

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **13** (1985/1986)

Številka 6

Strani 322-333

Janez Strnad:

O SPEKTRIH

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/13/797-Strnad.pdf>

© 1986 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

O SPEKTRIH

Dvogovor med piscem in članom uredniškega odbora — namesto uvoda

Bralci Preseka naj ne mislijo, da se pisec usede, napiše prispevek, ga odda in je zanj s tem zadeva opravljena. Rokopis gre skozi roke področnega urednika, odgovornega urednika in o njem razpravlja še uredniški odbor. Na vsakem izmed teh korakov se lahko porodijo pripombe in spreminjevalni predlogi. Ta misli, da bi bilo treba kaj povedati preprosteje, oni, da bi kazalo kaj spustiti ali dodati. Včasih posluša pisec pripombe tudi še po izidu prispevka. Naslednji dvogovor med piscem in članom uredniškega odbora ni izmišljen.

Pisec: Članek ob stoletnici Balmerjeve enačbe nekaterim članom uredniškega odbora Preseka menda ni bil pogodu?

Član uredniškega odbora: Zdel se je prezahteven za osnovnošolce, ki sestavljajo večino naših bralcev.

P: Mislil sem, da je poseben primeren za osnovnošolce. Johann Jakob Balmer je potreboval samo množenje in deljenje — s fiziko se sicer sploh ni ukvarjal —, da je odkril enačbo za valovno dolžino vodikovih spektralnih črt. To enačbo je uporabil Niels Bohr kot temelj, na katerem je začel graditi novo — kvantno — mehaniko.

Fizika bi brez merjenja in računanja shirala. Fiziki se ne bi mogli pogovarjati o tem, "zakaj ptice letajo in zakaj je nebo modro", če se ne bi prej z merjenjem in računanjem dokopali do zakonov za gibanje teles po zraku in za sipanje svetlobe.

Kaj imajo matematične naravoslovne teorije, kar jim omogoči, da pogosto uspešno napovedo izkustvene novosti? Tega ne zmorejo ne pesniki ne astrologi ne vedeževalci ne biologi ne sociologi ne tisti naravoslovci, ki se sklicujejo zgolj na izkušnje. Matematične teorije morajo biti v nekem posebnem odnosu z resničnostjo, ki jim omogoča uspešne napovedi, in izredno zanimivo se je vprašati, kakšen je ta odnos ...

"Število je vse, " je dejal Pitagora pred dvema tisočletjema. To razumsko

trditev so podprli Platon, Galilei, Descartes, Spinoza in Newton, če naštejemo le najznamenitejše.

H.J.Robinson, *A theorist's philosophy of science* (Teoretikova filozofija naravoslovja), *Physics Today* 37 (1984) 24 (3)

Ali ne sme Presek poudarjati tudi tega kvantitativnega pogleda v fiziki, če ga že v vsakdanjem življenju mnogi odklanjajo?

Postali bodo znani sociologi in politologi, čeprav so izrazito alergični na števila. Trpijo za "dismetrijo" — kot večina Američanov.

S.L.Glashow, *Science education and US technology*
(Pouk naravoslovja in ameriška tehnika),
Physics Today 36 (1983) 9 (4)

U: Kot matematik imam nasploh računanje rad. Članek se ni zdel prezahteven zaradi računanja, ampak po fizikalni strani. Ali se naučijo osnovnošolci v sedmem in osmem razredu, kaj je spekter?

P: Odleglo mi je, ker Presek ne preganja kvantitativnega pogleda nasploh. Obljubim, da bom poskusil napisati kaj o spektrih, kar bodo lahko razumeli tudi osnovnošolci.

Če lahko merite to, o čemer govorite, in izrazite s števili, veste nekaj o tem. Toda če tega ne morete meriti in izraziti s števili, je vaše znanje pičlo in nezadovoljivo. Morda je začetek znanja, toda v svojih mislih niste napredovali do stopnje znanosti.

Lord Kelvin, *Popular lectures and addresses* (Popularna predavanja in nagovori), McMillan, London 1891

Toda, seveda, kvantitativni pogled ni edini.

Rad povem svojo domislico, da so v svetu človeške misli nasploh in v fizikalni znanosti še posebej najplodovitejši tisti pojmi, ki jim je nemogoče pripeti določen pomen.

