ravoslovne olimpijade, ki je potekala decembra 2023 v Bangkoku na Tajskem. Avtorji so v nalogi posrečeno prepletli vsebine iz električnih krogov in svetlobe.

Naloga bi lahko imela naslov »Absorpcija svetlobe v kolorimetru«. Ideja naloge, predstavljena v uvodu navodil, je bila, da tekmovalci spoznajo princip delovanja enostavne naprave, s katero lahko merimo koncentracijo obarvanih raztopin, tako napravo sestavijo in umerijo. Podobno napravo (spektrometer) so uporabili tudi pri kemijskem eksperimentu. Celotno v slovenščino prevedeno besedilo naloge, s tipkarskimi napakami vred, je na spletni strani [5], originalno angleško besedilo pa na spletni strani [6].

Eksperimentalna naloga

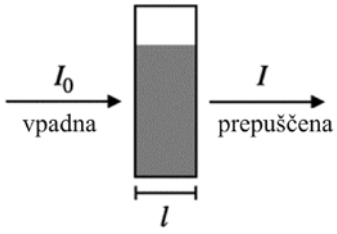
V kratkem teoretičnem uvodu eksperimentalne naloge je najprej predstavljena osnova delovanja te naprave, absorpcija svetlobe v merjenem vzorcu. Vzorec presvetlimo s svetlobo in merimo, koliko svetlobe prepusti. Za posamezni vzorec, v katerem merimo absorpcijo, definiramo količino, imenovano absorbanca (A),

$$A = log_{10}\left(\frac{I_0}{I}\right), \qquad (1)$$

kjer sta I_0 in I intenziteti vpadne in prepuščene svetlobe, prikazani na sliki 1. Izkaže se, da je absorbanca vzorca sorazmerna koncentraciji snovi, ki v vzorcu vpija svetlobo (c), in dolžini poti, ki jo svetloba v vzorcu opravi (l). Opisani sorazmernosti zajema Beer-Lambertov zakon,

$$A = \epsilon c l, \qquad (2)$$

kjer je ϵ molarni absorpcijski koeficient.



Slika 1: Ob prehodu plasti vzorca z debelino l se intenziteta svetlobe zmanjša z začetne I_0 na končno I.

Poskus je bil sestavljen iz treh delov. Pri prvem delu so tekmovalci sestavili preprosto napravo za merjenje absorbance, kolorimeter, pri drugem delu so preučevali odvisnost absorbance od debeline vzorca in pri tretjem odvisnost od koncentracije barvila v vzorcu. V uvodu vsakega od treh delov poskusa so avtorji jasno zapisali cilje posameznega dela, kar daje tekmovalcem oporo. V vsakem trenutku jim lahko pogled na zapisane cilje pomaga pri osredotočanju na temo poskusa. (Kot ste učitelji, ki poučujete fiziko v osnovni šoli, gotovo opazili, zapišemo kratek cilj oziroma namen poskusa tudi na začetku vsake eksperimentalne naloge na državnem tekmovanju v znanju fizike za osnovnošolce.)

Tako so avtorji zapisali cilje treh delov fizikalnega poskusa:

1. del:

1. Povezava električnih elementov v električna kroga kolorimetra, kot prikazujeta shemi električnih krogov.
2. Merjenje osnovnih električnih količin v obeh krogih.

2. del:

