

Žarnice in Stefanov zakon

↓↓↓

SIMON ČOPAR IN JOŠT STERGAR

→ Za fiziko zainteresiranim dijakom ne manjka izbire pri domačih in mednarodnih tekmovanjih, na katerih lahko svoje znanje in inovativnost postavijo na preizkušnjo. Med tovrstna tekmovanja spada tudi evropska fizikalna olimpijada, ki smo jo leta 2022 gostili prav doma, v Sloveniji. Organizacija je potekala pod okriljem DMFA Slovenije v sodelovanju s Fakulteto za matematiko in fiziko ter Pedagoško fakulteto Univerze v Ljubljani in s podporo ministrstva za šolstvo in Instituta »Jožef Stefan« (spletna stran dogodka: [1]). Takrat se je olimpijade udeležilo kar 182 dijakov iz 37 držav.

Teoretične naloge je priskrbel mednarodni znanstveni odbor, eksperimentalno nalogo, zasnovano okoli svetlobe in Stefanovega zakona, pa smo v celoti pripravili v Sloveniji. Razvoj naloge je trajal približno dve leti, čas praktičnega testiranja ter izbira in nabava opreme, pa sta zavzela približno devet mesecev. V tem prispevku avtorja predstavlja zasnovo eksperimentalne naloge in izzive pri njeni izvedbi ter pripravi.

S svetlobo se srečujemo vsakodnevno, pa naj bo pri izbiri in montaži svetil v bivalnih prostorih, v fotografiji, umetnosti, pri varnosti na cesti ali pri zaslonih elektronskih naprav. Ko so žarnice na žarilno nitko zamenjale varčne in kasneje LED-žarnice, so postale pomembne tudi razlike v barvi, ekonomičnosti razsvetljave in toplotnih učinkih svetlobe. Te lastnosti so tekmovalci v petih tekmovalnih urah te-



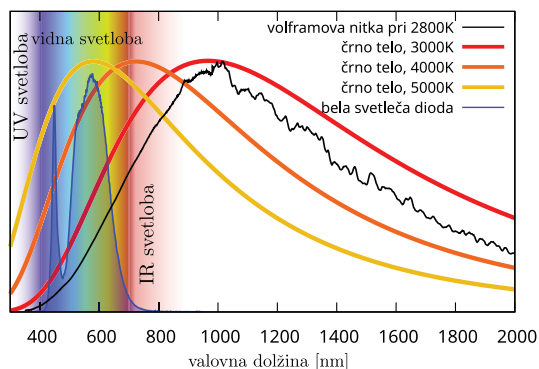
SLIKA 1.

Utrinek z olimpijade. Eksperiment se je izvajal v zatemnjeni telovadnici, da ni bilo motenj pri fotometričnih meritvah. Foto: Jan Šuntajs

meljito raziskali, zasnovati pa so morali tudi primeren postopek, ki jim je omogočal izvedbo kvantitativnih meritev. Pri svojem delu so uporabljali kombinacijo tako laboratorijskih pripomočkov, kot bolj vsakdanjih merilnih naprav. Natančneje, za izvedbo naloge so imeli na voljo nastavljeni laboratorijski napajalnik, ki lahko služi kot napetostni ali tokovni izvor, svetlomer in infrardeči termometer, spoznali pa so se tudi s fotometričnimi količinami. Posebnost eksperimentalne naloge na Evropski fizikalni olimpijadi je njena odprtost; tekmovalci so imeli na razpolago vso potrebno opremo, z vprašanji pa jim je bil podan končni cilj. Pot do rešitve, in njena dejanska izvedba, je bila pri nalogi skoraj v celoti na ramenih tekmovalca.



Avtorica stripa: Ana Marin

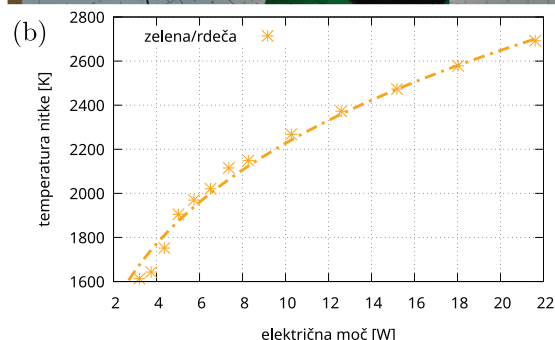
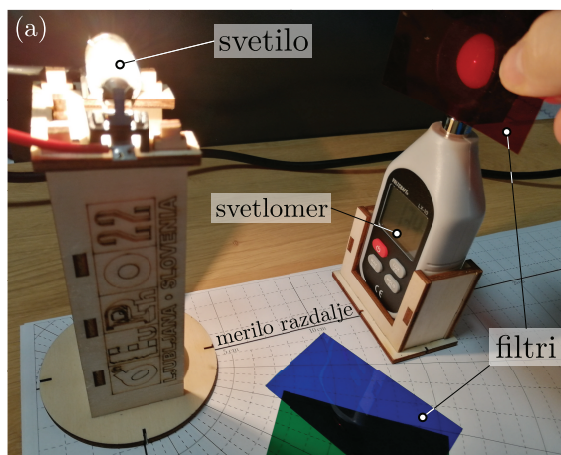


