostore opremiti z napeljavami, osnovno opremo, opremo za eksperimentiranje in delo, informacijskimi materiali in potrošnim materialom.

Obdelajmo podrobneje napeljave in osnovno opremo. Ta naj omogoča pridobivanje, shranjevanje, pretok in obdelavo informacij, shranjevanje, pretok in predelavo snovi, shranjevanje, pretok in pretvorbo energije ter zaščito učencev in učiteljev. Tako morajo biti v prostorih za fiziko specialne in splošne, električne, vo-

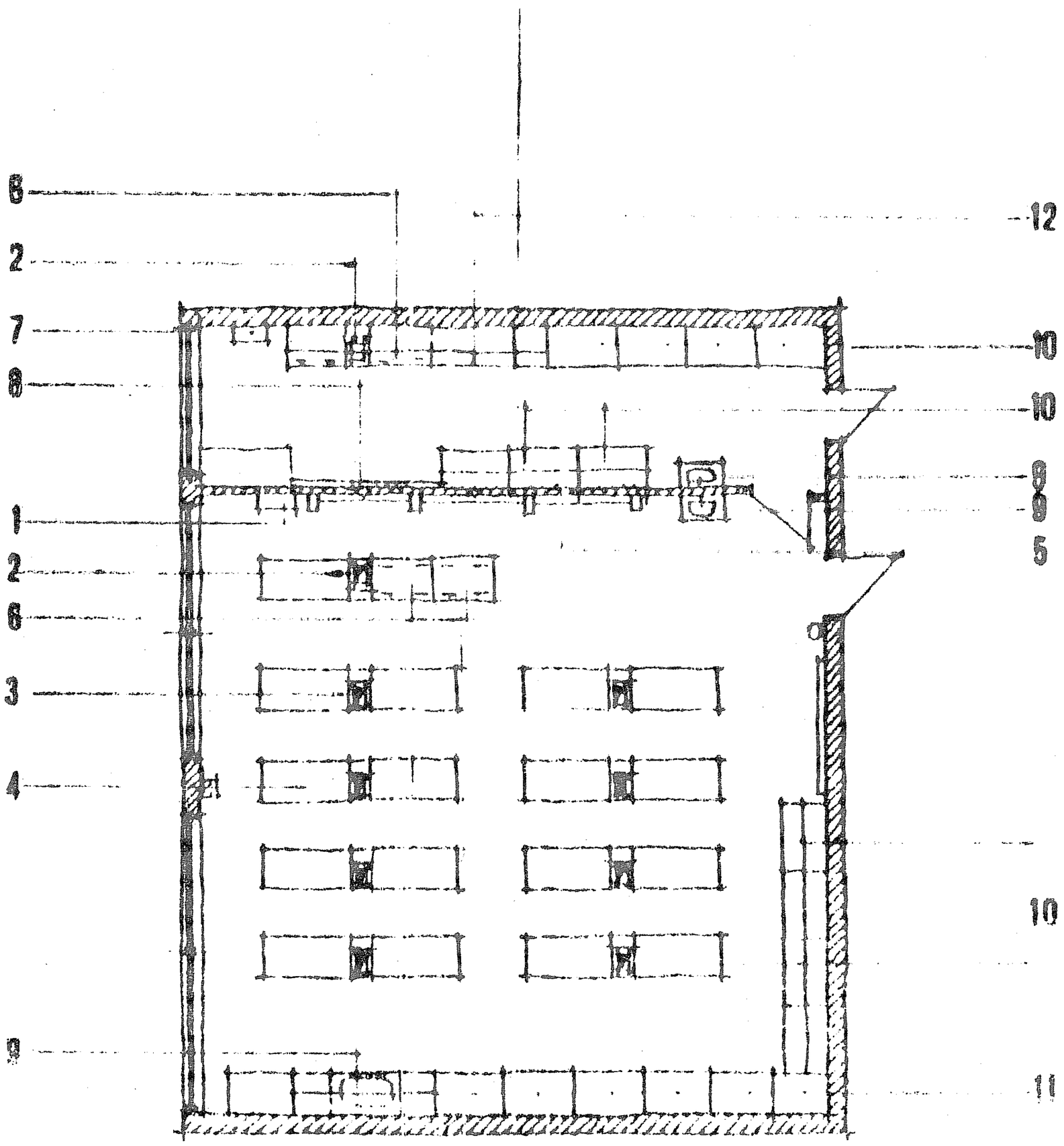
dovodne, kanalizacijske ter komunikacijske napeljave in specialne plinske napeljave ter osnovna laboratorijska, pohištvena, informacijska in varnostna oprema.

2. Zahteve za prostor

V fizikalni učilnici potekajo pouk in eksperimentalne vaje. Površina učilnice naj bo najmanj 80 m^2 za 32 učencev, to je 2,5 m^2 na učenca. V učilnico kvadratne oblike 9 m x 9 m je mogoče razvrstiti vso osnovno opremo, ki jo rabijo učenci za eksperimentalne vaje in učitelj za vodenje pouka, demonstracijsko eksperimentiranje in za delo z avdiovizuelno opremo (sl. 1 in 2). V kabinetu se mora učitelj pripraviti na pouk in vaje v takih okoliščinah, kot so v učilnici.



Sl. 1. Razporeditev opreme v učilnici za fiziko: električni razdelilnik, razdelilnik za vodo in za plin 1, instalacijski blok za učitelja 2, instalacijski blok za učenca 3, delovna miza za učenca 4, dvižna tabla 5, prevozna miza 6, obešalni tram 7, letvice za pritrjevanje stenskih oblog 8, stenska obloga 9, omara s policami in predali 10 in omara 11.