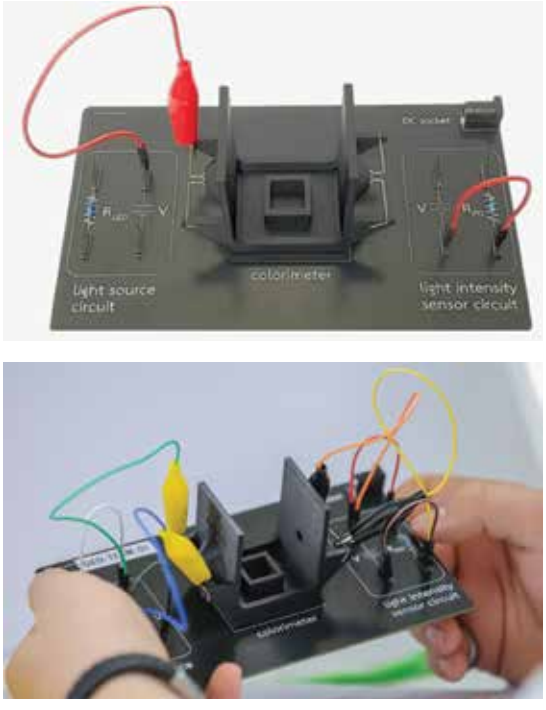
1. Merjenje absorbance sklada modrikastih akrilnih ploščic.
2. Določitev koeficienta sorazmernosti ϵ_{ac} modrega akrila, iz katerega so ploščice.

3. del:

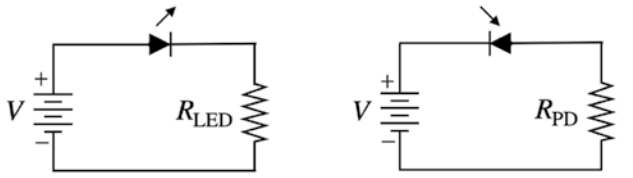
1. Merjenje absorbance raztopin rdečega barvila.
2. Umerjanje kolorimetra za določanje koncentracije barvila v neznanem vzorcu.

Prvi del poskusa: sestava naprave

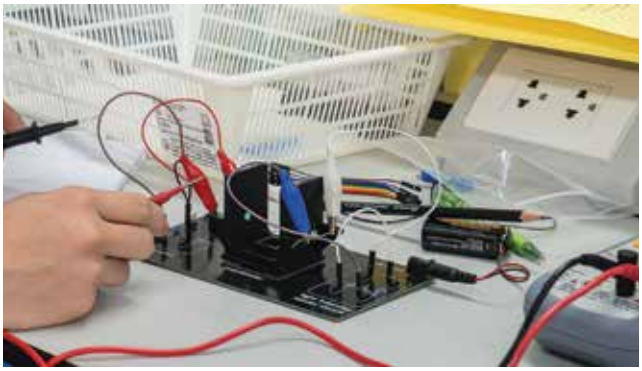
Iz elementov, naštetih med pripomočki, so tekmovalci najprej sestavili napravo, kolorimeter. Na ploščici s pritrjenimi električnimi elementi za dva med seboj nepovezana električna kroga (slika 2) so med seboj po shemah (slika 3) z veznimi žicami povezali ustrezne elemente in oba kroga priključili na isti vir napetosti (baterijo za 9 V). Prvi krog je vseboval svetlobni vir (LED), drugi krog pa fotodetektor (fotodiodo). Pri vezavi obeh diod (LED in fotodiode) so seveda morali paziti na ustrezno polariteto priključkov. Če so LED vezali pravilno, je svetila.



Slika 2: Ploščica z elementi obeh električnih krogov (vir napetosti, ki ga uporabijo v obeh krogih, upornika R_{LED} in R_{PD}, LED in fotodioda) in stojalom za vzorec (na sredini, črna plastika). (Foto: IJSO 2023)



Slika 3: Shema dveh električnih krogov: kroga z virom svetlobe, svetečo diodo (LED), in kroga s fotodiodo (PD).



Slika 4: Merjenje napetosti na elementih v obeh krogih. (Foto: IJSO 2023)

V nadaljevanju so morali z digitalnim multimetrom izmeriti napetosti na vseh elementih v obeh krogih (bateriji, upornikih, LED in fotodiodi) ter iz podanih uporov uporabljenih upornikov in izmerjenih napetosti izračunati električni tok v obeh krogih.

