

1

# Fizika v šoli

2024

Letnik 29

Poštšina plačana pri pošti 1102 Ljubljana



## Vrednotenje znanja pri pouku fizike

- Primer obravnave tematskega sklopa po korakih formativnega spremljanja
- Opis pojava: Kaj mora in česa ne sme vsebovati
- Intervju s slovensko znanstvenico dr. Marušo Bradač
- Atosekundni sunki svetlobe: Nobelova nagrada za fiziko 2023



## KAZALO

Dušan Klemenčič

### Uvodnik

1

## IZ TEORIJE ZA PRAKSO

Kaja Tušar in Igor Serša

### Vloga tuljav pri slikanju z magnetno resonanco

2

Milenko Stiplovšek

### O 6. zimskem seminarju na temo vrednotenje znanja pri pouku fizike

8

## IZ PRAKSE

Milan Ambrožič in Mojca Milone

### Kotalno trenje pri valjih in kroglah

18

Lidija Grubelnik

### Primer obravnave tematskega sklopa po korakih formativnega spremljanja

25

Jure Šantej, Tjaš Esih, Alen Labohar, Mitja Suvajac

### Izstreljevanje namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa

29

## UPODOBITVE V FIZIKI

Mojca Čepič

### Opis pojava: Kaj mora in česa ne sme vsebovati

36

## ZNANOST V SVETU IN PRI NAS

Aleš Mohorič

### Atosekundni sunki svetlobe: Nobelova nagrada za fiziko 2023

39

Uredniški odbor revije Fizika v šoli

### Intervju s slovensko znanstvenico dr. Marušo Bradač

44

## UČITELJEV POGLED

Peter Prelog

### Predlog drugačnega načina razlage posebne relativnosti v srednji šoli

46

## ZANIMIVOSTI

Barbara Rovšek

### Mednarodna mladinska naravoslovna olimpijada, četrtič

51

Rasto Snoj

### Astronomsko izobraževanje sredi Atlantika

56

Petra Zelenšek

### Udeležba dijaka na taboru v Cernu

61

Vladimir Grubelnik

### Strip: Preverjanje znanja

65



PACS 01.40. -d, 01.50. -i, 01.55. +b

ISSN 1318-6388

FIZIKA V ŠOLI

letnik XXIX, številka 1, 2024

Izdajatelj in založnik:

Zavod RS za šolstvo

Predstavniki:

dr. Vinko Logaj

Odgovorni urednik:

Dušan Klemenčič

Uredniški odbor:

mag. Miroslav Cvahte, dr. Mojca Čepič, dr. Saša Dolenc,

dr. Vladimir Grubelnik, Tatjana Gulič, dr. Sonja Jejčič, dr.

Tomaž Kranjc, dr. Marko Marhl, dr. Aleš Mohorič, Špela Mrak,

Milenko Stiplovec, Alex Wirth

Jezikovni pregled:

Andraž Polončič Rupačič

Mnenja bralcev v rubriki *Učiteljev pogled* ne recenziramo in ne lektoriramo.

Prevod povzetkov:

Bumblebee, jezikovno svetovanje, Polonca Luznik, s. p.

Urednica založbe:

Andreja Nagode

Oblikovanje:

Simon Kajtna, akad. slik.

Fotografije:

avtorji člankov

Računalniški prelom:

Cicero, d. o. o.

Tisk:

Present, d. o. o.

Naklada: 380 izvodov

Prispevke pošljite na naslov: Zavod RS za šolstvo,

Uredništvo revije Fizika v šoli, Poljanska c. 28,

1000 Ljubljana, e-naslov: revija.fizika@zrss.si.

Naročila: Zavod RS za šolstvo – Založba,

Poljanska c. 28, 1000 Ljubljana, faks: 01/30 05 199,

e-naslov: zalozba@zrss.si

Letna naročnina (2 številki): 22,00 € za šole in ustanove,

16,50 € za fizične osebe, 8,50 € za študente, dijake

in upokoјence. Cena posamezne številke v prosti prodaji je 13,00 €.

Revija je vpisana v razvid medijev, ki ga vodi

Ministrstvo za kulturo pod zaporedno številko 570.



Priznanje avtorstva-Nekomercialno-Brez predelav

Poština plačana pri pošti 1102 Ljubljana.

## Spoštovane bralke in spoštovani bralci.

Letošnja prva številka revije Fizika v šoli spada že v 29. letnik revije. Namenjena je vsem ljubiteljem fizike in učiteljem, ki vsak dan navdušujete nove generacije mladih fizikov in ljubiteljev narave.

In kot je že v navadi, v reviji pričenjamo z rubriko »Iz teorije za prakso«. Da je fizika temeljna veda in prisotna v praktično vseh dejavnostih človeka, dokazuje že prvi članek, ki opisuje uporabo fizike v medicini, in sicer na področju diagnostične radiologije. Avtorja v članku orišeta fizikalno teorijo magnetnoresonančnega slikanja in ga prikažeta kot lep primer vpliva kvantnega sveta na naš makroskopski svet, dotakneta pa se tudi uporabe nestandardnih tuljav. Te tuljave so trenutno še v fazi predklinične uporabe, jih pa lahko kmalu pričakujemo tudi v klinični rabi in bodo omogočale izdelavo visokokakovostnih magnetnoresonančnih slik z dobrim kontrastom. Vodilna tema letošnjega letnika revije je vrednotenje znanja pri pouku fizike. Predstavljamo teoretična izhodišča za vrednotenje znanja. V naslednji številki bodo tem teoretičnim izhodiščem o vrednotenju znanja sledili članki iz prakse.

V rubriki »Iz prakse« objavljamo dva članka iz osnovnošolske in enega iz srednješolske prakse. V prvem članku avtorja predstavitava raziskovalno nalogo treh devetošolcev, ki je na državnem tekmovanju mladih raziskovalcev osvojila zlato priznanje. V drugem članku izkušena učiteljica predstavlja obravnavo tematskega sklopa po korakih formativnega spremljanja, in sicer na temo toplote in notranje energije. V zadnjem članku v tej rubriki avtorji predstavijo letošnji fizikalni problem na Turnirju mladih fizikov, v katerem podrobno fizikalno opišejo posamezne faze leta namiznoteniške žogice, izstreljene s pomočjo vodnega topa, eksperimentalno opremo in analizo eksperimenta z računalniškim programom Tracker.

Avtorica se v rubriki »Upodobitve v fiziki« osredotoča na to, kaj mora in česa ne sme vsebovati opis pojava.

Rubriko »Znanost v svetu in pri nas« tokrat sestavljata kar dva članka. Poleg zdaj že ustaljenega članka s predstavitvijo znanstvenice objavljamo še članek o Nobelovi nagradi za fiziko za leto 2023, ki so jo prejeli trije fiziki za razvoj eksperimentalnih metod ustvarjanja atosekundnih sunkov svetlobe za proučevanje dinamike elektronov v snovi. Članek s predstavitvijo slovenske znanstvenice je tokrat posvečen naši mednarodno uveljavljeni redni profesorici na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dr. Maruši Bradač.

Jednat predlog drugačnega načina razlage posebne relativnosti v srednji šoli pa nam je predstavil zdaj že stalni avtor člankov v rubriki »Učiteljev pogled«. Teh člankov v želji po ohranjanju izvirnega mnenja avtorjev ne recenziramo in ne lektoriramo.

Udeležbe naših učencev, dijaka in učitelja na različnih mednarodnih dogodkih smo zbrali v rubriki »Zanimivosti«. V prvem članku avtorica opisuje izjemen uspeh naših učencev na Mednarodni mladinski naravoslovni olimpijadi in njihovo pot do tega uspeha. V naslednjem članku avtor opisuje svojo udeležbo na Mednarodni poletni šoli za učitelje, ki je na temo astronomije potekala kar sredi Atlantika. V zadnjem članku rubrike avtorica opisuje udeležbo dijaka na mednarodnem taboru v Cernu.

Vabimo vas, da s svojim prispevkom delite svoje izkušnje in mnenja v eni od prihodnjih števil revije, saj tako prispevate k razvoju kakovostnega poučevanja fizike v osnovni in srednji šoli ter poskrbite, da vaš zapis postane trajen **spomin**.

Dušan Klemenčič, odgovorni urednik

# Vloga tuljav pri slikanju z magnetno resonanco

Kaja Tušar

Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana

dr. Igor Serša

Institut Jožef Stefan



RF sonda za MR slikanje

## Izvleček

Magnetnoresonančno slikanje (MRI) je ena od standardnih neinvazivnih radioloških preiskav, ki jo uporabljajo zdravniki po vsem svetu. Za razumevanje delovanja te slikovne tehnike potrebujemo razumevanje jedrske magnetne resonance. Ta pojav je lep primer vpliva kvantnega sveta na naš makroskopski svet. Da lahko razložimo, kako dobimo sliko človeške notranjosti, potrebujemo tudi razumevanje Fourierjeve transformacije in vloge različnih vrst tuljav pri slikanju z magnetno resonanco.

**Ključne besede:** magnetnoresonančno slikanje, medicinska fizika, magnetno polje, tuljava, Fourierjeva transformacija

## Coils in Magnetic Resonance Imaging

### Abstract

Magnetic resonance imaging (MRI) is a standard noninvasive examination used worldwide by physicians. However, we must understand the nuclear magnetic resonance phenomenon to understand how this imaging technique works. Nuclear magnetic resonance is a perfect example of the influence of the quantum world on our macroscopic world. To fully explain how we get an image of the human interior, we must also understand the Fourier transform and the role of various coils in MRI.

**Keywords:** magnetic resonance imaging, medical physics, magnetic field, coil, Fourier transform.

## Jedrska magnetna resonanca

Jedrska magnetna resonanca (NMR) je pojav, ko atomska jedra z jedrskim spinom absorbirajo ali oddajajo elektromagnetno sevanje z določeno frekvenco.

Jedrski spin je lastnost nekaterih atomskih jeder. Njegovo ime izhaja iz angleške besede za vrtenje. Spin je enak produktu spinskega števila in reducirane Planckove konstante. Spinsko število jedra je odvisno od njegovega vrstnega števila, torej števila protonov v jedru in masnega števila oziroma števila nevtronov v jedru. Če je število tako protonov kot nevtronov liho, je spinsko število celo število. Če je vsota števila protonov in nevtronov liho število, pa je vrednost spinskega števila necelo število, sestavljeno iz polovic. V teh dveh primerih lahko atomska jedra uporabljamo za magnetno resonanco. Za primer lahko vzamemo vodikovo jedro, ki je pomembno za slikanje z magnetno resonanco. Sestavljeno je iz enega protona, torej ima spinsko število enako eni polovici. Če je število tako protonov kot nevtronov sodo, je spinsko število enak nič. Takšnih jeder ne moremo uporabljati

ti za jedrsko magnetno resonanco. Posledica jedrskega spina je dipolni magnetni moment jeder. Dipolni magnetni moment jedra  $\mu$  je proporcionalen njegovi vrtilni količini oziroma spinu  $\Gamma$ . Proporcionalna konstanta se imenuje giromagnetno razmerje  $\gamma$ :

$$\mu = \gamma \Gamma. \quad (1)$$

Elektromagnetno valovanje, ki je v večini primerov v radiofrekvenčnem območju in ga zato imenujemo radiofrekvenčno (RF) valovanje, lahko izmakne magnetni dipolni moment jedra iz ravnovesne lege. To povzroči, da jedro začne precesirati okoli osi magnetnega polja. To gibanje lahko opišemo klasično, brez uporabe kvantne mehanike. Obravnavamo povprečno jedro, ki mu pripada magnetni dipolni moment  $\mu$ , kar si lahko predstavljamo kot majhen magnet. Zunanje magnetno polje povzroča navor:

$$\mathbf{M}_{\text{jedro}} = \mu \times \mathbf{B}. \quad (2)$$

Navor povzroča tudi spremembo vrtilne količine:

$$d\mathbf{I} = \mathbf{M}_{\text{jedro}} dt. \quad (3)$$

Kombinacija enačb (1), (2) in (3) nam da enačbo gibanja spina nekega povprečnega jedra v magnetnem polju:

$$\frac{d\boldsymbol{\mu}}{dt} = \gamma \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}. \quad (4)$$

Če usmerimo os  $z$  opazovalnega sistema v smeri statičnega magnetnega polja, je  $B = B_0 \mathbf{e}_z$  in rešitev zgornje enačbe je precesija jedra okoli osi  $z$  s frekvenco

$$\omega_0 = \gamma B_0. \quad (5)$$

To frekvenco imenujemo tudi Larmorjeva frekvenca. Giromagnetno razmerje vodikovih jeder je  $(42,58 \times 2\pi)$  MHz/T. Na primer, če je zunanje statično magnetno polje enako  $B_0 = 2,35$  T, potem je Larmorjeva frekvenca vodikovega jedra enaka  $(100 \times 2\pi)$  MHz. Zaradi običajno velikega števila opazovanih jeder lahko množico povprečnih jeder nadomestimo z vektorjem jedrske magnetizacije:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{V} \sum_i \boldsymbol{\mu}_i \quad (6)$$

Zaradi sorazmernosti med povprečnim jedrom in jedrsko magnetizacijo velja tudi:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}. \quad (7)$$

Če vklopimo za čas  $t$  magnetno polje, ki je pravokotno na statično magnetno polje  $B_0$  in se vrti s frekvenco  $\omega_0$  okoli osi vzporedne  $B_0$ , potem se bo magnetizacija nagnila od svoje začetne smeri za kot  $\varphi$ , ki je sorazmeren gostoti tega vrtečega se polja in času  $t$ . To vrteče se magnetno polje imenujemo tudi radiofrekvenčni (RF) sunek. Po vzbuditvi magnetizacije z RF sunkom se magnetizacija čez čas vrne v ravnovesno smer. Pri tem procesu ločimo proces vračanja komponente magnetizacije v smeri  $B_0$  v ravnovesno vrednost od drugega procesa, pri katerem komponenta magnetizacije v smeri pravokotno na  $B_0$  postopno izgine. Prvi proces se imenuje spinsko-mrežna relaksacija in ga opisuje enačba:

$$M_z(t) = M_z(0) \exp(-t/T_1) + M_0[1 - \exp(-t/T_1)]. \quad (8)$$

Tu je  $M_0$  amplituda ravnovesne magnetizacije v smeri osi  $z$ , ki se vzpostavi v statičnem magnetnem polju  $B_0$ . Drugi proces se imenuje spinsko-spinska relaksacija in ga opisuje enačba:

$$M_{x,y}(t) = M_{x,y}(0) \exp(-t/T_2). \quad (9)$$

Tu sta  $T_1$  in  $T_2$  karakteristična časa obeh procesov, to je spinsko-mrežni ( $T_1$ ) in spinsko-spinski ( $T_2$ ) čas NMR relaksacije.

V običajnem NMR poskusu vzorec vstavimo v RF sondo, to pa potem namestimo v osnovno tuljavo, ki ustvarja zunanje statično magnetno polje  $B_0$  v smeri osi  $z$ . RF sonda je sestavljena iz RF tuljave, ki proizvaja RF magnetno polje v pravokotni smeri na statično magnetno polje. Isto tuljavo lahko uporabimo tudi za detekcijo NMR signala. Osnovna tuljava je superprevodna tuljava, ki ustvarja homogeno statično magnetno polje. Narejena je iz materialov, ki pri dovolj nizkih temperaturah dosežejo superprevodnost, to pomeni, da je njihov električni upor nič, torej električni tok teče po žicah tuljave brez izgub.

Največja magnetizacija v transverzalni ravnini se doseže, ko je magnetizacija nagnjena za  $90^\circ$  od smeri statičnega magnetnega polja. Precesija jedrske magnetizacije v vzorcu inducira električno napetost v RF tuljavi. Zajeti signal niha in eksponentno pada s časom. Ta NMR signal se imenuje signal proste precesije:

$$S(t) = A \exp(-t/T_2) \sin(\omega_0 t - \omega t). \quad (10)$$

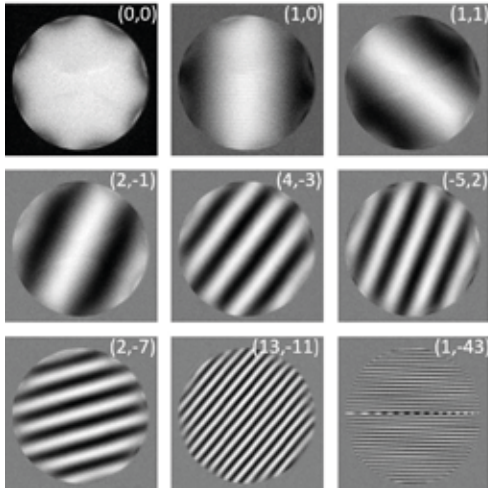
Larmorjeva frekvenca vzorca je  $\omega_0$ . Frekvenco detekcije  $\omega$  spreminjamo. Ko je frekvenca detekcije enaka Larmorjevi frekvenci, je signal proste precesije enak 0. NMR signal  $S(t)$  je torej vsota oziroma integral vseh frekvenčnih komponent, vseh različnih vrednosti frekvence detekcije  $\omega$ , njihova porazdelitev je predstavljena s spektrom  $I(\omega)$ . NMR spekter je prikaz intenzitet v odvisnosti od frekvence absorpcije in emisije RF valovanja. Ta spekter se izračuna s Fourierjevo transformacijo signala:

$$I(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (11)$$

## Slikanje z magnetno resonanco

Pod posebnimi eksperimentalnimi pogoji je lahko NMR spekter povezan s sliko vzorca, ki ustreza porazdelitvi dipolnih magnetnih momentov merjenih jeder. Magnetnoresonančno (MR) sliko dobimo s spreminjanjem resonančne frekvence jeder po prostoru z uporabo dodatnega magnetnega polja vzdolž smeri statičnega zunanjega magnetnega polja  $B_0$ . Dodatno magnetno polje zapiše lokacijo jeder v frekvenco NMR signala, kar pomeni, kot bo razloženo v nadaljevanju, da lahko informacijo o legi jeder ugotovimo iz frekvence. Pri slikanju z magnetno resonanco to dodatno magnetno polje linearno narašča, ko se premikamo vzdolž smeri osi  $z$ . To pomeni, da je gradient, torej vektor, ki nam pove, v kateri smeri se magnetno polje najbolj spreminja, konstanten. Zato se tudi tuljave, ki proizvajajo to magnetno polje, imenujejo gradientne tuljave. V prisotnosti gradientnega magnetnega polja ima Larmorjeva frekvenca prostorsko odvisnost:

$$\omega(\mathbf{r}) = \gamma B_0 + \gamma \mathbf{G} \cdot \mathbf{r}. \quad (12)$$



**Slika 1:** MR slike diskretnih točk v  $k$ -prostoru, zapisanih zgoraj desno, kot jih vidimo v realnem prostoru. To je samo nekaj primerov baznih slik [1].

Vektor  $G$  je gradient samo dela magnetnega polja  $B_0$ , ki kaže v smeri osi  $z$ . Vektor  $r$  kaže do točke, iz katere izvira NMR signal. Če seštejemo signal iz celotne prostornine vzorca, ki ga želimo slikati, dobimo naslednji izraz:

$$S(G, t) = \iiint \rho(r) \exp(i\gamma(B_0 + G \cdot r)t) dr. \quad (13)$$

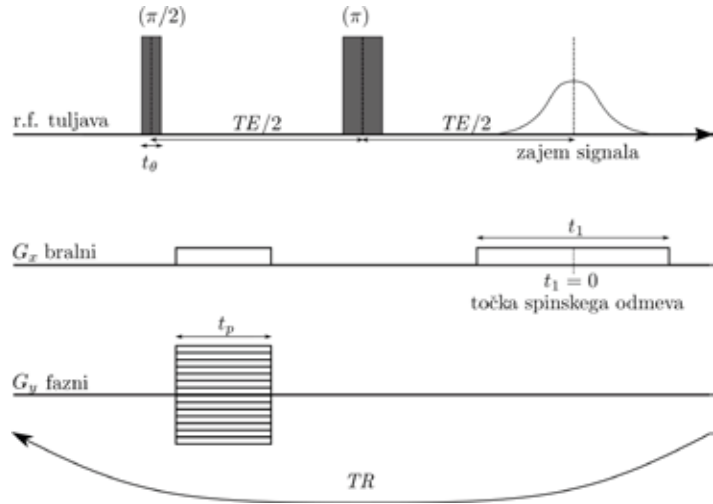
Z  $\rho(r)$  označimo številsko gostoto opazovanih jeder. Zgornjo enačbo bomo v nadaljevanju zapisali tako, da vpeljemo recipročni prostor prostorskim koordinatam,  $k$ -prostor. Da malo poenostavimo razlago, si pogledjmo, kako naredimo MR sliko v dveh dimenzijah  $x$  in  $y$ . Temu bi lahko tudi rekli, da si bomo pogledali, kako naredimo eno rezino. V dveh dimenzijah so komponente  $k$ -prostora  $k_x = \gamma G_x t$  in  $k_y = \gamma G_y t$ . MR signal lahko torej v dveh dimenzijah zapišemo na naslednji način:

$$S(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} \rho(x, y) \exp(i(k_x x + k_y y)) dx dy. \quad (14)$$

V dobljeni enačbi lahko prepoznamo inverzno Fourierovo transformacijo gostote jeder. Gostota jeder, kar je v resnici naša MR slika, je enaka Fourierovi preslikavi zajetega signala v  $k$ -prostoru:

$$\rho(x, y) = \frac{1}{2\pi} \iint_{-\infty}^{\infty} S(k_x, k_y) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dk_x dk_y. \quad (15)$$

Slika 1 kaže princip Fourierovega MR slikanja. Vsaka MR slika je sestavljena iz takšnih slik, ki skupaj tvorijo bazo. Bazne slike se seštevajo z utežmi, ki ustrezajo izmerjenim signalom. Bazne slike so prikazane s celošteviličnimi indeksi, ki ustrezajo pripadajočim  $k$ -koordinatam. Kot kaže ta slika, so vse bazne slike sinusne funkcije različnih prostorskih frekvenc in prostorskih smeri valovnih front. Bazna slika brez valov (z indeksom (0, 0)) pripada središču  $k$ -prostora, medtem ko imajo bazne slike, ki so bolj oddaljene od središča  $k$ -prostora, višjo gostoto valovnih front.



**Slika 2:** Prikazana je shema zaporedja sunkov za dvodimenzionalno MR slikanje z metodo spinskega odmeva [1].

Slika 2 kaže MRI zaporedje sunkov, ki se uporablja za dvodimenzionalno Fourierovo slikanje. MRI zaporedje je vhodni program za računalnik, ki nato to zaporedje posreduje MRI spektrometru, ki poskrbi za generiranje in zajemanje analognih RF signalov. Pridobljeni zajeti RF signal se nato digitalizira in pošlje nazaj v računalnik, ki izvede rekonstrukcijo MR slike.

Zgornja vrstica zaporedja kaže časovni niz dogodkov (sunkov), ki se prenašajo v oziroma iz RF tuljave. Prvi je oddan RF sunek, ki spremeni orientacijo jedrske magnetizacije za  $90^\circ$ . Nato se vklopijo fazni gradient in bralni gradient za čas  $t_p$ . Med tem časom prečna magnetizacija (v smeri, pravokotni na zunanje statično magnetno polje) začne izginjati na račun razpršitve vektorjev magnetizacije skupin jeder v ravnini XY v pahljačo in signal iz vzorca se posledično zmanjšuje. Ta proces se nadaljuje v manjšem obsegu tudi po tem, ko so gradienti izklopljeni. Razlog za to je nehomogenost zunanjega statičnega magnetnega polja. Vendar pa se magnetizacija lahko v precejšni meri povrne, vsaj za del, ki izvira iz nehomogenosti statičnega magnetnega polja, z uporabo dodatnega RF sunka. Ta sunek spremeni predznak faze magnetizacije. Zato faza magnetizacije, ki se je nakopičila v obdobju  $TE/2$  (med obema RF sunkoma), po drugem RF sunku spremeni predznak in nato v naslednjem intervalu  $TE/2$  (med RF sunkom in zajemom signala) spet za enak del spremeni kot v prejšnjem  $TE/2$  intervalu, tako da je pri času  $TE$  enaka 0. To fazno poenotenje se kaže z močnim povečanjem signala ob času  $TE$ . Ta pojav je zato znan kot spinski odmev in časovni interval  $TE$  kot čas spinskega odmeva. V zaporedju za slikanje s spinskim odmevom je sredina okna zajemanja signala poravnana s točko spinskega odmeva. Hkrati z zajemanjem signala se vklopi tudi bralni gradient. Pomembno je, da je produkt časa in amplitude vklopa tega gradienta v

prvem intervalu  $TE/2$  enak produktu časa in amplitude vklopa tega gradienta v drugem intervalu  $TE/2$  (v središču zajemanja signala).

To zaporedje se nato ponovi za vse vrstice zajemanja signala za MR sliko. Pri tem se vsaka vrstica ponovi z enakimi sunki bralnega gradienta, vendar z različnimi jakostmi sunkov faznega gradienta. Te se začnejo pri najbolj negativni vrednosti in nato enakomerno povečujejo v  $N$  korakih do nasprotno enake največje pozitivne vrednosti. Ko je ves signal slike zajet, se ta transformira z dvo- ali večdimenzionalno Fourierovo transformacijo za rekonstrukcijo MR slike. Transformacija se običajno izvede z algoritmom hitre Fourierove transformacije, ki je dobro optimiziran za izračun diskretne Fourierove transformacije. Pri uporabi standardne MRI opreme, kjer gradientne tuljave proizvajajo magnetna polja, ki imajo linearno prostorsko odvisnost in konstantne gradiente, je rezultat slikanja dvodimenzionalna MR slika vzorca. MR slika ustreza gostoti merjenega atomskega jedra v vzorcu [1].

### Osnovna tuljava

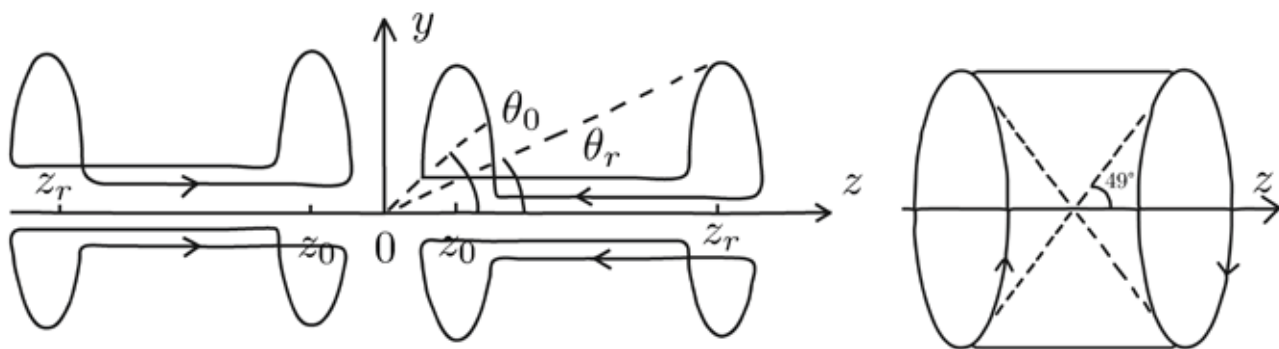
Osnovna tuljava ustvarja zunanje statično magnetno polje  $B_0$  v smeri osi  $z$ . Slika 4 kaže takšno tuljavo. Na sliki je magnet z gostoto magnetnega polja 2,35 T. Tako visoko gostoto magnetnega polja lahko dosežemo z uporabo superprevodne tuljave, to pomeni, da električni tok teče po žici, ki ima električni upor enak nič. Da žica, ki je po navadi zlitina niobija in titana, doseže to lastnost, jo je treba ohladiti na temperaturo le nekaj kelvinov. To dosežemo tako, da jo potopimo v rezervoar tekočega helija. Rezervoar tekočega helija je obdan z rezervoarjem tekočega dušika, kar zmanjša temperaturno razliko med zunanostjo in superprevodno tuljavo in tako zmanjša toplotne izgube in porabo dragocenega helija. Ker je električni upor v žici enak nič, tok, ki teče po žici, nima izgub in ne potrebuje zunanega napajanja. Gostota magnetnega polja torej ostane enaka, tudi če zmanjka elektrike. Spremeni se samo, če žica izgubi lastnost superprevodnosti, kar lahko dosežemo s segrevanjem žice.



**Slika 3:** Primer superprevodnega magneta za slikanje z magnetno resonanco v raziskovalne namene, ki se nahaja na Institutu Jožef Stefan v laboratoriju za MR slikanje.



**Slika 4:** Primer oddajno-sprejemne RF tuljave, instalirane v RF sondo, ki se uporablja na Institutu Jožef Stefan v laboratoriju za MR slikanje.



**Slika 5:** Na sliki vidimo Golajevo tuljavo (levo) in Maxwellovo tuljavo (desno) [2].

Tako lahko povzročimo hitro porušitev superprevodnega stanja, ki ga spremlja tudi glasen pok [1].

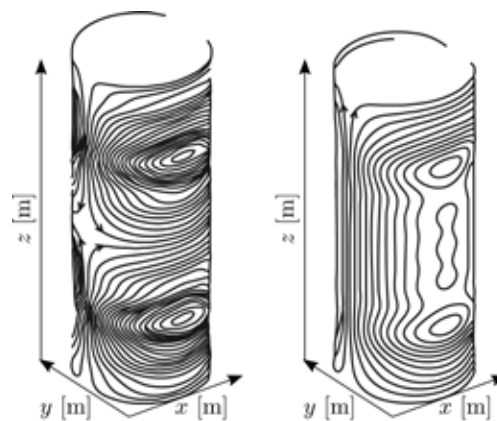
### Radiofrekvenčna tuljava

RF tuljava proizvaja RF magnetno polje v pravokotni smeri na statično magnetno polje  $B_0$ . Isto tuljavo lahko uporabimo tudi za detekcijo NMR signala. Slika 4 kaže primer takšne RF tuljave, ki lahko tako oddaja RF sunke kot sprejema signal v RF območju. Tuljava na sliki se uporablja za MR mikroskopijo in ima premer 2,5 cm, kar pomeni, da je to velikost največjega vzorca, ki ga lahko slikamo s to tuljavo [1].

### Gradientna tuljava

V običajnem MRI se morajo magnetna polja, ki jih proizvajajo gradientne tuljave, linearno spreminjati s krajem po prostoru v čim večjem volumnu. Gradienti takšnih magnetnih polj so zato konstantni. Takšno magnetno polje je potrebno za izvedbo znanega in nadzorovanega premikanja resonančnih frekvenc in brezhibno rekonstrukcijo slike z uporabo Fourierove transformacije ter za uspešno izvedeno MR slikanje.