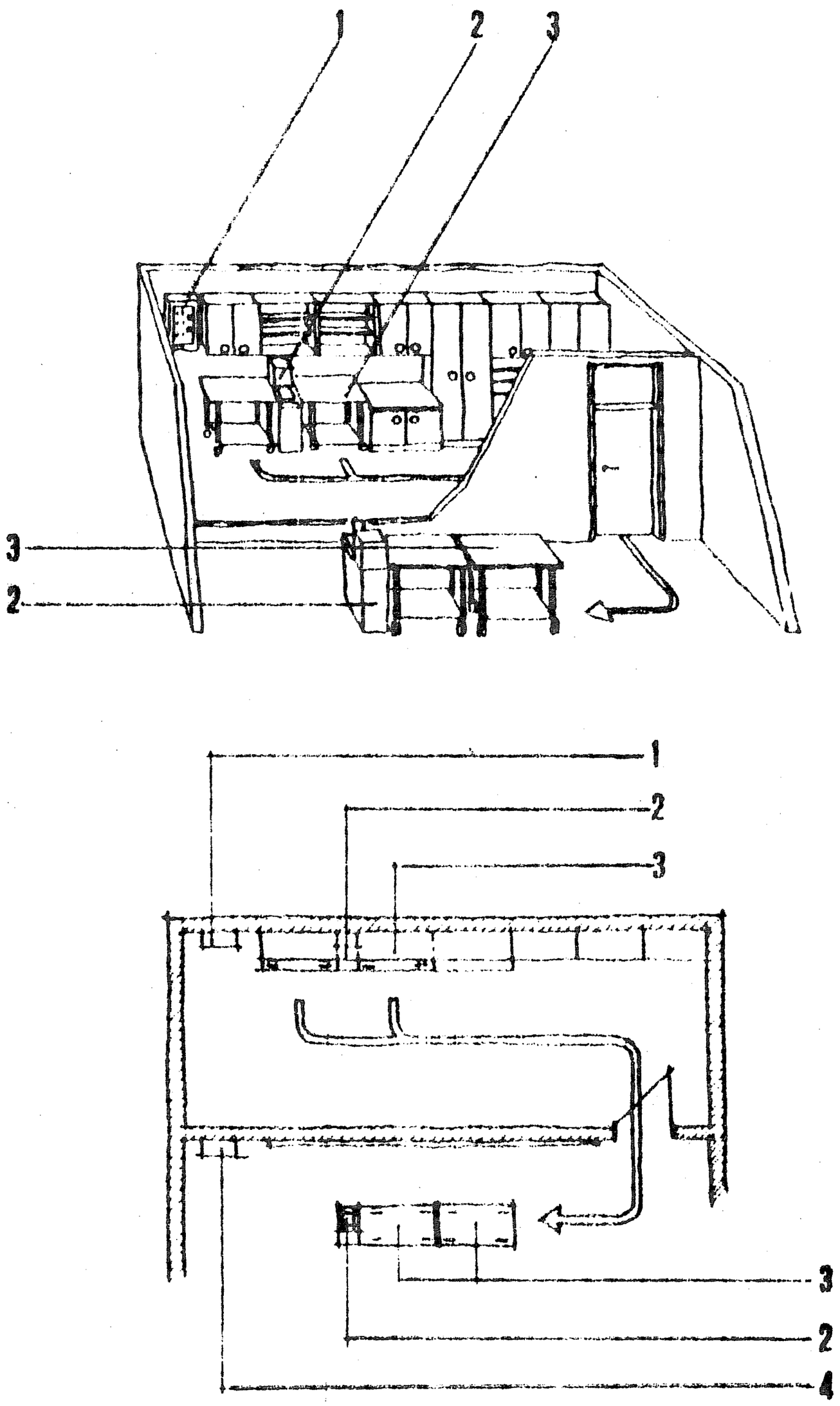
Sl. 2. Tloris učilnice in kabineta za fiziko: električni razdelilnik, razdelilnik za vodo in za plin 1, instalacijski blok za učitelja 2, instalacijski blok za učenca 3, delovna miza za učenca 4, dvižna tabla 5, prevozna miza 6, električni razdelilnik za kabinet 7, stenska obloga s projekcijsko površino 8, umivalnik ali laboratorijsko korito 9, omare s policami in predali 10, omare 11 in delovna miza za učitelja 12. Delovne mize za učenca lahko razporedimo za frontalni pouk, demonstracijske poskuse, individualno delo ali za delo v dvojicah.

Kabinet naj bo na sprednji strani učilnice z vrati ob tabli. Tako je pot prevoznih miz iz kabineta v učilnico najkrajša. Kabinet naj ima površino vsaj 20 m^2, če je v njem delovno mesto za enega ali za dva učitelja (sl. 3).

Učitelj fizike in laborant lahko uporabljata delavnico za tehnični pouk za popravljanje in vzdrževanje opreme, če ni na voljo posebne delavnice za fiziko ali morda za vse naravoslovje.

Kemiki nujno potrebujejo posebno shrambo za shranjevanje nevarnih kemikalij. V tej shrambi naj bi tudi učitelj fizike shranjeval kemikalije, ki jih rabi pri

pouku in vajah iz fizike. Shranjevanje nevarnih kemikalij v učilnici je prepovedano, v kabinetu pa zaradi kvarnega vpliva na fizikalno opremo nezaželeno.



Sl. 3. Podobnost učiteljevega delovnega mesta v kabinetu in v učilnici: električni razdelilnik za kabinet 1, instalacijski blok za učitelja 2, prevozna miza 3, instalacijski blok za učenca 4.

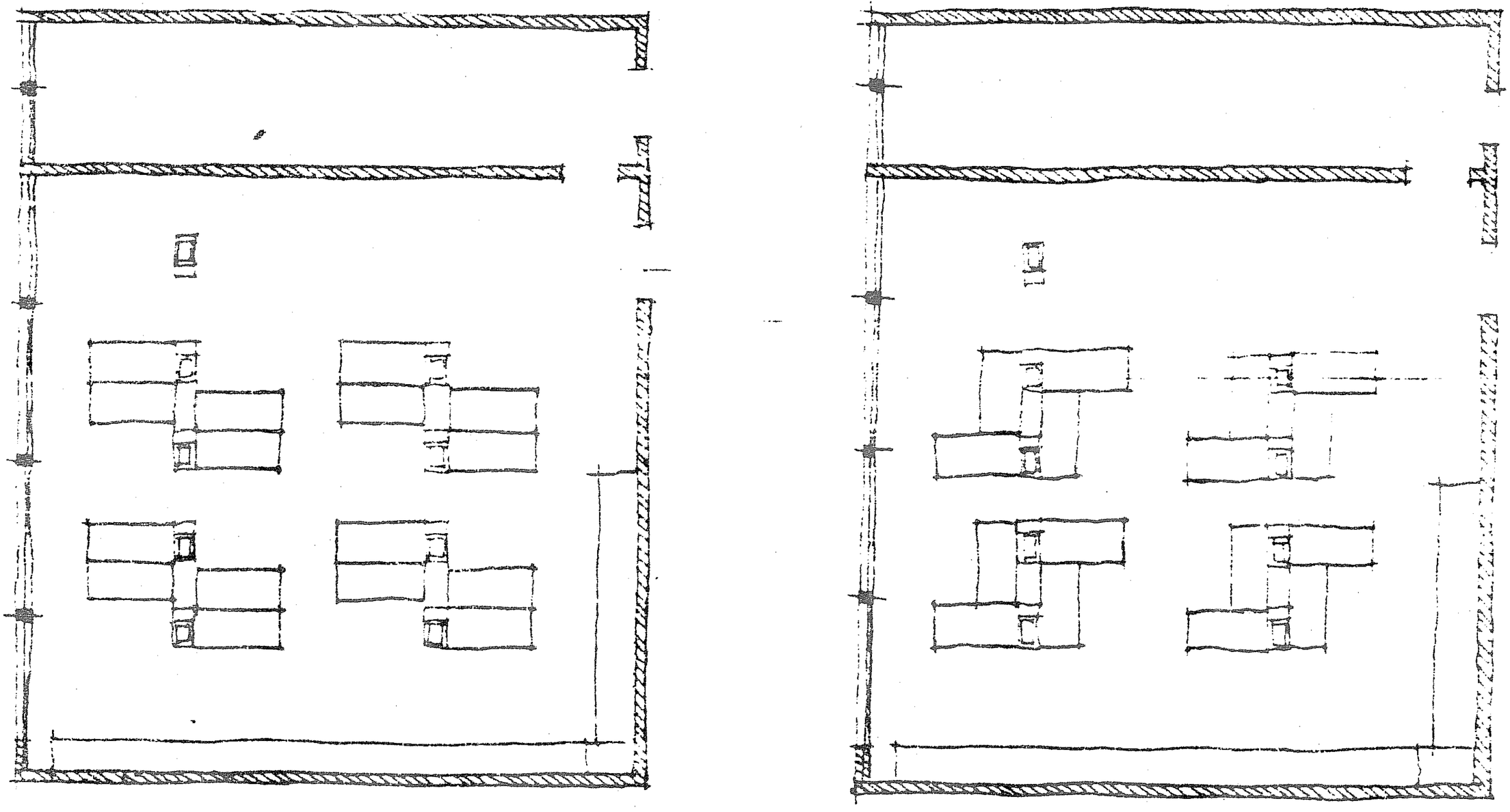
3. Zahteve za napeljave in osnovno opremo

Napeljave in osnovna oprema v vseh teh prostorih morajo biti varne za učence in učitelje, didaktično funkcionalne in prilagodljive.