H.A. Kramers, *Physical science and human values*
(Fizikalna znanost in človeške vrednote),
University Press, Princeton, N.J. 1947

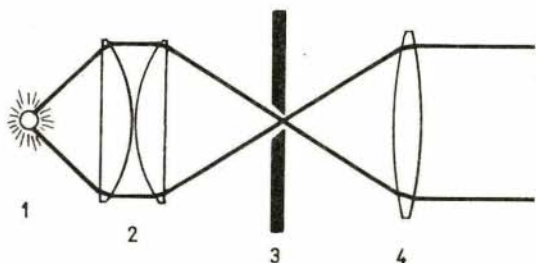
Obljuba dela dolg. Toda eno je imeti dober namen, drugo pa preprosto pojasniti, kaj je spekter. To zagotovo ni lahek pojem, čeprav ga v fiziki pogosto uporabljamo. Še pri fiziki v prvem letniku na univerzi marsikateri študent zajecija, ko ga vprašate, kako je s to zadevo. Ne osnovna ne srednja ne visoka šola te ne prisilijo, če izvezamo naravoslovno—matematično usmeritev in študij matematike ali fizike, da bi v podrobnostih razumel, kaj je spekter. Veliko ljudi tega znanja sploh ne pogreša.

Tukaj pa vzemimo, da pritegne "spekter" tako ali drugače pozornost mladega bralca in da le—ta želi izvedeti, za kaj gre.

Črtasti spekter

Začnimo z vodikovim spektrom, ki ga je obravnaval sestavek *Stoletnica Balmerjeve enačbe* (Presek 12 (1984/85), str. 103). Vzemimo cevko z vodikom pri znižanem tlaku in jo priključimo na visoko izmenično napetost, ki požene po njej spremenljiv tok. Plin zasveti v rdečkasti svetlobi. Poglejmo cevko skozi uklonsko mrežico. Vidimo štiri svetle spektralne črte. Najmanj sta odklonjeni vijolični črti, bolj je odklonjena modra črta in najbolj rdeča črta (slika na naslovni strani). Tudi v svetlobi drugih plinov opazimo svetle črte, le da jih je več ali manj, so drugih barv in drugače razporejene. Pravimo, da so za svetlobo, ki jo sevajo plini, značilni *črtasti spektri* (spectrum, latinsko: podoba, predstava). S tem mislimo na vidno sliko, ki jo dobimo, ko opazujemo sevajoči plin skozi uklonsko mrežico. Uklonska mrežica razstavi svetlobo na barve, bolj učeno: na sestavine z določeno valovno dolžino. Na temnem ozadju vidimo svetle črte v izrazitih barvah.

V fiziki pogosto ne shajamo s tako sliko, ampak potrebujemo diagram s številskimi podatki, ki mu tudi pravimo spekter. Najprej določimo valovno dol-



Slika 1. Poenostavljena risba preprostega spektroskopa na prizmo: 1 svetilo, katerega spekter bi radi opazovali, leča 2 zbere svetlobo nareži 3, leča 4 naredi vzporeden curek svetlobe, ki pade na prizmo 5. Spekter opazujemo skozi daljnogled z zbiralnima lečama 6 in 7. Nakazan je potek žarkov modre (črtkano) in rdeče svetlobe (pikčasto). Razlika odklonov za modro in rdečo svetlobo je narisana pre- tirano.

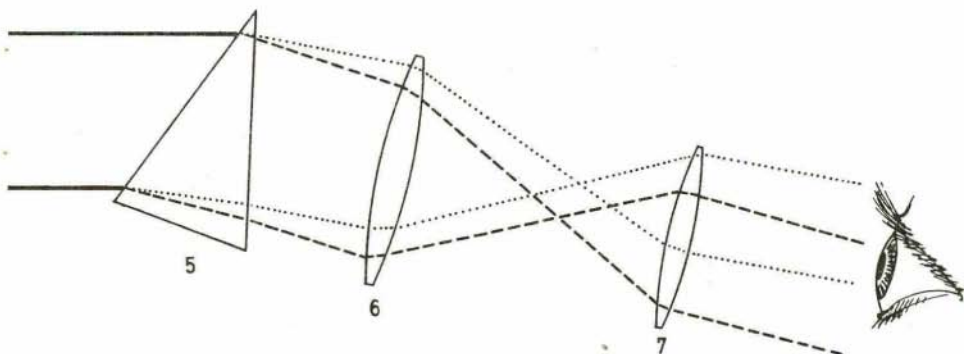
žino črt. Z nekaj truda bi lahko izmerili valovno dolžino črt v vodikovem spektru. Določiti bi morali odklon, pod katerim jih vidimo, in vedeti, koliko rež pride na milimeter v mrežnici. To pot si prihranimo računanje in kar ponovimo valovne dolžine, ki smo jih navedli zadnjič: 410,1 nm, 434,0 nm, 486,1 nm in 656,3 nm (nanometer je milijardina metra, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).