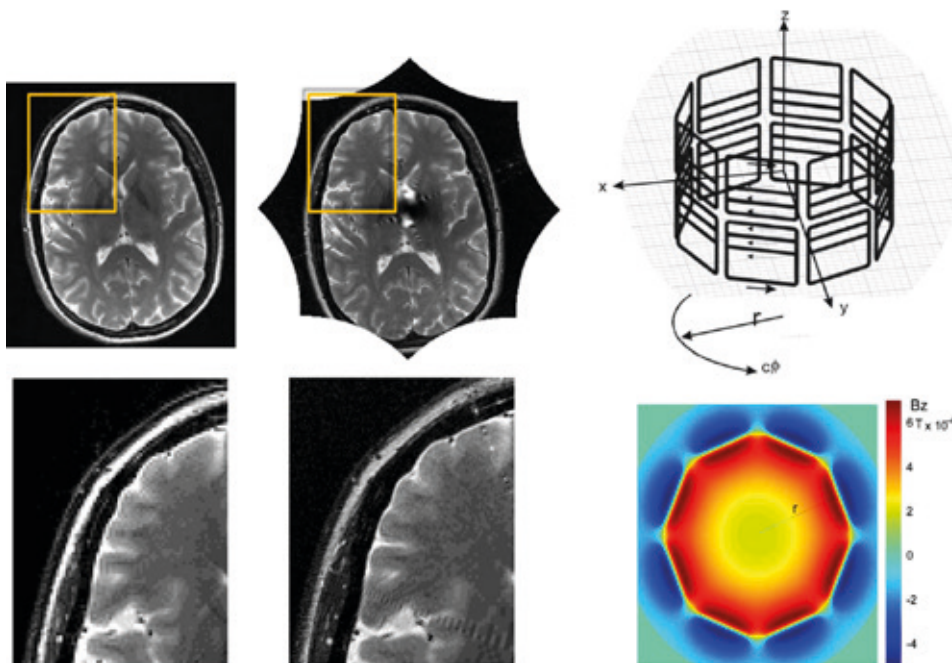
Osnovna oblika tuljave, ki proizvaja magnetno polje linearno vzdolž osi  $z$ , se imenuje Maxwellova tuljava (Slika 5). Sestavljena je iz dveh krožnih zank žice s polmerom  $a$ , med seboj ločenih z razdaljo  $\sqrt{3}a$ . V tuljavah, prikazanih na slikah, se magnetno polje linearno spreminja le na relativno majhnem območju v središču tuljave. Standardna tuljava, ki proizvaja konstantna gradientna polja v smeri  $x$  ali  $y$ , se imenuje Golayeva tuljava (Slika 5). Sestavljena je iz osmih odsekov žice, ki so vzporedni s statičnim magnetnim poljem, zato ne vplivajo na



Slika 6: Na sliki vidimo gradientne tuljave, navite v vzorec, ki spominja na prstne odtise [2].

gradient v smeri  $x$  – štirih notranjih lokov, ki proizvajajo konstantni gradient, in štirih zunanjih lokov, ki so tam samo za zaključek zanke in so dovolj oddaljeni, da magnetno polje, ki ga proizvajajo, ne vpliva opazno na slikani vzorec.

Geometrija tuljav se je med razvojem MRI razvila od preprostih diskretnih žic v postavljenih zankah do naprednih konstrukcij zapletenih vzorcev, vendar je linearost magnetnega polja še vedno najpomembnejši vidik. Vsaka MRI naprava, izdelana danes, tako za diagnostične kot tudi za znanstvene namene, bo imela gradientne tuljave v bolj zapletenih vzorcih, da bi povečala prostornino, ki se lahko uporablja za slikanje znotraj tuljave. Tuljave običajno niso izdelane iz diskretnih žic, temveč so vgrajevane v velike uniformne kovinske cilindre, ki omogočajo enakomernjšo porazdelitev električnega toka v zankah. Običajno uporabljen vzorec je podoben prstnim odtisom (Slika 6).



Slika 7: Na sliki vidimo primerjavo med sliko glave, zajeto s standardnimi gradientnimi tuljavami (levo), in sliko, zajeto s tuljavami z nelinearnim magnetnim poljem (srednji stolpec). Desno zgoraj je shema, ki prikazuje geometrijo uporabljenih gradientnih tuljav. Desno spodaj je simulacija, ki prikazuje projekcijo komponente magnetnega polja na statično magnetno polje. Kot lahko vidimo na sliki, prostorska odvisnost ni linearna [5].

Standardne gradientne tuljave z vzorcem, ki spominja na prstne odtise, imajo tudi slabosti. Običajno imajo veliko ovojev in posledično visoko induktivnost. To omejuje hitrost, s katero se gradient lahko vklopi in izklopi, kar podaljša tudi čas zajema signala. Poleg tega lahko gradientne tuljave proizvedejo veliko hrupa, ki izvira iz Lorentzeve sile. Gradientne tuljave niso superprevodne, saj bi to bilo tehnološko zelo težko izdelati, zato oddajajo tudi toploto, kar lahko vpliva na vzorec, ki ga slikamo. Zato je treba te tuljave običajno hladiti z vodo. Hitre spremembe magnetnih tokov okoli tuljav lahko povzročijo vrtnice v magnetnem polju, ki so lahko vir popačenja slik. Zato morajo biti vsi prevodni deli zunaj gradientne tuljave zaščiteni pred neposrednim vplivom tuljave, ki proizvaja gradientno polje. Zaščita se izvaja z ločeno zaščitno tuljavo [2].

### Nestandardne geometrije gradientnih tuljav

Kodiranje v MRI opisuje način, kako se amplituda in faza jedrskega magnetnega momenta zabeležita v signalu. Nekonvencionalna kodiranja lahko dobimo z uporabo nestandardnih RF sunkov ali z uporabo nekonvencionalne geometrije kodirnih tuljav. Kodiranje se lahko izvede pred ali med RF vzbuditvijo ali celo med ponovnim usmerjanjem magnetizacije.

MR slikanje, ki se izvaja z gradientnimi tuljavami, ki proizvajajo magnetno polje z nelinearno prostorsko odvisnostjo, je veja te slikovne metode, ki še ni v klinični uporabi. Takšne tuljave je lažje izdelati in jih je mogoče optimizirati za različne parametre, kot je znižanje induktivnosti ali zmanjšanje hrupa. Rekonstrukcija MR slik, proizvedenih s takšnimi kodirnimi tuljavami z uporabo Fourierjeve transformacije, v sliko vnese popačenja. Razumevanje vzrokov za ta popačenja, torej za njihovo matematično odvisnost, tudi omogoča njihovo odstra-

nitev. Končna rekonstruirana MR slika je nato geometrično pravilna, vendar ima spremenljivo ločljivost slike. Slika 7 kaže rekonstruirano MR sliko, kjer je ločljivost na povrhnjici možganov večja kot pri sliki, zajeti na standardnem MR tomografu, medtem ko je v središču možganov ločljivost slike slabša kot na standardnem sistemu.

Nobeno od predlaganih zaporedij za MR slikanje z uporabo gradientnih tuljav z magnetnim poljem z nelinearno prostorsko odvisnostjo ni trenutno v klinični uporabi, vendar so dosedanja rezultati zelo obetavni. Nekonvencionalne gradientne tuljave se lahko uporabljajo v kombinaciji z večkanalnimi RF tuljavami, kar omogoča izdelavo visokokakovostnih MR slik z dobrim kontrastom [3] [4] [5].

### Zaključek

V prispevku smo orisali fizikalno teorijo, na kateri temelji osnovno magnetnoresonančno slikanje (MRI). MRI je neinvazivna slikovna diagnostična metoda, ki jo uporabljamo že več kot 30 let. Za razumevanje delovanja je potrebno poznavanje pojava jedrske magnetne resonance, elektromagnetnih polj, teorije obdelave signalov in matematično poznavanje Fourierjeve in njej sorodnih transformacij. V prispevku smo predstavili osnove jedrske magnetne resonance, vzbujanja signala magnetne resonance in jedrske relaksacije. Opisali smo osnovno sunkovno zaporedje in razložili, kako lahko iz spektra dobimo prostorsko informacijo o položaju atomskih jeder in iz tega nato sliko človeške notranjosti, vse to brez uporabe ionizirajočega sevanja. Na koncu smo še malo več povedali o tuljavah, ki se uporabljajo za prostorsko kodiranje signala, in opisali nestandardne tuljave, ki so za zdaj še vedno v fazi predklinične uporabe, a bo ta lahko kmalu prešla tudi v klinično uporabo.

### Viri

- [1] Callaghan, P. T. (1993). Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy. Oxford: Clarendon Press.
- [2] Hidalgo-Tobon, S. S. (2010). Theory of Gradient Coil Design Methods for Magnetic Resonance Imaging. Concepts in Magnetic Resonance Part A, 4(36A), 223–242.
- [3] Patz, S., Hrovat, M. I., Pulyer, Y. M. in Rybicki, F. J. (1999). Novel encoding technology for ultra-fast MRI in a limited spatial region. International Journal of Imaging Systems and Technology, 10, 216–224.
- [4] Stockmann, J. P., Ciris, P. A., Galiana, G., Tam L. in Constable, R. T. (2010). O-space imaging: Highly efficient parallel imaging using second-order nonlinear fields as encoding gradients with no phase encoding. Magnetic Resonance in Medicine, 64, 447–456.
- [5] Schultz, G. (2013). Magnetic resonance imaging with nonlinear gradient fields Signal encoding and image reconstruction. Freiburg: Springer Spektrum.

# O 6. zimskem seminarju na temo vrednotenja znanja pri pouku fizike

Milenko Stiplovšek

upokojeni svetovalec za fiziko na Zavodu RS za šolstvo

## Izvelek

V članku so predstavljene nekatere vsebine in aktivnosti s 6. zimskega seminarja za učitelje fizike na temo vrednotenja znanja pri pouku fizike, ki je bil izveden na daljavo s pomočjo videokonferenčnega srečanja in sodelovanja v spletni učilnici. Svetovalci smo predstavili svoje izkušnje z ocenjevanjem znanja, ki vključuje eksperimentalno delo. Obravnavana je priprava pisnih preizkusov znanja in podanih je nekaj teoretičnih osnov na temo vrednotenja znanja ter različnih stopenj zahtevnosti ciljev.

**Ključne besede:** fizika, ocenjevanje, eksperimentalno delo, mrežni diagram

## 6th Winter Seminar on Assessment in Physics

### Abstract

This article introduces some of the content and activities of the 6th Winter Seminar for Physics Teachers, conducted via distance learning, videoconference, and online classroom collaboration. The topic was the assessment in physics. The consultants present their experience with knowledge assessment involving experimental work. We discuss the preparation of written examinations and provide theoretical background on assessment and the different levels of complexity of the objectives.

**Keywords:** physics, assessment, experimental work, network diagram.

### Uvod

Vodilna tema letošnjega letnika revije *Fizika v šoli* je vrednotenje znanja. Ocenjevanje znanja je po mojem mnenju najbolj izpostavljeno in občutljivo področje dela učiteljev in tudi zelo zahtevno. Velika večina prijav nezadovoljstva z delom učiteljev šolski inšpekciji, s katerimi sem se ukvarjal kot svetovalec v Predmetni skupini za fiziko na ZRSŠ, se je nanašala na ocenjevanje znanja. Tudi kot učitelj fizike sem bil največkrat zaprosen za pojasnila prav glede ocenjevanja znanja. Med izpostavljenimi dilemami, ki so jih učitelji predstavljali svetovalcem v Predmetni skupini za fiziko in pri katerih so želeli pomoč pri svojem delu, je prevladovala tema ocenjevanja znanja. Zato verjamem, da je smiselno o ocenjevanju znanja temeljito razmisliti in si vzpostaviti sistem, ki nam je logičen in sprejemljiv, biti pa mora seveda tudi strokovno korekten ter učinkovito izvajen. Svoj izdelani sistem je smiselno objektivno spremljati in analizirati ter ga (previdno in utemeljeno) spreminjati z namenom izboljševanja. Dobro je, če ga ustrezno predstavimo in utemeljimo tudi učencem.

Obravnavi te pomembne teme je bil namenjen 6. zimski seminar za učitelje fizike, ki je potekal januarja in februarja 2021, v času pandemije kovid 19, in je bil izveden na daljavo – videokonferenčno in s sodelovanjem v spletnih učilnicah.

### Terminologija

#### V knjigi Psihologija učenja in pouka

Barica Marentič Požarnik v svoji knjigi *Psihologija učenja in pouka* navaja:

**Vrednotenje ali evalvacija** pomeni sistematično zbiranje podatkov o kakovosti nekega procesa ali produkta, običajno z namenom, da sprejmemo odločitve, ki vodijo k njegovemu izboljšanju. [...] Osredotočili se bomo na **vrednotenje znanja** oz. učnih rezultatov in podrobneje opisali zlasti psihološke vidike, značilnosti in posledice procesa. Sestavini tega vrednotenja sta preverjanje in ocenjevanje znanja. **Preverjanje**

**znanja** je sistematično, načrtno zbiranje podatkov o tem, kako kdo dosega učne cilje; v postopku **ocenjevanja** pa učnim dosežkom dodelimo neko številčno vrednost – oceno. Ocena je lahko izražena tudi opisno v smislu analitičnega opisovanja učenčevih dosežkov. [1] (20. poglavje, str. 274)

### V pravilnikih, ki urejajo preverjanje in ocenjevanje znanja

Pravilnik o preverjanju in ocenjevanju znanja ter napredovanju učencev v osnovni šoli [2] navaja:

#### 3. člen

##### (preverjanje in ocenjevanje znanja)

S preverjanjem znanja se zbirajo informacije o tem, kako učenec dosega cilje oziroma standarde znanja iz učnih načrtov, in ni namenjeno ocenjevanju znanja.

Doseganje ciljev oziroma standardov znanja iz učnih načrtov učitelj preverja pred, med in ob koncu obravnave učnih vsebin.

Ocenjevanje znanja je ugotavljanje in vrednotenje, v kolikšni meri učenec dosega v učnem načrtu določene cilje oziroma standarde znanja. Učitelj ocenjevanje znanja opravi po obravnavi učnih vsebin in po opravljenem preverjanju znanja iz teh vsebin.

Pravilnik o ocenjevanju znanja v srednjih šolah [3] navaja:

#### 5. člen

##### (preverjanje znanja)

(1) Učitelj s preverjanjem znanja ugotavlja doseganje učnih ciljev, ki so predmet ocenjevanja znanja.

(2) Za izrednega dijaka se lahko organizira poskusno opravljanje izpitov, s čimer se mu omogoči, da preveri in spozna najmanj obseg in zahtevnost izpita ter primere izpitnih vprašanj.

Nato sledi poglavje II. SPLOŠNO O OCENJEVANJU ZNANJA, v katerem so členi od 7 do 11, in poglavje III. PRAVILA OCENJEVANJA ZNANJA s členi od 12 do 15.

Termina »vrednotenje znanja« v tem pravilniku ni.

Razlika med formalno urejenostjo preverjanja in ocenjevanja v osnovni in srednji šoli je tudi v tem, da ravnatelj za srednje šole določi šolska pravila ocenjevanja, v katerih so nekatere zadeve urejene posebej za določeno šolo in ne veljajo za vse srednje šole enako (npr. odstotek

negativnih ocen pri pisnem ocenjevanju, pri katerem se ocenjevanje ponovi; pravila za pisno ocenjevanje; izpitni red in priprava izpitov; ukrepi po kršitvah pravil in izpitnega reda ...).

### Na 6. zimskem seminarju in v tem članku

Na 6. zimskem seminarju smo vrednotenje znanja uporabljali kot termin, ki zajema tako preverjanje kot tudi ocenjevanje znanja. Enako je tudi v tem članku.

### Priprava in izvedba seminarja

Seminar sva v prvi četrtini leta 2020, po razpisu ministrstva, pristojnega za izobraževanje, pripravila takratna svetovalca za fiziko na ZRŠŠ Goran Bezjak in Milenko Stiplovšek. Pripravila sva ga s predpostavko, da ga bova morda morala izvesti sama. Bil je sprejet na razpisu in objavljen v katalogu KATIS za šolsko leto 2020/2021 v programskem sklopu Programi profesionalnega usposabljanja (PPU) in v okviru prednostne teme Poučevanje, učenje in vrednotenje v vzgojno-izobraževalnem procesu. Predvideno je bilo, da ga izvedeva v živo, 28. 1. 2021, v obsegu osmih ur v Mariboru.

Zaradi pandemije kovida 19 seminarja ni bilo mogoče izvesti, kot je bil načrtovan. Pred pričetkom izvedbe seminarja se je nama z Goranom v Predmetni skupini za fiziko pridružila svetovalka Danica Mati Djuraki, česar sva bila seveda zelo vesela. Vsi trije smo nato seminar prilagodili izvedbi na daljavo in ga tako tudi izpeljali.

Prilagojeni seminar je potekal videokonferenčno in s sodelovanjem v spletni učilnici. Sestavljali so ga trije deli. Prijavljeni učitelji so v spletni učilnici seminarja prejeli takšno informacijo:



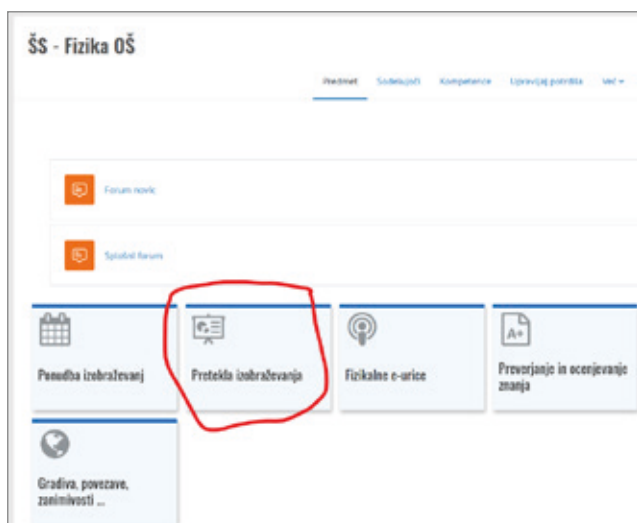
1. del seminarja v obsegu ene ure je zajemal ogled posnetega predavanja »Uvod v vrednotenje znanja pri pouku fizike« ter izpolnjevanje vprašalnika na temo vrednotenja znanja. Udeleženci so to opravili do 28. 1. 2021.
2. del seminarja je predstavljalo videokonferenčno srečanje 28. 1. 2021 v trajanju štirih ur. Na tem srečanju smo učitelje spodbudili k razmišljanju o učiteljevi strokovni avtonomiji, pripravi pisnih preizkusov znanja in vrednotenju znanja z vključevanjem eksperimen-

tov. Vsako od tem smo najprej predstavili, nato pa o njej razpravljali.

3. del seminarja v trajanju treh ur pa je bil namenjen temu, da učitelji pripravijo svoje gradivo na temo vrednotenja znanja pri pouku fizike in ga oddajo v spletno učilnico. Povabljeni so bili še k izpolnjevanju zaključnega vprašalnika, ki smo ga pripravili svetovalci, in k evalvaciji seminarja, kot jo zahteva aplikacija KATIS.

Gradiva s seminarja so še vedno dostopna učiteljem, vpisanim v spletno učilnico za učitelje fizike v osnovni šoli ali v spletno učilnico za učitelje fizike v srednji šoli. Dostopna so v poglavju Pretekla izobraževanja.

V spletni učilnici za učitelje v osnovni šoli lahko vidimo:



Po izboru poglavja Pretekla izobraževanja se premaknemo navzdol do razdelka šolsko leto 2020/2021 in izberemo 6. ZIMSKI SEMINAR ...



Opre se okno s prikazom objavljene vsebine v KATIS-u in s povezavami do gradiv.



V spletni učilnici za učitelje fizike v srednji šoli je situacija podobna.

## Nekaj poudarkov z uvodnega predavanja na temo vrednotenja znanja pri pouku fizike

### Oblike vrednotenja znanja



Zaslonska slika z uvodnega predavanja, ki prikazuje navedbo in poimenovanje različnih oblik vrednotenja znanja, kot jih predstavlja Barica Marentič Požarnik v svoji knjigi *Psihologija učenja in pouka* [1]. Vir [2] na zaslonski sliki ustreza viru [1] v članku.

Različne oblike vrednotenja znanja imajo seveda različne lastnosti in so zato različno primerne za vrednotenje različnih vrst ciljev. Z uporabo različnih oblik vrednotenja znanja lahko upoštevamo tudi razlike med učenci.

## Merske karakteristike vrednotenja znanja

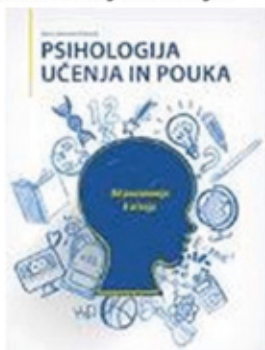
Na vrednotenje znanja lahko gledamo kot na neko vrsto merjenja, ki pa žal ni toliko dorečeno, kot smo to fiziki navajeni pri merjenju vrednosti fizikalnih količin. Spodaj navedene karakteristike je smiselno pretehtati za vsako od uporabljenih oblik vrednotenja znanja in našo izvedbo le-te.

### Merske karakteristike vrednotenja znanja:

- Veljavnost in taksonomija ciljev
- Zanesljivost
- Objektivnost
- Občutljivost
- Ekonomičnost

**Veljavnost ima prednost!**

[2]



Vir [2] na zaslonski sliki zgoraj ustreza viru [1] v članku.

## Veljavnost

Veljavnost je navedena kot najpomembnejša karakteristika vrednotenja. Gre za to, ali res vrednotimo to, kar zahtevajo učni načrti in katalogi znanj, ter ali smo res ovrednotili znanje učenca in ne znanja nekoga drugega.

**Merske karakteristike vrednotenja znanja:**

**Veljavnost** - Ali res vrednotimo to, kar bi naj vrednotili?

- doseganje uravnoteženo izbranih ciljev in standardov iz UN in KZ;
- dosežek učenca/dijaka.

Pri vrednotenju izdelkov, kratkih projektnih nalog, predstavitev eksperimentov ipd. se lahko hitro ujamemo v past in zahtevamo ter vrednotimo znanja in sposobnosti, ki jih ni med cilji in standardi učnega načrta za fiziko – npr. kakovost oblikovanja predstavitev v PowerPointu, kakovost fotografij in videoposnetkov, retorične sposobnosti ...

Problematično s stališča veljavnosti je tudi, če vrednotimo izdelek, ki ni bil izdelan pred našimi očmi, saj ne vemo, kdo ga je zares izdelal. Brez težav pa se ob takšnem izdelku pogovorimo o fiziki, ki je z izdelkom

povezana, in je to znanje zahtevano v učnem načrtu. Načeloma lahko v vzgojnem smislu celo spodbujamo sodelovanje in medsebojno pomoč (med sošolci, znotraj družine, v raznih krožkih in klubih ...) pri izdelavi izdelkov in pripravljanju predstavitev. Vztrajati pa je treba pri tem, da ocenimo le pred učiteljem izkazano znanje ocenjevanega učenca in da učenci rezultatov tujega dela ne prikazujejo kot rezultate svojega.

## Taksonomija ciljev

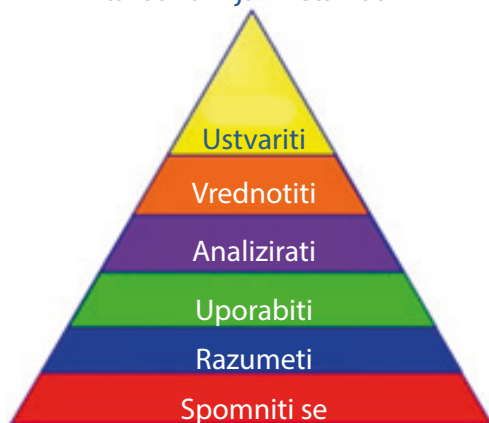
**Merske karakteristike vrednotenja znanja:**

**Taksonomija ciljev:**  
Ali smo z vrednotenjem uspeli zaznati, do katere stopnje zahtevnosti je osvojil posameznik cilje in standarde?

Bloomova taksonomija iz leta 1956



Revidirana Bloomova taksonomija iz leta 2001



Eden od namenov vrednotenja znanja je tudi ugotavljanje, do katere stopnje zahtevnosti učenec obvladuje vsebine ali procese, ki naj bi jih obvladoval. S klasifikacijami ravni zahtevnosti se ukvarjajo razne taksonomije. Najstarejša in še vedno pogosto uporabljena je Bloomova taksonomija izobraževalnih ciljev, ki je nastala že leta 1956, leta 2001 pa je bila revidirana.

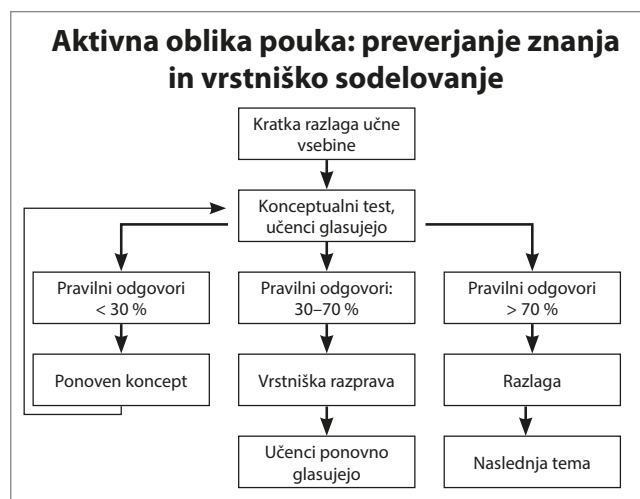
Prevod revidirane Bloomove taksonomije – *Taksonomija za učenje, poučevanje in vrednotenje znanja* [4] – zelo priporočam v branje. Dobro bi bilo, da bi jo imela vsaka šolska knjižnica.

Razmišljanja o preostalih merskih karakteristikah vrednotenja znanja si lahko pogledate na posnetku uvodnega predavanja v obeh spletnih učilnicah.

### Preverjanje znanja kot aktivna oblika učenja

Večkrat lahko slišimo pomisleke, da je formativno preverjanje znanja časovno potratno. Do neke mere to sicer drži, vendar lahko z ustreznimi pristopi ta čas zelo učinkovito izrabimo tudi za učenje. Primer takega pristopa je kombinacija preverjanja znanja in vrstniškega sodelovanja. N. Mazur je s sodelavci preizkušal kombinacijo preverjanja znanja in vrstniškega sodelovanja na Univerzi Harvard. Ugotovitve so objavili v članku »Peer instruction: From Harvard to the two-year college« [5].

V Sloveniji je ta pristop srednješolskim učiteljem predstavil prof. Gorazd Planinšič na enem od seminarjev na FMF UL. Nekateri smo ta pristop tudi preizkusili. Sam sem bil z rezultati zelo zadovoljen, dijaki pa so ga sprejeli izredno dobro in so sodelovali zavzeto ter z veseljem.



**Slika 1:** Postopek izvajanja vrstniških navodil. Upoštevajte, da so priporočeni odstotki pravih odgovorov za vsak korak ocene – kako se bo učitelj odločil nadaljevati, je močno odvisno od učne vsebine in populacije učencev. [5]

Gre za to, da po kratki predstavitvi teme pripravimo test znanja, ki ga je mogoče obdelati strojno. Praviloma gre za vprašanja izbirnega tipa z uporabo naprav za posre-

dovanje odgovorov. Test najprej rešijo učenci samostojno in posredujejo odgovore. Nato jih učitelj povabi, da se o vprašanih v testu pogovorijo med seboj – pojasnijo drug drugemu, zakaj so odgovorili tako, kot so. Pogovori praviloma potekajo v parih ali trojicah – s sosedi, s katerimi sedijo v učilnici. Po teh pogovorih ponovno rešijo isti test in posredujejo svoje odgovore. Če nismo presegli meje uspešnosti, s katero smo zadovoljni, lahko vsem učencem hkrati ponudimo nekaj dodatne razlage in ponovimo cikla reševanja testa.

Praviloma se seveda rezultat na testu izboljša. Ker je vrednotenje pravilnosti odgovorov strojno, lahko učenci ta napredek vidijo takoj, kar deluje zelo motivacijsko.

Za učitelja je zanimivo in zelo poučno poslušati argumente učencev za odločitve o odgovorih. Zaznamo lahko različne načine razmišljanja različnih učencev in tudi najpogostejše napačne predstave. To nam lahko zelo pomaga pri načrtovanju izboljšav svojega poučevanja. Treba pa se je vzdržati vsakega vmešavanja v razprave in v navedene argumente učencev v času med obema testoma. Če tu nismo dosledni, bodo učenci ob našem prihodu k skupini utihnili in čakali, kaj jim bomo povedali, namesto da bi nadaljevali svoje delo in si »razgibavali možgane«, nam pa posredovali dragocene informacije.

Tako porabljen čas dela v razredu je dokaj primerljiv s klasičnim zaporedjem podajanja snovi ter nato njenega utrjevanja in preverjanja, učenci pa so aktivnejši in po mojih izkušnjah tudi bolj motivirani.

Pristop smo uporabili tudi pri razvojni nalogi formativnega spremljanja na ZRSS. V srednji šoli smo uporabili aplikacijo Socrative, v osnovni pa Plickers.

Celotno uvodno predavanje na temo vrednotenja znanja pri pouku fizike je dolgo 35 minut in je še vedno dosegljivo v obeh spletnih učilnicah. Vljudno ste vabljeni k ogledu.

### O strokovni avtonomiji učiteljev na področju vrednotenja znanja

Razmerja med avtonomijo in regulativo so tema, izziv, problem ... za skoraj vsak družbeni podsistem ali organizirano skupino, ki opravlja določene naloge. Težava je v tem, da preveč regulative duši fleksibilnost, kreativnost, inovativnost ... in lahko s tem bistveno zmanjšuje učinkovitost ter kakovost funkcioniranja. Po drugi strani pa preveč avtonomije lahko povzroča kaos in s tem prav tako zmanjšuje kakovost funkcioniranja. Najti pravo ravnotežje med avtonomijo in regulativo znotraj posameznega sistema, ki bo optimalno za vse vpletene in vse situacije, je res velik izziv.