Varnost za učence in učitelje. Varnostni ukrepi so organizacijski, pasivni in aktivni. Po zakonskem določilu sta učitelj in šola odgovorna za varnost in zdravje učencev ves čas, ko so v šoli. Zato je treba šolo graditi, tako da učenci ne morejo nenadzorovano v prostore, v katerih je nevarnost večja kot v njihovem vsakdanjem okolju. Učenci so lahko v teh prostorih le pod nadzorom učitelja, laboranta ali koga drugega.

Pasivni varnostni ukrepi varujejo opremo, učence in učitelje, čeprav ravnajo z opremo malomarno, nepremišljeno brez znanja. Vsi pasivni ukrepi morajo biti večstopenjski. Če zataji ena stopnja naj neodvisno od nje delujeta druga ali tretja.

Pri električni napeljavi in opremi za pouk, delo in vaje so predvideni: zaščitno tokovno stikalo, mala napetost* (do 25 V), šolska varnostna vtičnica in včasih zaščitna izolacija. Pri plinski napeljavi in opremi pa termomagnetno varovalo na gorilnikih in omejena višina plamena.



Sl. 4. Razporeditev delovnih miz za učence za delo v četverkah in za skupinsko delo na projektih.

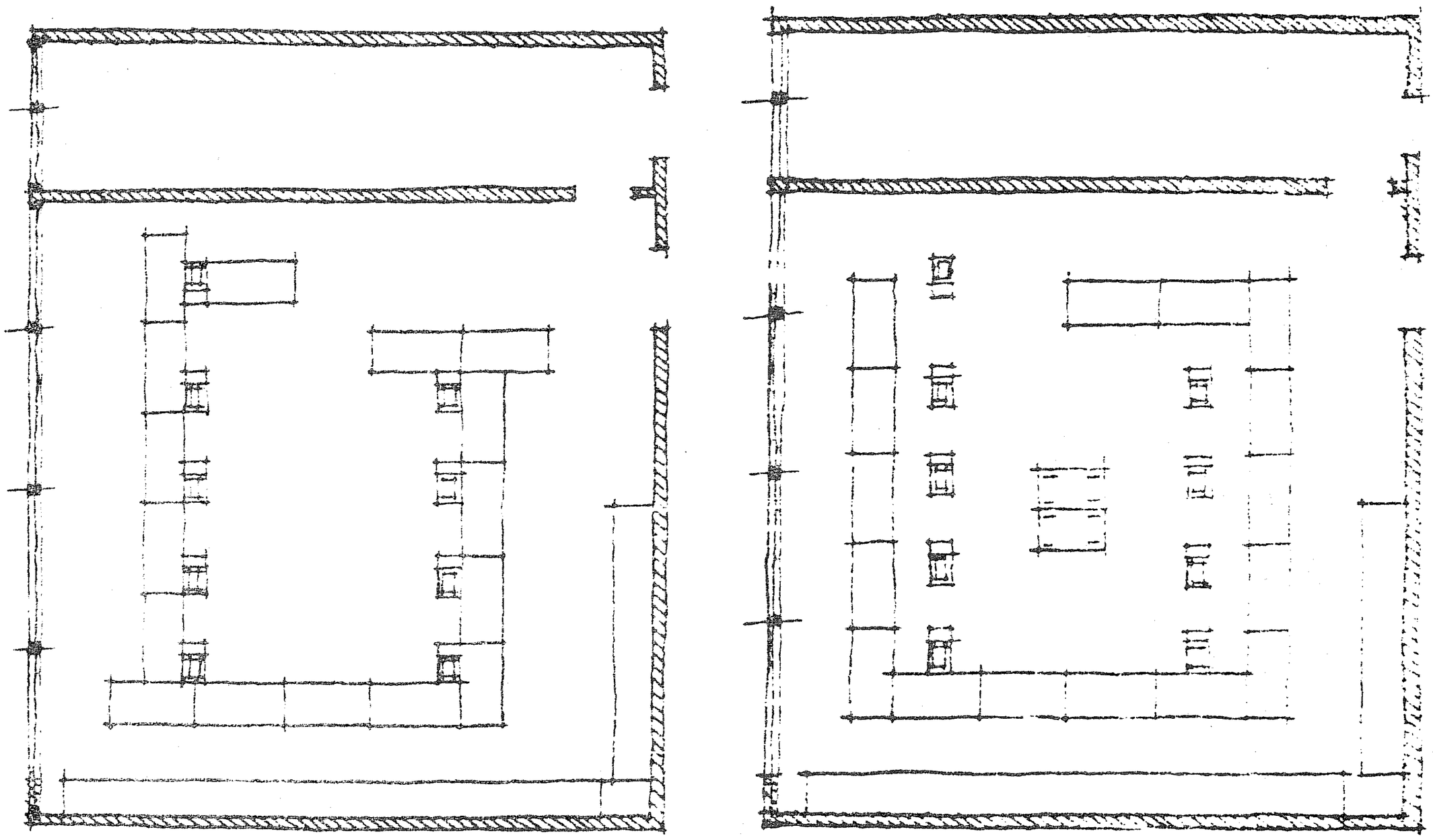
---

*Mala napetost je do 42 V, nizka od 42 V do 1000 V in visoka napetost nad 1000 V.

Aktivne varnostne ukrepe učenci in učitelji zavestno uporabljajo pri eksperimentiranju in delu ali za to, da bi preprečili nesrečo ali omejili hujše posledice nesreče. Aktivni varnostni ukrepi so: izklop vseh napeljav v sili, stalno usposabljanje učiteljev za varnost, stalna varnostna vzgoja učencev in usposabljanje učencev in učiteljev za nudenje prve pomoči.

Napeljave in osnovna oprema morajo imeti centralno stikalo za izklop vseh napeljav v sili, protipožarno, higiensko varnostno opremo in opremo za prvo pomoč ter telefonsko zvezo v kabinetu za klic v sili.

Didaktična funkcionalnost. Instalacijski bloki in osnovna pohištvena oprema v učilnicah naj bodo razporejeni, tako da je prostor mogoče enostavno in hitro prilagoditi za različne organizacijske oblike učnega procesa, kot so frontalni pouk, demonstracijski poskusi, individualno delo in eksperimentalno delo v dvojicah (sl. 2), eksperimentalno in študijsko delo v skupinah po štirje učenci in delo na projektih (sl. 4), konference, referati, interdisciplinarne ure, skupinsko poučevanje in nekateri demonstracijski poskusi (sl. 5). Pri vseh nakazanih razporeditvah je treba upoštevati varnostne zahteve in zagotoviti možnost za prenašanje in dovažanje materiala do delovnih mest ter vzdolžno in prečno prehodnost po prostoru. Da bodo učenci in učitelji res lahko eksperimentirali, morajo biti tudi priključki za napeljave na učenčevem in učiteljevem delovnem mestu, in to na pritrjenih elementih osnovne opreme – instalacijskih blokih ali pa na steni.