Za natančno merjenje bi potrebovali *spektroskop* (slika 1). Svetlobo cevke z lečo zberemo na vstopni reži. Drugo zbiralno lečo postavimo tako, da je reža v njeni goriščni ravnini. Vzporedni curek svetlobe usmerimo na uklonsko mrežico. Tej sledi še ena zbiralna leča, ki da ostro sliko na zaslonu, ali pa dve zbiralni leči, skozi kateri opazujemo kot skozi daljnogled. Pogosto pravimo, da so spektralne črte slike vstopne reže v različnih barvah. (Vodikovega spektra zaradi šibke svetlobe iz spektralne cevke ne moremo opazovati na zaslonu, ampak le z očmi neposredno ali skozi daljnogled.)

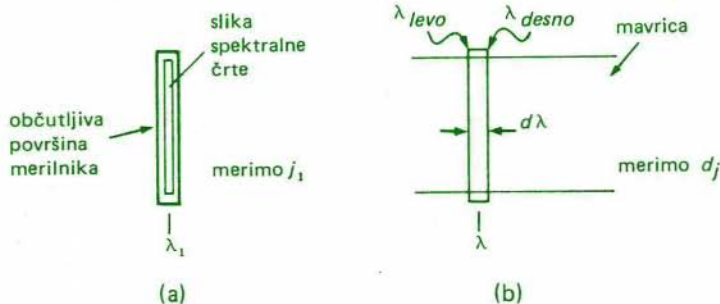
Namesto uklonske mrežice lahko uporabimo *prizmo* iz stekla. Prizma je vgrajena tudi v žepni spektroskop, ki ga uporabljamo v šoli. V tem primeru je najmanj odklonjena rdeča črta, najbolj vijolični. Valovne dolžine pa ne moremo tako preprosto izračunati kot pri mrežici.

S tem, da smo določili valovne dolžine črt, smo naredili šele prvi korak. V drugem koraku moramo izmeriti svetlobni tok ali gostoto svetlobnega toka, ki ustreza črtam. Uporabimo merilnik gostote svetlobnega toka, ki meri pri vseh valovnih dolžinah enako, na primer baterijo termoelementov. Merilnik postavimo na mesto prve črte v spektru in odčitamo gostoto svetlobnega toka. Poskrbeti moramo, da občutljiva površina merilnika v obliki ozkega pravokotnika pokrije vso črto, torej, da merilnik ni ožji kot črta (slika 2). Postopek ponovimo na kraju druge, tretje ... črte.

Narišemo diagram, v katerem nanesemo na vodoravno os valovno dolžino, na navpično os pa gostoto svetlobnega toka. Pri valovni dolžini prve črte λ_1 na-



rišemo navpično črto, katere višina ustreza gostoti svetlobnega toka v prvi črti j_1 , pri valovni dolžini druge črte λ_2 navpično črto z višino j_2 , pri valovni dolžini tretje črte λ_3 navpično črto z višino j_3 ... (slika 3).