Izobraževalni sistem je kompleksen in pomemben

družbeni podsistem. Pričakujemo, da bo učinkovit, da bo delo učiteljev kakovostno, da bodo učenci in dijaki po vsej državi imeli podobno kakovost storitve, da bo transparenten, enostaven in ne predrag ... Kje postaviti meje, ki so trde in nespremenljive, ter kje in koliko puščati izvajalcem in uporabnikom storitev proste roke, je zahtevno vprašanje. Pomaga pa nam, da ni treba začeti razmišljati »iz nič«. Imamo sistem, ki je preizkušen, za katerega vemo (morda ne čisto podrobno), kako deluje, in ga lahko spreminjamo postopoma v skladu z novimi zahtevami in možnostmi v družbi. Prav zdaj poteka prenova učnih načrtov, ki bo npr. vpeljala standarde znanja (vključno z minimalnimi standardi) za gimnazijske programe. Tega v veljavnih učnih načrtih ni, minimalne standarde avtonomno določajo strokovni aktivni oz. učitelji na šolah. Ta sprememba bo gotovo zmanjšala raznolikost zahtev za doseganje pozitivnih ocen na različnih gimnazijah v Sloveniji. To bo prispevalo k izenačevanju položaja dijakov na različnih gimnazijah v Sloveniji, kar lahko vidimo kot pozitiven premik. Je pa mogoče, da se bo s tem povprečna raven znanja, ki ga dijaki odnesejo z gimnazij v Sloveniji, zmanjšala, kar pa ni prav pozitivno. Skratka – vsaka medalja ima dve plati, kot vemo že dolgo.

Strokovno avtonomijo učiteljev formalno ureja Zakon o organizaciji in financiranju vzgoje in izobraževanja (ZOFVI) [6]. Drugi odstavek 92. člena pravi:

Strokovni delavci izvajajo vzgojno-izobraževalno delo v skladu z zakonom in javno veljavnimi programi tako, da zagotavljajo objektivnost, kritičnost in pluralnost ter so pri tem strokovno avtonomni.

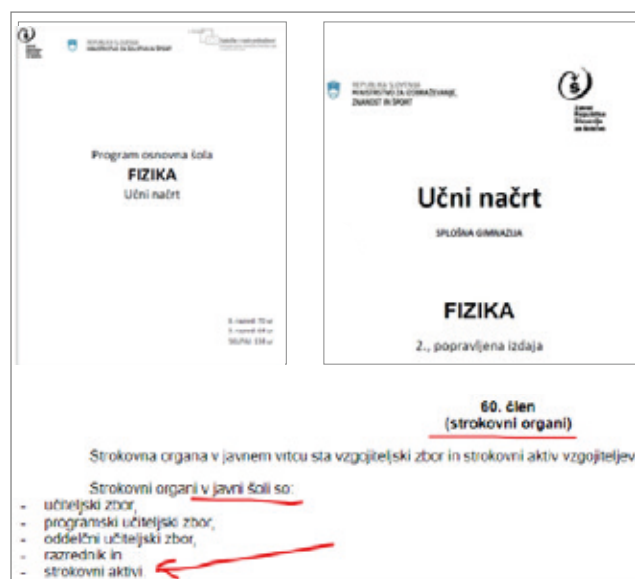
Seveda velja še, da smo avtonomni pri vsem, kar ni določeno in predpisano z zakonskimi in podzakonskimi akti. Zanimivo je opazovati stališča različnih učiteljev na to temo. Na eni strani ste tisti, ki želite veliko regulative, saj vam to prihrani sprejemanje odločitev in odgovornost za posledice teh odločitev – kar je čisto legitimno in racionalno stališče. Drug pol ste tisti, ki vas regulativa duši in si želite delati izključno v skladu s svojimi prepričanji in idejami – kar praviloma izvira iz vaših osebnostnih lastnosti in prepričanj, do katerih imate seveda vso pravico. Kot je običajno, tudi tu velja, da nobena skrajnost ni prav dobra. Če ste nekje med skrajnostnima in lahko s svojimi prepričanji uspešno delate ter zadovoljno živite v sožitju z okolico, se poskusite tega držati čim dlje. Če pa ste zaradi bližine eni ali drugi skrajnosti večkrat v težavah, je vredno premisliti, ali bi bilo mogoče te težave odpraviti s ponovnim razmislekom o svojih stališčih in argumentih za ta stališča.

Kaj vse urejajo zakoni in pravilniki in kako je to urejeno, je obsežno področje. Učitelji nismo pravniki in zapisi v pravnih aktih so mnogokrat različno razumljeni celo med strokovnjaki pravne stroke. Zato je pogosta praksa,

da se pač držimo obstoječe tradicije in verjamemo, da je ta pravilna, če v preteklosti s tem ni bilo večjih težav. Žal pa nam lahko tradicija prične povzročati težave, saj se situacija spreminja in postajajo nekateri postopki, ki so bili včasih enostavni, vedno težje izvedljivi. Primer, o katerem smo govorili na seminarju, je npr. predpisano število ocen in predpisani načini ocenjevanja:

**Primer možne težave:** Vsako ocenjevalno obdobje je potrebno dobiti  $x$  ustnih ocen in  $y$  pisnih ocen, kar povzroča časovno stisko.

**Možna rešitev:** Poglejmo v pravilnike in učni načrt (UN) oz. katalog znanja (KZ), kaj se res zahteva. V aktivu premislimo o možnostih za izpolnjevanje teh zahtev v danih časovnih okvirih ob upoštevanju ugotovitev pedagoške stroke in naših preferenc. Načine in število ocenjevanj uskladimo na sestanku aktiva, dogovore zapišemo v zapisnik.



Skratka: če se začnejo pojavljati težave z obstoječo prakso, je vredno ponovno pogledati, kaj je res določeno z zakonodajo in je nespremenljivo, kje pa imamo proste roke in lahko težave zmanjšamo ali odpravimo sami.

## Priprava pisnih preizkusov znanja

Na seminarju smo za pripravo pisnega preizkusa znanja predlagali premislek o naslednjih zadevah:

### Pisno vrednotenje znanja

1. Točke za min. standard.
2. Točke za odlično oceno.
3. Čas reševanja – (izpis podatkov, pisanje enačb, vstavljanje z enotami, 2 x tipkanje po kalkulatorju, naloga za premisliti).
4. „Joker“ naloga.

Za pisne preizkuse znanja imamo dosežene točke, ki predstavljajo meje za ocene, določene vnaprej. Predlagali smo, da posebno pozornost namenimo zastopanju minimalnih standardov znanja in točkam, potrebnim za doseganje odlične ocene.

### Točke, pridobljene z obvladovanjem minimalnih standardov znanja

Predlagali smo, da je s točkami, pridobljenimi z obvladovanjem izključno minimalnih standardov, mogoče preseči mejo za oceno zadostno (2), ne pa meje za oceno dobro (3). V učnem načrtu za pouk fizike v osnovni šoli [7] je na strani 17 zapisano:

S poudarjenim tiskom so zapisani **minimalni standardi**, ki jih pri ocenjevanju uporabimo kot osnovo za pozitivno oceno oziroma pogoj za napredovanje v višji razred.

Pravilnik o ocenjevanju znanja v srednjih šolah pravi:

#### 9. člen

##### (minimalni standard znanja)

(1) Minimalni standard znanja predstavlja stopnjo znanja, spretnosti ali kakovost dosežka, potrebnega za pozitivno oceno oziroma za zadovoljivo sledenje pouku pri posameznem predmetu oziroma strokovnem modulu.

(2) Če minimalni standard znanja pri predmetu oziroma strokovnem modulu ni določen v učnem načrtu oziroma katalogu znanj, ga z načrtom ocenjevanja znanja določi strokovni aktiv oziroma učitelj.

V katalogih znanj za pouk fizike v srednjem strokovnem in poklicno-tehniškem izobraževanju so minimalni standardi znanja določeni. V učnih načrtih za pouk fizike v gimnazijskih programih pa minimalnih standardov ni in jih na vsaki šoli določi strokovni aktiv oziroma učitelj. To je zahtevna in odgovorna naloga. Za pomoč pri njej smo v Predmetni razvojni skupini (PRS) za fiziko leta 2015 pripravili predlog minimalnih standardov znanja za program splošne gimnazije. Predlog je dosegljiv v spletni učilnici za srednješolske učitelje in ga je z ustreznimi prilagoditvami mogoče uporabiti tudi v klasičnih in strokovnih gimnazijah. Datoteka je dosegljiva v poglavju Preverjanje in ocenjevanje znanja:



### Točke, potrebne za odlično oceno

Predlagali smo, da naj bi bilo treba za odlično oceno osvojiti vsaj eno točko na višji ravni zahtevnosti (ob vseh osvojenih točkah na nižjih ravneh zahtevnosti). Včasih se primeri, da učenci z najvišjo stopnjo razumevanja fizikalnih zakonitosti in sposobnostjo njihove uporabe za reševanje problemov izgubljajo točke pri manj zahtevnih nalogah, pri najzahtevnejših pa osvojijo vse ali večino točk. Zato je smiselno ponuditi tudi t. i. joker naloge. To so dodatne naloge na koncu preizkusa, ki jih za popolni izkupiček ni treba rešiti, če pa jih učenci rešijo, lahko z njimi nadomestijo izgubljene točke pri lažjih nalogah. S takimi nalogami tudi dodatno zaposlimo tiste učence, ki hitreje rešujejo probleme, in lahko odgovarjajo na vprašanja ter rešujejo probleme še potem, ko so obvezni del testa že rešili.

### Merjenje časa, potrebnega za reševanje testa

Predlagamo, da sestavljen test reši najprej učitelj in si meri čas, potreben za reševanje. Med reševanjem naj prebere vsako nalogo tako, kot da jo vidi prvič, izpiše podatke, zapiše potrebne enačbe, izrazi neznane količine in jih izračuna tako, kot to pričakuje od učencev. Nariše naj tudi potrebne oz. zahtevane skice. Izračune s kalkulatorji je treba narediti dvakrat, po možnosti na dva različna načina, da preverimo ujemanje dobljenih rezultatov. Učitelj v osnovni šoli bi moral za tak način reševanja testa porabiti največ tretjino časa, ki ga bodo imeli učenci, v srednji šoli pa naj ta delež ne bi presegal polovice razpoložljivega časa. Če smo porabili več časa, je število nalog oz. vprašanj smiselno zmanjšati.

## Mrežni diagram oz. specifikacijska preglednica

**Mrežni diagram**

| Št. naloge | Cilji standardi UN | Zastopnost MAT | Tehniška stopnja |            |            | Št. točk | Min. standardni rezultat |
|------------|--------------------|----------------|------------------|------------|------------|----------|--------------------------|
|            |                    |                | 1. stopnja       | 2. stopnja | 3. stopnja |          |                          |
| 1.         |                    |                |                  |            |            |          |                          |
| 2.         |                    |                |                  |            |            |          |                          |
| 3.         |                    |                |                  |            |            |          |                          |
| 4.         |                    |                |                  |            |            |          |                          |

Zavod Republike Slovenije za šolstvo www.zrsos.si

Gre za preglednico, ki jo zelo priporočamo za pripravo pisnih preizkusov znanja, uporabna in smiselna pa je za načrtovanje in analizo katere koli oblike vrednotenja znanja. V njej lahko vidimo, kako so v testu znanja zastopani posamezni cilji, ravni zahtevnosti ter minimalni standardi. Za vsako nalogo/vprašanje zapišemo, na katere cilje/standarde se nanaša, koliko točk je vredna in kako so te točke razporejene glede ravni zahtevnosti, ugotavljanja doseganja minimalnih standardov itd. S pogledom na tako preglednico hitro vidimo, kateri cilji so v testu morda preveč in kateri premalo zastopani pa tudi kako je z doseganjem točk na različnih ravneh zahtevnosti. Vidno naj bi bilo, da je mogoče doseči pozitivno oceno izključno z doseganjem minimalnih standardov znanja in da je za odlično oceno treba izkazati znanje tudi na višji ravni zahtevnosti. Tabelo si lahko seveda sestavimo sami, tako kot nam najbolj ustreza.

Zgoraj vidimo primer, ki ga je pri sestavi testov uporabljal kolega Goran Bezjak. V tabeli, ki jo je uporabljal, je imel še stolpec »Zastopanost MAT«. Matematično znanje in sposobnost uporabe matematike sta seveda pomembna za opisovanje fizikalnih pojavov in zakonitosti ter tudi za reševanje problemov. Vendar pa so previsoka pričakovanja glede znanja matematike in velik odstotek točk, ki jih je mogoče izgubiti zaradi neustreznega znanja matematike, lahko nepotreben razlog za slabe dosežke pri fiziki. Vredno se je temeljito pozanimati, kaj je tisto, kar naj bi učenci v določenem trenutku na področju matematike res znali, in to upoštevati.

## Primeri vrednotenja znanja z vključevanjem eksperimentov

Na videokonferenčnem srečanju v okviru 6. zimskega seminarja je vsak izvajalec najprej predstavil svoje izkušnje s tovrstnim vrednotenjem, nato pa je sledila razprava o tej temi.

## Eksperimentalna/praktična naloga je vključena v preizkus znanja

Kolegica Danica Mati Djuraki je predstavila enega od načinov ocenjevanja eksperimentalnih spretnosti in veščin, ki ga je uporabljala pri pouku. Učenci so individualno in samostojno pri pouku v razredu izvedli eno ali več meritev ter obdelali rezultate. Izdelek so nato oddali in je bil ocenjen. Predstavila je delo v primeru, ko je opreme dovolj, da lahko vsi delajo enako meritev hkrati, in v primeru, ko je opreme manj in se selijo po učilnici.



Zgoraj je prikazan primer razporeditve opreme v razredu, ko je bilo ocenjevanje sestavljeno iz treh sklopov: merjenje dolžine, merjenje temperature in še nekaj obvladovanja teorije (pri oknu). Učenci so se po prvi in drugi tretjini razpoložljivega časa prestavili na naslednji sklop, na koncu pa so oddali svoj izdelek, na katerem so bili rezultati dela za vse tri sklope.

Spodaj sta še primera nalog, ki ju je na seminarju predstavila Danica Mati Djuraki:

**Primeri nalog**

**Merjenje dolžine**

- Izmeri premere in obsege okroglih posód. Meritve zapiši v preglednico.
- Izračunaj povprečno vrednost obsegov.
- Nariši graf, ki bo pokazal, kako sta povezana premer in obseg okrogle posode.

Zavod Republike Slovenije za šolstvo www.zrsos.si

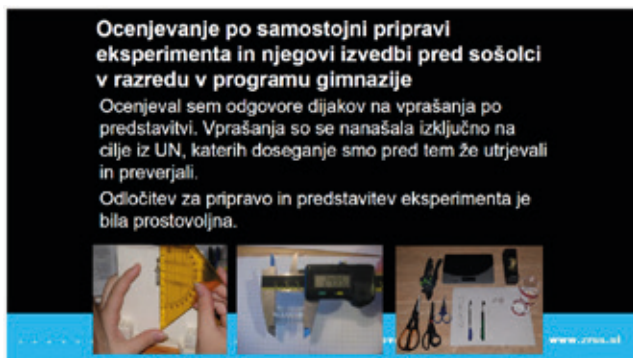
**Primeri nalog**

**Merjenje temperature**

- V posodo nalij 1 dcl mrzle vode in ji izmeri temperaturo. Postopno dodajaj po 3 ml vroče vode in vsakič sproti izmeri temperaturo. Ponavljaj do prostornine 1,12 dcl. Meritve podaj v preglednici.
- Nariši graf, ki bo pokazal, kako sta povezana prostornina vode in njena temperatura.

Zavod Republike Slovenije za šolstvo www.zrsos.si

## Ocenjevanje po samostojni pripravi eksperimenta in njegovi izvedbi pred sošolci v razredu



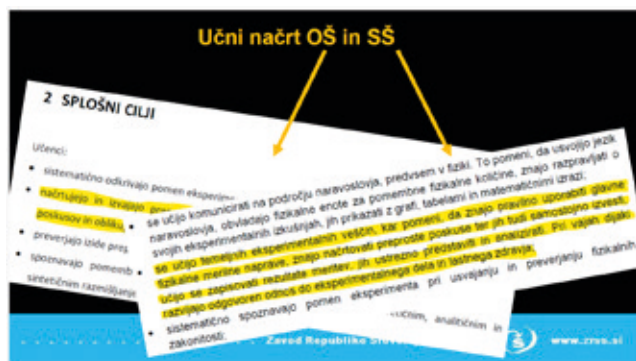
Sam sem predstavil izkušnjo s pridobivanjem ocene potem, ko je dijak pripravil in predstavil kratko projektno nalogo. Ena od možnosti je bila, da določijo konstanto vzmeti, ki jo imajo v kemičnem svinčniku. Več o izkušnjah s takšno projektno nalogo lahko preberete v prispevku »Določanje konstante vzmeti« v priročniku *Posodobitve pouka v gimnazijski praksi: FIZIKA – Mehanika, toplota, nihanje*. [8]

Navodila za nalogo so bila praviloma ekstremno kratka: kaj je treba določiti/izmeriti, nič pa, kako. S tem sem poskušal spodbuditi kreativnost dijakov in razvijati njihovo sposobnost za reševanje problemov in premagovanje težav, ki se pojavljajo pri načrtovanju in izvajanju eksperimentalnega dela. Dijak je napisal in učitelju oddal poročilo o svojem delu in ugotovitvah. Nato je imel deset do petnajst minut časa, da je sošolcem v razredu predstavil svoje delo in ugotovitve ter nato pred njimi in učiteljem izvedel vsaj eno meritev. Ocenjevanje dijakovega znanja je potekalo zelo podobno kot ustno ocenjevanje. Dobil je tri vprašanja na treh ravneh zahtevnosti, vsako vprašanje je bilo vredno dve točki. Prvo je bilo na temo poznavanja dejstev (definicij, zakonitosti ...). Drugo vprašanje se je nanašalo na enostavno uporabo znanja (največkrat na izračun kakšne vrednosti na standardni in znani način ali pa na preoblikovanje in pojasnilo prikaza rezultatov meritev). Tretje vprašanje je bilo na najvišji ravni zahtevnosti. Po predstavitvi kratkih projektnih nalog se je lahko nanašalo na povezavo med negotovostjo meritev in negotovostjo izračunanih rezultatov, na zaznane razloge za negotovost meritev, na ideje, kako izboljšati natančnost, kako izmeriti potrebne vrednosti na več različnih načinov, na oceno velikosti sistematične napake zaradi poenostavljanja teoretičnega modela itd.

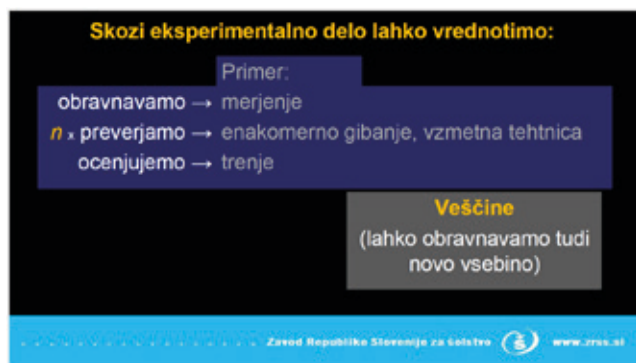
Udeležence sem spomnil še na možnost uporabe idej za ocenjevanje veščin eksperimentalnega dela, predstavljениh vsako leto v prvi nalogi druge pole na splošni maturi iz fizike, ki se vedno nanaša na eksperimentalno delo.

## Razvijanje raziskovalnih veščin in vrednotenje stopnje doseganja le-teh

Goran Bezjak je predstavil svoje izkušnje z razvijanjem raziskovalnih veščin in z vrednotenjem stopnje doseganja le-teh.

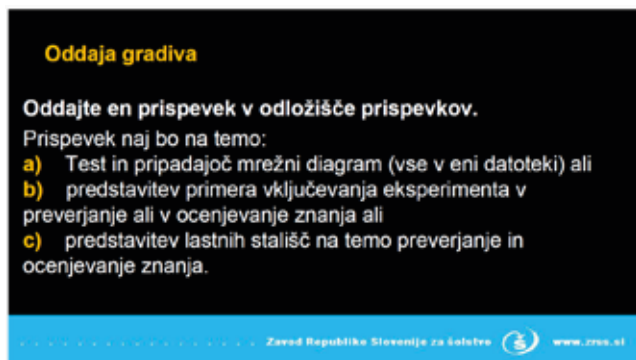


Spomnil je na zapise procesnih ciljev v učnih načrtih, ki so v primerjavi z vsebinskimi cilji pri pouku večkrat zanemarjeni.



Predstavil je sistematični pristop k razvijanju, utrjevanju in preverjanju iste veščine ob različnih vsebinah. Če smo to korektno opravili, lahko stopnjo doseganja tako razvite veščine ocenjujemo celo na novi vsebini. Zgoraj je predstavljen primer, ko je merjenje (npr. dolžine) vpeljavano, preverjano in utrjevano ob obravnavi gibanja in vzmetne tehtnice, ocenjevano pa med obravnavo trenja kot nove vsebine.

Ob koncu videokonferenčnega srečanja so bili udeleženci povabljeni še, da oddajo en svoj prispevek v odložišče gradiv in izpolnijo vprašalnik, ki smo ga pripravili izvajalci seminarja, ter zahtevano evalvacijo seminarja v aplikaciji KATIS. Za ta del aktivnosti so se jim priznale tri ure sodelovanja na seminarju.



## Zaključek

Seminarja se je udeležilo 73 udeležencev. Vse obveznosti je opravilo 55 udeležencev (39 iz osnovne šole in 19 iz srednje šole), ki so s tem dobili tudi možnost za izpis potrdila o opravljenem strokovnem izobraževanju.

Ocene posameznih kategorij seminarja (vsebine, metode dela, uporabnost, organizacija, delo predavateljev ...), ki jih zahteva ministrstvo, pristojno za izobraževanje, in jih udeleženci vpišejo med evalvacijo seminarja v aplikaciji KATIS, so se gibale med 7,7 in 8,6. Najvišja mogoča ocena je 9,0.

Nekaj sporočil iz vprašalnika, ki smo ga za udeležence pripravili izvajalci:

- Super pripravljen zimski seminar, odlične nove ideje. Veliko sem se novega naučil. Super.
- Zelo dobro izpeljano, hvala za novosti in nove ideje, znanja.
- Pohvalila bi izvedbo seminarja. Prav nič ni motilo, da delamo na daljavo, v tem času nam je šele dobrodošlo, da smo poleg vrednotenja in ocenjevanja videli tudi precej oblik dela na daljavo. Predavanja preko Zoom-a, sodelovalno učenje v sobah, izmenjava izkušenj z Multimetrom, delo v parih. Vsa pohvala posebno Goranu za izvedbo.
- Spoznala sem, da smo v osnovni šoli veliko bolj omejeni z ocenjevanjem kot pa učitelji v srednji šoli. Učitelji v srednji šoli imajo večjo avtonomijo pri ocenjevanju. Bravo za vas, pri nas se moramo žal držati strogih pravilnikov, ki pa niso dobri ne za učence in ne za učitelje.
- Lep pozdrav, super izvedba glede na okoliščine! Konstruktivna debata, mrežni diagrami so zares koristni. Hvala za vaš trud.

## Viri

- [1] Marentič Požarnik, B. (2020). *Psihologija učenja in pouka: od poučevanja k učenju*. Ljubljana: DZS.
- [2] Pravilnik o preverjanju in ocenjevanju znanja ter napredovanju učencev v osnovni šoli <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV11583#> (29. 1. 2024)
- [3] Pravilnik o ocenjevanju znanja v srednjih šolah <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV13441> (29. 1. 2024)
- [4] Lorin W. Anderson idr. (2016). *TAKSONOMIJA za učenje, poučevanje in vrednotenje znanja: Revidirana Bloomova taksonomija izobraževalnih ciljev*. Ljubljana: ZRSŠ.
- [5] Lasry, N. Mazur, E. Watkins. J. (2008). Peer instruction: From Harvard to the two-year college. *American Journal of Physics*, 76(11).
- [6] Zakon o organizaciji in financiranju vzgoje in izobraževanja (ZOFVI) <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO445#> (31. 1. 2024)
- [7] Učni načrt za predmet FIZIKA v osnovni šoli [https://www.gov.si/assets/ministrstva/MIZS/Dokumenti/Osnovna-sola/Ucni-nacrti/obvezni/UN\\_fizika.pdf](https://www.gov.si/assets/ministrstva/MIZS/Dokumenti/Osnovna-sola/Ucni-nacrti/obvezni/UN_fizika.pdf) (31. 1. 2024)
- [8] Stiplovšek, M. (2010). Določanje konstante vzmeti. V Cvahte, M. (ur.). *Posodobitve pouka v gimnazijski praksi: FIZIKA – Mehanika, toplota, nihanje*, str. 168–170. Ljubljana: ZRSŠ <https://www.zrss.si/pdf/Posodobitve-pouka-v-gimnazijski-praksi-FIZIKA.pdf> (31. 1. 2024).

# Kotalno trenje pri valjih in kroglih

Doc. dr. Milan Ambrožič in Mojca Milone

Osnovna šola Solkan

## Izvleček

Članek opisuje raziskovalno nalogo, s katero je ekipa treh devetošolcev OŠ Solkan dosegla zlato priznanje na slovenskem tekmovanju mladih raziskovalcev na področju fizike in astronomije spomladi 2023 v Murski Soboti. Preverili smo odvisnost kotalnega trenja od polmera teles. Učenci so spuščali aluminijaste tulce in ležajne kroglice različnih polmerov po majhnem klancu in merili, kolikšno pot še naredijo na vodoravnih tleh. Ugotovili smo, da približno velja obratno sorazmerje med polmerom teles in silo kotalnega trenja tako za valje kot za kroglice. Ugotavljali smo še, kako lahko z mazivi zmanjšamo kotalno trenje.

**Ključne besede:** kolo, kotalno trenje, energijske pretvorbe, ležaj

## Rolling Friction of Cylinders and Spheres

### Abstract

This article describes research for which a team of three ninth-grade students from the Solkan Primary School won the Golden Plaque in the Slovenian competition of young researchers in physics and astronomy in the spring of 2023 in Murska Sobota. We checked the dependence of rolling friction on the radius of bodies. Students let aluminium tubes and ball bearings with different radii go down the small inclination path and measured the distance they made on horizontal ground. We found an approximate inverse proportion of friction force on the radii of bodies, both for cylinders and spheres. We also tested how the lubricants reduce rolling friction.

**Keywords:** wheel, rolling friction, energy transformations, bearing.

## 1 Uvod

Zanimiva raziskovalna naloga lahko dodatno motivira učno uspešne osnovnošolce, na primer pri predmetih fizika in tehnika in tehnologije. Verjetno to velja še toliko bolj, če je takšna naloga povezana z življenjskimi vsebinami ali pa so poskusi nekoliko bolj nenavadni [1-7]. Za današnje mlajše generacije je značilna množična uporaba sodobnih tehničnih pripomočkov, predvsem digitalne tehnologije (DT). Lep zgled je uporaba polarizacijskih očal za doseg globinske ostrine v treh dimenzijah, s čimer bi se bilo mogoče poigrati tudi v osnovni ali srednji šoli [8]. Pri poskusih z drago eksperimentalno opremo se lahko pojavi nevarnost fenomena »črne škatle«, celo pri študentih in učiteljih fizike [9]. To pomeni, da nam naprava prikaže neke rezultate, npr. v obliki številke ali grafov, ne vidimo pa neposredno, kaj se v njej v resnici dogaja, in lahko izgubimo občutek za fiziko v ozadju. Zato ne smemo pozabiti na preproste, nazorne šolske poskuse in na razvijanje tehniških veščin. Dobro premišljena improvizacija z osnovnimi pripomočki je vredna vsaj toliko kot najboljša računalniška animacija ali aplikacija na pametnem telefonu.

Avtorica Milone ima že dolgoletne izkušnje z mentorstvom pri raziskovalnih nalogah osnovnošolcev. Dobro zastavljena naloga tako pritegne »mlade raziskovalce«, da tudi sami prihajajo do zamisli, kaj bi bilo mogoče pri njej še narediti. V tem članku opisuje nalogo, pri kateri so učenci iskali kvantitativno zvezo med velikostjo teles (polmerom valja ali krogle) in trenjem pri kotaljenju. Naloga se morda zdi še zanimivejša, ker se v osnovni šoli omenita drsno in kotalno trenje samo na kratko pri pouku fizike in tehnike, tako da je tema za učence večinoma nova.

Kot je navada pri takšnih nalogah, sva mentorja z učenci postavila naslednja raziskovalna vprašanja:

- Kako vpliva velikost kotalečih se teles na silo kotalnega trenja?
- Ali lahko izboljšamo gibanje, če se odločamo za nakup ležajev z določenimi kotalnimi oblikami različnih dimenzij, in koliko pravilno vzdrževanje vpliva na potek gibanja?
- Katere kotalne ležaje uporabiti za to, da nam trenje čim manj zavira gibanje?

Postavili smo tudi dve delovni hipotezi:

- Pri kotalnih ležajih se trenje zmanjša z velikostjo kotalnih elementov.
- Z mazivom lahko bistveno zmanjšamo kotalno trenje v ležaju.

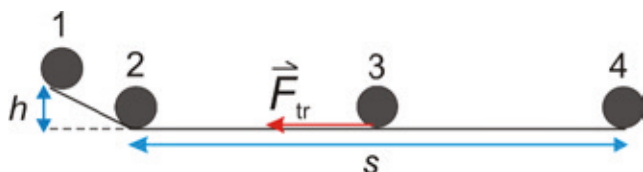
Čeprav so se z nalogo ukvarjali trije za fiziko nadarjeni učenci devetega razreda OŠ Solkan, se zdi še primernejša kot dodaten, motivacijski skupinski poskus za dijake. Lahko pa je tudi popestritev pouka v OŠ. Izvedba naloge je namreč enostavna, brez kakšnih posebnih pripomočkov. To je mogoče narediti pri obravnavi dela in energije, vsaj prvi del naloge, kot je opisana v nadaljevanju, ki je za fiziko zanimivejši.

Mehanizem kotalnega trenja je dokaj kompleksen, glavni vzrok zanj pa je deformacija kolesa na mestu stika s tlemi zaradi lastne teže [10]. Nanj vplivajo tudi deformacija tal, adhezija kolesa s tlemi, mikroskopski zdrsi kolesa itd. Ključni faktor je tudi polmer kolesa, kar se takoj vidi iz poskusa (slika 1), s katerim so učenci proučevali trenje pri kotaljenju.