Sl. 5. Razporeditev delovnih miz za učence za konference, referate in skupinsko poučevanje.

Prilagodljivost. Napeljave je treba položiti v jaške, kanale in cevi, tako da jih bo mogoče kasneje popravljati, depolnjevati in spreminjati brez gradbeniških posegov. Električne napeljave naj bodo vgrajene v podu in položene v cevi ali kanale, ki imajo standardizirane izhodne priključke. Enako velja za informacijske napeljave, ki morajo biti zaščitene pred motnjami iz drugih električnih napeljav. Vodovodne, kanalizacijske in plinske cevi naj bi bile praviloma speljane tik pod stropom prostora pod učilnico. Cevi naj bodo obarvane s standardnimi barvami za označevanje vodovodnega, plinskega in kanalizacijskega omrežja.

4. Pregled napeljav

Specialne napeljave	električne	plinske	vodovodne in kanalizacijske	informacijske
začetek	električni razdelilnik	razdelilnik za plin	razdelilnik za vodo	učiteljev terminal
zaključek	električna vtičnica	plinska vtičnica	vodovodna pipa, korito z odtokom	informacijska vtičnica
Primer osnovne laboratorijske opreme	napetostni izvir	plinski gorilnik	črpalka na vodni curek	učenčev terminal

Vse napeljave imajo razvod, talni priključek, instalacijski blok in izklop v sili.

Splošne napeljave v prostorih za fiziko so še električne, naprave za ogrevanje in prezračevanje, za bojler, za osvetljevanje, vodovodne in kanalizacijske za dovod tople in hladne vode za umivalnik, in komunikacijske za telefon, interfon in televizor ali monitor.

5. Pregled osnovne opreme

Med osnovno opremo štejemo osnovno laboratorijsko opremo, pohištveno, informacijsko in varnostno opremo.

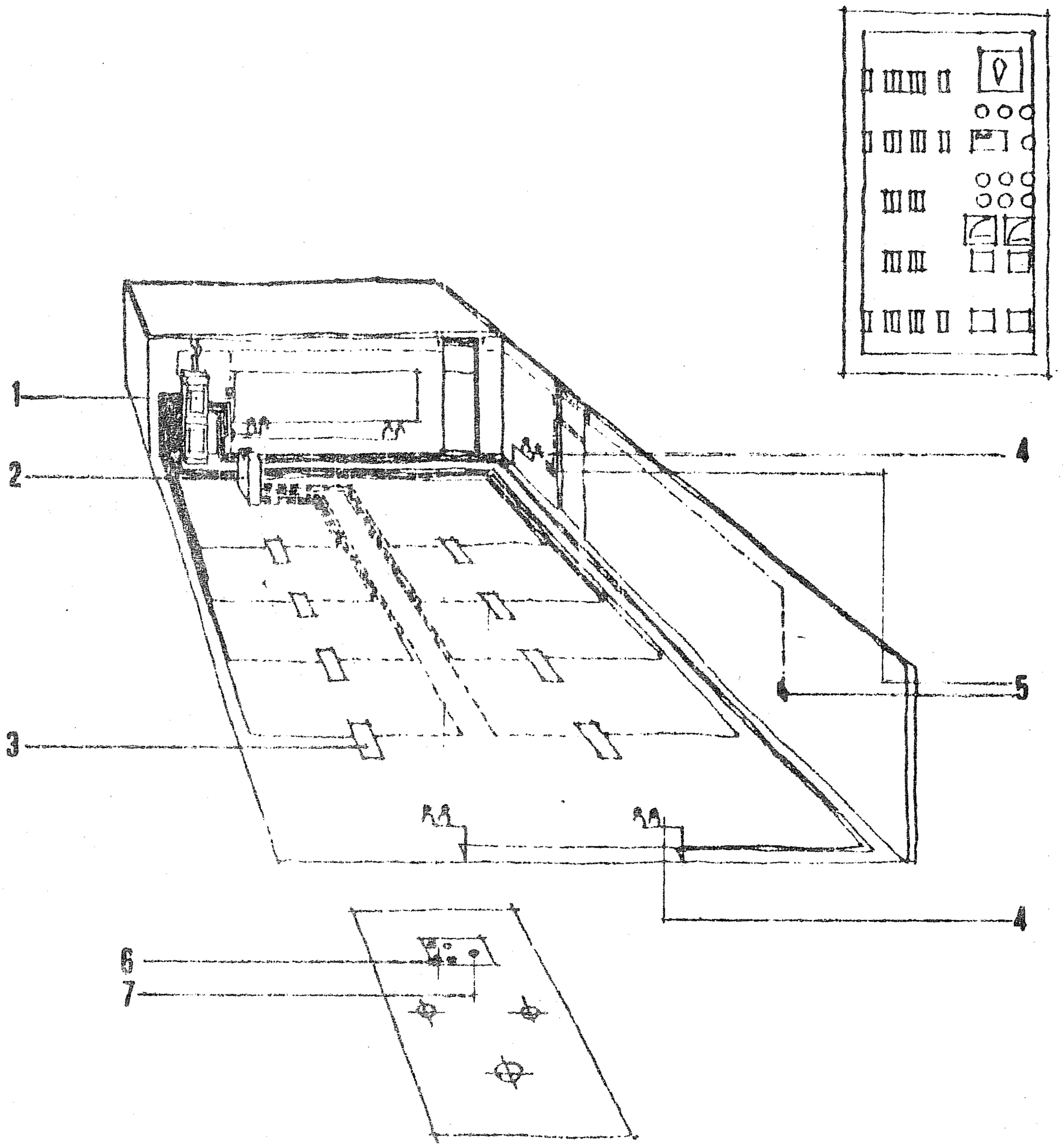
Osnovno laboratorijsko opremo sestavljajo instalacijski blok, šolski malonapetostni izvir, laboratorijska miza za kemijo, plinski laboratorijski gorilnik, vakuumska črpalka na vodni curek, destilator.

Naštejmo pohištveno opremo: miza (učenčeva miza za eksperimentiranje), delovna miza (učenčeva in učiteljeva delovna miza), stol, omara, prevozna miza,

prevozno stojalo za avdiovizuelno opremo, stojala in podstavki, police, tabla, stenske obloge, stenske obloge kot projekcijske površine.

Informacijska oprema: avdio oprema (radijski sprejemnik, magnetofon, gramofon), video oprema (kasetni kinoprojektor S 8, grafoskop, diaprojektor, episkop), avdiovizuelna oprema (kinoprojektor, televizijski sprejemniki in monitorji), sistem interne televizije (kamera, monitor, magnetoskop), računalniški sistem (terminal, vhodno izhodne enote sistema).