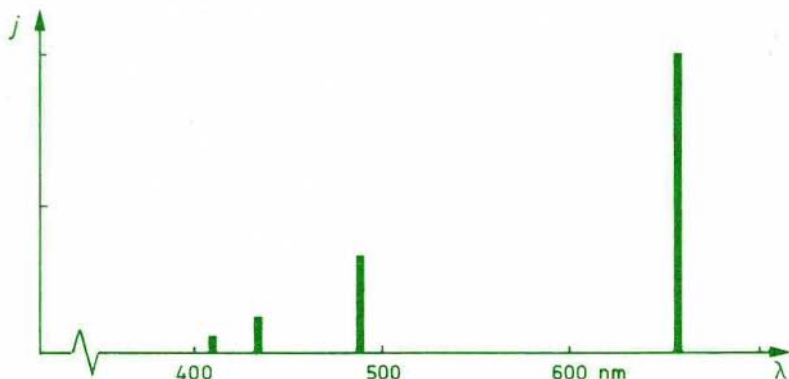


Slika 2. Merjenje gostote svetlobnega toka j_1 v črti v spektru pri valovni dolžini λ_1 (a) in dela gostote svetlobnega toka dj v zveznem spektru na pasu valovne dolžine s širino $d\lambda$ okoli valovne dolžine λ (b).

Tako narišemo tudi črtaste spektre drugih valovanj, ki jih ne moremo neposredno videti. Spektri zvoka, ki ga oddajajo glasbila, so na primer tudi črtasti.

Zvezni spektri

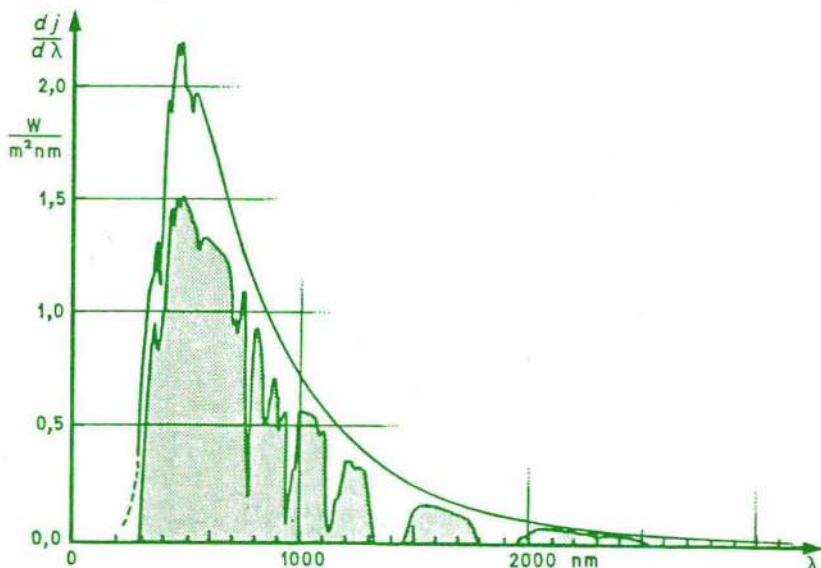
Poznamo še drugačne spektre. Kot smo opazovali spekter vodika, opazujemo zdaj spekter *bele* sončne svetlobe. Podobni so tudi spektri svetlobe, ki jo sevajo trdna telesa, na primer žareča nitka v žarnici, ali kapljevine, na primer



Slika 3. Črtasti spekter vodika na vidnem območju v diagramu

talina v plavžu. Slika, ki jo vidimo, spominja na mavrico, v katero so razvrščene mavrične barve: vijolična, modra, zelena, rumena, oranžna in rdeča (slika na naslovni strani). Zdaj ni območij brez svetlobe kot v prejšnjem primeru. Okoli vsake valovne dolžine na vidnem območju je nekaj svetlobe, zastopane so na gosto vse sestavine s tega območja. V tem primeru govorimo o *zveznem spektru*. Diagram zveznega spektra je težavneje dobiti kot diagram črtastega spektra.

Poskušajmo ravnati podobno kot pri merjenju gostote svetlobnega toka v črtastem spektru. Postavimo merilnik na določeno mesto v spektru in odčitajmo gostoto svetlobnega toka. Toda lege merilnika zdaj ne moremo določiti po zaporedni številki spektralne črte, ki je v črtastem spektru že določala valovno dolžino. Ob spekter si mislimo položeno lestvico valovnih dolžin, na kateri odčitamo valovno dolžino λ , ki ustreza sredini merilnika (slika 2b). Dobljena gostota svetlobnega toka pa je odvisna od širine občutljive površine merilnika. Tej neprijetnosti se izognemo, če izmerek za gostoto svetlobnega toka delimo s širino občutljive površine, izraženo kar s pasom valovne dolžine $d\lambda = \lambda_{desno} - \lambda_{levo}$. Za izmerek gostote svetlobnega toka zapišemo dj in damo s tem vedeti, da gre za del gostote svetlobnega toka, ki odpade na pas valovne dolžine $d\lambda$