## 2 Teorija

### 2.1 Fizika

Zaradi jedrnatega izražanja bomo okroglemu kotalečemu se telesu rekli kar *kolo*. Pri kotaljenju kolesa po vodoravni podlagi ni drsnega trenja, ker se pojavi sila lepenja, ki preprečuje drsenje. Kotaljenje je gibanje, sestavljeno iz translacije in rotacije okrog središča kolesa. Rotacijska hitrost obodnih točk kolesa je enaka translacijski hitrosti, to je hitrosti središča kolesa. Vendar se kolo na vodoravni podlagi vseeno upočasnjuje zaradi kotalnega trenja. Pri našem poskusu (slika 1) lahko takoj opazimo, da je pot zaustavljanja velikih kroglic (ali koles) precej daljša kot pri majhnih kroglicah. Tako lahko predpostavimo, da je v prvem približku pri kroglicah in valjastih kolesih sila kotalnega trenja obratno sorazmerna z njihovimi polmeri, kar zapišemo z enačbo (2). Na vodoravni podlagi je ustrezna enačba za silo kotalnega trenja (na kratko: *sila trenja*):



Slika 1: Shema poskusa za meritev kotalnega trenja

$$F_{tr} = k_{tr} \cdot F_n, \quad (1)$$

$$k_{tr} = \frac{c}{R}, \quad (2)$$

$$F_n = F_g = mg. \quad (3)$$

Simboli v enačbah (1-3) pomenijo:  $m$  je masa kolesa in  $R$  njegov polmer,  $g$  je težni pospešek. Sile so naslednje: sila trenja  $F_{tr}$ , pravokotna sila tal (normalna sila)  $F_n$ , ki je za vodoravno podlago po velikosti kar enaka sili teže  $F_g = mg$ , kaže pa navpično navzgor. Sorazmernostni faktor med silo trenja in normalno silo je brezdimenzijski koeficient trenja  $k_{tr}$ . Tega smo izrazili s polmerom kolesa v enačbi (2), kjer je  $c$  ustrezeni koeficient z dolžinsko enoto. Koeficient  $c$  je odvisen od stičnih materialov, obdelave površin itd. Pri avtomobilskih gumah je znano, da je poleg materiala in asfalta pomembna tudi trdota gum.

Na sliki 1 so s števkami označene značilne lege kotalečega se telesa: (1) začetna lega z največjo potencialno energijo, (2) lega ob vznožju klanca z največjo kinetično energijo, v katero se je pretvorila potencialna, (3) vmesna lega na vodoravni podlagi z zmanjšano hitrostjo in kinetično energijo zaradi sile kotalnega trenja, (4) končna lega, ko se telo ustavi.

Glavni cilj izrazito fizikalnega dela naloge je preverjanje enačbe (2) in potem izračun  $c$ . Direktna meritev s silo trenja je prezapletena, zaplete pa se tudi pri matematiki, posebej za osnovnošolsko stopnjo. Če bi uporabili drugi Newtonov zakon, bi bilo v računu preveč neznank. Zato je veliko lažje merjenje prek energij in negativnega dela sile  $F_{tr}$ . Pomagamo si s potencialno energijo tako, da kolo spustimo po klancu z znano začetno višino  $h$  (slika 1). Potencialna energija  $W_p$  se med kotaljenjem po klancu pretvarja v kinetično (na kratkem klancu zanemarimo kotalno trenje), tako da je vsa kinetična energija  $W_k$  ob vznožju klanca enaka začetni potencialni. Zato hitrosti ni treba računati; ta račun bi zahteval hkratno obravnavo translacijske in rotacijske kinetične energije. Kolo se naprej giblje po vodoravni podlagi, kjer se vsa začetna energija  $W_k = W_p$  pretvori v notranjo zaradi negativnega dela sile trenja  $A_{tr}$ . Ker je pri poskusih klanec zelo kratek v primerjavi z vodoravnim delom tira pri ustavljanju, lahko delo sile trenja na klancu zanemarimo, kot smo že omenili. S črko  $s$  označimo pot ustavljanja na vodoravni podlagi. Tedaj veljajo zveze:

$$|A_{tr}| = W_p,$$

$$F_{tr} \cdot s = mgh.$$

Za silo trenja uporabimo enačbe (1-3):

$$k_{tr} \cdot F_n \cdot s = mgh,$$

$$\frac{c}{R} \cdot mg \cdot s = mgh,$$

$$s = \frac{Rh}{c}, \quad (4)$$

$$c = \frac{Rh}{s}. \quad (5)$$

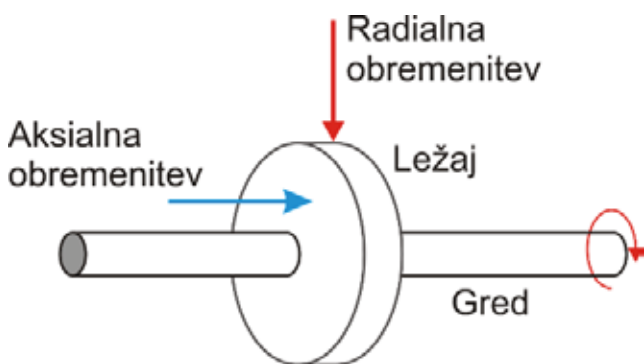
Ključni sta končni enačbi (4) in (5), ki sta obrat ena druge in ki smo ju uporabili za eksperimentalni del raziskave. Enačba (4) pove, da je pot zaustavljanja zaradi kotalnega trenja premo sorazmerna tako s polmerom kolesa kot z višino klanca. To premo sorazmernost z različnimi višinami (pri istem kolesu) in s kolesi z različnimi zunanjimi polmeri (pri isti višini klanca) lahko preverimo s poskusi. Ko preverimo pravilnost enačbe (4), lahko iz enačbe (5) izračunamo koeficient  $c$  za različne pare materialov kolo + tla.

## 2.2 Tehnika in tehnologija

V tehniki razlikujemo nekoristno in koristno trenje, zato ga želimo včasih zmanjšati, drugič pa povečati. Iz lastnih izkušenj vemo, da je pri gibajočih se delih motorja in koles trenje navadno nekoristno, pri zaviranju, na primer z zavorno ploščico, pa koristno. Kotalno trenje nastane pri prenosih moči in gibanju. Zato smo se osredotočili na kotalno trenje, kotalne elemente in njihovo velikost ter možnosti optimalnega zmanjšanja trenja v ležajih. Ležaji so strojni elementi, o katerih se bežno učimo pri predmetu tehnika in tehnologija v osmem razredu. Ležaje uporabljamo za podpore tečajev gredi, osi in da omogočajo vrtenje in pregibanje.

### Vrste ležajev

Gibanja zahtevajo različne obremenitve ležajev glede na smer gredi: pravokotno na gred (radialno) ali pa vzporedno z njo (aksialno) (slika 2).



**Slika 2:** Obremenitve ležaja

Ležaje torej najprej razlikujemo po smeri prenašanja obremenitve:

- radialni (prečni) ležaji, pri katerih deluje obremenitev pravokotno na geometrijsko os gredi in ležajev;
- aksialni (vzdolžni) ležaji, pri katerih deluje obremenitev v osi ležajev;
- kombinirani ležaji, pri katerih delujeta na ležaj prečna in vzdolžna obremenitev.

Ležaje razlikujemo tudi po vrsti trenja: drsni in kotalni ležaji. Drsni ležaji delujejo po načelu primarnega trenja in jih v osnovi podpira mazanje, kotalni pa na principu kotalnega trenja kotalnih elementov, kjer je manj mazalnega učinka. Naše raziskovanje je bilo usmerjeno v kotalne ležaje.

### Kotalni ležaji

Ti ležaji so sestavljeni strojni elementi za prenos vrtenja in njihova uporaba je široka. Večina jih je sestavljena iz notranjega in zunanjega obroča, kotalnih elementov in kletke. Kotalni element, največkrat kroglica in valjček, je v kletki med obročema. Kotalni ležaji imajo veliko prednosti pred drsnimi: imajo dober izkoristek, so preprosto nadomestljivi in poceni, zavzemajo pa malo prostora. Zato jih uporabljamo veliko več kot drsne ležaje. Po obliki kotalnih elementov so poleg krogličnih in valjnih ležajev v rabi še stožčasti, sodčkasti in iglični. Kroglični in valjni ležaji prenašajo predvsem radialne obremenitve, prikazane zgoraj, za prenos aksialnih obremenitev pa uporabljamo stožčaste ležaje pa tudi kroglične ležaje z navpično postavljeno kletko.

Kotalni ležaji podpirajo strojne elemente (npr. gredi, osi ali kolesa). Vzdržujejo nizko trenje, s tem pa znižajo hrup, pregrevanje, porabo energije in obrabe. Kroglični radialni ležaji se pogosto uporabljajo v gospodinjskih aparatih. Po navadi so del različnih električnih motorjev: gospodinjskih in strojnih pripomočkov. Sposobni so delovanja pri visokih hitrostih. So v večini gospodinjskih in obdelovalnih strojev, prevoznih sredstvih itd. Kot pomanjkljivosti kotalnih ležajev velja omeniti opletanje, tresenje, hrupnost pri morebitnih poškodbah kotalnih elementov, težjo montažo, občutljivost na temperaturne spremembe ter nabiranje prahu in umazanije.

## 3 Opis poskusov

Slika 4 prikazuje fotografijo poskusa z nagnjeno podlago (*klancem*), izdelano za ta poskus v šoli. Na leseni podpori z dvema višinama  $h$  (5 cm in 10 cm) sloni nagnjena lepenska. Poskuse smo izvajali na šolskem hodniku. Tako sta bili stični površini umetna masa in kovina. Kovinske



**Slika 3:** Prikaz poskusa s spuščanjem kovinskih tulcev po klanecu

tulce smo izrezali iz dolgih aluminijastih cevi z različnimi polmeri, kroglice pa smo pobrali iz krogličnih ležajev. Merjene poti na vodoravnih tleh so bile po več metrov oziroma veliko daljše od klanca, tako da je bila predpostavka o zanemarljivem delu kotalnega trenja na klanecu upravičena. Za vsak valj in kroglico je bila narejena meritev poti  $s$  po petkrat, da so bili rezultati zanesljivejši. Tako smo lahko izračunali povprečno vrednost poti in ocenili mersko negotovost.

Uporabili smo štiri valje s polmeri 3 mm, 7 mm, 8 mm in 14 mm ter tri kroglice s polmeri 2,5 mm, 3 mm in 5 mm, izmerimo jih npr. s kljunastim merilom. Vsa ta telesa so učenci spustili z obeh višin klanca: 5 cm in 10 cm. Pri votlih valjih so pomembni samo zunanji polmeri. Valje smo po velikosti polmerov oštevilčili od 1 do 4, krogle pa od 1 do 3.

V drugem delu poskusov, bolj povezanem s tehniko mazanja ležajev, smo tako za njihovo zaščito kot za zmanjšanje trenja uporabili dve »mazivi«: namensko mazivo za ležaje in olivno olje. Da ne bi umazali tal, smo poskuse izvedli drugače: s prelomljenim aluminijastim žlebom z U-profilom (slika 5). Vzeli smo samo kroglice premerov 6 mm in 13 mm. Nagnjeni del (klanec) je bil dolg 10 cm, vodoravni del žleba pa precej daljši. Nagib klanca je bil dokaj majhen in smo ga določili z več zaporednimi poskusi, tako da sta se obe kroglici ustavili na vodoravnem delu žleba in nista padli na tla. Poti namazanih kroglic smo primerjali s tistimi brez mazanja.

## 4 Rezultati raziskave

### Prvi del poskusov

Rezultati meritev poti za valje in kroglice na šolskem hodniku so prikazani v tabelah 1–4. Najprej primerjajmo poti istega valja ali kroglice pri dveh različnih vrednostih višine klanca  $h$ , ki sta v razmerju 2 : 1. Pri kroglicah je v skladu z enačbo (4) ustrezno razmerje poti na vodoravni podlagi bližje tej vrednosti kot pri valjih, morebitno razlago pa podajamo spodaj. Povprečje v predzadnjem stolpcu tabel pomeni povprečje petih meritev poti. Negotovost pa ocenjeno negotovost, to je največji odmik meritev od povprečja.



**Slika 4:** Prikaz poskusa z mazanjem kroglic

Analizirajmo nekaj podatkov za valje. Na primer količnik med polmeroma valjev št. 4 in 3 je enak 1,75, medtem ko je ustrezno razmerje povprečnih dolžin  $s$  pri spustu z višine 5 cm enako 1,30, pri spustu z višine 10 cm pa 1,21. Količnik med polmeroma valjev št. 4 in 1 je enak 4,67, medtem ko je ustrezno razmerje povprečnih dolžin  $s$  pri spustu z višine 5 cm enako 3,35, pri spustu z višine 5 cm pa 3,87. Najverjetnejši vzrok za odmike eksperimentalnih ugotovitev od teorije je rahel nagib tal hodnika, ki se mu ne moremo popolnoma izogniti. Vzrok pa je lahko tudi ne dovolj natančna meritev zunanega polmera valjev ali pa njihova rahla koničnost. Glede na podano negotovost za pot  $v$  zadnjem stolpcu je namreč meritev poti dovolj natančna. Za oceno koeficienta  $c$  pri valjih vzamemo najdebelejši valj in večjo višino spusta; iz podatkov  $h = 10$  cm,  $R = 14$  mm in  $s = 565$  cm iz tabele 2 izračunamo z enačbo (5)  $c = 0,25$  mm, koeficient kotalnega trenja pa iz enačbe (2)  $k_{tr} = \frac{c}{R} = 0,02$ .

Rezultati so pri kroglicah podobni kot pri valjih. Če pa primerjamo odvisnost poti od začetne višine, je premo sorazmerje precej bližje kot pri valjih. Na primer, za povprečni poti največje kroglice, 1016 cm in 492 cm,

dobimo količnik 2,07. Dodatni morebitni vzrok, zakaj imamo pri kroglicah po teoriji natančnejši rezultat kot pri valjih, je, da se lahko valji gibljejo »nesimetrično«, to je, ne točno pravokotno na os valja. Najverjetnejši vzrok za takšno nesimetrično kotaljenje valja je, da je nekoliko koničen. Primerjajmo še poti kroglic s polmeroma 5 mm in 2,5 mm, tako da je količnik polmerov 2. Opazimo, da večja kroglica res naredi približno dvakrat daljšo pot: pri  $h = 5$  cm je količnik povprečnih poti enak 1,74, pri  $h = 10$  cm pa 1,83. Za oceno koeficienta  $c$  pri kroglicah vzamemo najdebelejšo kroglico in večjo višino spusta; iz podatkov  $h = 10$  cm,  $R = 5$  mm in  $s = 1016$  cm iz tabele 4 izračunamo z enačbo (5)  $c = 0,05$  mm, petkrat manj kot pri poskusih z valji.

Povzemimo ugotovitve o negotovostih meritev in eksperimentalnih pogojih za valje in kroglice. Največja relativna napaka merjenja poti je okrog 10 %, in to pri valju z najmanjšim polmerom. Natančnosti merjenja polmerov nismo posebej preverjali, lahko pa podamo grobo kvalitativno oceno absolutne negotovosti 0,1 mm, kar da največjo relativno negotovost 4 % pri najmanjšem polmeru 2,5 mm. Negotovost pri merjenju višine  $h$  lahko ocenimo

**Tabela 1:** Poti valjev,  $h = 5$  cm

| Št. (polmer) | Pot (cm) |     |     |     |     |           | Negotovost |
|--------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----------|------------|
|              | 1        | 2   | 3   | 4   | 5   | Povprečje |            |
| 1. (3 mm)    | 109      | 119 | 115 | 105 | 118 | 113       | 6          |
| 2. (7 mm)    | 206      | 214 | 216 | 217 | 206 | 212       | 6          |
| 3. (8 mm)    | 300      | 290 | 292 | 290 | 285 | 291       | 9          |
| 4. (14 mm)   | 379      | 372 | 373 | 378 | 386 | 378       | 8          |

**Tabela 2:** Poti valjev,  $h = 10$  cm

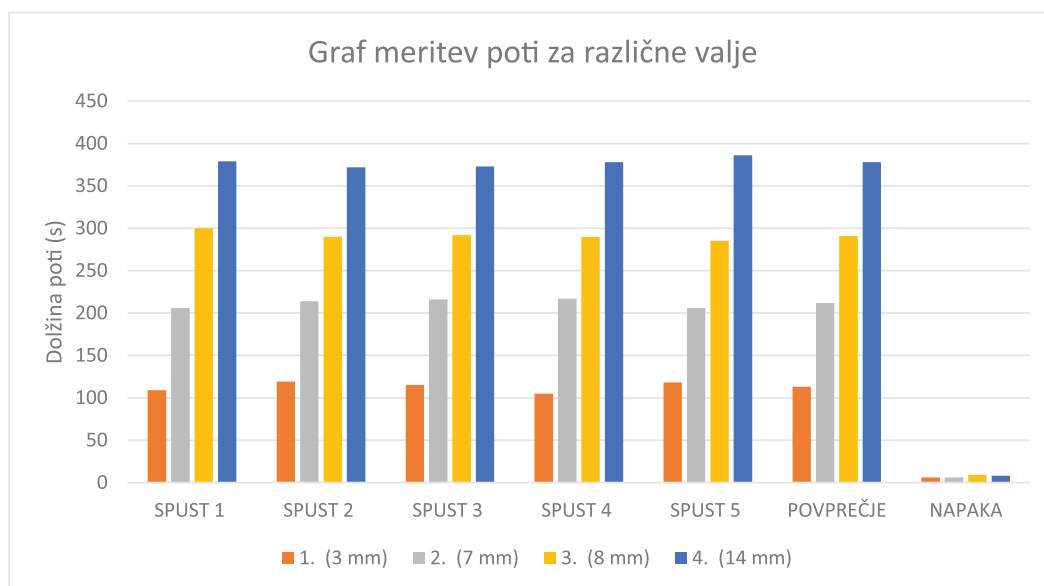
| Št. (polmer) | Pot (cm) |     |     |     |     |           | Negotovost |
|--------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----------|------------|
|              | 1        | 2   | 3   | 4   | 5   | Povprečje |            |
| 1. (3 mm)    | 147      | 136 | 137 | 147 | 163 | 146       | 17         |
| 2. (7 mm)    | 389      | 372 | 391 | 400 | 392 | 389       | 17         |
| 3. (8 mm)    | 452      | 465 | 464 | 473 | 482 | 467       | 15         |
| 4. (14 mm)   | 602      | 550 | 567 | 533 | 575 | 565       | 37         |

**Tabela 3:** Poti kroglic,  $h = 5$  cm

| Št. (polmer) | Pot (cm) |     |     |     |     |           | Negotovost |
|--------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----------|------------|
|              | 1        | 2   | 3   | 4   | 5   | Povprečje |            |
| 1. (2,5 mm)  | 279      | 284 | 259 | 286 | 302 | 282       | 23         |
| 2. (3 mm)    | 381      | 337 | 366 | 402 | 376 | 372       | 35         |
| 3. (5 mm)    | 476      | 480 | 491 | 504 | 510 | 492       | 18         |

**Tabela 4:** Poti kroglic,  $h = 10$  cm

| Št. (polmer) | Pot (cm) |      |     |      |     |           | Negotovost |
|--------------|----------|------|-----|------|-----|-----------|------------|
|              | 1        | 2    | 3   | 4    | 5   | Povprečje |            |
| 1. (2,5 mm)  | 519      | 533  | 563 | 580  | 581 | 555       | 36         |
| 2. (3 mm)    | 804      | 776  | 884 | 892  | 792 | 893       | 117        |
| 3. (5 mm)    | 1014     | 1032 | 987 | 1050 | 999 | 1016      | 34         |



Slika 5: Grafi poti za valje za  $h = 5$  cm

na 5 mm, npr. tudi zaradi nenatančne začetne lege spusta po klancu, kar nam da relativno negotovost 10 % pri manjši višini. S slike 4 levo je razvidno, da je vrhnji rob vodoravne podporne letvice nastavljen na višino 5 cm, vendar nam tudi debelina lepenke in njeno štrljenje čez rob prineseta nekaj napake pri tej višini. Vse tri omenjene relativne negotovosti seštejemo in v enačbi (5) dobimo skupno relativno negotovost desne strani okrog 25 %. Za takšen šolski poskus brez posebne merilne opreme je to sprejemljivo.

Kot smo že namignili, pa se lahko tu pojavijo tudi sistematične napake, npr. rahla nagnjenost tal. To bi bilo mogoče dodatno preveriti, če bi postavili klanec drugam, tako da bi se telesa kotalila po tleh v nasprotni smeri. Lahko pa tudi enačba (2) ne velja natančno pri vseh pogojih kotaljenja.

## Drugi del poskusov

Pri poskusih z mazanjem kroglic in njihovim spuščanjem po prelomljenem žlebu smo ugotovili naslednje. Primeren kot nagiba klanca je bil  $4^\circ$ . Mazivo za ležaje se je izkazalo neprimerno za ta poskus, saj sta se kroglici zaradi njega lepili na žleb. Poskus pa je dobro uspel z olivnim oljem, vendar je bilo treba odvečno olje odstraniti s čopičem (slika 5). Prav tako smo izvedli po pet spustov in meritev poti za vsako od obeh kroglic in za oba pogoja, nenamazano in namazano kroglico (skupaj 20 meritev). Ko kroglici nista bili namazani, sta bili povprečni poti okrog 10 cm za manjšo kroglico in 50 cm za večjo. To ni v enakem razmerju kot polmera kroglic, vendar pa tudi pogoji niso bili takšni kot prej na klancu. Zato je bil ta poskus bolj kvalitativne narave. Z oljem namazani kroglici sta se zakotalili precej dlje: manjša je naredila v povprečju pot okrog 35 cm, večja pa okrog 70 cm.

## Potek tekmovanja

Naslov raziskovalne naloge je bil »Ali velikost kotalnih elementov pogojuje trenje?«. Izvedli so jo učenci devetega razreda Matic Gorjan, Lovro Frančeškin in Matic Stibilj. Učenci so poleg zgoraj prikazanih tabel za pisno in ustno predstavitev naloge pripravili tudi ustrezne stolpčne diagrame. Primer enega od njih pri prvem delu poskusa je prikazan na sliki 6. Tako iz tabel kot iz grafov je lepo razvidno, da je relativna napaka merjenj poti pri petih meritvah dovolj majhna.

Učenci so se z nalogo ukvarjali kakšna dva meseca pred uradnim delom tekmovanj. Prvo predstavitev so imeli v Ajdovščini, drugo pa v Murski Soboti, pri obeh pa jih je spremljala tudi mentorica Mojca Milone. Tekmovanje s predstavitvijo v Ajdovščini je bilo v okviru projekta Labirint, ki ga organizira Center odličnosti COBIK v Ajdovščini, nadaljnja tekmovanja v Murski Soboti pa organizira Zveza za tehnično kulturo Slovenije (ZOTKS). Z dobro oceno naloge v tekmovanju Labirint so se učenci uvrstili na tekmovanje v Murski Soboti in tam na svojem področju (fizika in astronomija) dosegli zlato priznanje.

## 5 Sklep

Ugotovili smo, da se sila kotalnega trenja za valje in kroglice zmanjšuje s polmerom. To smo preverili z dolžino poti, ki jo kotaleče se telo naredi na vodoravni podlagi, preden se ustavi. Pomagali smo si z računom pretvorbe potencialne energije v notranjo zaradi negativnega dela sile kotalnega trenja. Izračunali smo ustrezni koeficient  $c$ , ki ima v skladu z enačbama (2) in (5) dolžinske dimenzije: okrog 0,25 mm za valje in 0,05 mm

za kroglice. Za kroglice bolje velja približna obratna sorazmernost med silo kotalnega trenja in polmerom kot za valje, verjetno zaradi eksperimentalnih pogojev. Sem lahko spadajo negotovosti meritev, nagib tal, morda rahla koničnost valjev in nesimetrično gibanje pri valjih. Pokazali smo tudi, da ustrezno mazanje kotalnih elementov zmanjša kotalno trenje.

Prvi, bolj fizikalni del naloge, bi bilo mogoče oblikovati še drugače. Na primer, če je premalo prostora za dolgo pot kotalečih se teles, se lahko nasproti prvemu klancu, s katerega telesa spustimo, postavi klanec, po katerem

se telesa povzpnejo do manjše višine v primerjavi s prvim klancem, vmes pa je točno določena vodoravna pot, dolga npr. 1 m. Zgornje enačbe je treba samo nekoliko preurediti in računati z razliko potencialnih energij pri obeh klancih. Vendar bi se tu pri valjih lahko pojavile težave, ker radi nekoliko zavijejo z ravne poti. Tedaj bi se v drugi klanec ne vzpenjali poravnano. Za kroglice bi se takšna preureditev poskusa verjetno bolje obnesla. Dalje, za kroglice lahko namesto ravne nagnjene podlage uporabimo nagnjen trikotni žleb, ki jih vedno usmeri v točno določeno smer.

## Viri

- [1] Robič, D. (2017). *Motivacija učencev v procesu vnašanja sodobnih znanstvenih dognanj v pouk fizike osnovne šole. Magistrsko delo.* Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, Maribor.
- [2] *Razvoj naravoslovnih kompetenc.* Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Maribor. Dostopno na: <http://kompetence.uni-mb.si/> (2. 2. 2024).
- [3] Minner, D. D., Levy, A. J., in Century, J. (2010). Inquiry-based science instruction – what is it and what does it matter? Results from a research synthesis years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(4), 474–496.
- [4] Repnik, R. (2012). *Uspešnost tradicionalnih učnih metod pri vnašanju sodobnih znanstvenih dognanj v osnovnošolski pouk fizike. Doktorska disertacija.* Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko, Maribor.
- [5] Repnik, R., Ambrožič, M. (2018). Practical School Experiments with the Centre of Mass of Bodies. *CEPS Journal*, 8(1), 97–116.
- [6] Milone, M., Ambrožič, M., Batagelj, O., Batagelj, A. (2018). Tehnični dan Fizika v šoli. *Fizika v šoli*, 23(2), 16–24.
- [7] Ambrožič, M., Milone, M. (2022). Pouk fizike v naravi. *Fizika v šoli*, 27(2), 52–59.
- [8] Bernad, P., Vaupotič, N., Repnik, R. (2019). Teaching the physics behind a 3D cinema through experiments supported by ICT. *Mipro 2019, 42nd International Convention*, May 20–24, 2019, Proceedings, 823–829.
- [9] Bernad, P., Šic, D., Repnik, R., Osrajnik, D. (2021). Development of Measurement Systems with the BBC Micro:bit. *Mipro 2021, 44th International Convention*, Sept. 27–Oct. 1, 2021, Proceedings 911–916.
- [10] Wikipedia, Rolling resistance. Dostopno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling\\_resistance#Physical\\_formulae](https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance#Physical_formulae) (2. 2. 2024).

# Primer obravnave tematskega sklopa po korakih formativnega spremljanja

Lidija Grubelnik

Osnovna šola Sladki Vrh

## Izvleček

V članku je predstavljen učni proces po metodah formativnega spremljanja iz poglavja »Toplota in notranja energija« v okviru štirih učnih ur. Učni proces je zajemal preverjanje predznanj, zapis namenov učenja s kriteriji uspešnosti, načrtovanje in izvedbo dejavnosti ter vrednotenje usvojenih znanj.

**Ključne besede:** toplota in notranja energija, formativno spremljanje, eksperimentalno delo

## Using Formative Assessment Steps to Address Thematic Units

### Abstract

This article presents the learning process of the formative assessment methods of the chapter "Heat and Internal Energy" in the context of four lessons. The learning process consisted of checking prior knowledge, writing learning intentions and success criteria, planning and carrying out activities, and the acquired knowledge assessment.

**Keywords:** heat and internal energy, formative assessment, experimental work.

### Uvod

V zadnjem času se na področju izobraževanja vse bolj uveljavlja pristop formativnega spremljanja pouka [1, 2], ki se osredotoča na zbiranje informacij o napredku učencev med učnim procesom. To učiteljem omogoča, da prilagodijo svoje poučevanje v realnem času in s tem pomagajo učencem pri izboljšanju razumevanja učnih vsebin. Formativno spremljanje je postalo pomembno orodje v izobraževalnem procesu, saj omogoča bolj diferencirano in prilagodljivo poučevanje ter učence spodbuja k aktivnemu sodelovanju pri lastnem učenju.

V prispevku se osredotočamo na primer formativnega spremljanja pouka pri učencih devetega razreda osnovne šole. Učni proces zajema štiri učne ure in se nanaša na vsebine o toploti in notranji energiji [3, 4, 5]. Uvodni ponovitvi znanj o temperaturi in toploti sta sledila oblikovanje namenov učenja in kriterijev uspešnosti ter eksperiment, s katerim so učenci merili količino energije, nakopičene v hrani. Učiteljica je njihovo znanje vrednotila po kriterijih uspešnosti in jim podajala povratne informacije. Temu je sledila še samoevalvacija učencev po zapisanih kriterijih uspešnosti. V sklepni fazi so izvedli analizo vrednotenja znanj. Posamezne faze učnega procesa so podrobneje opisane v nadaljevanju.



**Slika 1:** Faze formativnega spremljanja za načrtovanje učnega procesa.

## Priprava faz učnega procesa po načelih formativnega spremljanja

Načrtovanje učnega procesa zmeraj izhaja iz nabora vsebin, ciljev, priporočil in standardov znanj učnega načrta. Smiselno je tematsko načrtovanje določene vsebine, ki učitelju in učencem zagotavlja celovitejši pregled ciljev, ki jih želimo doseči. Pri tem sledimo korakom formativnega spremljanja [1], ki so prikazani na sliki 1.

Pri zapisu tematske priprave izhajamo iz operativnih in splošnih ciljev, zapisanih v učnem načrtu. Za načrtovanje tematskega sklopa Toplota in notranja energija smo izbrali naslednje cilje.

### Operativni cilji vsebinskega sklopa Toplota in notranja energija:

- učenci opišejo razliko med pojmom temperatura in toplota,
- s poskusi raziščejo zakonitosti prehajanja toplote ( $E$ ),
- razložijo odvisnost spremembe notranje energije od prehajanja toplote,
- uporabijo enačbo za računanje toplote,
- primerjajo spremembo notranje energije s prejeto ali oddano toploto.

### Splošni cilji:

- učenci načrtujejo in izvajajo preproste poskuse in raziskave,
- obdelujejo podatke, analizirajo rezultate poskusov in oblikujejo sklepe.

Učitelj na podlagi operativnih in splošnih ciljev pripravi namene učenja, ki jih kasneje, v procesu učenja, zapiše še skupaj z učenci. Glede na izbrane cilje tematskega sklopa Toplota in notranja energija so načrtovani spodaj zapisani nameni učenja.

### Nameni učenja:

- znal bom razlikovati med pojmom temperatura in toplota,
- znal bom izračunati toploto ( $Q$ ) oziroma spremembo notranje energije ( $\Delta W_n$ ),
- razumel bom prehajanje toplote med snovmi in spremembo njihove notranje energije,
- znal bom brati navodila za delo in si ustrezno pripravil pripomočke,
- izvedel bom poskus in raziskal zakonitost  $Q = \Delta W_n$ ,
- naučil se bom oceniti rezultate in negotovosti pri meritvah,
- naučil se bom varnega eksperimentalnega dela,
- teoretična znanja bom povezal z življenjskimi izkušnjami,
- znal bom analizirati rezultate in napovedati dopolnitve eksperimenta.