SLIKA 2.

Primerjava spektra svetleče diode (LED), spektra žarnice na volframovo nitko, in idealnih spektrov črnih teles pri treh temperaturah. Svetila, ki svetijo zaradi visoke temperature, oddajo veliko svetlobe v infrardečem območju.

Pri prvi izmed treh nalog so tekmovalci ugotavljali, kolikšno temperaturo doseže volframova žarilna nitka v avtomobilski žarnici. Žarilna nitka je prevroča in premajhna, da bi njeno temperaturo lahko direktno izmerili z infrardečim termometrom, ki je bil sicer del priložene opreme. Pot do rešitve leži v dejstvu, da žarilna nitka seva kot črno telo, njen spekter pa posledično sledi Planckovemu zakonu (glej sliko 2). Najbolj zastopana valovna dolžina se z višanjem temperature premika od rdečih in oranžnih proti modrim delom spektra, kar se odraža tudi v opaženi barvi telesa (pojav imenujemo tudi Wienov zakon). To lastnost svetlobe podajamo kot »barvno temperaturo«, ki je pogojena s temperaturo vročega svetila. Poskušajo jo oponašati tudi svetila, ki ne delujejo več na principu sevanja črnih teles, na primer varčne sijalke in LED-svetila.

Tekmovalci so temperaturo torej lahko določili na podlagi barve svetlobe. Podobno metodo uporabljajo tudi astronomi, ki temperaturo določajo iz barvnega indeksa. Slednjega smo za namen tekmovalne naloge priredili v razmerje svetlosti izmerjenih skozi dva izbrana barvna filtra. Za meritev svetlosti (natančneje, osvetljenosti v točki merilnika) so imeli tekmovalci na voljo svetlometer, ki meri osvetljenost v vidnem delu spektra, v enoti luks, ki je umerjena na človeški vid. S pomočjo priložene umeritvene tabele so tako lahko pretvorili dobljene barvne indekse v temperaturo, ki narašča z močjo žarnice tja do 2800 K (glej sliko 3).



SLIKA 3.

(a) Postavitev eksperimenta za meritev barve svetlobe. (b) Temperature nitke pri različnih električnih močeh, izračunane iz razmerja svetlosti skozi zelen in rdeč filter. Črtna črta je rezultat prilaganja podatkov Stefanovemu zakonu.

Druga naloga se je posvetila raziskovanju razlike v svetlobnem izkoristku med žarnicami na žarilno nitko in LED-sijalkami – koliko vidne svetlobe dobimo na enoto moči. Svetila na žarilno nitko veliko energije izgubijo z emisijo človeškim očem nevidne infrardeče svetlobe, ki v resnici predstavlja znaten del značilnega spektra črnega telesa. Po drugi strani LED-sijalke svoj visok izkoristek dosežejo tako, da oddajajo praktično vso svetlobo v vidnem delu spektra (slika 4). Pomembno se je torej zavedati, da s pojmom izkoristek običajno označujemo le delež energije, ki služi nekemu namenu, v našem primeru svetlobi, ki je očem zaznavna. Ker svetloba v infrardečem delu spektra povzroča le gretje, gre v tem primeru torej za izgubljeno energijo in posledično slabši izkoristek.