Varnostna oprema pa je protipožarna oprema (gasilski aparat, tuš, ponjava za gašenje ognja na ljudeh), higiensko varnostna oprema (umivalnik s toplo in

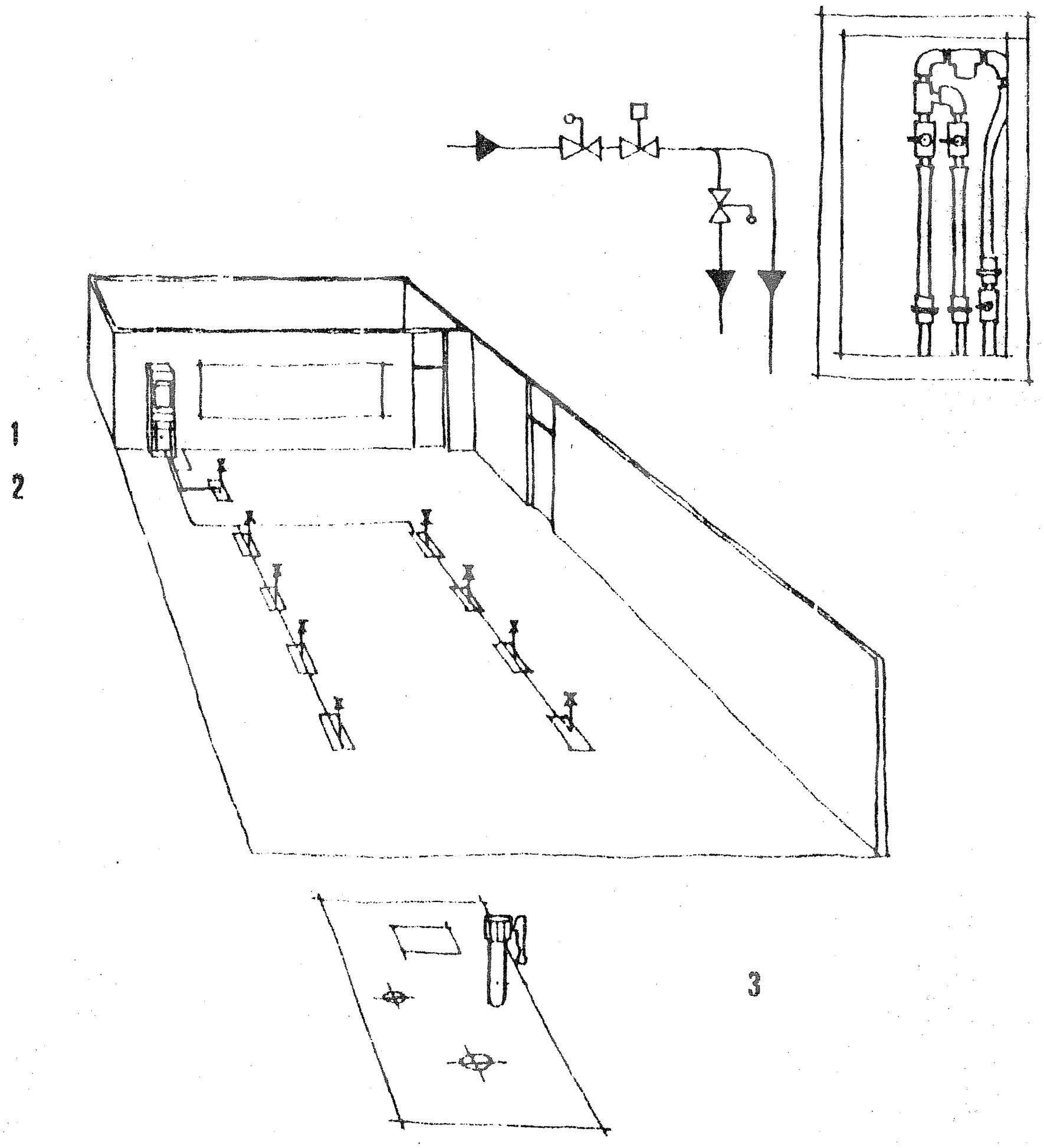


Sl. 6. Električne napeljave v učilnici za fiziko: električni razdelilnik 1, instalacijski blok za učitelja 2, talni električni priključek 3, vtičnici za avdiovizuelno opremo 4, tipka za izklop v sili 5, električni priključek za instalacijski blok 6, in priključek za komunikacijske napeljave 7. Desno zgoraj je čelna plošča električnega razdelilnika na kateri je podobna razporeditev instalacijskih odklopnikov kot v učilnici. Levo spodaj je talni priključek za elektriko in komunikacije.

hladno vodo, papirnate brisače, krpe za brisanje po pohištvu in tleh, koš za odpadke, omelce in smetišnica, kovinska posoda za razbito steklovino in druge nevarne odpadke), oprema za prvo pomoč (standardna omarica za prvo pomoč, dodatni pripomočki za prvo pomoč pri nesrečah pri pouku naravoslovja in tehnike: prha za obraz in roke, plastenka za izplakovanje oči).

6. Električne, plinske in vodovodne napeljave in oprema

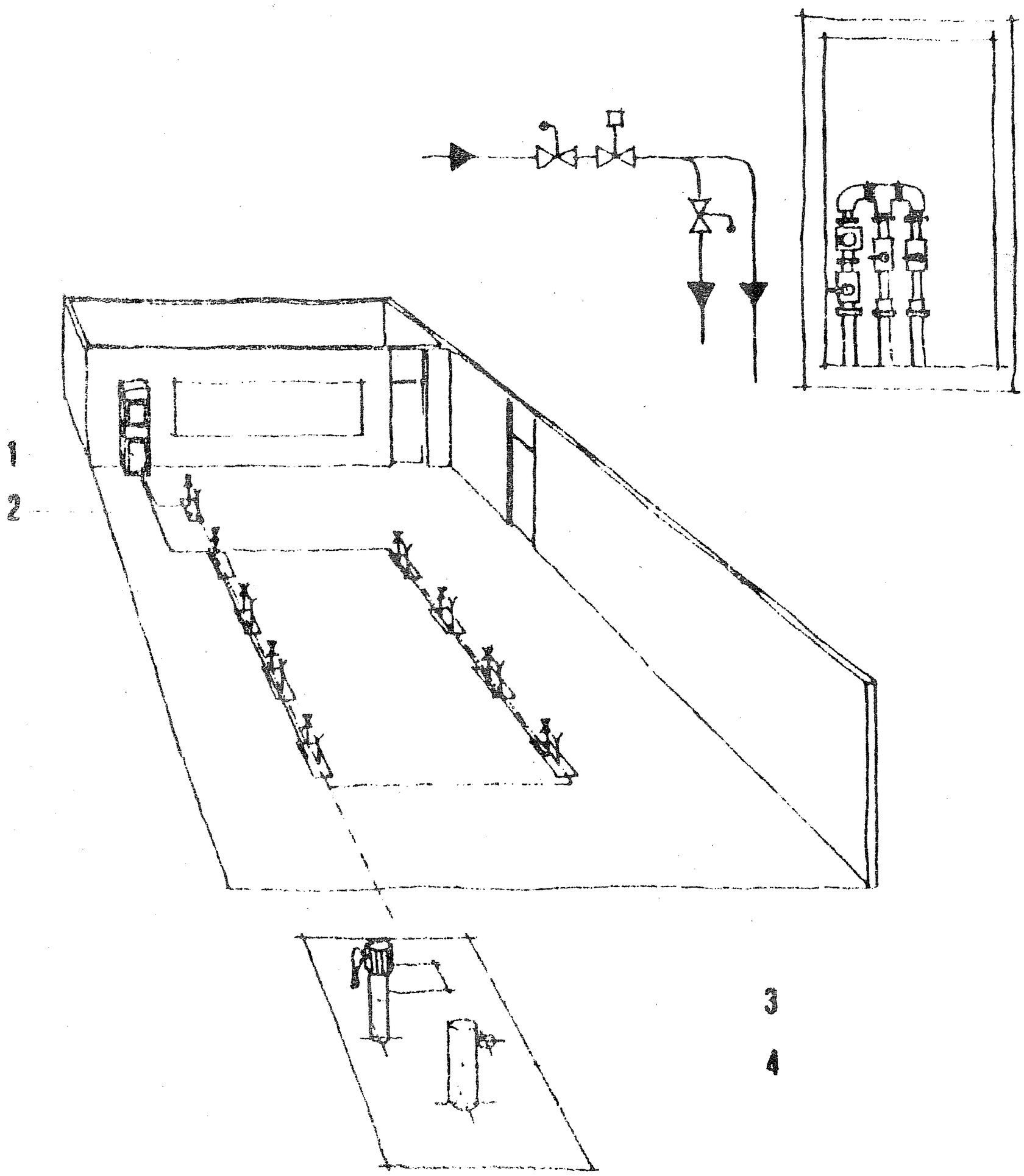
Pri poskusih iz fizike uporabljajo učenci malo napetost, učitelj pa tudi nizko in visoko napetost. Sistem električnih napeljav in opreme je zgrajen tako, da je na začetku električni razdelilnik, na kraju pa so na vseh delovnih