Nameni učenja učencem povedo, kaj se bodo učili. S tem se osmisli učenje, učenci pa postanejo aktivnejši v učnem procesu. Iz njih sledi zapis kriterijev uspešnosti. Kriteriji uspešnosti učencem povedo, katera znanja učitelj pričakuje kot dokaz učenja, in hkrati nakažejo standarde znanj. Kriteriji uspešnosti za obravnavan tematski sklop so zapisani v nadaljevanju.

### Kriteriji uspešnosti:

- ločil bom med pojmom temperatura in toplota,
- vedel bom, da toplota prehaja iz telesa z višjo temperaturo v telo z nižjo temperaturo,
- vedel bom, da je energija nakopičena v hrani in se lahko sprosti v obliki toplote,
- poznal bom obrazec za izračun  $Q$  ali  $\Delta W_n$ ,
- poznal bom pojem specifična toplota snovi in znal poiskati vrednosti v tabeli,
- znal bom izvesti eksperiment po navodilih,
- znal bom pravilno beležiti meritve količin,
- znal bom izračunati iskano količino,
- znal bom oceniti negotovost meritev,
- znal bom primerjati rezultate in sklepati o odstopanjih, razlikah,
- znal bom načrtovati podobne eksperimente.

Načrtujejo se tudi dejavnosti, s katerimi želimo doseči zastavljene cilje in kriterije uspešnosti. Za obravnavano tematiko smo izbrali eksperimentalno delo, ki ga predvideva tudi učni načrt. Kot podpora eksperimentalnemu delu in razumevanju na novo usvojenih pojmov je načrtovana dejavnost tudi reševanje delovnega lista.

### Načrtovane dejavnosti učencev:

- reševanje delovnega lista,
- praktično delo – skupinski eksperiment: energijska vrednost hrane,
- merjenje,
- vrednotenje rezultatov dela,
- opazovanje,
- samoocenjevanje.

V procesu učenja je mogoče dejavnosti in časovnico učnega procesa tudi prilagajati, kar je odvisno od doseganja kriterijev uspešnosti učencev. To ugotovimo na podlagi zbranih dokazov učencev med procesom učenja. V skupinskem eksperimentu se lahko zgodi, da posamezni učenci nezadostno sodelujejo pri sami izvedbi poskusa in samostojnem izpolnjevanju nalog na delovnih listih. Sprotna povratna informacija učencu omogoča, da znanja izpopolni. Učenci so tako vođeni skozi proces učenja in pozneje veliko bolje pripravljeni na vrednotenje svojega znanja [1, 2].

## Potek učnega procesa po posameznih učnih urah

Obravnavano poglavje Toplota in notranja energija [3] se v devetem razredu osnovne šole začne z obsežnim zapisom pričakovanih znanj učencev, ki izhajajo iz fizike, kemije in naravoslovja v nižjih razredih. Učenci že poznajo zgradbo snovi, pojma temperatura in toplota, znajo izmeriti temperaturo snovi in vedo, da toplota prehaja z mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo. Kot novo znanje v devetem razredu učenci obravnavajo Kelvinovo temperaturno lestvico in pojem specifična toplota ter izračun spremembe notranje energije snovi [3, 4, 5].

Po uvodni uri ponovitve predznanj je učiteljica skupaj z učenci oblikovala namene učenja, ki smo jih podrobneje opredelili v prejšnjem poglavju. Ključno pri tem je bilo tvorno sodelovanje med učenci in učiteljico. Nameni učenja so bili podkrepljeni s konkretnimi primeri iz vsakdanjega življenja. Nadalje je učiteljica z učenci zapisala še kriterije uspešnosti, ki so podlaga za sprotno vredno-

tenje znanja in podajanje povratne informacije. Sočasno so se učenci seznanili tudi z dejavnostmi, ki so jih načrtovali za naslednjo učno uro.

Naslednjo učno uro je sledilo izpolnjevanje delovnega lista (slika 2), katerega namen je bil učence voditi skozi postopke eksperimentalnega dela pri določitvi energijske vrednosti oreščkov. Delovni list je sestavljen iz uvodnega besedila, ki je vezano na energijsko vrednost hrane. Del učnega lista je namenjen tudi ponovitvi učne snovi o toploti in notranji energiji, temu pa sledi priprava na eksperimentalno delo.

Eksperimentalno delo je potekalo po posameznih fazah (slika 3). Učenci so pripravili vse potrebščine, navedene na učnem listu. V epruvete so natočili 20 ml ( $m = 20$  g) vode in izmerili njeno začetno temperaturo ( $T_1$ ). Nadalje so s svečo prižgali arašid in začeli z njim segrevati vodo, dokler arašid ni dogorel. Izmerili so končno temperaturo vode ( $T_2$ ) in določili spremembo notranje energije vode ( $\Delta W_n = mc\Delta T$ , pri čemer je  $c = 4200 \frac{J}{kgK}$ ). Ta sprememba notranje energije izraža delež nakopiče-

### HRANA KOT VIR ENERGIJE

#### Določanje energije, nakopičene v hrani

Človek za svoje delovanje potrebuje **energijo**, ki jo dobi s **hrano**. V hrani je nakopičena določena količina energije, ki jo naše telo s presnovo pretvori v energijo, potrebno za delovanje telesa. Mladostniki potrebujete približno **250 kJ** energije **dnevno na vsak kilogram telesne mase**.

#### Določí energijsko vrednost oreščkov

Oreščki vsebujejo veliko **maščob**, zato imajo veliko **energijsko (kalorično) vrednost**. Njihovo energijsko vrednost lahko približno določiš s preprostim poskusom.

#### Razmisli in dopolni:

Toplota ( $Q$ ), ki se sprošča med gorenjem arašida, se pretvori v \_\_\_\_\_ vode in voda se tako segreje.

Za koliko se voda segreje, je odvisno od prejete \_\_\_\_\_ in mase vode ( $m$ ), ki se segreva.

Da 1 kg vode segrejemo za 1 °C, potrebujemo \_\_\_\_\_ toplote.

Zapiši enačbo, po kateri lahko izračunaš **spremo notranje energije** vode:

#### Potrebščine:

- več enakih arašidov,
- sveča,
- stojalo,
- epruveta,
- prijemalka za epruveto,
- voda,
- termometer,
- tehnika.

#### Postopek dela:

- V epruveto nalij 20 ml vode in **izmeri njeno temperaturo** ( $T_1$ ).
- Na stojalo postavi arašid in pod njim prižgi svečo. Počakaj, da arašid zagori, in svečo umakni.
- S prijemalko drži epruveto z vodo nad gorečim arašidom, da ta dogori.
- S termometrom izmeri **končno temperaturo** vode ( $T_2$ ) v epruveti.

#### Zapis meritev:

Določi količino toplote, ki jo je prejela voda v epruveti.

Kolikšna je sprememba notranje energije enega arašida? \_\_\_\_\_

Določi količino energije, ki se sprosti pri sežigu 100 g arašidov.

Primerjaj energijsko vrednost 100 g arašidov z deklaracije in izračunano oddano toploto pri sežigu enake količine arašidov. Zapiši ugotovitev.

Ugotovitev:

#### Izziv 1:

Kolikokrat moramo dvigniti enokilogramsko utež za 1 m, da bo opravljeno delo enako energiji, ki se sprosti pri presnovi enega arašida?

#### Izziv 2:

S pomočjo izračuna oceni, koliko arašidov bi moral pojesti na dan, da bi zadostil dnevnim porabi energije mladostnika.

Slika 2: Delovni list, ki je dostopen tudi na spletni strani [www.zrss.si](http://www.zrss.si) – strokovne revije – Fizika v šoli – spletne vsebine.





**Slika 3:** Gorenje arašida in določanje prejete toplote z merjenjem temperature vode.

ne energije enega arašida, ki jo med sežigom v obliki toplote odda vodi. Dobljeno vrednost so učenci preračunali na 100 g arašidov. Pri izračunu so primerjali energijski delež, ki se sprosti pri sežigu 100 g arašidov, z energijsko vrednostjo, ki je zapisana na deklaraciji embalaže. Primerjava energijskih vrednosti je bila osnova za razmislek o energijskih izgubah zaradi nepopolnega zgorevanja in segrevanja okolice.

Med eksperimentom je učiteljica po zapisanih kriterijih uspešnosti v pogovoru z učenci vrednotila njihovo znanje in jim sproti ustno podajala povratno informacijo. Sprotna povratna informacija je poleg kriterijev uspešnosti najpomembnejša faza formativnega spremljanja. Učenci tako lahko sproti odpravljajo napake.

Zadnjo učno uro načrtovanega učnega procesa so se učenci samovrednotili po zapisanih kriterijih, učiteljica pa jim je nato podala povratno informacijo o celotnem učnem procesu. Samovrednotenje in vrednotenje sta potekala ustno v pogovoru med učiteljico in posameznim učencem.

Učiteljica je v predstavljenem primeru ugotovila, da so nekateri učenci neustrezno zapisali meritve, in sicer brez merskih oznak in enot. Nekaj napak se je pojavilo tudi pri pretvarjanju enot in posledično pri izračunu iskane količine. Spremembo temperature vode v  $^{\circ}\text{C}$  so nekateri učenci nepravilno pretvarjali v spremembo temperature v kelvinih. Namesto da bi ohranili razliko merskih vre-

dnosti, so izračunani razliki v  $^{\circ}\text{C}$  prišteli 273 K. Smiselno so učenci razmislili o toplotnih izgubah med eksperimentom in sklepali o razlikah med energijsko vrednostjo arašidov, zapisano na deklaraciji izdelka, in izračunano spremembo notranje energije. Uspešnejši učenci so načrtovali tudi nove eksperimente in pridobljena znanja povezali še z znanji iz biologije.

## Zaključek

Predstavili smo učni proces po metodah formativnega spremljanja iz poglavja Toplota in notranja energija. Učni proces je bil zasnovan na štirih učnih urah in je zajemal preverjanje predznanj, zapis namenov učenja in kriterijev uspešnosti, načrtovanje in izvedbo dejavnosti ter vrednotenje usvojenih znanj. Izkazalo se je, da so učenci motivirani za takšno delo. Zaradi sprotne preverjanja kriterijev uspešnosti učenci v okviru skupinskega eksperimentalnega dela tudi samostojneje rešujejo zastavljene naloge. Uspešnejši učenci načrtujejo nove eksperimente in medpredmetno povezujejo pridobljena znanja. Pokazala so se tudi določena pomanjkljiva znanja učencev. Napake so se pojavljale pri zapisu meritev, pretvarjanju enot in posledično izračunu iskane količine.

Načrtovanje tematskih sklopov po vzoru predstavljenega učnega sklopa lahko načrtujemo pri vseh učnih vsebinah. Ključno je, da s procesom formativnega spremljanja učencem bolj osmislimo učenje za izboljšanje njihovega znanja.

## Viri

- [1] Holcar Brunauer, A. idr. (2016). *Formativno spremljanje v podporo učenju. Priročnik za učitelje in strokovne delavce*. Ljubljana: ZRSŠ.
- [2] *Formative and Summative Assessments*  
<https://poorvucenter.yale.edu/Formative-Summative-Assessments> (8. 1. 2024).
- [3] *Digitalizirani učni načrti*  
<https://dun.zrss.augmentech.si/#/> (8. 1. 2024).
- [4] *eTorba*  
<https://etorba.sio.si/etorba/sl/epubs-search> (8. 1. 2024).
- [5] Beznec, B. idr. (2013). *Moja prva fizika 2. Učbenik za 9. razred osnovne šole*. Ljubljana: Modrijan.

# Izstreljevanje namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa

Jure Šantej<sup>1</sup>, Tjaš Esih<sup>1</sup>, Alen Labohar<sup>1</sup>, Mitja Suvajac<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gimnazija Celje – Center

<sup>2</sup> Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za fiziko

## Izvleček

V prispevku predstavimo raziskavo izstreljevanja namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa, ki je letošnji fizikalni problem na Turnirju mladih fizikov (YPT). Cilj tega fizikalnega problema je optimizirati mehanizem izstrelitve za doseg največje končne višine. V prispevku je razloženo, kako kapilarne sile vplivajo na izstrelitev žogice in kakšna je sestava eksperimentalnega okolja. Pri poskusu smo nadgradili svoje tehnike merjenja in analize podatkov z računalniškim programom Tracker. Rezultati eksperimenta so pokazali, da bo žogica dosegla največjo višino v posodi s srednjim premerom, ki jo bomo izpustili z najvišje začetne lege.

**Ključne besede:** YPT, vodni top, kapilarne sile, eksperiment, fizika

## Ping Pong Ball Water Cannon Launcher

### Abstract

The paper introduces a problem investigation of launching a ping pong ball using a water cannon, which is this year's problem at YPT. The objective is to optimise the launching mechanism to achieve the maximum final height. We explain how capillary forces affect the ball launch and the composition of the experimental environment. In the process, we enhanced our measuring and data analysis techniques using the Tracker computer programme. The results show that the ball will reach its maximum height in a medium-diameter container released from the highest launch position.

**Keywords:** YPT, water cannon, capillary forces, experiment, physics.

## 1 Uvod

Pri pripravi na Turnir mladih fizikov (angl. *Young Physicists' Tournament – YPT*) smo se srečali tudi s problemom izstreljevanja namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa. YPT je tekmovanje, na katerem srednješolci tekmujejo v proučevanju, predstavitvi in preverjanju rezultatov vnaprej izbranih fizikalnih problemov [1].

Za tekmovanje se odločimo vsako leto, saj je eno izmed redkih v Sloveniji, ki nam omogoča tako eksperimentalno kot tudi teoretično raziskovanje na področju fizike. V letih smo razvili številne spretnosti na področju fizike, med drugimi smo usvojili tudi osnove programiranja, logičnega sklepanja, računalniškega modeliranja in merjenja. Ob vsem tem smo svoje znanje nadgradili tudi na področju hidrodinamike, kvantne fizike, mehanike, akustike, elektrike in magnetizma. Ker gre pogosto za realne in kompleksne fizikalne probleme, se področja marsikdaj tudi prepletajo, zato smo usvojili tudi znanje povezovanja različnih fizikalnih smeri.

Izmed sedemnajstih fizikalnih problemov, ki jih je za leto 2024 razpisal YPT, smo si med drugimi za problem izbrali tudi problem številka 5, ki se nanaša na izstrelitev namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa [2]. Vodni top sestavlja žogica v posodi, napolnjeni z vodo, ki jo izpustimo z začetne višine. Ko posoda trči ob tla, izstrelimo namiznoteniško žogico v zrak. Za proučevanje tega problema smo se odločili zato, ker smo bili v preteklih letih že dejavni na področju hidrodinamike, med drugim smo se ukvarjali tudi z Marangonijevim pojavom [3] in fraktali v viskoznih tekočinah [4]. Problem nas je navdihnil tudi zaradi povezave med mehaniko in hidrodinamiko, ki pa je do zdaj še nismo obravnavali. Podoben problem je bil proučevan že na Turnirju fizikov (angl. *Physicists' Tournament – PT*) leta 2020, kjer je bil poudarek na samem mehanizmu pred izstrelitvijo. Mi pa smo se v okviru priprav na YPT usmerili na področje optimizacije celotnega sistema, da bo žogica dosegla največjo višino po izstrelitvi. Pri tem smo se osredotočili na parametra, ki zadevata višino začetne lege vodnega topa

in premer posode. Menimo, da bo žogica dosegla največjo višino pri najvišji začetni legi in pri posodi s srednjim premerom.

## 2 Teoretični model

Za lažje razumevanje in optimizacijo samega problema smo se najprej odločili, da bomo svoj problem teoretično razdelili na štiri faze. To so faza mirovanja (angl. *rest phase*), padanja (angl. *falling phase*), trka (angl. *collision phase*) in izstrelitve (angl. *jet phase*). Razdelitev kompleksnega problema nam je omogočila lažje razumevanje posamezne faze in s tem vpliva na samo izstrelitev, kar nam je pomagalo pri izoblikovanju teoretične napovedi izstrelitve žogice. Teoretična napoved ima pomanjkljivost, saj ne upošteva premera posode, ki vpliva na lego žogice v vodnem topu.



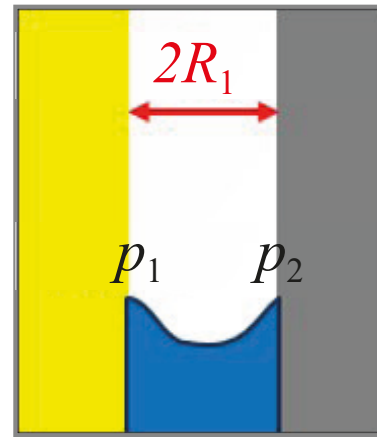
Slika 1: Vodni top, ki je sestavljen iz žogice v posodi z vodo.

### 2.1 Faza mirovanja

Faza mirovanja opisuje stanje žogice v posodi pred fazo padanja. V njej se žogica opazno premakne k steni. Ta pojav je posledica razlike med tlakoma na vodni površini, ki ju ustvarjata sama žogica in zrak. Ker gre hkrati za soodvisnost krivinskega radija, razlike v tlakih in površinske napetosti, smo za obrazložitev problema uporabili Young-Laplaceovo enačbo. Za svoj sistem smo izpeljali

$$\gamma = (p_1 - p_2)R_1, \quad (1)$$

kjer je  $\gamma$  površinska napetost vode,  $p_1$  tlak, ki ga ustvarja sila žogice na površino vode,  $p_2$  zračni tlak in  $R_1$  krivinski radij med steno in žogico. Ker je  $p_1$  večji od  $p_2$ , se ustvari gradient, ki kaže od območja z višjim tlakom na območje z nižjim. Zato se žogica premakne proti steni.



Slika 2: Shema vpliva tlakov na vodo. Rumeni pravokotnik prikazuje namiznoteniško žogico.  $p_1$  je tlak, ki ga ustvarja sila žogice na površino vode. Sivi pravokotnik prikazuje steno posode, vmesno modro polje pa vodo.  $p_2$  predstavlja zračni tlak tik nad površino vode.  $R_1$  prikazuje krivinski radij površine vode med žogico in steno posode.

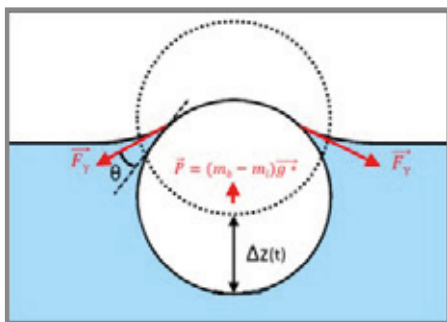
### 2.2 Faza padanja

Faza padanja opisuje stanje žogice med padanjem vodnega topa z žogico v njem do trenutka, ko vodni top udari ob tla. Situacijo opišemo v pospešenem koordinatnem sistemu, v katerem padajoča cev miruje. Če za opis sil na žogico v posodi med padanjem uporabimo drugi Newtonov zakon, ugotovimo, da se žogica med padanjem začne rahlo potapljati zaradi površinske napetosti vode, ki privede do kapilarnega delovanja. Kapilarno delovanje je pojav tekočine, ki teče v ozkem prostoru v nasprotju z zunanji silami, kot je gravitacija, ali vsaj brez njihove pomoči [5]. Za svoj sistem, v katerem je pozitivna smer usmerjena v smer padanja, smo ugotovili, da je rezultanta vseh zunanjih sil na žogico

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_g + \vec{F}_s + \vec{F}_\mu + \vec{F}_\gamma, \quad (2)$$

kjer je  $\vec{F}_g$  sila teže žogice,  $\vec{F}_s$  sistemska sila na žogico [6],  $\vec{F}_\mu$  sila zaradi viskoznosti in  $\vec{F}_\gamma$  sila zaradi površinske napetosti na žogico. V primeru prosto padajoče cevi, v kateri je žogica zunanji (inercialni) opazovalec, ugotovimo, da na cev in žogico deluje sila teže, zato se gibljeta pospešeno s težnim pospeškom. V opazovanem sistemu, ki je zvezan s cevjo, pa moramo poleg »pravih« sil upoštevati tudi sistemsko silo, ki ravno kompenzira silo teže [6], posledično dobimo navidežno breztežnostno stanje žogice, kjer velja, da je  $\vec{F}_g + \vec{F}_s = 0$ , saj žogica v takem koordinatnem sistemu miruje. Med padanjem torej na žogico delujeta le  $\vec{F}_\gamma$  in  $\vec{F}_\mu$ , pri čemer je  $\vec{F}_\mu$  zaviralna sila.  $\vec{F}_\mu$  deluje podobno kot sila trenja pri trenju med gibajočimi trdnimi snovmi in pretvarja kinetično energijo v notranjo energijo [7].  $\vec{F}_\mu$  zavira samo potapljanje žogice zaradi močne strižne napetosti, ki ji nasprotuje potapljanje žogice.  $\vec{F}_\gamma$  je sila zaradi površinske napetosti

in teži k stanju, pri katerem imajo tekočine v mirovanju najmanjšo mogočo površino [8].  $\vec{F}_\gamma$  omogoči začetek potapljanja žogice, saj se zaradi nje gladina vode, ki omoči steno žogice, ob robu žogice zakrivi navzgor in se dvigne (kapilarni dvig). Kapilarnost je pojav, ki nastane zaradi površinske napetosti na površini vode. Kapljevina omoči steno posode, če je mejni kot, tj. kot med tangento na gladino vode in žogico, med  $0$  in  $90^\circ$  [9]. V našem primeru je mejni kot  $\theta$  enak  $50,6^\circ$ . Žogica doseže končno globino v vodi zaradi kapilarnega delovanja, ko se vzpostavi ravnovesje sil med  $\vec{F}_\gamma$  in  $\vec{F}_\mu$ . Globina žogice postane pomembna v fazi trka, saj se pri trku začne žogica v izbranem koordinatnem sistemu premikati pospešeno (rezultanta sil ni več enaka  $0$ ). Ker se žogica med padanjem deloma potopi, ob trku nanjo deluje večja sila vzgona kot na gladini.



**Slika 3:** Model vpliva sil na žogico v posodi.  $\theta$  je mejni kot med vodno površino in žogico,  $\Delta z$  predstavlja spremembo pozicije iz mirovanja (črtan krog) in pozicijo žogice med fazo padanja (neprekinjen krog),  $\vec{P}$  je sila vzgona na žogico in  $\vec{F}_\gamma$  sila zaradi površinske napetosti. Povzeto po [10].

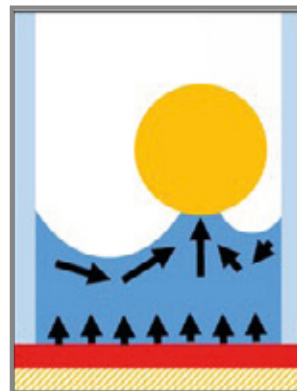
### 2.3 Faza trka

Faza trka opisuje dogajanje z žogico, ko posoda trči ob tla. Takrat se zaradi sunka sile tal na sistem celotnemu sistemu spremeni gibalna količina ( $\Delta \vec{G} = \vec{F} \Delta t$ ). Trk traja le nekaj desetink sekunde, zato na sistem deluje velika sila tal, ki v primeru, da je dno posode poravnano s tlemi, kaže v smer navpično navzgor. V isto smer kaže tudi rezultanta sil na žogico, posledično pa tudi pospešek  $\vec{a}$ , ki je mnogo večji od  $\vec{g}$ , zato se sistem začne premikati navzgor. Če v tej fazi uporabimo za žogico drugi Newtonov zakon, dobimo

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a} = \vec{F}_\mu + \vec{F}_\gamma + \vec{F}_g + \vec{P} + \vec{F}_c, \quad (3)$$

kjer je  $\vec{F}_\mu$  sila zaradi viskoznosti,  $\vec{F}_\gamma$  sila zaradi površinske napetosti,  $\vec{F}_g$  sila teže žogice,  $\vec{P}$  sila vzgona in  $\vec{F}_c$  sila vodnega curka [11]. V tej fazi postaneta  $\vec{F}_\gamma$  in  $\vec{F}_\mu$  zaviralni sili.  $\vec{F}_\mu$  zavira gibanje žogice med dviganjem skozi vodo,  $\vec{F}_\gamma$  pa ga zavira v trenutku, ko želi žogica prebiti površino vode. Torej žogico v navpični smeri pospešujeta  $\vec{P}$  in  $\vec{F}_c$ .  $\vec{P}$  pospeši žogico zaradi  $\vec{a}$  in njene potopitve v vodo ( $\Delta z$ ).

$\vec{F}_c$  še dodatno pripomore žogici pri izstrelitvi navzgor, saj se zaradi cilindrične oblike posode vsi tokovi, ki nastanejo ob trku, zaradi razlik v tlakih usmerijo proti sredini posode. Ker se žogica že v fazi mirovanja zaradi površinske napetosti odmakne od sredine, je učinek curka manjši, kar je eden od razlogov za odstopanje eksperimentalno pridobljenih rezultatov od teoretične napovedi.



**Slika 4:** Model žogice tik pred izstrelitvijo. Na njem so vidne tokovnice, ki prikazujejo tokove, ki nastanejo ob trku sistema s tlemi. Povzeto po [12].

### 2.4 Faza izstrelitve

Faza izstrelitve opisuje gibanje žogice po izstrelitvi iz vode. Ko se žogica loči od vode, pridobi začetno kinetično energijo  $W_k$  kot posledico delovanja rezultante sil (3) na žogico. Za premikajočo se žogico v zraku velja izrek o kinetični in potencialni energiji

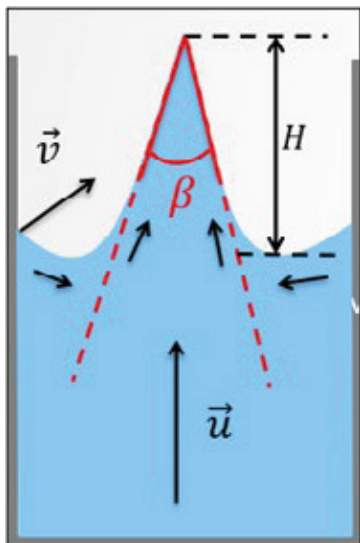
$$\Delta W_k + \Delta W_p = A, \quad (4)$$

kjer je  $\Delta W_k$  sprememba kinetične energije žogice,  $A$  delo vseh zunanjih sil na žogico, razen sile teže, in  $\Delta W_p$  sprememba potencialne energije žogice. Zunanja sila je sila zračnega upora ( $\vec{F}_u$ ) na žogico, ki deluje v nasprotni smeri gibanja žogice. Žogica tako doseže najvišjo lego, ko njena kinetična energija pade na nič.

### 2.5 Teoretična napoved

Na podlagi posameznih faz smo izoblikovali svojo teoretično napoved, ki pa ima pomanjkljivost, saj pri njej nismo upoštevali samega premera posode. Pri teoretični napovedi izstrelitve smo privzeli, da se vodni curek, vrh katerega je žogica, izoblikuje v obliko stožca. Na podlagi rezultatov, ki so jih dobili ruski študentje, ugotovimo, da sta končna višina žogice ( $h$ ) in začetna višina sistema ( $h_0$ ) povezani prek izstrelitvenega koeficienta ( $k$ ). Ta pa je znotraj stožca definiran kot  $\sqrt{k} = \cot \frac{\beta}{2}$ , kjer je  $\beta$  kot ob vrhu stožca.  $k$  ob poenostavitvi povezuje hitrost pretoka vode ( $\vec{u}$ ) in vodoravno komponento hitrosti vode na gladini ( $\vec{v}_x$ ) prek Pitagorovega izreka. Za izračun  $h$  so privzeli, da je hitrost žogice, ko zapusti sistem, enaka  $\vec{u}$ .

Na podlagi tega sklepa so za določitev  $h$  vpeljali enačbo,  $h = \frac{u^2}{2g}$ . Od tod sledi enačba  $k = (\cot \frac{\beta}{2})^2 = (\frac{u}{v_x})^2$  [12], iz katere smo lahko izračunali, da je pri naših pogojih  $k$  enak vrednosti 3.69.



**Slika 5:** Model izstrelitvenega curka v obliki stožca, kjer je  $H$  višina stožca,  $\vec{u}$  hitrost vodnega toka,  $\vec{v}$  vodoravna komponenta hitrosti vode na gladini in  $\beta$  kot ob vrhu stožca.

Pri napovedi smo upoštevali tudi globino, ki jo žogica pridobi zaradi kapilarnega delovanja, ki smo jo v končno napoved vpeljali prek enačbe, ki so jo ruski študentje pridobili eksperimentalno,  $d = d_{\max}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ , kjer je  $d$  globina potopljene žogice,  $d_{\max}$  maksimalna mogoča globina potopitve,  $t$  čas padanja in  $\tau$  časovni parameter, ki je bil na podlagi meritev določen na vrednost 0,25 s [12]. Iz dane enačbe smo izpeljali  $t$ , ki smo ga vstavili v enačbo  $t = \sqrt{\frac{2h_0}{g}}$ . Iz te povezave smo nato izpeljali enačbo

$$h_0 = \frac{g\tau^2 \left( \ln \left( 1 - \frac{d}{d_{\max}} \right) \right)^2}{2}, \quad (5)$$

iz katere smo nato ob vpeljavi zgoraj ugotovljene povezave  $h = kh_0$  izpeljali, da velja

$$h = \frac{kg\tau^2 \left( \ln \left( 1 - \frac{d}{d_{\max}} \right) \right)^2}{2}. \quad (6)$$

### 3 Eksperiment

Eksperiment smo želeli zastaviti tako, da bo mogoče proučiti čim več parametrov. Tako smo svoje eksperimentalno orodje razdelili v dve skupini, na eksperimentalno opremo in merilno opremo. Za eksperimentalno opremo se upošteva vsa oprema, ki smo jo uporabili za izvedbo eksperimenta. Za merilno opremo se upošteva vsa oprema, ki smo jo uporabili pri opravljanju meritev danega eksperimenta in za analizo izmerjenih podatkov.

#### 3.1 Eksperimentalna oprema

Kot dele eksperimentalne opreme smo uporabili leseno ploščo, lesene palice, laser, namiznoteniško žogico in posode različnih premerov. Iz lesene plošče, lesenih palic in laserja smo postavili osnovno eksperimentalno ploščad, na kateri smo izvajali eksperimente. Za oblikovanje eksperimentalne ploščadi z leseno ploščo na dnu smo se odločili, ker smo s tem zagotovili isti koeficient prožnosti materiala ob vsakem trku. Lesene palice so nam služile kot merilne skale za odčitavanje začetne višine. Ker pa je na trenutke zaradi oddaljenosti palic nastala težava pri odčitavanju, smo na palico namestili še premični laser, ki je izboljšal odčitavanje začetne višine.