Drugi del poskusa: odvisnost absorbance od dolžine poti (oziroma debeline vzorca)

V sestavljeni napravi zaznava svetlobo fotodioda. Iz navodil so tekmovalci izvedeli, da je električni tok i_{ph}, ki teče v krogu detektorja (fotodiode), sorazmeren intenziteti svetlobe l, ki vpada na fotodetektor. Ko upoštevamo še Ohmov zakon za upornik R_{PD}, ki je vezan v tem krogu, $U_{R_{PD}} = i_{ph} \cdot R_{PD}$, ugotovimo, da velja $I = k \cdot U_{R_{PD}}$, kjer je k sorazmernostna konstanta. Ker pa v absorbanci (1) nastopa le razmerje različnih intenzitet svetlobe, se k v razmerju pokrajša. V navodilih so avtorji eksplicitno zapisali, naj tekmovalci povsod v nadaljevanju naloge, kjer je omenjeno merjenje intenzitete svetlobe, dejansko izmerijo le napetost $U_{R_{PD}}$.

Tekmovalci so morali v stojalo za vzorec po vrsti vstaviti $n = 0, 1, 2 \ldots 5$ modro obarvanih akrilnih ploščic (slika 5) in v vsakem primeru z merjenjem napetosti $U_{R_{PD}}$ izmeriti intenziteto svetlobe, ki jo oddaja LED, prehaja celo skladovnico n ploščic in na koncu vpada na fotodiodo. Izmerke so vpisovali v tabelo, kjer so v enega od stolpcev tabele vpisovali skupno debelino ploščic v skladovnici, v zadnji stolpec pa zapisali iz meritev izračunane vrednosti absorbance A_n, opredeljene z izrazom (1)

$$A_n = log_{10}\left(\frac{U_{R_{PD},n=0}}{U_{R_{PD},n}}\right). \qquad (3)$$

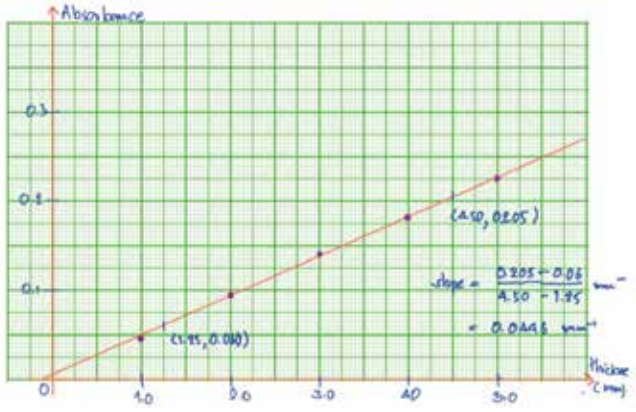
Slika 5: Modro obarvane akrilne ploščice. (Foto: Talal Al-Rashidi)

V nadaljevanju so narisali graf odvisnosti absorbance A od debeline akrilnih ploščic l, iz grafa pa določili vrednosti parametrov ϵ_{ac} in w, ki nastopata v Beer-Lambertovem zakonu za absorbanco (1),

$$A = \epsilon_{ac} \cdot l + w. \qquad (4)$$

Parameter ϵ_{ac} iz enačbe (4) nima istega pomena (in enote) kot parameter ϵ v enačbi (2). Zaradi negotovosti meritev se je lahko v linearnem grafu absorbance v odvisnosti od debeline ploščic pojavil tudi konstantni člen w.

Na sliki 6 je graf absorbance v odvisnosti od debeline akrilnih ploščic iz uradnih rešitev eksperimentalne naloge (žal nimamo fotografije grafov, ki so ju iz meritev narisali naši tekmovalci).



Slika 6: Odvisnost absorbance od debeline akrilnih ploščic iz uradnih rešitev.