Sl. 7. Plinske napeljave: razdelilnik za plin 1, talni plinski priključek 2, plinski priključek z ventilom za instalacijski blok 3. Desno zgoraj je razdelilnik za plin s plinskimi vodi in ventili. Levo spodaj je talni priključek za plin.

mestih za učenca in učitelja instalacijski bloki, v katerih so vgrajene šolske varnostne vtičnice za 220 V. Ob stenah so vgrajene šolske varnostne vtičnice za avdiovizuelno opremo (sl. 6). Tako je narejen razvod elektrike samo za nizko napetost. Nanjo pa priključimo vse naprave in priprave, ki jih je treba napajati z elektriko.

Za segrevanje v laboratoriju uporabljamo več vrst plina. Po javnih plinskih vodih dovajamo v objekte zemeljski, mestni in mešani plin (zmes propan – butan in zrak). Tam, kjer ni plinskega omrežja uporabljamo plin propan – butan iz jeklenk. Sistem plinskih napeljav in opreme je zgrajen, tako da je na začetku razde-



Sl. 8. Vodovodne napeljave in kanalizacija: razdelilnik za vodo 1, talni vodovodni in kanalizacijski priključek 2, vodovodni priključek z ventilom za instalacijski blok 3, odtočni, kanalizacijski priključek za instalacijski blok 4. Desno zgoraj je razdelilnik za vodo z vodnimi vodi in ventili. Levo spodaj je talni priključek za vodo in kanalizacijo.

lilnik plina, na kraju pa so na vseh instalacijskih blokih plinske vtičnice (sl. 7). Vanje je mogoče hitro in enostavno priključiti plinske laboratorijske gorilnike.

Za hladilne sisteme z vodo, za črpalke na vodni curek in za vrsto poskusov iz naravoslovja, potrebujemo vodo. Tako je sistem vodovodne napeljave in odtoka z opremo zgrajen, tako da je na začetku razdelilnik vode, na kraju pa so na vseh delovnih mestih za učenca in učitelja instalacijski bloki s pipami za hladno vodo in koriti z odtoki (sl. 8).

Električni razdelilnik. Osrednji del sistema električnih napeljav je električni razdelilnik, ki razdeljuje električno energijo na posamezne kroge, ločeno za učence in učitelja.

Vgrajeni elementi (stikala, odklopniki, tipke) omogočajo upravljanje. Prek električnega razdelilnika vključujemo in izključujemo vodovodne in plinske napeljave. Varovanje pred preobremenitvami in kratkimi stiki v posameznih električnih krogih in vključevanje in izključevanje posameznih električnih krogov za delovna mesta učencev in učiteljev je izvedeno z instalacijskimi odklopniki. Razpored elementov za signalizacijo kaže tloris učilnice (sl. 6), kar pripomore k hitrejši lokaciji napake, boljšemu pregledu in nadzoru nad posameznimi krogi in razumljivejšemu upravljanju. Merilni instrumenti rabijo za kontrolo napajalne napetosti in toka v krogih. Za zaščito pred previsoko napetostjo dotika je vgrajeno v električni razdelilnik stikalo FID.

Stikalo FID. Skozi diferenčni transformator stikala FID so speljani vsi vodniki krogov, tudi nevtralni vodnik. Vsota vseh pritekajočih in odtekajočih tokov je pri normalnem obratovanju enaka nič. Kadar pa del toka zaradi okvare izolacije porabnika steče v zemljo prek zaščitnega vodnika, vsota tokov ni več enaka nič. Tedaj se v sekundarnem navitju transformatorja inducira napetost, ki požene tok in prek releja izklopi stikalo. Najnižji tok, ki še zanesljivo sproži stikalo imenujemo diferenčni tok. Diferenčni tokovi so zaradi različnih uporov na mestu napake in upora ozemljila različni, vendar so stikala FID grajena, tako da lahko brez posledic za stikalo izklopijo tudi tokove do 2000 A, torej tudi kratkostične tokove. Stikalo FID za 30 mA ima še prednost, da ne ščiti samo pred previsoko napetostjo dotika, ki nastane ob poškodbi izolacije, pač pa izklopi napravo tudi v primeru, če skozi človeško telo teče nevaren tok proti zemlji. To nastane lahko zaradi prekinitve zaščitnega vodnika, ob morebitni zamenjavi žic in ob slučajnem stiku človeka z obratovalno napetostjo. Do izklopa stikala pride prej kot v 30 ms. Po obsežnih medicinskih raziskavah naj ne bi bil nevaren sunek toka 30 mA, ki bi trajal manj kot 30 ms.

Razdelilnik za vodo in razdelilnik za plin. Neodvisno dodeljevanje vode in plina na eksperimentalna mesta učencev in učitelja omogočata razdelilnik za vodo in razdelilnik za plin. Takoj pri vstopu plinovoda v učilnico je nameščen glavni ventil, ki zapre plin za vsa delovna mesta. Poleg tega ventila pa je še elektromagnetni ventil za odpiranje in zapiranje plina. Vod se nato razdeli v vod za instalacijski blok učitelja v učilnici in kabinetu in v vod za instalacijske bloke učencev. V obeh krakih sta vgrajena ventila. Vsi ventili so nameščeni v omarici s prozornimi vrati na ključ (sl. 7). V primeru, da je plinska instalacija priklopljena na jeklenke za propan – butan lahko kot glavni ventil uporabljamo ventil na jeklenki. Prav tako je izveden razvod vode v razdelilniku za vodo, čeprav pri vodovodni napeljavi elektromagnetni ventil zaradi varnosti ni tako nujno potreben kot pri plinski napeljavi (sl. 8).

V razdelilnik vgrajeni ventili za ročno upravljanje kažejo s položajem ročice, ali je cevovod odprt ali zaprt. Centralno upravljanje in nadzor nad stanjem vodov je mogoče z elementi za upravljanje in signalizacijo, ki so vgrajeni v električnem razdelilniku. Z njimi vklapljamo in izklapljamo elektromagnetna ventila za vodo in za plin.