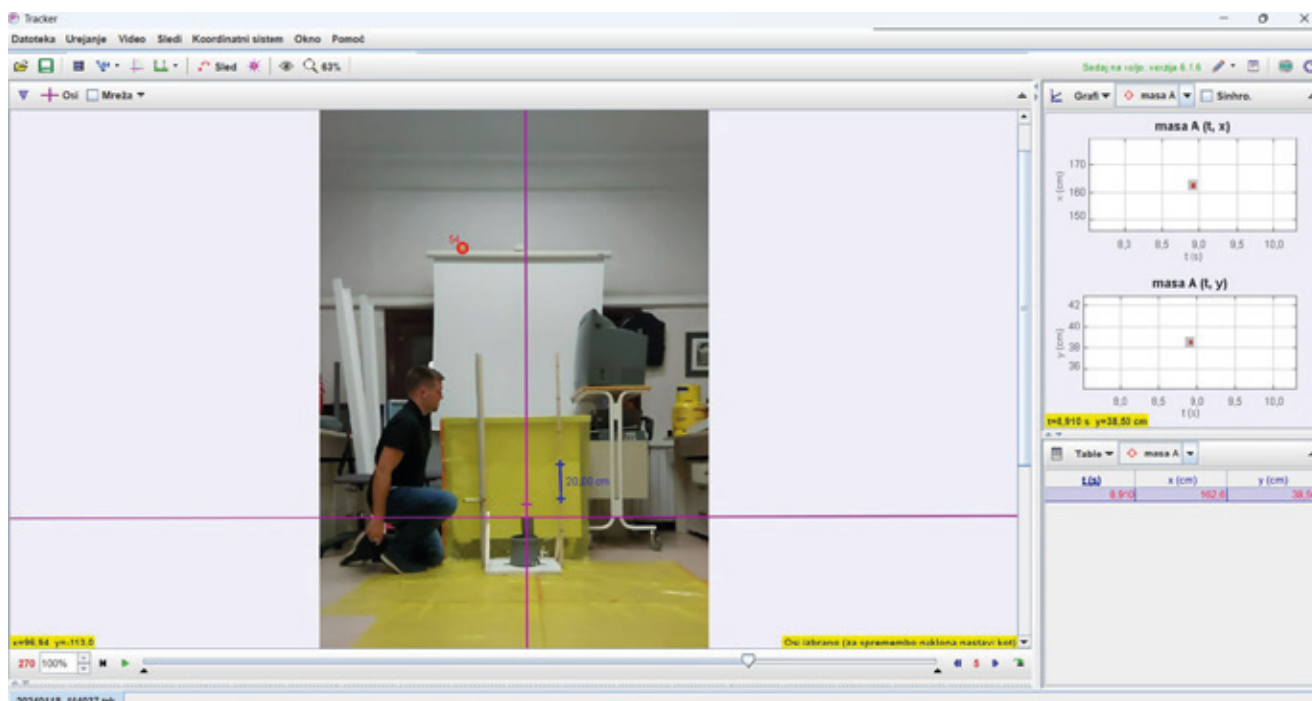
Pri vseh ponovitvah eksperimenta smo uporabili isto namiznoteniško žogico, saj smo s tem zagotovili enak mejni kot med površino žogice in gladino vode. Z uporabo iste namiznoteniške žogice smo zagotovili tudi enako maso žogice, 2,8 g, enak premer žogice, 4,2 cm, enak volumen žogice, 37,2 cm<sup>3</sup>, in s tem tudi enako gostoto žogice, 0,075  $\frac{g}{cm^3}$ . Vse štiri količine imajo neposredno ali posredno vlogo pri izstrelitvi. Z različnimi premeri posod z istimi prostorninami vode smo želeli eksperimentalno raziskati, ali premer posode vpliva na samo izstrelitev žogice. V ta namen smo uporabili tri posode z različnimi premeri: 5,0; 7,6 in 11,6 cm.



**Slika 6:** Eksperimentalna ploščad z leseno osnovno ploščo, lesene palice z merilno skalo in premični laser za lažje odčitavanje višine.

#### 3.2 Merilna oprema

Kot dele merilne opreme smo uporabili visokohitrostno kamero, kljunasto merilo, tehtnico, merilno posodo s skalo 0,5 l ter programa Tracker in Excel. Visokohitrostno kamero smo uporabili za natančno snemanje izstrelitve žogice, saj smo tako lažje opazovali njeno gibanje. Kamero smo stacionirali 2,5 m od same eksperimentalne ploščadi, saj smo s tem povečali snemalni prostor, hkrati pa se izognili tudi morebitni paralaksi. Kakovostni in natančni posnetki so nam nato omogočili lažjo obdelavo



Slika 7: Proučevanje končnih višin žogice s pomočjo programa Tracker.

podatkov s pomočjo programa Tracker. Kljunasto merilo smo uporabili pri meritvi premera posod in žogice. Za merjenje lastnosti žogice smo tako uporabili tudi tehtnico. S pomočjo merilne posode s skalo 0,5 l smo lažje odmerjali količino vode v posodo. S tem smo zagotovili večjo ponovljivost eksperimenta, saj smo lahko pri vsaki ponovitvi uporabili enako količino vode. Programa Tracker in Excel sta nam nato služila pri obdelavi posnetkov. S pomočjo programa Tracker smo določili končne višine žogice v ustreznem merilu. Te podatke smo nato vnesli v program Excel, v katerem smo potem izrisali grafe glede na pridobljene podatke.

### 3.3 Neodvisne in odvisne spremenljivke

Na podlagi teoretičnih napovedi, postavitve eksperimentalnega okolja in ideje fizikalnega problema smo se odločili, da si za začetek izberemo dve neodvisni spremenljivki in eno ključno odvisno spremenljivko. Za neodvisni spremenljivki smo pri eni vrsti eksperimenta določili začetno višino posode, pri drugi pa premer posode. Pri eksperimentu, kjer smo spreminjali začetno višino, sta bila pri vseh ponovitvah eksperimenta premer posode in količina vode v njej enaka. Pri eksperimentu, kjer smo spreminjali premer posode, pa sta bili količina vode v posodi in začetna višina posode, s katere smo jo spustili, konstantni. Odvisna spremenljivka je bila pri obeh eksperimentih končna višina žogice, saj je naš osnovni cilj le-to optimizirati.

## 4 Rezultati

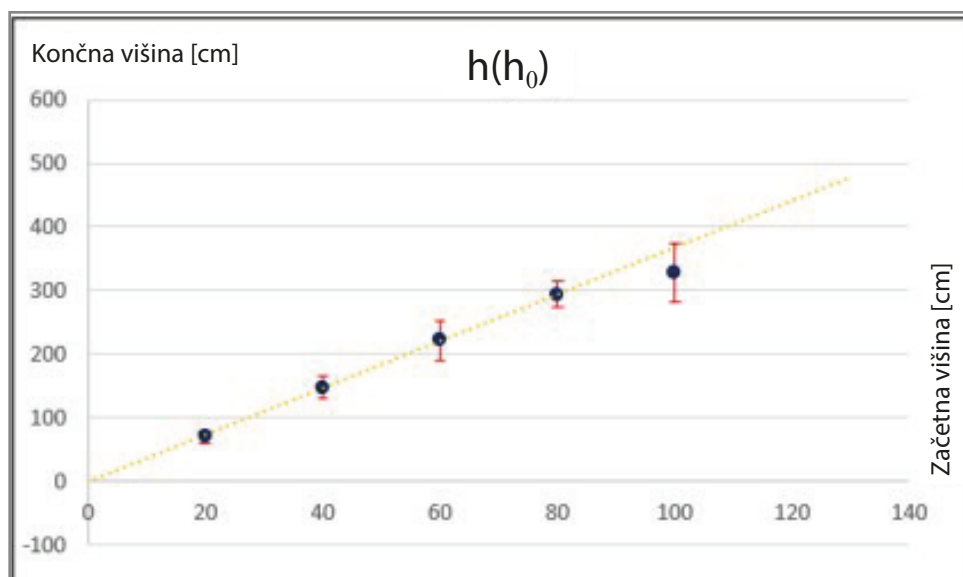
Najprej bomo predstavili rezultate, ki smo jih pridobili s spuščanjem vodnega topa z različnih začetnih višin pri konstantnem volumnu vode 1 l in pri stalnem premeru posode 7,6 cm. Za začetne višine posode smo v danem eksperimentu vzeli višine 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm in 100 cm. Vsako meritev smo ponovili desetkrat, saj smo s tem zagotovili večjo natančnost meritve. Spodnji graf (Slika 8) prikazuje rezultate eksperimenta v primerjavi s teoretično napovedjo končne višine.

Z grafa je mogoče razbrati, da se z večanjem začetne višine sistema večja tudi vrednost končne višine žogice. Vendar se pri večjih začetnih višinah končne višine začnejo razlikovati od naše teoretične napovedi. Razlog za to je najverjetneje neupoštevanje premera posode pri teoretični napovedi končne višine. Od tod lahko sklepamo, da je naša teoretična napoved za končno višino uporabna le do začetne višine 100 cm, saj ima pri tej in vseh večjih začetnih višinah premer posoda že prevelik vpliv na končno višino žogice, da bi jo lahko z uporabo naše teoretične napovedi natančno določili. Premer posode vpliva na pozicijo žogice pred izstrelitvijo, saj se zaradi povečanja krivinskega radija med žogico in steno poveča tudi gradient, ki povzroči, da se žogica odmakne od centralne lege. Posledično tudi  $\vec{F}_c$  manj vpliva na samo žogico, saj curek nastane v sredini, žogica pa je od sredine odmaknjena. Rezultati grafa so torej potrdili naše predvidevanje, da bo žogica dosegla najvišjo končno lego pri najvišji začetni legi, vendar pa je postalo razvidno, da je naš model pomanjkljiv, saj ne vključuje premera posode.

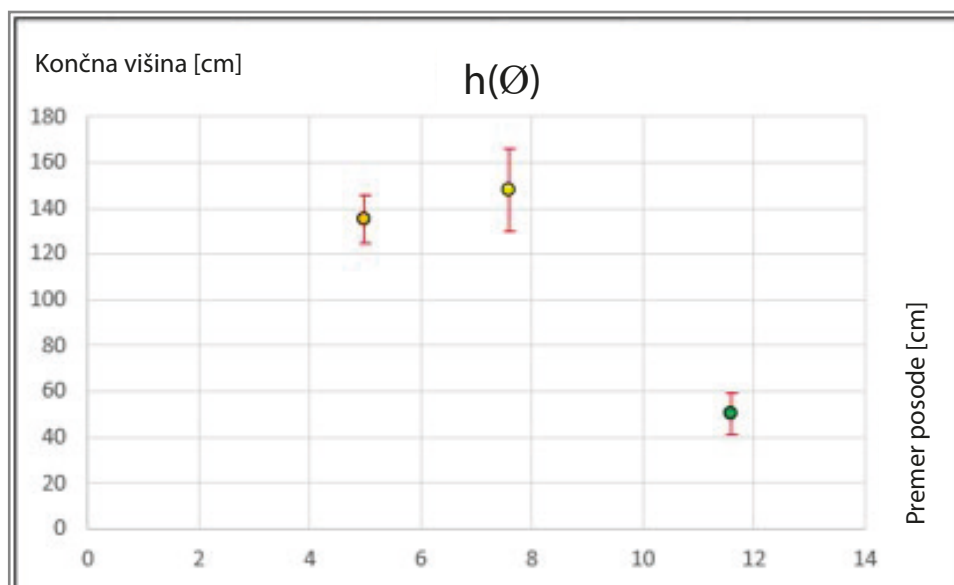
Nadaljujemo s predstavitvijo rezultatov, ki smo jih pridobili s spuščanjem posod z različnimi premeri z enake začetne višine sistema 40 cm in pri enaki prostornini vode 1 l. Pri eksperimentu smo uporabili tri posode različnih premerov: 5,0, 7,6 in 11,6 cm. Vsako meritev smo ponovili desetkrat, saj smo s tem povečali njeno natančnost.

Spodnji graf (Slika 9) prikazuje rezultate našega eksperimenta brez primerjave teoretične napovedi, saj samega premera posode v napovedi nismo upoštevali.

Z grafa je mogoče razbrati, da bomo največjo končno višino dosegli pri posodi s srednjim premerom, najmanjšo končno višino pa pri posodi z največjim premerom. Pri posodi z najmanjšim premerom bomo dosegli vmesno končno višino, kar ovrže naše predvidevanje, da bomo največjo končno višino dosegli pri posodi z najmanjšim premerom. Razlog za to je najverjetneje to, da sta premer žogice in premer posode primerljiva (premer žogice je 4,2 cm, premer posode je 5,0 cm), kar onemogoči učinek kapilarnega delovanja in privede do manjše globine.



**Slika 8:** Graf končne višine žogice v odvisnosti od začetne višine sistema. Z modrimi točkami so predstavljene povprečne vrednosti za posamezno začetno višino. Rdeče črte čez modre točke predstavljajo absolutno mersko napako za posamezno povprečno vrednost meritve. Rumena črtkana črta prikazuje teoretično napoved meritve v zgoraj opisanih eksperimentalnih pogojih.



**Slika 9:** Graf končne višine žogice v odvisnosti od premera posode pri enaki začetni višini 40 cm. Z oranžno točko je označena povprečna končna višina za posodo s premerom 5,0 cm, z rumeno točko je označena povprečna končna višina za posodo s premerom 7,6 cm, z zeleno točko pa je označena povprečna končna višina za posodo s premerom 11,6 cm. Rdeče črte na posamezni točki predstavljajo absolutno mersko napako za posamezno povprečno vrednost.

Zato na žogico deluje manjša sila vzgona kot pri posodi s premerom 7,6 cm. Pri posodi z največjim premerom žogica doseže najmanjšo končno višino, kar je najverjetneje posledica prevelikega premera posode, zaradi katerega se žogica odmakne od središča posode. Posledično na žogico deluje tudi manjša sila curka, zato žogica doseže tudi manjšo končno višino.

Rezultati eksperimentov so torej pokazali, da bo žogica dosegla največjo končno višino v situaciji, ko bomo žogico izstrelili s pomočjo srednje posode, 7,6 cm, pri največji začetni višini sistema, v našem primeru z višine 100 cm.

## 5 Zaključek

V članku smo na začetku na kratko predstavili zgodovino tekmovanja YPT v Sloveniji, ki se ga udeležujemo vsako leto [1]. V krajšem razmisleku smo nato predstavili tudi nekaj fizikalnih spretnosti in veščin, ki smo jih pridobili z leti. Nato smo začeli analizirati problem izstrelitve namiznoteniške žogice s pomočjo vodnega topa, ki smo si ga letos izbrali za enega izmed fizikalnih problemov za YPT.

V nadaljevanju smo teoretično razdelili fizikalni problem na posamezne faze. Razložili smo, kako se v prvi fazi žogica zaradi površinske napetosti približa steni. Razložili smo, zakaj se v drugi fazi začne žogica potapljati in kako to vpliva na izstrelitev v tretji fazi. Razložili smo, kako udarec ob tla v tretji fazi ustvari vodni curek in kako ta pripomore pri sami izstrelitvi žogice. Razložili pa smo tudi, kdaj žogica v zadnji fazi doseže končno višino. Po predstavitev posameznih faz smo predstavili svojo teoretično napoved končne višine in svoje

eksperimentalno orodje. Pri eksperimentalni opremi bi izpostavili leseno dno, saj smo s tem v eksperimentu zagotovili enak prožnostni koeficient trka v vseh ponovitvah poskusa. Pri merilni opremi pa bi posebej omenili računalniški program Tracker, ki nam je omogočil lažjo obdelavo meritev. Določili smo tudi neodvisni spremenljivki, ki sta bili pri našem eksperimentu začetna višina sistema in premer posode, in odvisno spremenljivko, ki je bila v vseh izvedbah končna višina žogice. Na koncu smo predstavili še rezultate svojega eksperimenta. Najprej tistega, pri katerem smo spreminjali začetno višino in kjer so rezultati pokazali, da bo žogica dosegla največjo končno višino pri največji začetni višini sistema, kar se ujema z našo predpostavko. Nato pa smo predstavili še rezultate eksperimenta, pri katerem smo spreminjali premer posode, kjer so rezultati pokazali, da je žogica dosegla največjo končno višino pri posodi s srednjim premerom, kar je ovrglo našo predpostavko, da bo žogica največjo višino dosegla pri posodi z najožjim premerom. Iz rezultatov smo izpeljali sklep, da bo žogica dosegla največjo končno višino, če bo izstreljena iz posode s srednjim premerom posode in z najvišje začetne lege sistema.

V nadaljevanju želimo pri samem eksperimentu izboljšati svojo teoretično napoved končne višine žogice, tako da bomo pri napovedi upoštevali tudi premer posode in s tem poskusili napovedati, kako geometrijska oblika posode vpliva na končno višino. V veselje in zadovoljstvo nam bo, če bo ta članek navdušil bralce za morebitno udeležbo na Slovenskem turnirju mladih fizikov (angl. *Slovenian Young Physicists' Tournament – SiYPT*) ter na splošno za raziskovanje in razvijanje na področju eksperimentalne fizike in s tem povečal tudi zanimanje za fiziko v osnovnih in srednjih šolah po Sloveniji.

## Viri in literatura

- [1] Faletič, S. (2018). Kaj pa en YPT v razredu? *Fizika v šoli*, 23 (1), 2–9.
- [2] <https://www.iypt.org/problems/problems-iypt-2024/> (25. 2. 2024).
- [3] Keiser, L., Bense, H., Colinet, P., Bico, J., in Reyssat, E. (2017). Marangoni Bursting: Evaporation-Induced Emulsification of Binary Mixtures on a Liquid Layer. *Phys. Rev. Lett.* 118, 074504.
- [4] Harkai, S. (2014). *Difuzijsko omejena agregacija*. Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Univerza v Mariboru, Maribor.
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary\\_action](https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_action) (26. 2. 2024).
- [6] Strnad, J. (1977). *Fizika*, 1. del (str. 60–61). Ljubljana: DZS.
- [7] Strnad, J. (1979). *Leksikon Cankarjeve založbe FIZIKA* (str. 242). Ljubljana: Cankarjeva založba.
- [8] Strnad, J. (1977). *Fizika*, 1. del (str. 121–125). Ljubljana: DZS.
- [9] Strnad, J. (1979). *Leksikon Cankarjeve založbe FIZIKA* (str. 99). Ljubljana: Cankarjeva založba.
- [10] Barlet, A., Malhomme, N. (2022). Suction-ejection of a ping-pong ball in a falling water-filled cup. *Emergent Scientist* 6, 2.
- [11] Kladnik, R. (2005). *Fizika za srednješolce 1. del – Gibanje, sila in snov* (str. 35–36). Ljubljana: DZS.
- [12] <https://zenodo.org/records/4307817> (26. 2. 2024).

# Opis pojava: Kaj mora in česa ne sme vsebovati

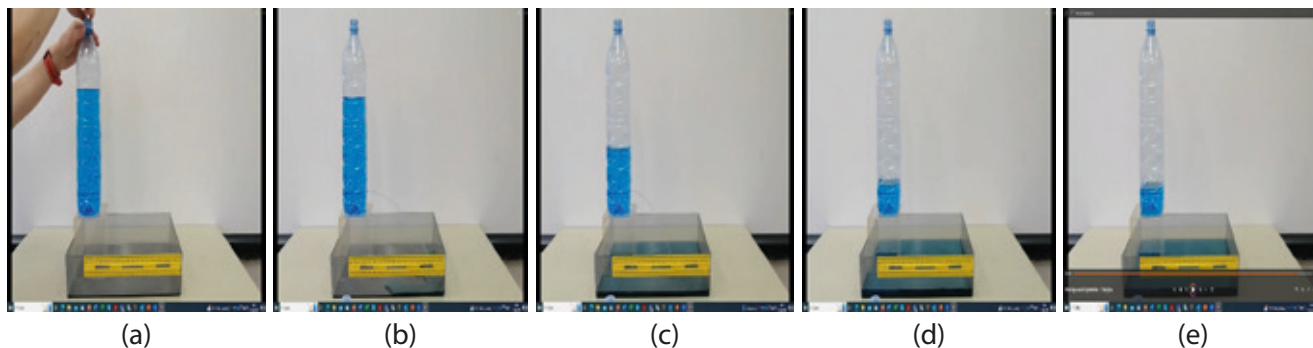
dr. Mojca Čepič

Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta

V prejšnjih dveh kolumnah smo na dolgo in široko razpravljali, kaj mora vsebovati slikovna predstavitev opazovanega pojava. Poudarek je na »opazovanem«, torej pojavu, pri katerem lahko dogajanje spremljamo z očmi. Kako grafično predstavljamo polja, svetlobo, zvok in podobne očem nezaznavne komponente pojavov oziroma rezultate meritev, smo izključili. Spodbujanje opazovanja in ozaveščanje vidnega z risanjem je posebna in pomembna naravoslovna veščina.

V tej kolumni pa se želimo posvetiti naslednji stopnji, ki pri vzgoji naravoslovnih veščin sledi risanju – opisovanju pojava. Dolgoletno delo na področju teoretične fizike in primerjave eksperimentalnih rezultatov s teoretičnimi napovedmi me je naučilo, da je opis eksperimentalnih rezultatov zelo pogosto pomešan z razlago, celo do te mere, da teoretik ne more dejansko primerjati rezultatov poskusa s svojimi napovedmi, ker več ne ve, ali raziskovalec govori o tem, kar je videl, izmeril, ali o tem, kar misli, da je videl, izmeril. Mešanje tega, kar je učenec zares videl, in tega, o čemer je iz vidnega sklepal, je zelo pogosto, še posebej pri učencih, ki v »resno« naravoslovje šele vstopajo.

Dejavnost, ki močno ozavešča razliko med videnim in sklepanim, je preprosta. Vnaprej olupimo kumarico in jo oblikujemo v obliko sveče. Postavimo jo pokonci na podstavek in vanjo zapičimo paličko iz mandeljna. Ta »predmet« postavimo pred učence, ne pustimo pa jim, da bi se predmetu približali. Nato poprosimo učence, da predmet, ki ga tudi imenujemo »predmet«, opišejo. Učenci običajno začno z naštevanjem, da je predmet bel, ima premer dva do tri centimetre, a pogosto se v opisu znajde, da je predmet sveča in da je predmet iz voska. Da ta vtis učitelj še ojači, prižge mandljev »stenj«, ki običajno lepo gori. Čez nekaj časa ogenj upihne in učenci dodajo še nekaj svojih »opažanj«. Če se v prvem nizu opisov še nista znašla sveča in vosek, sta v drugem zagotovo omenjena. Nato učitelj svečo poje, najbolje skupaj s stenjem. Šele tedaj se učenci zavedo, da to, kar so videli, ni isto kot tisto, kar so si predstavljali. In na tem začnemo graditi opis pojavov.



**Slika 1:** Časovno zaporedje iztekanja vode iz plastenke. a) Začetek poskusa. b) Takoj po začetku poskusa. c) Na sredini dogajanja. d) Proti koncu dogajanja. e) Konec poskusa.

Vir: Čepič, M. (2023). »Risanje pojavov II: Koliko slik je potrebnih za predstavitev pojava.« *Fizika v šoli*, 28 (2), str. 28, slika 1.

Prispevek je organiziran tako: najprej se posvetimo temu, kaj mora opis pojava vsebovati, nato pa za vsako komponento opisa uporabimo že obravnavani primer iztekanja vode iz plastenke in zahteve opisa ilustriramo z izjavami. Hkrati omenimo tudi povezave, ki jih opis ne sme vsebovati, kadar je to relevantno. Za lažjo predstavo tukaj ponovno vključujem fotografije poskusa (slika 1).

Najprej identificiramo lastnosti, ki se med pojavom spreminjajo. Lastnosti, ki se spreminjajo, imenujemo *spremenljivke*. V opazovanem pojavu lahko identificiramo tri zvezne spremenljivke: višino gladine v plastenki, domet curka in višino gladine v prestrežni posodi. Pozoren opazovalec lahko opazi še eno spremenljivko, hitrost spuščanja gladine v plastenki, vendar mora za to primerjati videno v dveh različnih časih.

Pogosto učenci navedejo tudi hitrost vode v curku. Nanjo lahko sklepamo iz dosega, ne moremo pa je v curku videti. Identificiramo pa lahko tudi eno spremenljivko, ki je kvazi diskretne tipa, ali je zamašek odprt ali zaprt. Kvazi zato, ker se zamašek dejansko odpira zvezno, ampak za poskus, pri katerem smo spremljali iztekanje, zveznost pri odpiranju zamaška ni bila pomembna.

Nato identificiramo lastnosti, ki se med pojavom ne spreminjajo in jih imenujemo *konstante*. Tudi konstante se včasih spreminjajo, a ne med opazovanjem poskusa. Kadar jih načrtno spreminjamo, jih imenujemo *kontrolne spremenljivke*. Konstanta pri opazovanem poskusu je vrsta tekočine, v našem primeru je to navadna voda. Konstanta je tudi prostornina vode v plastenki na začetku poskusa. Med poskusom samim se voda prerazporeja. Konstanta je presek odprtine, skozi katero izteka voda. Konstanta je tudi število odprtin, skozi katere izteka voda. Če razmislimo o navedenih konstantah, lahko načrtno vsako od njih spremenimo, uporabimo lahko drugo prostornino vode, drugo tekočino, npr. olje ali sirup, spremenimo lahko tudi presek odprtine ali število odprtin. Poskus sam bo potekal drugače in morda nas pri izvedbi zanima prav to, kako spremenjene okoliščine vplivajo na dogajanja med poskusom. Vse našteje spremenljivke imajo lahko tudi vlogo kontrolne spremenljivke, ki jo načrtno spreminjamo, a med eno ponovitvijo poskusa so stalne in so za ta poskus konstante.

V naslednjem koraku opišemo, kako se spremenljivke med pojavom spreminjajo. Spremembe so lahko časovne ali krajevne ali oboje. Če se vozimo z avtomobilom, se spreminja lega avtomobila, notranjost avtomobila ostaja ista, pogled skozi okno pa je odvisen od kraja in se spreminja zaradi spremenljivega položaja avtomobila. Šofer lahko obravnava spremembe pogleda skozi okno kot krajevno ali časovno spremenljivko, saj bo njegov pogled skozi okno odvisen tudi od časa. Pogosto načrtno spremenimo časovne spremenljivke v krajevne in obratno, če taka sprememba omogoča lažje spremljanje poskusa.

Lastnosti, ki se spreminjajo, imenujemo spremenljivke.

Kadar jih načrtno spreminjamo, jih imenujemo kontrolne spremenljivke.

Pri opisu obravnavanega poskusa iztekanja vode iz plastenke se spreminjajo tri omenjene spremenljivke, in sicer na naslednje načine:

- Višina gladine v plastenki se zmanjšuje.
- Domet curka se krajša.
- Višina gladine v prestrezni posodi se povečuje.

Ostro oko lahko doda še eno trditev:

- Hitrost nižanja gladine v plastenki se manjša.

Naj ponovno omenim še hitrost vode v curku. Iz izkušenj lahko o hitrosti vode v curku sklepamo iz dometa, a neposredno hitrosti vode ne moremo opaziti. Prav tako je logično, da se naraščanje vodne gladine v prestrezni posodi zmanjšuje, a v relativno velikih prestreznih posodah tega oko ne opazi, lahko le sklepamo. Zato tudi ta izjava ne sodi v opis poskusa.

Nato opišemo opažene povezave med spremenljivkami. Naj naštejemo nekaj povezav, ki jih lahko pri iztekanju vode iz plastenke neposredno opazimo:

- Čim višja je gladina vode v plastenki, tem daljši je domet curka.
- Čim višja je gladina vode v plastenki, tem nižja je gladina vode v prestrezni posodi.

Pa še za ostro oko:

- Čim višja je gladina vode v plastenki, tem hitreje se niža.

Povezave med spremenljivkami predstavljajo izhodišče za razlago pojava. Za zapis uporabimo zvezo »Čim ..., tem ...«. Čim večji je A, tem večji je B. Čim večji je A, tem manjši je B. Zveza »Čim ..., tem ...« ne prejudicira vzroka in posledice. V opisu je to zgolj povezava. Tako je trditev »Čim daljši je domet curka, tem višja je gladina vode v plastenki« prav tako ustrezna kot povezava, ki smo jo navedli prej. Opažene povezave tudi niso nujno indikacija za vzročno-posledične povezave. Pogosto kažejo tudi le na korelacije, in šele z razlago lahko pojasnimo, da imata dve opažanji lahko isti vzrok in se zato zdi, da sta vzročno-posledično povezani.

Naj poudarim še enkrat, tukaj smo obravnavali opazovani poskus, torej poskus, kjer je kot merilni instrument neposredno nastopal človek s svojimi čutili. Pri opisu navajamo zgolj dejstva, ki jih je bilo med poskusom mogoče zaznati z vidom. Striktno se moram izogniti sklepom, ki jih ponujajo oziroma vanje silijo izkušnje. Sklepi sodijo v razlago.

Podobno velja tudi za rezultate in predstavitev meritev, a o tem kdaj drugič. ■

Pri opisu navajamo zgolj dejstva, ki jih je bilo med poskusom mogoče zaznati z vidom. Striktno se moram izogniti sklepom, ki jih ponujajo oziroma vanje silijo izkušnje.

# Atosekundni sunki svetlobe: Nobelova nagrada za fiziko 2023

**dr. Aleš Mohorič**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

Nobelova nagrada za fiziko je bila leta 2023 podeljena za razvoj eksperimentalnih metod ustvarjanja atosekundnih sunkov svetlobe za proučevanje dinamike elektronov v snovi [1]. Nagrado so si v enakih deležih razdelili Pierre Agostini, Ferenc Krausz in Anne L'Huillier.

Pierre Agostini je francoski eksperimentalni fizik in zaslužni profesor na državni univerzi v Ohiju. Ferenc Krausz je madžarsko-avstrijski fizik, direktor Inštituta Max Planck za kvantno optiko in profesor eksperimentalne fizike na Univerzi Ludwiga Maximiliana v Münchnu v Nemčiji. Anne L'Huillier je francoska fizičarka in profesorica atomske fizike na Univerzi v Lundu na Švedskem.