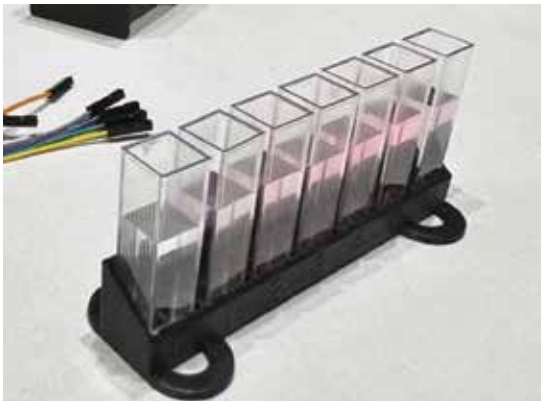
Tretji del poskusa: odvisnost absorbance od koncentracije raztopine barvila

V zadnjem delu poskusa so tekmovalci v stojalo za vzorec po vrsti vstavljali enako oblikovane kivete, ki so vsebovale raztopino rdečega barvila v različnih koncentracijah ($c_n = n \cdot 1{,}0\ ppm$, slika 7), in merili intenziteto

prepuščene svetlobe (napetost $U_{R_{PD}}$). Absorbanco n-te kivete so iz meritev napetosti izračunali z enačbo (3), kjer $n = 0$ ustreza primeru, ko svetlobo absorbira kiveta, v kateri je čista voda (koncentracija barvila je 0 *ppm*). Izmerke in račune so vpisali v tabelo ter narisali graf, ki prikazuje odvisnost absorbance A od koncentracije rdečega barvila c (graf iz uradnih rešitev je na sliki 8). Absorbanca je premo sorazmerna s koncentracijo c (kot pove Beer-Lambertov zakon (1)), zapišemo lahko linearno zvezo

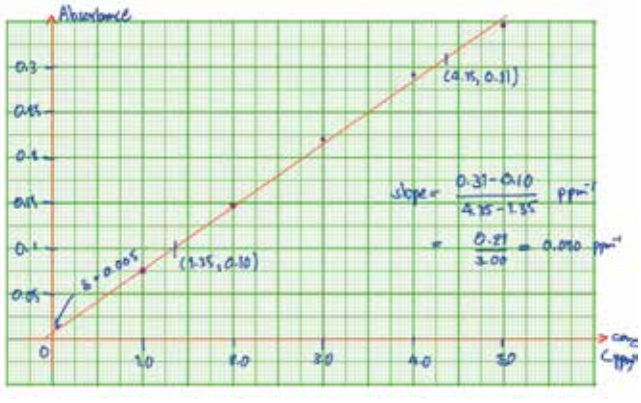
$$A = \epsilon_l \cdot c + \delta. \tag{5}$$

Oba parametra linearne funkcije $A(c)$ (enačba 5) so določili iz grafa. Parameter ϵ_l nima istega pomena (in enote) kot parameter ϵ v enačbi (2). Zaradi negotovosti meritev se je lahko v linearnem grafu absorbance v odvisnosti od koncentracije barvila pojavil tudi konstantni člen δ.



Slika 7: Kivete z raztopino rdečega barvila v različnih koncentracijah. (Foto: Mateja Golubić)

Narisan graf $A(c)$ je tudi umeritvena krivulja kolorimetra, ko ga uporabljamo kot napravo za merjenje koncentracije danega rdečega barvila v vodi v standardnih (uporabljenih) kivetah. V zbirki z $n + 1 = 6$ kivetami z raztopinami rdečega barvila v različnih znanih koncentracijah je bila tudi sedma kiveta X z neznano koncentracijo barvila c_X. Zadnje vprašanje, na katero so pri fizikalni eksperimentalni nalogi tekmovalci morali odgovoriti, je spraševalo po koncentraciji barvila v kiveti X. Z merjenjem intenzitete prepuščene svetlobe, izračunom absorbance A_X in odčitavanjem vrednosti iz umeritvene krivulje $A(c)$ so za konec določili neznano koncentracijo c_X.



Slika 8: Graf absorbance v odvisnosti od koncentracije barvila (umeritvena krivulja kolorimetra) iz uradnih rešitev naloge.