Slika 4. Zvezni spekter sončne svetlobe v diagramu pri tleh ob pravokotnem vpadu (osenčeno) in na vrhu ozračja. Fraunhoferjeve črte so tako ozke, da jih ni mogoče vnesti na risbo. Osenčena ploščina ustreza približno gostoti svetlobnega toka 1 kW/m^2 in je pomembna za tiste, ki razmišljajo o izkoriščanju sončne energije.

okoli valovne dolžine λ . Kvocient $dj / d\lambda$ določimo na dovolj velikem številu mest, to je pri dovolj velikem številu različnih valovnih dolžin. Prikažemo ga z gladko krivuljo v diagramu, v katerem nanesimo na vodoravno os valovno dolžino λ , na navpično os pa $dj / d\lambda$ (slika 4). *

Pri zvoku dobimo zvezni spekter za šum, če na primer rečemo ššššš ali plosknemo z rokama ali strgamo list papirja. Bela svetloba ustreza torej šumu.

Emisijski in absorpcijski spektri

Doslej smo govorili le o *emisijskih spektrih*. Vselej smo razstavili na enobarvne sestavine svetlobo, ki so jo svetila neposredno izsevala. Pa spustimo belo svetlobo skozi hladen plin. V takem *absorpcijskem spektru* opazimo temne absorpcijske črte na svetlem ozadju, in to pri valovnih dolžinah, pri katerih ležijo v emisijskem spektru svetle črte.

V plinu sevajo in absorbirajo svetlobo posamični atomi. Atomi ne morejo imeti katere koli (notranje) energije, ampak samo določeno. Nemoten atom ima najnižjo mogočo energijo. Po trku z ionom ali elektronom ima lahko atom višjo energijo. Presežek energije odda v obliki sevanja z določeno valovno dolžino, ki prispeva k črti v spektru.

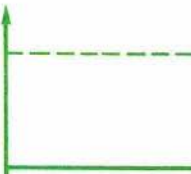
Pri trdnem telesu, segretem do določene temperature, dobimo zvezni spekter. Tako seva tudi Sonce. Čeprav je Sonce velika plinska krogla, se izsevana svetloba na poti od atomov iz globljih plasti do površja obreigne ob veliko atomov. Svetloba, ki jo vidimo, ima podoben spekter kot trdno svetilo s temperaturo sončnega površja.

Curek te bele svetlobe s sončnega površja gre na poti do nas skozi hladnejši plin v sončni atmosferi. Njena sestavina s pravo valovno dolžino λ_1 vzbudi atome, ki nato ponovno sevajo, a sevajo v vseh mogočih smereh. Zato je sevanja s to valovno dolžino v svetlobi, ki prihaja na Zemljo, manj kot pri sosednjih valovnih dolžinah, pri katerih svetloba ne vzbudi atomov. V spektru se pokaže ta primanjkljaj kot temna črta. V sončnem spektru je veliko takih ozkih *absorpcijskih črt*.

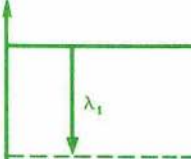
Diskretne in zvezne porazdelitve

Črtasti spektri so zgled za *diskretne* (začuda ne pravimo črtaste), zvezni spektri pa zgled za *zvezne porazdelitve*. Spekter je pač porazdelitev gostote svetlobnega toka po valovni dolžini. Morda si bodo bralci oboje lažje predstavljali po zgledih iz športa. Kot zgled za diskretno porazdelitev navedimo porazdelitev števila igralcev po številu nastopov v državni nogometni reprezentanci (slika 5).