Kaj je posebnega na atosekundnih laserskih sunkih? Najprej to, da so zelo, zelo kratki. Atosekunda je tolikšen del sekunde, kot je pol sekunde del starosti vesolja – trilionina sekunde,  $10^{-18}$  s. Sunek (energije, valovanja ipd.) si običajno zamislimo in izvedemo tako, da vir valovanja vključimo za kratek čas. Tudi z lasersko svetlobo lahko naredimo podobno. Krajše trajanje sunka pomeni manj nihajev elektromagnetnega valovanja – svetlobe. Zdi se, da spodnjo mejo dosežemo, če ustvarimo en sam nihaj. Nihaj vidne svetlobe pa traja nekaj femtosekund. Elektronska ali mehanska stikala odpovedo že veliko prej. Tu pride na pomoč interferenca. Večrodovni laserji generirajo svetlobo, ki jo sestavljajo valovanja podobnih valovnih dolžin, in ta valovanja interferirajo med seboj tako, da nastane zaporedje kratkih sunkov. Matematično bi nastanek lahko opisali s Fourierovo transformacijo, pa

se tu ne bomo spuščali tako globoko. Upam, da nas prepriča pogled na sliko 2 b). Pogoj za nastanek sunkov je koherenca valovanj, torej medsebojna faza delnih valovanj se ne sme hitro in naključno spreminjati.

Tipičen nihajni čas vidne svetlobe je  $t_0 = \frac{\lambda}{c} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 10^8} \text{ s} \approx 2 \text{ fs}$ . V sunkovnem laserju dosežemo sunke, katerih dolžina je tega velikostnega reda. Še vedno pa nas velikostni redi ločijo od atosekundnih laserskih sunkov.

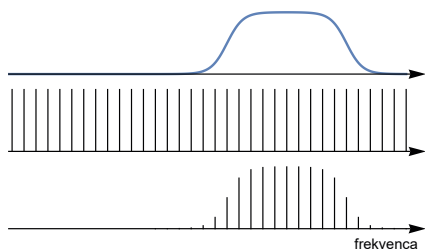
Zakaj bi želeli še krajše svetlobne sunke, mar niso že femtosekundni dovolj kratki? S kratkimi laserskimi sunki lahko zaznamo hitre pojave, npr. gibanje delcev. Čim krajši je čas osvetlitve, manj je lega zabrisana zaradi gibanja. S femtosekundnimi sunki lahko zaznavamo lego atomov v molekuli, elektroni pa so nekaj velikostnih redov lažji, zato so hitrejši in za zaznavanje njihove lege v molekulah potrebujemo nekaj velikostnih redov krajše sunke. Z zgoščevanjem svetlobe v sunke dosežemo tudi znatno višje vršne svetlobne moči. Namesto konstantne manjše moči dobimo v sunkih večjo moč. Zato lahko sunkovne laserje uporabljamo tudi za dovajanje energije, npr. za laserske operacije oči.

Kakšna je časovna skala za pojave na atomskem nivoju? Klasično si oglejmo elektron v osnovnem stanju vodikovega atoma pri Bohrovem radiju  $a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e} = 52 \text{ pm}$ , kar je tipična velikost atomov. V izrazu nastopajo električna konstanta, Planckova konstanta, osnovni naboj in masa elektrona. Elektrostatični privlak z jedrom – pripišimo

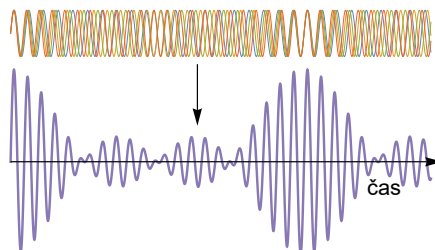


**Slika 1:** Od leve: Pierre Agostini, Ferenc Krausz in Anne L'Huillier.

Foto: ameriška ambasada na Švedskem, Thorsten Naeser in Bengt Oberger.



(a)



(b)

**Slika 2:** Spekter svetlobe večrodovnega laserja pojasnimo s slikami v stolpcu a). Zgornja slika kaže frekvenčni pas, na katerem je mogoče lasersko ojačevanje svetlobe, srednja kaže spekter lastnih nihajnih načinov, ki jih lahko vzbudimo v laserskem resonatorju, spodnja slika kaže spekter svetlobe večrodovnega laserja, v katerem je – kot že ime pove – hkrati vzbujenih več laserskih nihanj. Na primer tipični helij-neonski laser ima pas valovnih dolžin približno 0,002 nm pri osrednji valovni dolžini 633 nm, medtem ko ima s titanom dopiran safirni laser pas valovnih dolžin širok več kot 500 nm pri osrednji valovni dolžini 800 nm. Zato je v helij-neonskem laserju vzbujeno eno samo lastno resonatorsko nihanje, v titan-safirnem pa zelo veliko. Helij-neonski laser je zvezno delujoč, titan-safirni pa izrazito sunkovno. Slika b) prikazuje, kako seštevanje valovanj s podobno valovno dolžino generira sunke. Ti nastanejo zaradi ujemanja faze delnih valovanj.

mu en osnovni naboj, ostanek je senčen z oblakom notranjih elektronov (natančneje to opišemo z efektivno vrednostjo naboja  $e_{ef}$ ) – povzroča centripetalno silo, ki elektron pospešuje v krožnico okoli jedra:

$$\frac{e_0^2}{4\pi\epsilon_0 a_0^2} = \frac{m_e 4\pi^2 a_0}{t_o^2}.$$

Obhodni čas takega elektrona ocenimo:

$$t_o = \sqrt{\frac{16\pi^3 \epsilon_0 a_0^3 m_e}{e_0^2}} \approx 10^{-16} \text{ s} = 0,1 \text{ fs} = 100 \text{ as}.$$

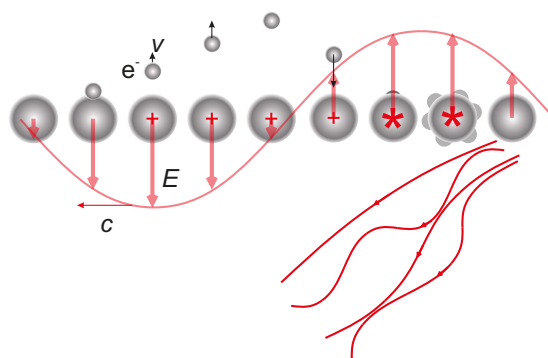
Tudi kvantni razmislek nam ponudi podobno oceno. Tipični čas pri prehodih med stanji z energijsko razliko  $\Delta E = h\nu$  je reda 400 as, če upoštevamo velikostni red energijskih razlik 10 eV. Torej s femtosekundnimi sunki lahko opazujemo zgolj neko povprečno lego elektrona v atomu ali molekuli. Svojevrsten izziv pa predstavlja zaznavanje lege na atosekundni časovni skali.

Za atosekundne sunke potrebujemo svetlobo s precej višjo frekvenco, daljno ultravijolično ali celo mehko rentgensko svetlobo. Svetlobo z višjo frekvenco dobimo z nelinearnim optičnim pojavom, z generacijo višjih harmonikov [2]. Podoben pojav je sicer dokaj znan – večina zelenih laserjev z valovno dolžino 532 nm, ki jih uporabljamo kot laserske kazalnike, deluje tako, da laser z valovno dolžino 1064 nm generira infrardečo svetlobo. Tej se pri prehodu skozi poseben kristal podvoji frekvenca. Ko svetloba vpade na tak kristal, v njem vzbuja nihanje elektronov. Ti so vezani v nesimetričnem potencialu in v njihovem nihanju se pojavijo višje harmonične komponente, najmočnejša je pri drugem harmoniku. Pojav lahko razumemo tudi kot hkratno absorpcijo dveh fotonov nižje energije in izsevanje fotona s skupno energijo. Vendar pa frekvenčno podvojevanje ne zadošča za doseganje dovolj visokih frekvenc za generiranje atosekundnih sunkov. Višje harmonike dobimo tako, da z močno lasersko svetlobo ioniziramo snov. Običajno z infrardečim

laserjem ioniziramo žlahtni plin, pri tem se ionizacijski elektron pospeši, vrne do atoma ter pri tem izseva energijo. Shematično proces kaže slika 3.

Proces generacije višjih harmonikov svetlobe opišemo v treh korakih [3, 4]. V prvem električno polje laserske svetlobe spremeni coulombski privlačni potencial vezanega elektrona z  $\varphi_c = -\frac{e_{ef}}{4\pi\epsilon_0 r}$  na  $\varphi_e = \varphi_c - E_0 r$  (slika 4), kar poveča verjetnost za tuneliranje elektrona iz atoma. Energijo elektrona dobimo tako, da potencial množimo z osnovnim nabojem ( $W_c = e_0 \varphi_c$ ) in jo izrazimo z ustrežno atomsko enoto, rydbergom:  $Ry = \frac{e_0^2}{8\pi\epsilon_0 a_0} = 13,6 \text{ eV}$ .

Po tuneliranju elektron obravnavamo kot prosti, klasični delec. Energije elektrona so dovolj majhne, da relativistična obravnava ni potrebna. Električno polje laserske svetlobe elektron najprej pospešuje stran od iona, nato



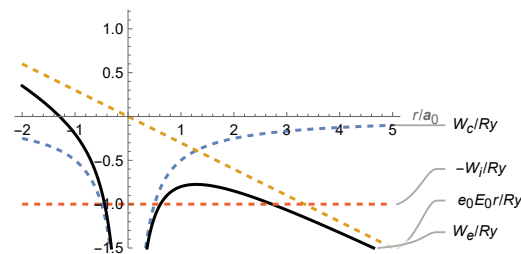
**Slika 3:** Električno polje laserske svetlobe, predstavljeno z rdečimi puščicami, ionizira atom. Elektron  $e^-$  pospeši najprej stran od iona, nato pa električno polje vpadne svetlobe  $E$  zaniha v nasprotno smer in pospeši elektron nazaj proti ionu. Elektron med rekombinacijo z ionom vzbudi atom. Vzbujeni atomi potem sevajo svetlobo (rdeče črte na desni) s spektrom, v katerem so zastopani višji harmoniki vzbujevalne svetlobe.

pa se smer električnega polja zaradi nihanja spremeni in elektron pospeši nazaj proti ionu. Električno polje niha s frekvenco  $\omega$ , ki je tipično velikostnega reda  $\sim 10^{15}$  Hz:  $E = E_0 \cos \omega t$ . Izbrali smo tako fazo, da je polje največje ob času  $t = 0$ . Elektron tunelira iz atoma ob času  $t_0 > 0$ , ki je krajši od nihajnega časa svetlobe, in takoj po ionizaciji miruje v izhodišču koordinatnega sistema. Električno polje ga pospešuje skladno z drugim Newtonovim zakonom:  $m\ddot{x} = -e_0 E_0 \cos \omega t$ . Os  $x$  koordinatnega sistema usmerimo vzporedno s smerjo polarizacije laserske svetlobe. Lega elektrona se s časom spreminja

$$x = \frac{e_0 E_0}{m \omega^2} [\cos \omega t - \cos \omega t_0] + \frac{e_0 E_0}{m \omega} (t - t_0) \sin \omega t_0.$$

Grafe gibanja za nekaj različnih časov tuneliranja  $t_0$  kaže slika 5.

Elektron najprej pospešuje stran od iona, nato pa električno polje zaniha v drugo smer in elektron pospeši nazaj proti ionu. Približek, da je elektron na začetku v izhodišču koordinatnega sistema, je upravičen, saj se elektron na svoji poti oddalji za več deset atomskih polmerov. Razdalja, do katere se oddalji, je sorazmerna jakosti električnega polja, ne more pa biti poljubno velika. Elektron se mora za uspešno rekombinacijo vrniti do iona prej kot v enem nihaju. Pri prevelikih jakostih svetlobe na elektron deluje tudi znatna magnetna sila in elektron zavije stran od iona in do rekombinacije ne pride. Vidimo tudi, da se elektron ne vrne vedno nazaj, potreben pogoj je, da  $t_0$  leži na intervalu od nič do četrtnine nihaja laserske svetlobe. Tu se izkaže prednost infrardeče svetlobe: če je frekvenca svetlobe visoka, se elektron prehitro vrne nazaj in ne nabere dovolj energije. To prelomno idejo je uresničila LHuillier, ona je prva za ionizacijo uporabila infrardečo svetlobo. Energijo, ki jo med opisanim gibanjem dobi elektron, najlažje izrazimo s povprečno energijo nihanja prostega elektrona. V polju laserske svetlobe prosti elektron niha s pospeškom  $\frac{e_0 E_0}{m_e} \cos \omega t$ , lego pa

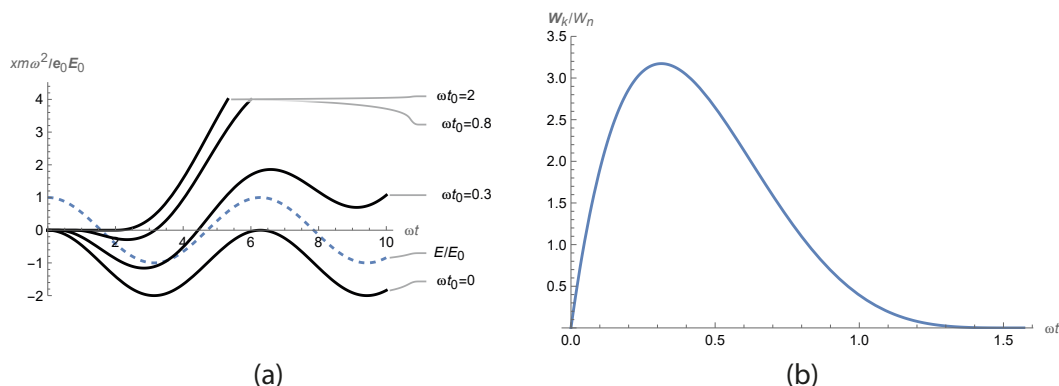


**Slika 4:** Električno polje laserske svetlobe spremeni električni potencial elektrona v atomu. Elektron lahko tunelira iz coulombske jame in potem ga obravnavamo kot prostega. S črtno modro črto je prikazana coulombska potencialna energija, z rumeno črtno pa potencialna energija električnega polja, ki ga zaradi valovne dolžine  $\sim 1000$  nm, ki je mnogo večja od velikosti atoma, obravnavamo kot homogeno. S črno črto je označena skupna potencialna energija vezanega elektrona, katerega energijski nivo je označen z rdečo črtno črto in je za ionizacijsko energijo pod energijskim nivojem prostega elektrona.

napišemo, kot smo navajeni pri nihanju:  $x = -\frac{1}{\omega^2} a$ .

Polno energijo nihanja izrazimo  $W_n = \frac{1}{2} m \omega^2 \langle x^2 \rangle = \frac{e_0^2 E_0^2}{4 m_e \omega^2}$ .

Ion absorbira pospešeni elektron in se pri tem vzbudi. Po relaksaciji izseva svetlobo, ki ima v spektru tudi višje harmonike. Spekter, ki ga kaže slika 6, ima značilna plato in prag. Ta plato v spektru je pravzaprav nenavaden. Pričakovali bi namreč, da intenziteta višjih harmonikov zelo hitro pojema, saj gre vendar za večfotonske procese, ki so precej manj verjetni. V spektru enoatomnih žlahtnih plinov so zaradi simetrije prisotni le lihi višji harmoniki. Razlaga spektra presega nivo tega prispevka. Ko spektralne komponente interferirajo, nastanejo zelo kratki sunki. Iz grafa na sliki 5b vidimo, da je največja kinetična energija, ki jo lahko doseže elektron, približno  $3,17 W_n$ , in če prištejemo še ionizacijsko energijo  $W_i$ , dobimo energijo praga oz. energijo najvišjega



**Slika 5:** a) Grafi gibanja ionizacijskega elektrona za različne čase ionizacije. Elektron se sprosti ob času  $t_0$  in pospešuje v električnem polju, ki niha s frekvenco  $\omega$ . Če se elektron sprosti takrat, ko je faza električnega polja  $\omega t_0 = 0$ , pospeši stran od iona in se vrne do njega v času enega nihaja, njegova hitrost ob povratku pa je enaka kot na začetku, nič. Največjo hitrost ima elektron, za katerega je  $\omega t_0 \approx 0,3$ . Elektron, ki se sprosti ob  $\omega t > \frac{\pi}{2}$ , se ne vrne k ionu. Narisani so grafi prostega elektrona, elektron se lahko v trenutku, ko se vrne v izhodišče ( $x = 0$ ), rekombinira z ionom. b) Graf kaže kinetično energijo elektrona po vrnitvi k ionu kot funkcijo časa ionizacije. Energija je največja, ko je  $\omega t_0 \approx 0,3$  in enaka  $W_k \approx 3,2 W_n$ .

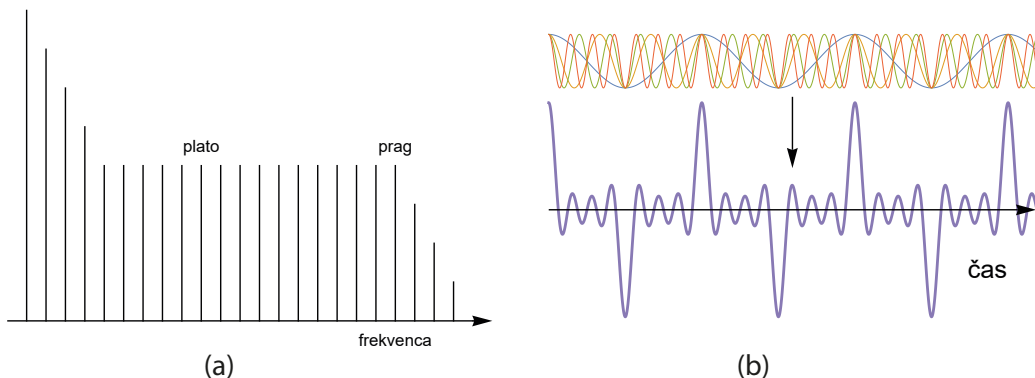
harmonika, ki ga v danem primeru lahko generiramo:  $W_{\text{prag}} = W_i + 3,17 W_n$ . Spomnimo še, da je amplituda jakosti električnega polja v laserski svetlobi povezana z gostoto energijskega toka svetlobe:  $j = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2$ .

Tipični laserji, ki jih uporabljajo za generiranje atosekundnih sunkov, uporabljajo infrardeči laser z valovno dolžino, ki oddaja svetlobo v pikosekundo (to je milijon atosekund) dolgih sunkih z gostoto energijskega toka  $10^{15} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ . Jakost električnega polja v taki svetlobi je  $2 \cdot 10^9 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ . Spomnimo, prebojna jakost polja v zraku je  $3 \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ . V neonu dosežejo najvišji harmonik reda  $>100$  in mehko rentgensko lasersko svetlobo s fotoni z energijo  $>100 \text{ eV}$ , v heliju celo čez  $1 \text{ keV}$  [2].

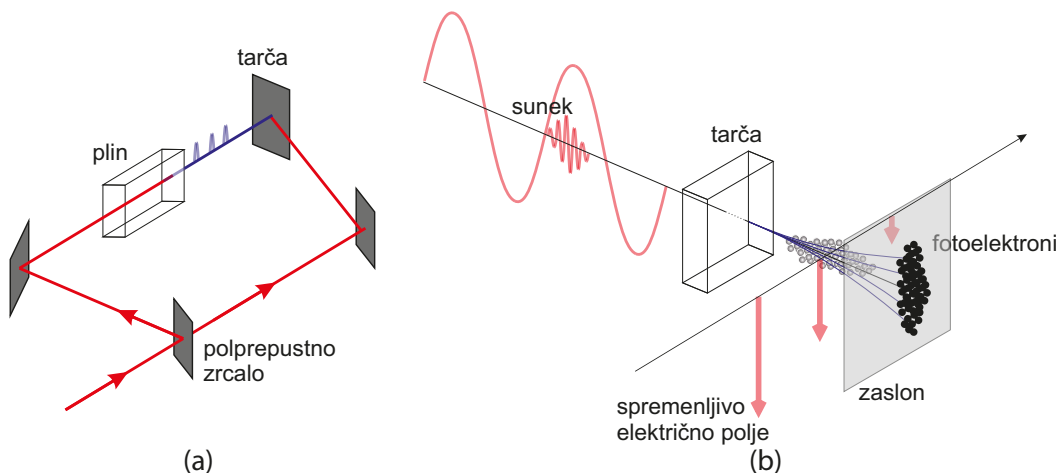
Kako vemo, da so sunki res tako kratki? Jasno, štoparice, ki bi neposredno merila dolžino sunka, ni. Pomagamo si s trikoma, foton iz kratkega sunka in foton iz vzbujevalne svetlobe hkrati uporabimo za ionizacijo atomov v tarči. Zakasnitev med fotonoma lahko natančno merimo in od nje je odvisno, kakšno energijo imajo izbiti fotoelektroni. Energijski spekter fotoelektronov merimo z nekakšno vrstično kamero, katere osnove so prikazane na sliki 7. Kratek sunek svetlobe povzroči v snovi fotoefekt in izbije gručo elektronov. Dolžina gručice je sorazmerna z dolžino laserskega sunka. To gručo vodimo v električno polje, ki

se v smeri prečno na gibanje gručice spreminja s časom. Tako se elektroni z različnega mesta v gručici v polju odklonijo za različne kote. Odklon pa je odvisen tudi od energije – hitrosti – elektronov. Na zaslonu v smeri curka nato iz dolžine sledi, ki jo pusti gruča, lahko sklepamo na energijo in dolžino sunka. Takšno kamero lahko uporabljamo tudi za spremljanje elektronske gostote v vzorcu, ki ga osvetljujejo laserski sunki, in njenega spreminjanja, ko vzbujamo določene reakcije.

Kje v zgodbi o atosekundnih laserskih sunkih najdemo nobelovce? Agostini je znan po svojem pionirskem delu na področju laserske fizike močnega polja in raziskav atosekundnih sunkov. Odkril je pojav večfotonske ionizacije [5]. Anne L'Huillier vodi skupino, ki proučuje gibanje elektronov v realnem času, kar omogoča razumevanje kemijskih reakcij na atomski ravni. Leta 1988 je prispevala pomembno odkritje, ko je v spektrih žlahtnih plinov, ioniziranih z infrardečim laserjem, odkrila plato višjih harmonikov [6]. Kasneje je s sodelavci pojasnila pojav tvorbe višjih harmonikov z numerično rešitvijo časovno odvisne Schrödingerjeve enačbe [7]. Ta odkritja so vodila njeno raziskovalno skupino k uspešnemu generiranju atosekundnih sunkov [8–10]. Naslednji izziv je bil razvoj načina merjenja zelo kratkih sunkov. Tu je pomemben korak prispeval Agostini s sodelavci [11].



**Slika 6:** a) Spekter svetlobe plina, ioniziranega z močno lasersko svetlobo. b) Demonstracija nastanka svetlobnih sunkov s seštevanjem višjih harmoničnih valovanj. Širina sunka je sorazmerna nihajnemu času komponente z največjo frekvenco.



**Slika 7:** a) Postavitev poskusa, pri katerem del laserske svetlobe uporabimo za generiranje sunkov, del pa za vzbujanje in detekcijo dogajanja v tarči. b) Podrobnosti dogajanja okoli tarče.

Raziskovali so frekvenčno modulacijo v dvobarvnem fotonem polju. Metoda omogoča merjenje dolžine zaporedja atosekundnih sunkov s hkratnim fokusiranjem visokofrekvenčnih sunkov ultravijoličnega in vzbujevalnega infrardečega laserja na plinsko tarčo in analizo spektra fotoelektronov, ki izhajajo iz tarče. Njegovi skupini je uspelo narediti sunke, dolge 250 as [12], njihovo dolžino pa so merili z novorazvito metodo rekonstrukcije atosekundnega utripanja z interferenco dvofotonskih prehodov. Infrardeča svetloba, ki iz laserja izhaja v obliki nekaj femtosekund dolgih sunkov, generira svetlobo, sestavljeno iz višjih harmonikov, ki se v izhodni svetlobi združi v zaporedje atosekundnih sunkov svetlobe. Nastalo zaporedje sunkov nato usmerimo v novo tarčo iz žlahtnega plina, na katero hkrati sveti tudi osnovni infrardeči laser. Z dodatnimi zrcali spreminjamo časovno zakasnitev infrardeče svetlobe. Svetloba ustrezne valovne dolžine iz atomov žlahtnega plina izbije fotoelektrone. Energija fotonov osnovne infrardeče svetlobe je prenizka, pomagajo jim fotoni visokih harmonikov. Kadar je zakasnitev med osnovno infrardečo svetlobo in atosekundnim sunkom tako majhna, da na atom hkrati vpadeta tako foton infrardečega valovanja kot tudi foton visokih harmonikov, ta fotona skupaj ionizirata atom. Energijo izbitih elektronov lahko natančno merimo in iz nje določimo energijo fotonov, ki so elektrone izbili. Ta energija zavzema diskretne vrednosti – vsaka vrednost ustreza fotonom enega vpadnega harmonika. Na detektorju tako poleg elektronov, ki so jih izbili posamezni visoki harmoniki, zaradi teh dvofotonskih pojavov opazimo tudi elektrone z vmesnimi vrednostmi energij. Njihova energija je

enaka vsoti ali razliki energij fotona visokega harmonika in osnovne infrardeče svetlobe. Tako pokažemo, da so višji harmoniki večinoma v fazi, in iz podatkov o fazi lahko razberemo obliko sunkov svetlobe. Agostini je s sodelavci izmeril serijo sunkov, dolgih po 250 atosekund, razmik med dvema zaporednima sunkoma pa je znašal približno petkrat toliko. Hitro ponavljanje sicer kratkih in jasno ločenih kratkih sunkov pa ne omogoča opazovanja dinamike elektronov. Prvi, ki mu je uspelo ustvariti posamezne atosekundne sunke svetlobe, je bil Ferenc Krausz. Posamezne sunke dobimo tako, da iz svetlobe, tvorjene iz višjih harmonikov, s filtrom odstranimo nižje harmonike, tako da ostane le nekaj najvišjih tik pod pragom [13]. Tako za vsak vpadni sunek infrardeče svetlobe nastane en sam atosekundni sunek v ekstremni ultravijolični oziroma že mehki rentgenski svetlobi.

Ker so atosekundni sunki zelo kratki, je časovna ločljivost eksperimentov izjemna in lahko sledi kinematiki elektronov v molekulah. Molekule lahko tudi vzbujajo z lasersko svetlobo, ki jo uporabijo za generacijo višjih harmonskih sunkov. Taka svetloba je časovno usklajena s sunki. Časovni zamik se enostavno prilagaja z zakasnilno linijo in tako lahko s spreminjanjem zamika spremljamo odziv sistema na motnjo. To metodo je mogoče uporabljati na številnih različnih področjih. V elektroniki je na primer pomembno razumeti in nadzorovati, kako se elektroni obnašajo v snovi. Atosekundne sunke je mogoče uporabiti tudi za identifikacijo različnih molekul, na primer v medicinski diagnostiki. ■

## Viri in literatura

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/summary/> (15. 2. 2024).
- [2] L'Huillier, A. in Balcou, P. (1993). High-order harmonic generation in rare gases with a 1-ps 1053-nm laser. *Phys. Rev. Lett.* 70, 774–777.
- [3] Corkum, P. B. (1993). *Phys. Rev. Lett.* 71, 1994.
- [4] Lewenstein, M., Balcou, Ph., Ivanov, M. Yu., L'Huillier, A. in Corkum, P. B. (1994). *Phys. Rev. A* 49, 2117.
- [5] Agostini, P., Fabre, F., Mainfray, G., Petite, G. in Rahman, N. K. (1979). *Phys. Rev. Lett.* 42, 1127.
- [6] Ferray, M., L'Huillier, A., Li, X. F., Lompre, L. A., Mainfray, G., Manus, C. (1988). Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiatio in rare gases. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 21:L31–L35.
- [7] L'Huillier, A., Schafer, K. J. in Kulander, K. C. (1991). *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 24, 3315.
- [8] Antoine, P., L'Huillier, A. in Lewenstein, M. (1996). *Phys. Rev. Lett.* 77, 1234.
- [9] Salières, P., L'Huillier, A., Antoine, P. in Lewenstein, M. (1997). arXiv quant-ph/9710060.
- [10] Bellini, M., Lyngå, C., Tozzi, A., Gaarde, M. B., Hänsch, T. W., L'Huillier, A. in Wahlström, C.-G. (1998). *Phys. Rev. Lett.* 81, 297.
- [11] Schins, J. M., Breger, P., Agostini, P., Constantinescu, R. C. Muller, H. G., Grillon, G., Antonetti, A. in Mysyrowicz, A. (1994). *Phys. Rev. Lett.* 73, 2180.
- [12] Paul, P. M., Toma, E. S., Breger, P., Mullot, G., Augé, F., Balcou, Ph., Muller, H. G. in Agostini, P. (2001). *Science* 292, 1689.
- [13] Hentschel, M., Kienberger, R., Spielmann, Ch., Reider, G. A., Milosevic, N., Brabec, T., Corkum, P., Heinzmann, U., Drescher, M. in Krausz, F. (2001). Attosecond metrology, *Nature* 414, 509.



# Intervju s slovensko znanstvenico

## dr. Maruša Bradač

Uredniški odbor revije *Fizika v šoli*

Maruša Bradač je redna profesorica na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani. Je astrofizikarka, ki je študij pričela na Fakulteti za matematiko in fiziko, magistrirala in doktorirala pa na Univerzi v Bonnu, Nemčija. Doktorat z naslovom Exploring dark matter properties from the smallest to the largest scales ji je odprl raziskovalno pot v ZDA, kjer je bila najprej podoktorska raziskovalka na Kavlijevem inštitutu za astrofiziko delcev in kozmologijo na Univerzi v Stanfordu, nato Hubblova stipendistka na Univerzi v Santa Barbari in kasneje predavateljica na Univerzi v Davisu, Kalifornija. Med študijem na Univerzi v Bonnu se je pričela ukvarjati z gravitacijskim lečenjem. Proučuje lastnosti temne snovi in prve galaksije, ki so nastale v vesolju, kar nam daje odgovore na najbolj temeljna vprašanja o razvoju in prihodnosti vesolja. Bila je prva, ki je z opazovanjem jat galaksij neposredno izmerila lastnosti delcev temne snovi. Z opazovanjem jate galaksij Izstrelek je skupaj s sodelavci določila empirično zgornjo mejo za interakcijski presek delcev temne snovi. Ta rezultat je najpomembnejši neposredni dokaz za obstoj temne snovi doslej. K področju opazovanja galaksij v zgodnjem vesolju je pomembno prispevala z meritvijo spektra takrat najtemnejše galaksije, detekcijo ogljika v eni od najzgodnejših znanih galaksij ter s posnetkom gravitacijskega lečenja in večkratne slike pritlikave galaksije. Vodila je več velikih opazovalnih projektov na mednarodnih observatorijih in satelitih. Objavila je prek 130 izvirnih znanstvenih člankov s prek 7000 citati. Vodi tudi mednarodni raziskovalni projekt Firstlight („Prva svetloba“), ki ga financira Evropski raziskovalni svet. Pri projektu s podatki iz teleskopa James Webb opazujejo čas nastanka prvih zvezd in galaksij.

dr. Aleš Mohorič,  
član uredniškega odbora revije *Fizika v šoli*

### 1. Se lahko na kratko predstavite?

Sem Maruša Bradač, astrofizičarka, profesorica na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

### 2. S čim se ukvarjate?

Ukvarjam se z raziskavami prvih galaksij, ki so nastale v vesolju. S tem poskušam odgovoriti na vprašanje, kako so galaksije, med drugimi tudi naša Galaksija, nastale. Za to delo uporabljam opazovanja s teleskopom James Webb. Pri tem projektu sodelujem tudi kot članica raziskovalne skupine, ki je razvila enega od štirih znanstvenih instrumentov na teleskopu, kamero NIRISS. Preučujem pa tudi sestavo vesolja, opravljam meritve lastnosti temne snovi – izmuzljive snovi, ki sestavlja kar četrtno vesolja.