Instalacijski blok. Uporabo elektrike, vode in plina na delovnih mestih učencev in učitelja omogočajo instalacijski bloki. Vgrajene šolske varnostne vtičnice 220 V/10 A zagotavljajo varno priključitev električnih napeljav. Za točenje vode in za priključitev porabnikov vode rabi dvojna plastificirana pipa z možnostjo ročne regulacije curka vode, odvodu vode pa je namenjeno korito z odtokom. Plinski vtičnici sta namenjeni priključitvi laboratorijskih gorilnikov. Instalacijski blok vsebuje vso notranjo napeljavo za elektriko, plin, vodo in odtok do talnih priključkov.

Šolski malonapetostni izvir. Za eksperimentalno delo učencev in učiteljev je namenjen šolski malonapetostni izvir (ŠMI), ki zagotavlja funkcionalno in varno uporabo ter preprosto ravnanje. Temeljni šolski malonapetostni izvir ima malo napetost do 25 V in je ključni element sistema električnih napeljav in opreme. Enosmerne in izmenične napetosti na izhodu lahko nastavimo na poljubno vrednost od 0 do 25 V. Napetost kaže vgrajeni merilni instrument. Nastavljiva tokovna varovalka od 1 do 10 A varuje pred preobremenitvami v zunanjem električnem krogu in tudi sam ŠMI.

Plinski laboratorijski gorilnik. Plinski laboratorijski gorilniki, ki jih uporabljamo pri pouku, morajo biti opremljeni s termomagnetnimi ventili. Tak ventil

zapre dovod plina, če ogenj na gorilniku ugasne (zaradi prepiha, vretja vode, ...).

Tipka za izklop v sili. Poleg drugih varnostnih ukrepov so v sistem vključene tipke za izklop vseh napeljav ob nevarnosti. Tipke so nameščene na različnih mestih v učilnici, ob tabli, vhodnih vratih in v zadnjem delu razreda.

LITERATURA

[1] *Normativi za graditev in opremo osnovnih šol v SR Sloveniji*, Dodatek k Uradnemu listu SRS št. 21/68, Ljubljana, 1968.

[2] Lapuh M., Lapuh M., *Kabinetni pouk v sodobni šoli, šola kulturni in športni center,* Republiški sekretariat za prosveto in kulturo SR Slovenije, Zavod za šolstvo SR Slovenije, Ljubljana, 1970.

[3] Izobraževalna skupnost Slovenije, *Oblikovanje in opremljanje osnovnošolskega prostora za sodobno vzgojnoizobraževalno delo, Ljubljana, 1978*

[4] Lewis J.L., *Teaching School Physics,* Penguin Books — Unesco, 1976.

[5] Komisija za instalacije pri Zavodu SRS za šolstvo, *Priporočila za napeljave in opremo, (delovni materiali),* Ljubljana, 1980—82.
(Opomba: V Priporočilih je navedena literatura s področja tehnologije in varnosti za napelja in opremo in veljavni predpisi, normativi in standardi.).

PRIJAVA

Prijavljam se na 34. občni zbor DMFA SRS, ki bo 22. in 23.10.1982 v Čateških toplicah.

....
(priimek in ime) *(točen naslov)*

Rezervirajte mi prenočišče skupaj z .....
v hotelu B—kategorije "BUNGALOVI" ob Zdraviliškem domu v dvo— (tro—) posteljni sobi.
Cena po osebi: z zajtrkom (280,— din), polpenzion (410,- din), polni penzion (510,— din).
V ceni je vključeno tudi kopanje v termalnih kadeh in bazenih.

Prijavljam se za ogled Jedrske elektrarne Krško: DA NE

Obkroži ustrezne cene.

Upravni odbor Društva matematikov, fizikov in astronomov SR Slovenije vabi na **34. OBČNI ZBOR DMFA SRS**, ki bo 22. in 23. oktobra 1982 v **ČATEŽKIH TOPLICAH**, v hotelu "Zdraviliški dom".

Spored:

Petek, 22.10.1982

– 12.00 in dalje	Prijave v recepciji hotela "Zdraviliški dom"
– 15.30	Strokovno predavanje: dipl.ing. Marko Štular, FIZIKI V INDUSTRIJI
– 17.00	Posvetovanje O PROBLEMIH NARAVOSLOVJA V USMERJENEM IZOBRAŽEVANJU
– 19.30	Skupna večerja

Sobota, 23.10.1982

– 9.00 OBČNI ZBOR, z naslednjim dnevnim redom:

1. Otvoritev
2. Poročilo o delu društva
3. Podelitev priznanj
4. Razprava o poročilih
5. Poročilo nadzornega odbora
6. Volitve novega odbora
7. Razno

– 13.00	Skupno kosilo
– 14.30	Ogled Jedrske elektrarne Krško

V prostorih Zdraviliškega doma bo prodajna razstava društvenih publikacij. Ob tem boste lahko vplačali tudi članarino in naročnino za Obzornik za matematiko in fiziko ter morebitne starejše dolgove ter posamezna in skupinska naročila za Presek.

Prijavite se do 10.10.1982 na naslov:

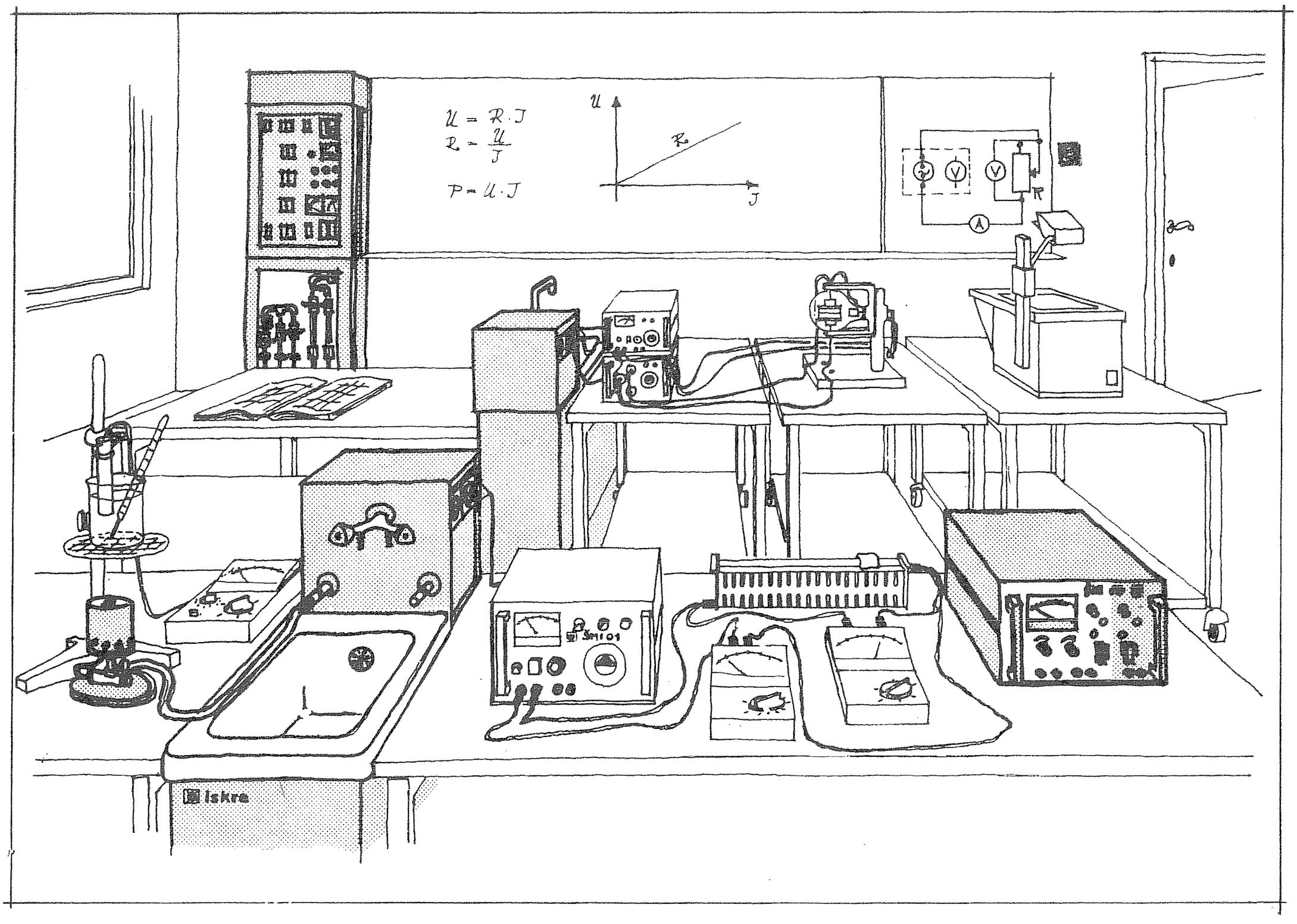
prof. Jože ANTOLOVIČ,
Šolski center Brežice,
Trg dr. I. Ribarja 14,
68250 BREŽICE