Komentar absorbance

Zgodbo z absorpcijo svetlobe pri pouku fizike običajno začnemo teoretično: s tem, da povemo, da se v tanki plasti (kapljevine ali prozorne trdne snovi) z debelino Δl absorbira določen delež svetlobe oziroma energije, ki jo svetloba nosi. Na poti z dolžino Δl se zato intenziteta svetlobe I zmanjša za ΔI, ki je sorazmeren I in tudi (kratki) dolžini poti Δl. Razliko v intenziteti ΔI lahko zapišemo kot

$$\Delta I = -I\mu\Delta l, \tag{6}$$

kjer je μ absorpcijski koeficient snovi, ki vpija svetlobo in ima enoto m^{-1}. Z integracijo enačbe (6) ugotovimo, da se intenziteta svetlobe z opravljeno potjo l v snovi eksponentno zmanjšuje,

$$I = I_0 e^{-\mu l}. \tag{7}$$

Kakšna je zveza med absorpcijskim koeficientom μ in absorbanco A? Kratka vaja iz logaritmiranja nam da zvezi

$$\mu = \epsilon c \ ln\ 10 \text{ oziroma } A = \frac{\mu l}{ln 10}. \tag{8}$$

Ker ta matematična vaja presega pričakovana matematična znanja povprečnega tekmovalca na IJSO (oziroma bi za reševanje zahtevala nekoliko več časa, kot je na voljo pri eksperimentalni nalogi), so se tekmovalci v uvodu naloge seznanili že kar z rezultatom oziroma definicijo absorbance, ki so jo v nadaljevanju uporabljali. Absorbanca (včasih jo nadomesti pojem ekstinkcija) je s svojo preprosto odvisnostjo od koncentracije topljenca (glej enačbo 2) količina, ki se uporablja pri kemijski analizi raztopin. Kot je očitno iz njene definicije (1), absorbanca nima enote.

Zaključek

V prispevku je bil predstavljen fizikalni del eksperimentalne naloge na 20. Mednarodni mladinski naravoslovni olimpijadi. Naloga ima teoretični uvod, kjer je vpeljan pojem absorbance, in tri praktične dele. V prvem praktičnem delu tekmovalci sestavijo merilno pripravo, ki jo uporabijo v drugem in tretjem delu, pri katerih merijo absorbanco v odvisnosti od debeline vzorca in koncentracije barvila v vzorcu.

Naši ekipi sta fizikalno eksperimentalno nalogo reševali zelo dobro. Od 13 mogočih točk jih je prva ekipa dosegla 12,7 (skoraj vse; nekaj desetink so izgubili – po našem mnenju neutemeljeno, a se ocenjevalci na moderaciji niso pustili prepričati – zaradi zapisa rezultatov z eno

pomembno številko preveč), druga pa 11,2. Druga ekipa je točke (tudi neupravičeno, po naši sodbi) izgubila, ker v pravilno narisanih grafih niso dovolj poudarjeno označili vnesenih merskih točk (tudi tu je bil izplen pogajanj z ocenjevalci slab).

Slika 9: Naši tekmovalci med reševanjem eksperimentalnih nalog. (Foto: IJSO 2023)

Viri

[1] Rovšek, B. (2024). Mednarodna mladinska naravoslovna olimpijada, četrtič, *Fizika v šoli, 29*(1), 51–55.

[2] Rovšek, B. (2020). Mednarodna juniorska naravoslovna olimpijada, *Presek, 47*(5), 27–29.

[3] Rovšek, B., in Vaupotič, D. (2022). Priprave na mednarodno mladinsko naravoslovno olimpijado 2021, *Presek, 49*(4), 12–14.

[4] Rovšek, B. (2023). Selection Process and Training of the Slovenian Team for IJSO: A Case Study, GPG *Journal of Science Education, 4*(2), 1–9.

[5] V slovenščino prevedena eksperimentalna naloga https://drive.google.com/file/d/1jNImVbobLq7W3D5CVqePuXjPdlOCCKwP/

[6] Teoretične in eksperimentalne naloge s preteklih olimpijad: https://ijsoweb.org/downloads