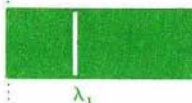
energija ↑
nemoten atom z najmanjšo energijo



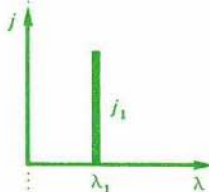
energija ↑
po trku ima atom višjo energijo, ki se je znebi s sevanjem



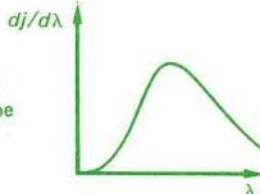
v emisijskem spektru vidimo svetlo črto



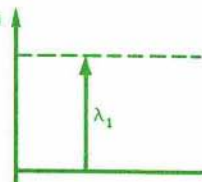
črtasti spekter



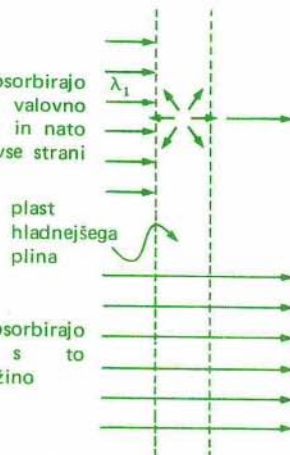
zvezni spekter sončne svetlobe



energija ↑
 λ_1



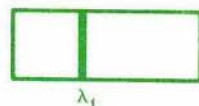
atomi absorbirajo svetlobo z valovno dolžino λ_1 in nato sevajo na vse strani



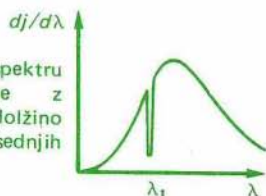
plast hladnejšega plina

atomi ne absorbirajo svetlobe s to valovno dolžino

v absorpcijskem spektru vidimo temno črto

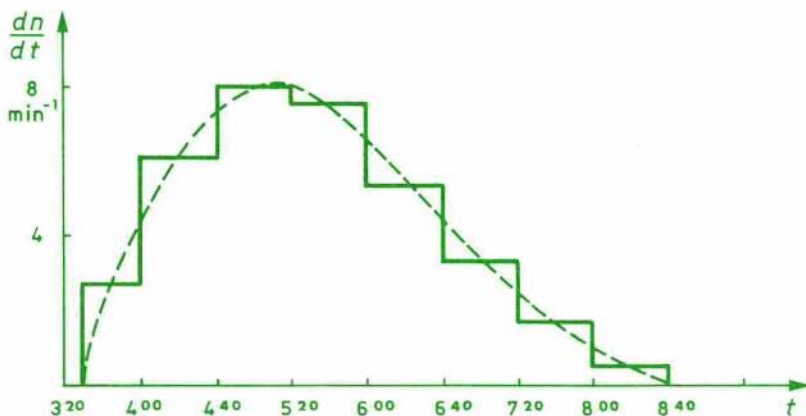
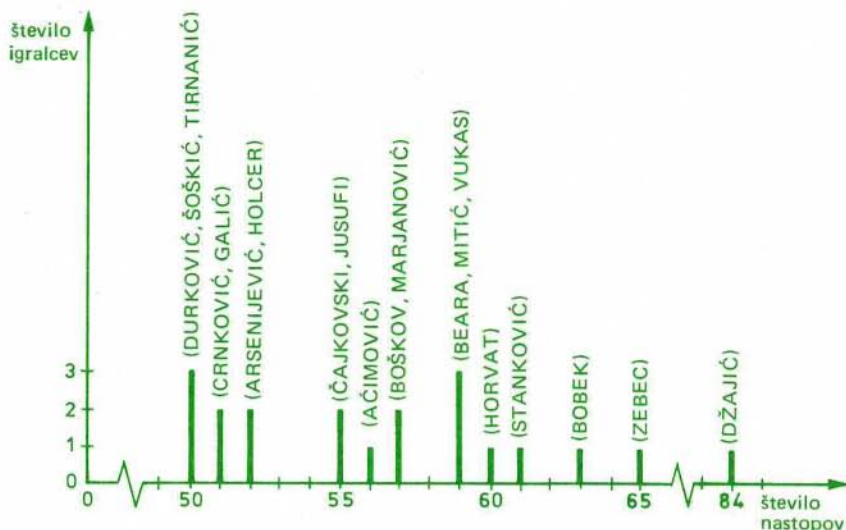


v zveznem spektru je sestavine z valovno dolžino manj kot sosednjih sestavin



* Nekateri priporočajo pisavo $\Delta\lambda$ in Δj namesto $d\lambda$ in dj , češ da sta prvi znamenji bolj domači od drugih. Ali ni izbira znamenj nepomembna, če se le dobro dogovorimo, kaj pomenja pomenijo in kako to izmerimo?