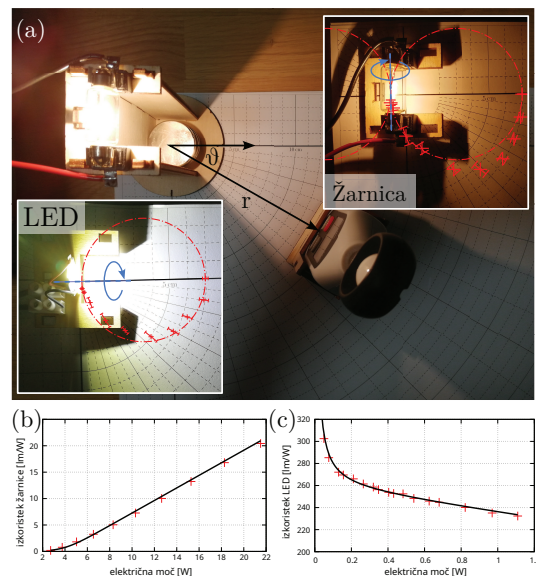




Eden izmed poudarkov naloge je bilo spoznavanje radiometričnih enot. Že omenjena enota luks, ki jo meri tudi merilnik osvetljenosti, opisuje intenziteto svetlobe; na splošno je odvisna tako od razdalje kot tudi smeri glede na svetilo. Skupno količino svetlobe, ki jo svetilo odda v vse smeri, poimenujemo tudi svetlobni tok in ga merimo v luminih (luks = lumen na kvadratni meter). Lumne iz vsakdanjega življenja poznamo kot količino, ki je zapisana na običajnih žarnicah poleg porabe električne moči v vatih. Izkoristek svetil lahko opišemo v luminih na vat – z razmerjem med izsevanim svetlobnim tokom v vidnem področju in skupno porabljenjo močjo. Sončna svetloba ima na primer izkoristek 93 lm/W. Pri električnih svetilih za porabljenjo moč običajno vzamemo kar električno moč.

Za ugotovitev izkoristka je treba torej ugotoviti skupno količino vidne svetlobe, ki jo oddaja svetilo. Ker svetila ne svetijo v vse smeri enako, so tekmovalci morali izmeriti svetlost v različnih smereh in prispevke ustrezno sešteti. Pri tem delo močno olajša dejstvo, da sta bili obe svetili namensko izbrani tako, da sta bili simetrični na rotacijo okrog ene osi. Šele z upoštevanjem te prostorske porazdelitve svetlobe je bilo mogoče dobro določiti svetlobni izkoristek. Slika 4 prikazuje eksperimentalno postavitve in dobljene izkoristke – zanimiva ugotovitev je, da se izkoristek navadne žarnice pri povečevanju moči izboljšuje, saj vedno več svetlobe odda v vidnem spektru, pri LED-svetilu pa je situacija obrnjena – pri višjih močeh je izkoristek slabši, večinoma zaradi pregrevanja svetila. Tudi v redni prodaji najdemo svetilke, ki ženejo LED-čipe s prevelikim tokom, kar negativno vpliva na izkoristek in na dolgoživost svetila.

Tretji, in hkrati tudi zadnji del naloge, je tekmovalce usmerjal v razmislek, koliko svetloba vročih teles greje okoliške površine. S tem pojavom se soočamo vsak dan, ko nam sonce segreje temna oblčila ali parkiran avto. Tekmovalci so imeli na razpolago črno ploščico, ki so ji morali določiti koeficienta toplotne prevodnosti in toplotne prestopnosti. To so dosegli z merjenjem temperature na obeh straneh osvetljene ploščice s pomočjo infrardečega termometra. Ker se toplota izgublja tako v okolico kot tudi prevaja na drugo stran ploščice, je naloga zahtevala tudi nekaj računske spretnosti za razklopitev teh dveh učinkov in uspešno izluščenje obeh iskanih količin.

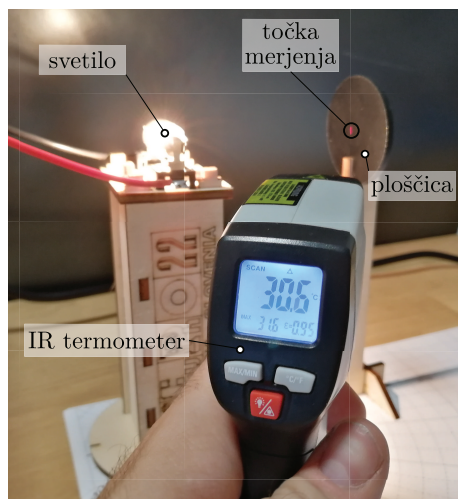


SLIKA 4.