Iskra

SISTEMI IN OPREMA ZA IZOBRAŽEVANJE

ISKRA ZA AKTIVNEJŠI UK IN POUK

Iskra se s svojim programom vključuje v vzgojo in izobraževanje kot načrtovalec in proizvajalec učne tehnologije ter načrtovalec in izvajalec najsodobnejših metodično didaktičnih projektov.



Sistem napeljav in osnovne opreme sestavljajo sistemi za shranjevanje, prenos in predelavo energije, snovi in informacij ter sistemi za zaščito učencev in učitelja. Glavni sestavni deli: instalacijski blok (IB), električni razdelilnik (ER), napetostni izviri, razdelilna omarica za vodo in plin (ROV, ROP), plinski laboratorijski gorilnik (PLG), avdiovizuelna sredstva (AV) in izklop v sili (IVS). Sistem napeljav in osnovne opreme v prostorih za pouk naravoslovja in tehničnih predmetov omogoča varno in preprosto eksperimentiranje in delo učencev in učitelja. Je varen, didaktično funkcionalen in prilagojen potrebam v prihodnosti.

ISKRA – Industrija merilno regulacijske in stikalne tehnike, Kranj, n.sol.o.,
DS Komerciala – Prodaja Ljubljana,
61000 Ljubljana, Trg revolucije 3,
tel.: (061) 213-213.

VSEBINA OBZORNIKA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO **29** (1982) ŠT. 1—6, STR. 1—208

Str.

Članki — matematika

Afina geometrija (Ivan Vidav) 65
Dokaz Jordanovega in Schoenfliesovega izreka za poligonalne krožnice v ravnini (Janez Rakovec) 73
Inverzija in konstrukcije z ravnilom in šestilom (Marija Vencelj) 81
Elementarna varianta osnovnega izreka integralnega računa (Aljoša Volčič) . . 97

Članki — fizika

Energijski pasovi v kristalih polprevodnikov (Janez Strnad) 1
Dioda in tranzistorji (Jože Pahor) 11
Fotoelektrični pojavi (Peter Gosar) 19
Polprevodniški detektorji sevanja (Andrej Likar) 27
Svetleče in laserske diode (Janez Stepišnik) 33
Termoelektrični pojavi (Slobodan Žumer) 38
Tunelski pojav v polprevodnikih (Peter Prelovšek) 45
Svetloba v megli (Ivan Kuščer) 129
Težave pri pouku kvantne fizike (Janez Strnad) 141
Fotoelektrične lastnosti polprevodnikov (Peter Gosar) 155
Osnovni delci in osnovne interakcije (Mitja Rosina) 162
Tri leta, dve šoli, ena fizika (Janez Ferbar) 178
Varnost pri pouku fizike (Zlatko Bradač) 189
Prostori, napeljave in osnovna oprema za fiziko (Janez Ferbar, Janez Rovanšek, Tomaž Skulj) 195

Novice

O nerešljivem problemu (Ivan Vidav) 101
e je transcendentno število (Rudolf Moge) 105
Korak k višjim energijam (Janez Strnad) 106
Merilnik frekvence električnih signalov (Janez Žitnik) 111

Šola

Premica in ravnina v učbeniku za matematiko za usmerjeno izobraževanje (Izidor Hafner) 56
Usklajevanje predmetnikov in učnih načrtov za matematiko v osnovni šoli in v skupni vzgojno-izobrazbeni osnovi srednjega usmerjenega izobraževanja med posameznimi republikami in pokrajinami v SFRJ (Aleksander Cokan) 58
Zakaj speljavajo avtomobili s parkirišč (Jurij Vdovič) 115
Spreminjanje radija Kefeide (Marijan Prosén) 116

Domače vesti

Ivan Vidav — avnojski nagrajenec (Niko Prijatelj) 61
Mednarodno tekmovanje študentov matematike v Beogradu (Mirko Dobovišek) 62
Primatiada 81 (Primož Trante) 64
Obzornik za matematiko in fiziko v letu 1982 (Ciril Velkovrh) III
Pogovor avtorjev — vabilo (Janez Stepišnik) III
9. seminar iz matematike — Geometrija — vabilo (Martina Koman) IV
Žagarjevo priznanje (Sonja Križanič) 88
Profesor Niko Prijatelj šestdesetletnik — Bibliografija (Ivan Vidav) 89
Letovanje v Plemljevem domu na Bledu 1982 (Dušan Modic) 91
Franc Kvaternik — umrl (Marjan Vagaja) 92
33. občni zbor DMFA SRS (Janez Stepišnik) 93
Drugi seminar iz teorije grafov Beograd—Ljubljana (Bojan Mohar) 94
14. zvezno tekmovanje študentov matematike ISTAM 1981 (France Forstnerič) . 117
Seznam diplomantov ... (Zbral in ur. Ciril Velkovrh) 121
Nagrajenci Sklada Borisa Kidriča v letu 1982 (Zbral in ur. Ciril Velkovrh) . . 124
V slovo kolegu in prijatelju profesorju Francu Galiču (Ivan Pucelj) 125
Novi člani društva v letu 1981 (Ciril Velkovrh) 126
Priznanja učiteljem — vabilo (Martina Koman) 188
Seminar za učitelje fizike (Seta Oblak) 194
34. občni zbor DMFA SRS — vabilo (Janez Stepišnik) 207, 208

Utrinki: Vse o radioaktivnem razpadu (Izbral Dušan Modic) 114

Nove knjige: . . . . . 10, 18, 32, 44, 50—55, 95—VIII, 105, 126—XII, 140, 154