Slika 5. Zgled za diskretno porazdelitev: porazdelitev števila igralcev po številu nastopov v državni nogometni reprezentanci (*Almanah 1978*, Delo, Ljubljana 1979)



Slika 6. Zgled za zvezno porazdelitev: porazdelitev števila tekmovalcev po času na 150 kilometrskem kolesarskem maratonu "Franja" 27. julija 1985. Vseh 1382 moških tekmovalcev smo razvrstili na pasove s širino $dt = 40$ min in narisali stopničasti diagram, ki smo ga podali tudi z gladko krivuljo (črtkano). Če bi vzeli ožje pasove, krivulja ne bi bila tako pregledna, ker so prihajali tekmovalci na cilj v naključnih skupinah (*Horuk*, mesečna priloga Dnevnika, 12.8. 1985).

Pri tekmovanjih, pri katerih merimo čas ali razdaljo, pa se srečamo z zveznimi porazdelitvami. Na vodoravno os naneseimo na primer čas t , ga razdelimo na pasove s širino dt in preštejemo tekmovalce dn na pasu s širino dt okoli t , se pravi od $t - 1/2 dt$ do $t + 1/2 dt$. Kvociient dn/dt v odvisnosti od časa t lahko podamo z gladko krivuljo (slika 6).

Zgodovinsko ozadje

Bralci, ki bi ne razumeli vsega, naj ne bodo vznejevoljeni. V življenju pogosto pomaga, če se o težavah pogovorimo. Tedaj navadno ugotovimo, da imajo podobne težave tudi drugi. Ta način se menda obnese pri uvajanju zahtevnih pojmov v šoli. Ob spektrih za težave drugih sploh nismo v zadregi: dovolj je, če posežemo v zgodovino fizike.

Na začetku 17. stoletja se je z uvedbo daljnogleda in mikroskopa povečalo zanimanje za optiko. Isaaca Newtona je zanimalo, zakaj da daljnogled na lečo sliko z barvastimi robovi. Da bi se temu izognil, je izdelal zrcalni daljnogled. Na drugi strani pa je opazoval prehod svetlobe skozi kose stekla z nevzporednima mejnima ploskvama. Leta 1672 je prvič razstavil belo svetlobo s prizmo na spekter. Ugotovil je, da se vsaka od spektralnih barv po svoje lomi in da je ni mogoče dalje razstaviti. Naprej pa ni prišel, ker je verjel, da sestavljajo svetlobo delci, čeprav tega pogleda ni vsiljeval drugim in je celo delcem pripisal nekatere lastnosti valov.

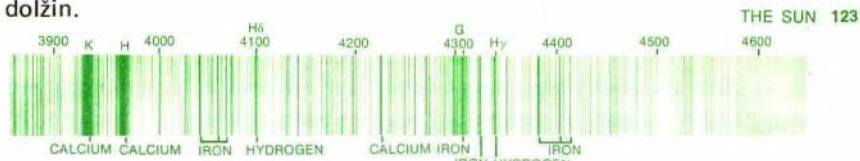
Na začetku 19. stoletja je Thomas Young povzel staro Huygensovo slutnjo, da je svetloba valovanje, ki so jo Newtonovi posnemovalci pregnali iz fizike. Svetlobo je primerjal z zvokom in barve s toni z različnimi valovnimi dolžinami. S svetlobo je ponovil za valovanje značilni poskus, ki so ga tedaj že poznali pri valovih na vodi in pri zvoku. Skozi dve ozki špranji v zaslonu je spustil enobarvno svetlobo na zaslon. Iz razmika med nastalimi svetlimi in temnimi interferenčnimi progami je ocenil valovno dolžino.

Kakor koli občudujem Newtona, me to ne obvezuje, da bi verjel v njegovo nezmotljivost. Z obžalovanjem ugotavljam, da se je tudi on lahko motil in da je njegova avtoriteta včasih morda celo zadrževala razvoj znanosti.