(a) Postavitev eksperimenta za meritev kotne porazdelitve svetlobe z izmerki pod 9 koti v enem kvadrantu. LED sveti samo v pol prostora in ima simetrijo okrog pravokotnice na sredino diode, žarnica pa sveti v celoten prostor in je simetrična na rotacijo okrog prečne osi (smer žarilne nitke). Črtkana črta predstavlja poenostavljen model kotne odvisnosti, križci pa meritve z napakami. Sence, ki jih ogrodje meče na podlago, niso težava za svetlomer, ki meri na višini svetila. (b,c) Izkoristek žarnice (b) in LED (c) v odvisnosti od vhodne moči. Povečanje strmine okrog ničle pri diodi (c) je posledica netočne regulacije toka pri zelo nizkih tokovih – napajalnik oddaja nekaj toka tudi, ko prikazuje ničelni tok.

Kot smo videli že pri opisu posameznih delov tekmovalne naloge, je bil problem zastavljen zelo odprto, tako da so imeli tekmovalci popolno svobodo pri izvedbi in zasnovi poskusa. V tej obliki se odražajo moderne smernice fizikalnih nalog, ki se vedno bolj odmikajo od »sledenja receptom«. Tovrstna zasnova hkrati spodbuja znanstveni način razmišljanja in kreativnost tekmovalcev, saj je odločitev o postavitvi točne hipoteze in zasnovi primernih opazovalnih in preverjevalnih poskusov v celoti prepuščena njim samim.

Takšna oblika naloge je kakopak terjala večjo skrb, tako pri snovanju naloge, kot pripravi ocenjevalnih obrazcev. Rešitev namreč ni nujno enolična, poti do njih pa je mnogo. Tekmovalec sam je moral



SLIKA 5.

Postavitev eksperimenta za meritev temperature ploščice. Vgrajeni laser pomaga pri ciljanju sredine tarče.

izbirati primerne razdalje in merske instrumente, pri čemer je često iskal kompromis med (pre)majhnimi vplivi pri (pre)velikih razdaljah in pregrevanjem ter geometrijskimi natančnostmi pri (pre)majhnih.

Med snovanjem naloge se je za poseben izziv izkazala primerna izbira svetil, ki omogoča različne pristope do reševanja druge naloge. Avtomobilska žarnica, izbrana za meritve v drugem delu naloge, je morala zadoščati dvema pomembnima pogojema: oddajati je morala zadosten energijski tok, da je omogočala merjenje s temperaturo povezanih količin, hkrati pa je morala biti njena geometrija čim bolj preprosta in zadosti simetrična. Tovrstna posebna skrb je omogočila tekmovalcem, da so lahko z upoštevanjem cilindrične simetrije žarnice brez kompleksnih računskih prijemov in manjšim številom meritev prišli do zelo dobre analitične ocene o celotnem

izsevu svetila. No, očitno pa je, da takšnih žarnic ni preprosto dobiti. Kot anekdota: za potrebe tekmovalneja (300 žarnic in še 300 rezerv) smo pokupili toliko žarnic, da smo porabili večino evropske zaloge in posledično dvignili cene žarnice pri prodajalcih.

Poleg izkušenj z znanstveno metodo so bili pedagoški cilji naloge tudi bolj praktično usmerjeni. Preko uporabe laboratorijskih usmernikov in instrumentov so se tekmovalci navajali na delo z različno opremo. Za uspešno izvedbo tekmovalne naloge je bilo potrebno natančno upoštevanje tehničnih specifikacij naprav; neupoštevanje je lahko vodilo v okvare opreme, ki so posledično že same po sebi otežile delo tekmovalcem. Kljub jasnim opozorilom je vendar svoj prerani (in s strani sestavljalcev naloge precej nepričakovani!) konec med tekmovalcem doživelo nekaj infrardečih termometrov, ki so jih tekmovalci skušali uporabiti za kontaktno merjenje temperature razgrete žarnice. Tudi barvni filtri in črne ploščice so nekajkrat postali žrtev vročih žarnic, kar je mogoče še en pokazatelj, da je prehod na LED-razsvetljavo na splošno dobra ideja tudi s stališča varnosti. Tovrstne »zlorabe« opreme je bilo treba pri snovanju eksperimenta predvideti in zagotoviti, da tudi v primeru napačne uporabe eksperiment ni predstavljal nevarnosti za zdravje udeležencev.

Po vseh izzivih sva avtorja z nalogo bila zelo zadovoljna, prav tako so bili pozitivni tudi odzivi tekmovalcev. Verjetno gre velik del zasluge tudi izbrani tematiki – eksperimenti s svetlobo so privlačna tema, ki mlade fizike hitro zamoti za nekaj ur, čeprav je treba za to ugasniti luči.

Literatura

- [1] *6th European Physics Olympiad 2022*, dostopno na <https://www.eupho2022.si/>, ogled 16. 5. 2023.

× × ×



Avtorica stripa: Ana Marin