Th. Young

Pomemben korak naprej je naredil Joseph Fraunhofer. Z zbiralno lečo pred prizmo in daljnogledom za njo je sestavil spektroskop in z njim leta 1814 ugotovil veliko ozkih temnih črt v sončnem spektru (slika 7). Te temne črte je uporabil kot znamke v spektru in zanje mnogo natančneje premeril lom kot

Newton. Fraunhofer je nadaljeval tudi po Youngovi, ne samo po Newtonovi poti. Namesto dveh rež je v zaslon naredil veliko ozkih rež v enakem majhnem razmiku in tako izdelal uklonsko mrežico. Ko jo je uporabil namesto prizme v spektroskopu, je mogel izračunati valovno dolžino, ki je ustrezala določenemu odklonu, torej določeni barvi. Tako je postavil ob mavrico lestvico valovnih dolžin.



Slika 7. Del sončnega spektra s temnimi Fraunhoferjevimi črtami na območju valovnih dolžin od 540 nm do 610 nm, od zelenega do rdečega dela. Izrazite črte izvirajo od železa (pri 546 nm in 561 nm), skandija (565 nm) in natrija (dvojna črta pri 589 nm).

Tudi pri drugih količinah, ki se spreminjajo zvezno, na primer pri času, razdalji, temperaturi, je trajalo precej časa, preden so fiziki določili take lestvice. Obvladali so jih, ko so se navadili količino meriti in so se dogovorili za enoto. Pri tem so jim pomagale "fiksne točke", na primer tališče ledu in vrelišče vode pri temperaturi ali Fraunhoferjeve črte v sončnem spektru pri valovni dolžini svetlobe. Emisijske črte so opazili pozneje kot absorpcijske v sončnem spektru. O obojih so veliko govorili, ne da bi natančno vedeli, za kaj gre.

Fraunhofer ni imel sreče. Foucault bi bil kmalu zadel v živo, ko je nekega dne opazoval Sonce skozi prizmo in je šla svetloba skozi obločnico. Opazil je, da se je rumena črta, ki jo je ponavadi sevala obločnica, nenadoma spremenila v temno črto. Švedski fizik Andres Angstroem je tudi šel mimo odkritja, ko je zapisal, da so svetle črte kovinskih par na istem mestu kot temne črte sončnega spektra.

Slavo za izum spektralne analize sta požela Nemca Gustav Robert Kirchhoff in Robert Wilhelm Bunsen. Najprej je prvi izpopolnil spektroskop, da so lahko podrobno podali položaj črt, drugi pa iznašel gorilnik z zelo vročim plamenom. Kirchhoff je vrgel v plamen nekoliko kuhinjske soli in opazil rumeno črto. "To pomeni," je rekel, "da je rumena črta značilna za natrij." Tako je delal še naprej in naredil seznam spektrov, od katerih je bil vsak značilen za določen element. Potem je potrdil Angstroemovo ugotovitev, da se črte nekaterih kovinskih par ujemajo z nekaterimi temnimi črtami sončnega spektra. "Iz tega sklepam, da so na Soncu natrij in druge kovine. Toda zakaj so te črte temne, namesto da bi bile svetle?"

Leta 1860 je izrekel splošni zakon: "Plinska plast, skozi katero gre svetloba, preden pride do spektroskopa, absorbira sestavine, ki jih sicer sama seva."

Leto se še ni končalo, ko je Bunsen izkoristil novo odkritje. V spektru kamene soli iz rudnika v Strassfurtu je opazil nekaj zelo šibkih črt, ki jih ni bilo na seznamih. "Ker te črte ne ustrezajo nobenemu znanemu elementu," si je dejal, "kažejo na navzočnost še neznanih elementov." Skupaj s Kirchhoffom sta se lotila dela. Slednjič sta izločila dve novi kovini, ki sta ju imenovala rubidij in cezij.

Prirejeno po knjigi P. Rousseau, *Zgodovina znanosti*, DZS, Ljubljana 1955, str. 598

Pravo zvezo med emisijskimi in absorpcijskimi črtami v spektru plinov je pojasnil šele Niels Bohr leta 1913 s svojim modelom atoma (*Ob stoletnici Bohrovega rojstva*, Presek 13 (1985/86), str. 144).

Pisec ne bo zvedel, koliko bralcev je prebralo sestavek do konca, koliko si jih je prišlo na jasno o črtastih spektrih, koliko o zveznih. Zato se bo moral zanesti na razširjeno mnenje, da pomaga že pogovor o težavah.

Janez Strnad

DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV I^N ASTRONOMOV SRS LETNIK 13, 1985-86,

PRESEK

6