### 3. Kdaj in kako ste opazili, da vas fizika zanima oziroma da vam je všeč?

Za fiziko me je navdušil oče, ki mi je vedno znal na zelo razumljiv način predstaviti dogajanja v naravi. Velikokrat sva opazovala zvezde, kar me je še posebej pritegnilo. Sem pa že v osnovni in srednji šoli imela fantastične učitelje fizike, kar je moje zanimanje samo poglobilo. Kasneje pa sem se tudi začela udeleževati astronomskih taborov, tako v Sloveniji kot tudi v tujini, kar me je dokončno usmerilo na pot astronomije.

### 4. Je imel kdo poseben vpliv na vašo izbiro študija fizike? Morda starši, učitelji ali učiteljice? Vas je kdo pozitivno spodbujal?

Izbira študija ni bila lahka, saj sem dolgo oklevala med meni ljubšo fiziko in računalništvom, ki je takrat obljubljalo bolj gotovo zaposlitev. Starši so mi tukaj resnično dali proste roke, me podpirali ne glede na mojo odločitev, saj so vedeli, da je najbolj pomembno to, da se odločim za študij, ki me najbolj veseli. Odločila sem se za fiziko in nikoli mi ni bilo žal.

### 5. Kakšen je bil odnos učiteljev ali učiteljic, profesorjev ali profesorice fizike, sošolcev in sošolk do vas in vašega zanimanja za fiziko? Se je ta odnos spreminjal s stopnjo šolanja – v osnovni šoli, srednji šoli, na fakulteti? Imate občutek, da so vas obravnavali kot enakovredno sošolcem moškega spola?

Imela sem veliko srečo, da so me moji mentorji na vsakem koraku absolutno podpirali, ne glede na moj spol. Sem se pa še posebej kasneje začela zavedati, da sem tukaj imela res srečo, kajti v vseh primerih ni tako. V karieri sem se večkrat morala tudi boriti proti takšnim stereotipom, da smo ženske manj primerne za ta poklic. Ampak vedno znova pa smo tudi dokazale ne le, da ni tako, v dosti primerih smo tudi bolj uspešne. Tako danes tudi še naletim na začudenje, da sem astrofizičarka, čeprav na srečo je tega vedno manj.



### 6. Bi želeli našim bralkam in bralcem še kaj sporočiti?

Vsem mladim bralkam in bralcem svetujem, naj pri izbiri srednje šole, študija sledijo svojem srcu. Tudi če niso čisto prepričani, kako naprej, naj sledijo tistemu, kar jih trenutno najbolj veseli. Vsem učiteljicam in učiteljem pa iskrena hvala, saj so prav oni temelj vseh naših uspehov. ■

# Predlog drugačnega načina razlage posebne relativnosti v srednji šoli

Peter Prelog

upokojeni učitelj fizike

Posebna relativnost je prav gotovo poglavje pouka fizike, ki ga – ob krčenju učne snovi zaradi časovne stiske – nikakor ne smemo izpustiti, saj je to prvo razširjanje klasične fizike v nove matematične okvire. Poleg težav v splošno izobraževalni šoli zaradi zahtevne matematike so pa tudi težave z razumevanjem nekaterih navidezno protislovnih trditev: npr. kako lahko kaže Vladkina ura manj od Perove ure in hkrati (!) več od nje? Tudi moj meter je lahko večji od sosedovega in hkrati (!) manjši od njega!?

V tem besedilu skušam najti srednji šoli primerno razlago posebne relativnosti.

Pri tem ponujam nov (star?) način poučevanja: »številkanje«, ki naj bi olajšal razumevanje sicer matematično obdelane učne snovi tistim dijakom, ki za matematiko morda niso preveč navdušeni. Pa še pri tem bomo uporabili samo nekaj števil: 0, 1, 50, 100, 200 ... in graf ( $t, x$ ).

Namesto zahtevnejših matematičnih transformacij koordinat med dvema inercialnima sistemoma ponujam za fizikalno manj vnete dijake pogled iz enega vlaka na drugega, vzporedno vozečega, kar – na lažji način – omogoča razumevanje teh povezav.

Naslednje besedilo in slike se lahko pri pouku uporabijo samostojno ali pa kot ilustracije k drugim razlagam, nikar pa ne uporabljajte vsega tega besedila v razredu, saj je namenjeno učiteljem, ne dijakom! Za njih ga razredčite, prilagodite!

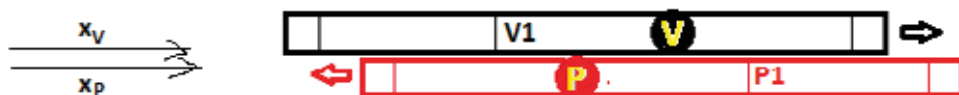
Ob prvi razlagi posebne relativnosti v srednji šoli največkrat uporabimo razlago s hitro se premikajočo »svetlobno uro« B, ki se premika v smeri koordinatne osi  $x$  sistema A z veliko hitrostjo  $v$ ; v njej pa svetlobni žarek šviga gor in dol v smeri osi  $y$  s hitrostjo  $c$  (glej [\*0]). Vedno me je

motila ta nedoslednost: najprej vse poenostavimo z razlago v eni prostorski dimenziji  $x$ , potem pa brez potrebe dodamo še drugo prostorsko dimenzijo  $y$ ! To pa je odveč, če razlagamo drugače! Razlage v dveh ali več prostorskih dimenzijah prepustimo fakultetam!

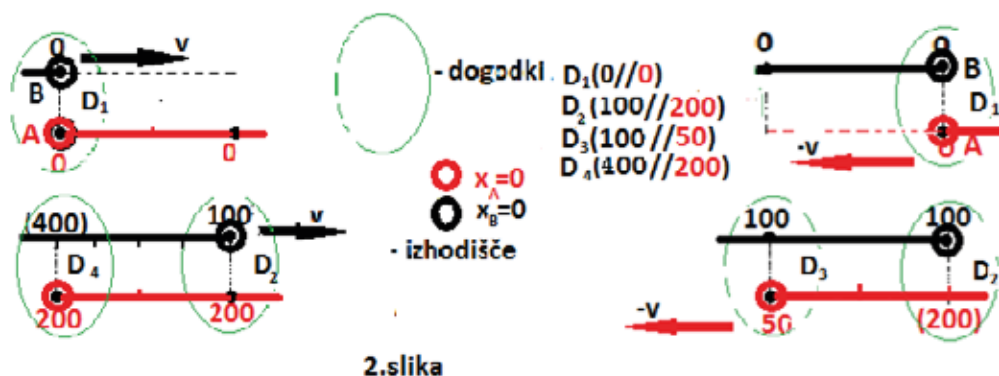
Zato predlagam drugačno pot razlage. Seveda samo »pot«; za način razlage v razredu, za obseg snovi v razlagi, sredstva razlage – risbo, letvico, računalniško sliko ... se pa odloči razlagalec, učitelj, ko upošteva sposobnosti svojih dijakov, okoliščine in čas, ki mu je na razpolago za razlago.

Prikažimo relativno gibanje dveh enodimenzionalnih inercialnih sistemov A in B na vzporednih oseh  $x_A$  in  $x_B$ ! Predstavimo ga s postavitvijo dveh **domišljajskih** (nepospešenih) vlakov A in B z enakimi **vagoni** in enakimi **vagoni**, ki se premikata v nasprotnih smereh s konstantno relativno hitrostjo  $v$ . Na začetku vsakega vagona je ura ( $t_A$  ali  $t_B$ ) in oznaka vagona ( $x_A$  ali  $x_B$ ) tako, da ju lahko »preberemo« tudi iz sosednjega sistema – vlaka. Ure na vlaku A so sinhronizirane med seboj, enako ure na vlaku B (klasično kažejo vse enako)! (glej [\*0]) Namesto na sliki ali na zaslonu prikažemo lahko vlaka tudi z dvema letvicama: na oznaki **V** sedi Vladka v koordinatnem izhodišču zgornjega sistema B, Na oznaki **P** je **Pero** spodaj v izhodišču A (1. slika).

Seveda pa v vesolju ne moremo opazovati nobenih neskončno dolgih vlakov, to je samo izmišljeni pripomoček za lažje razmišljanje, ki pa vseeno zadošča za smiselne zaključke. Njihovo relativno gibanje in spreminjanje časov na njihovih urah lahko prikažemo tudi z računalniškim programom »vlaki« (kot na 4. sliki, [\*0]). Sicer pa lahko vsako vesoljsko plovilo obravnavamo enako kot »del vlaka« na naših slikah!



1.slika



Taka slika dogodkov je koristna zaradi lažjega razumevanja meritev; dejansko naj bi bili ti »vlakci« svetlobno hitri in seveda ne bi bilo mogoče, da bi človek gledal na uro na sosednjem vlaku! Zmogle bi pa to elektronske naprave pa tudi naknadna izmenjava informacij med opazovalci A in B! In tolažba za fizike: to besedilo ni fizikalna znanost, to je le učiteljsko prizadevanje za razumljivo razlago v srednji šoli, z vsemi »neznanstvenimi« približki in poenostavitvami.

Zapišimo predpostavki naše nove teorije (seveda zopet poenostavljeni za uporabo v šoli – glej pripombo [\*1]), postulata nove fizikalne teorije, najprej starejšo predpostavko:

**(I): V obeh inercialnih sistemih veljajo enaki fizikalni zakoni.**

In še »novejšo«:

**(II): Svetlobni hitrosti  $c_A$  in  $c_B$  sta enaki za poljubnega opazovalca (Maxwell).**

Ker je ta enakost hitrosti (merjena iz istega opazovališča v A ali B) skregana s klasičnim načinom računanja hitrosti ( $c_A = v + c_B > c_B$  [\*2]), lahko domnevamo, da tudi časi na urah A in B ne bodo tekli klasično,  $t_A = t_B$ : najenostavnejša nova povezava med časoma istega dogodka (npr. v izhodišču  $x = 0$  [\*3]) bi bila linearna:  $t_A = \gamma \cdot t_B$ , ( $\gamma = \text{konst}$ ), v tem je zajeta tudi klasična povezava pri  $\gamma = 1$ , (korespondenca). Razmišljajmo o posledicah!

**1. posledica:** hitrost razmikanja izhodišč  $v$ , (I postulat):  $|v_A| = |v_B| = v$  [\*4] in  $c > v$  (sicer svetlobni signal  $c$  iz enega izhodišča ne bi mogel ujeti odmikajočega se ( $v$ ) drugega izhodišča!)

**2. posledica:** Ko sta si izhodišči P in V (1. slika) (ob  $v = \text{konst.}$ ) »nasproti« ( $v$  isti točki, 2. slika levo in desno zgoraj), naj bo to dogodek  $D_1$  v skupnem koord. izhodišču  $x = 0$ , uri A in B tam naj kažeta 0:  $D_1(t_A, x_A) = D_1(0, 0)$  in  $D_1(t_B, x_B) = D_1(0, 0)$ . Ko izhodišči nista več skupaj (2. slika spodaj), naj kaže ob  $\gamma = 2$  SOSEDOVA URA

B OB IZHODIŠČU A:  $t_B = t_{A0} \cdot \gamma$  (2. sl. sp. desno), SOSEDOVA URA A OB IZHODIŠČU B:  $t_A = t_{B0} \cdot \gamma$  (2. sl. sp. levo) – nova povezava! [\*3]

(Dogajanje na 2. sliki lahko lepše prikažemo z rač. programom »vlakci«,  $\gamma = 2$  ali na letvicah: čase dogodkov obešamo izpisane na kartončkih na žebličke ob koncih »vagonov«, 1. slika).

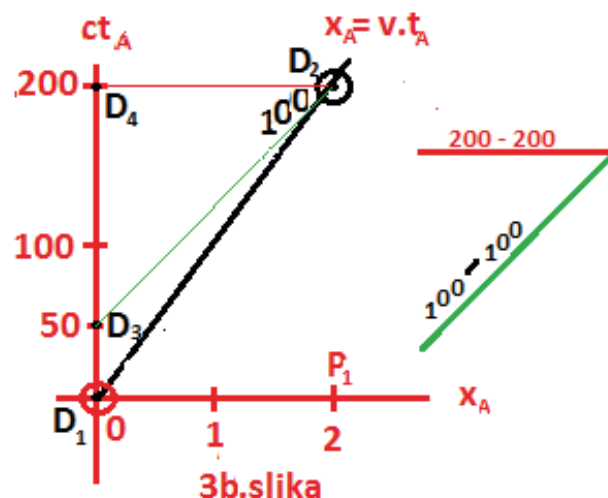
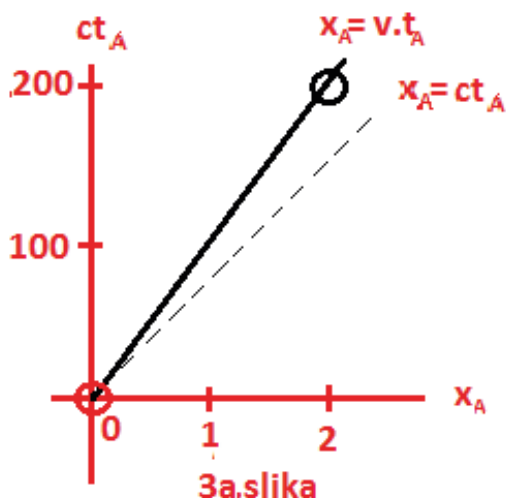
Premaknimo Vladko v izhodišču B iz skupnega izhodišča  $D_1$  za dva vagona<sub>A</sub> na desno,  $x_A = 2$ ,  $D_2(200, 2)$ ! (2. slika levo sp.) ali pa Pera v izhodišču A za en vagon<sub>B</sub> na levo  $x_B = -1$ ,  $D_3(100, -1)$  (2. sl. desno sp.). Desna 2. slika bi lahko imela enake številke kot leva ( $200 - 200$ ,  $100$ , 2 vagona<sub>B</sub>), vendar narišemo krajšo sliko ( $100 - 100$ ,  $50$ , 1 vagon<sub>B</sub>) zato, da bi imeli, zaradi primerjave, na desni spet isti  $D_2$   $100//200$  kot na levi 2. sliki (in s tem – ob istem dogodku  $D_2$  kot na levi, imeli med Vladko in Perom – tudi na desni 2 vagona<sub>A</sub>!).

Med  $t_A$  in  $t_B$  naj bo torej v izhodiščih (ob  $v = \text{konst.}$ ) linearna zveza. Ker pa je hitrost  $v$  konstantna, je  $x_A = v \cdot t_A$  premica odmikanja Vladke od Pera v grafu ( $ct_A, x_A$ ) bolj strma kot simetrala  $x_A = c \cdot t_A$ , saj je  $v < c$  (3a. slika, [5\*]): ( $ct_A$  ob ordinatni osi zaradi enakega merila na obeh oseh).

**3. posledica:** OB IZHODIŠČU SOSEDOVA URA NE MORE KAZATI MANJ ( $\gamma > 1$ )! Ko se Vladka odmakne od Pera ( $t \neq 0$ ,  $D_2$ ) mu pošlje svetlobni signal. Napišimo enačbi za gibanje svetlobe od starta V do cilja P posebej za sistema A in B in iz obeh izpeljimo  $\gamma^2 = 1/(1 - v^2/c^2) > 1$

Odtod npr.  $\gamma = 2 \rightarrow v = 0,87c$ . Korespondenca  $v \rightarrow 0$ ,  $\gamma \rightarrow 1$ ! (\*6).

Ob vsakem dogodku D »vidita« opazovalca (na mestu dogodka D) na vlaku A in na vlaku B oba ista para koordinat:  $D(t_A, x_A)$  in  $D(t_B, x_B)$ , **DOGODEK D JE V DVEH SISTEMIH DOLOČEN S ŠTIRIMI KOORDINATAMI!** [\*7] Pri tem je nasploh  $t_A \neq t_B$ , (klasično  $t_A = t_B$ , tam gibanje ne vpliva na čas),  $v = \text{konst.}$  – za vse vagone obeh



vlakov. Merske enote: 1(s<sup>2</sup>), »korak« premika na slikah: npr. (2. slika) v časovnem presledku  $\Delta t = 100$  (s<sup>2</sup>) je premik za en vagon (1. vagon =  $t \cdot v = 100v$ , npr.  $v = 1\text{m/s}$ , 1. vagon = 100 m). Na 2. sliki ( $\gamma = 2$ ) so konci vagonov označeni samo s črtico in s časom dogodka na tem mestu, levo dve zaporedni A istočasni sliki (zgoraj 0 – 0 in potem spodaj 200 – 200, desno zaporedno po dva B istočasna dogodka zgoraj 0 – 0, spodaj 100 – 100). ENOT NE PIŠEMO, v obeh sistemih so iste; npr. meter, vagon, sekunda ...! Na levi sliki spodaj se premakne izhodišče B z Vladko za »2 koraka«, 2 vagona<sub>A</sub> =  $2 \cdot 100v$  na desno (D<sub>2</sub>), na desni sliki spodaj izhodišče A s Perom za en »korak«, 1 vagon<sub>B</sub> =  $100v$  na levo (D<sub>3</sub>).

V A so ure Asinhronizirane (0–0, 200–200), v B Bsinhronizirane (0–0, 100–100)!

4. posledica: upoštevam 2. posledico in na 2. sliko dodam levo D<sub>4</sub> (400), desno je D<sub>2</sub> (200).

A ISTOČASNI DOGODKI NISO B ISTOČASNI! D<sub>4</sub>, D<sub>2</sub>

B ISTOČASNI DOGODKI NISO A ISTOČASNI! D<sub>3</sub>, D<sub>2</sub>

Leva 2. slika, 4. slika: vsi dog. so A istočasni (0–0, 200–200) – ne pa B istočasni!

Desna 2. slika: vsi dog. so B istočasni (0–0, 100–100) – ne pa A istočasni!

Ob sinhr. 100 – 100 – ... na B – je na A med izhodiščem A in koncem drugega vagona<sub>A</sub> časovna razlika: ... 50 – 200 – ... (desna 2. slika spodaj)  $\Delta t_A = 150 = 100 \cdot \gamma - 100/\gamma = \Delta t_B \cdot (\gamma - 1/\gamma)$ , če je  $\Delta t_B = 100$  »korak« gibanja izhodišča A med izhodiščem B in koncem prvega vagona<sub>B</sub> in v B časovna razlika med D<sub>1</sub> in D<sub>3</sub>.

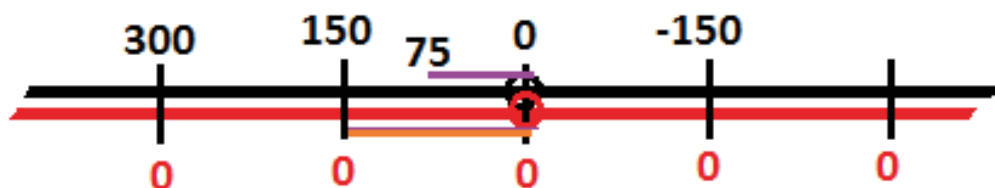
Ob  $t_A = 0$  in A istočasnosti dogodkov pa je 4. slika (kaj kažejo ure na obeh vlakih ob D<sub>1</sub>, prim. 2. levo sliko zg.) takšna:  $\Delta t_B = 150$  (podobno za  $t_B = 0$ , B)

5. posledica: URE DVEH SISTEMOV SE HKRATI PREHITEVAJO IN ZAOSTAJAJO! (2, 3b slika). Primer: Vladko v izhodišču B ob dogodku D<sub>2</sub> ( $t_2 = 100$ ) vprašamo, koliko (hkrati, istočasno) kaže Perova ura  $t_A$  v (od nje oddaljenem!) izhodišču A (P)! Možna sta dva odgovora: A istočasno 200 (=  $100 \cdot \gamma$ ) (2. slika levo, A prehiteva!) in B istočasno 50 (=  $100/\gamma$ , B prehiteva!) (2.slika desno). Če Vladko takrat vprašam za sosedno (neoddaljeno!) A-uro (pomočnika P1, 3b slika) je odgovor samo eden: 200.

Torej: Vladkina ura prehiteva Bistočasno (100–100) Perovo uro (50), ki zaostaja – hkrati (ob dogodku D<sub>2</sub>!) pa Perova ura prehiteva Aistočasno (200–200) Vladkino uro (100), ki zaostaja. Pri tem EN dogodek na Vladkini uri (100, D<sub>2</sub>) povezujemo z DVEMA zaporednima dogodkoma (50, 200, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>) na Perovi uri. Prvi, D<sub>3</sub> je B istočasen z D<sub>2</sub>, drugi, D<sub>4</sub>, A istočasen z D<sub>2</sub>.

Torej izraz HKRATI se sklicuje na EN DOGODEK, istočasnost A ali B pa vedno povezuje dva dogodka! Dve istočasnosti, A in B, ki se nikoli ne prekrivata (4.posledica) pa povzročata navidežno časovno protislovje!

Na ta način, kot na 3b.sliki, lahko odgovorimo na vprašanje o času na poljubni sosedni uri tudi, če je postavljeno poljubnemu opazovalcu v sistemu. Pri tem so (ob določenem  $\gamma$ ) vse možne (rdeče npr. 200–200) A istočasnice seveda vzporedne, enako tudi (zelene npr. 100–100) B istočasnice. Kaj bi odgovoril Pero, če bi ga ob D<sub>3</sub> vprašali, koliko kaže istočasno Vladkina ura? In koliko vidi na sosednji uri V1 Vladkine pomočnice?



4.slika

Na 2.sliki levo vidimo, da je Vladka izmerila časovni presledek  $\Delta t_B = 100$  med dvema dogodkoma  $D_1$  in  $D_2$  NA ISTEM MESTU v izhodišču B. Imenujemo ga **LASTNI časovni presledek**. Pero je pa izmeril za ista dogodka **KOORDINATNI** časovni presledek  $\Delta t_A = 200 = \gamma \cdot \Delta t_B$  gibanja Vladke med istima dogodkoma, a med različnima koordinatama izhodišča A in pomočnika  $P_1$  na koncu drugega vagona<sub>A</sub>. (Na sliki desno je pa med  $D_1$  in  $D_3$  lastni Perov presledek 50, koordinatni Vladkin pa 100).

**Lastni presledek (npr. 100) med dogodkoma je** (zaradi 2. posledice) **vedno manjši od koordinatnega (200) med istima dogodkoma.**

Na 3b. sliki so lastni časi (0, 50, 100, ...) dogodkov, ki se dogajajo pri Peru, na navpičnici  $ct_A$  skozi izhodišče in lastni časi (0, 50, 100, ...) pomočnika P1 na navpičnici skozi P1. Lastni časi Vladke (0, 100, ...) pa so na poševnici iz izhodišča skozi  $D_2$  ... (Obratno bi bilo na grafu ( $ct_B, x_B$ )).

Če se po koordinatnem sistemu A premika namesto Vladke hitri delec B, bomo LASTNO časovno dogajanje na njem lahko spremljali z merjenjem večjih (dilatacija) KOORDINATNIH časovnih presledkov med različnimi mesti delca v našem sistemu A. (Kot pri smučarskih tekmah: sodniki merijo koordinatne presledke med startom in ciljem, lahko bi pa to merili kar s stoparico v smučarjevem žepu – saj pri teh hitrostih ni razlike!).

Tako vidimo, da je izjava v 5. posledici o medsebojnem hkratnem prehitevanju ur samo navidez protislovna, saj je mogoča zaradi dveh načinov primerjanja časov (A ali B istočasno) med urama A in B, ki sta razmaknjeni. Če pa sta ti uri na istem mestu je možen samo eden rezultat! Tudi če dvojček odpotuje v vesolje, bosta ob vrnitvi, na urah, z bratom dvojčkom videla isto:  $t_A$  in  $t_B$ . Katera številka bo večja, kateri dvojček bo pomlajen, je pa odvisno od načina gibanja vesoljca (ki pa gotovo ni bilo samo enakomerno oddaljevanje, ki ga mi »obvladamo«, saj se tako vesoljec ne bi mogel vrniti)! In res – pri meritvi z urami na letalu in na tleh, pri poletu okoli zemlje, so dobili pri eni smeri poleta prehitevanje letalskih ur, pri nasprotni smeri potovanja okoli zemlje pa prehitevanje zemeljskih! (To bi bil lahko odgovor na včasih slavni »paradoks dvojčkov«!).

Naša poenostavljena izpeljava (2. slika!) velja le za dogodka v obeh izhodiščih. Enaka »nova« pravila pa dobimo za poljubno izbiro sedežev za Pera in Vladko, pri tem lahko koordinate preračunavamo »po kmečko«, tako kot na levi in desni 2. sliki, ali pa s posebnimi (Lorentzovimi) transformacijskimi enačbami. **Pero** lahko trdi, da gibajoča se Vladkina ura zaostaja – pa je to res samo, če Vladka čas izmeri npr. med dogodkoma  $D_1$  in  $D_2$  na istem mestu v B (lastni čas, leva 2. slika), če bi **Pero** meril lastni čas med dogodkoma  $D_1$  in  $D_3$  na istem mestu v izhodišču A (desna slika) bi Vladkina ura B prehitevala, pri ostalih izbirah dogodkov pa je možno eno ali drugo. **Pero** bi ob  $D_3$   $t_A = 50$  videl na sosednjem vagonu<sub>B</sub>  $t_B = 100$ , ker pa ve, da so ure B sinhronizirane, je to (ob  $D_3$ ) tudi Vladkin čas  $D_2$ ! Isto  $t_B = 100$ , vidi pri Vladki tudi **Perov** pomočnik P1 – toda šele ob  $D_2$  in  $t_A = 200$ , ko se mimo pripelje Vladka, torej je takrat A istočasno tudi pri **Peru** ura 200!.

Med dvema dogodkoma merimo (npr. med  $D_1$  in  $D_2$ ) časovni presledek  $t_2 - t_1 = \Delta t$ . Nasploh v poenostavljenih razlagah primerjamo največkrat samo koordinate posebnih parov dogodkov: istočasnih dogodkov ( $\Delta t = 0$ ), dogodkov na istem mestu ( $\Delta x = 0$ ), razmaknjene dogodke ( $\Delta x \neq 0$ ), dogodke v izhodiščih ( $x = 0$ ), .... dogodke v enakih časovnih presledkih, enakih krajevnih presledkih itd.

**6. posledica:** Odkrili bi tudi (v naši okolici A so vse ure A sinhronizirane!) da med dvema A istočasna dogodka v sosednjem sistemu B vedno »vidimo« **skrčene vagona<sub>B</sub> (kontrakcija)** – (kar je zopet »protislovno«: če jaz vidim pri sosedu skrčen vagon, kako potem more **hkrati** (!) tudi sosed videti (zaradi 1. postulata) skrčenega pri meni – in daljšega pri sebi?). Podobno enostavno pravilo  $\Delta x_A = \gamma \cdot \Delta x_B$  (in obratno  $\gamma \Delta x_A = \Delta x_B$ , [\*8]) kot za čas pa velja le, če te dolžine merimo med istočasnimi dogodki – npr. med konci vagonov. Za to sta pa zopet dve možnosti: **A istočasno** ali **B istočasno**! Premik **Pera** v levo s skupnega izhodišča z Vladko ob  $D_1$  v času  $t_B = 100$  za **en vagon<sub>B</sub>** =  $1 \cdot 100v$  (2. slika desno) da **B istočasna** dogodka  $D_2$  in  $D_3$ . Toda ob istem dogodku  $D_2$  sta med Vladko in **Perom** 2. vagona<sub>A</sub> (2. slika levo),  $2 > 1$ ! Na tej sliki se vidi tudi, da so nasproti 2. vagonov<sub>A</sub> = 4. vagoni<sub>B</sub>,  $2 < 4$ , dogodka  $D_2$  in  $D_4$  pa sta **A istočasna**. (Pri 5. posledici: Vladka ob določenem dogodku ( $D_2$ , hkrati, SEDAJ ob  $t_B = 100$ ) »vidi« pri **Peru** dva dogodka:  $D_4$  (A istočasno, 200) in  $D_3$  (B istočasno, 50),  $D_4$  je štirikrat ka-

sneje kot  $D_3$ , zato so takrat vmes štirje vagoni<sub>B</sub> namesto enega – kot pri  $D_3$ ).

Ponavadi beremo, da hitre mimovozeče ure **zaostajajo**, metri ob njih se pa **skrajšajo**. Toda zaradi enakovrednosti sistemov A in B (postulat I) **mimovozeče ure hkrati tudi prehitevajo** in meter ob njih je **daljši** – pa čeprav se (klasično!) to zdi še kako protislovno! Sicer pa podoben vsakdanji primer »protislovja« lahko tudi pokažemo: dve enako dolgi letvici – če sta vzporedni, vidim bolj oddaljeno sosedovo letvico krajšo, sosed pa v istem trenutku (ker meri drugače!) vidi krajšo letvico pri meni (in sta – ob takem primerjanju – obe letvici **HKRATI** daljši in krajši!).

Ob prvem načinu merjenja dobimo prvi del »resnice«, ob drugem drugi del, ob tretjem morda še kaj več ...! Zato moramo biti pri razlagi pazljivi in ne npr. združevati protislovnih delnih »resnic«: npr. sosedove **ure, ki zaostajajo** (njihove **sekunde so daljše!**) in **HKRATI** sosedove **metre, ki so skrajšani** – to dvojje je v protislovju z drugim postulatoma!! ( $c_A = c_B \rightarrow m_A/s_A = m_B/s_B$ ). V 3. posledici je zapisano, da oba opazovalca A in B »vidita« ob vsakem dogodku poleg svojih tudi sosedove koordinate dogodka in to jima omogoča pravilno izbiro dogodkov in način meritve, ki vodijo k neprotislovnim sklepom (gl. dodatek!). Pri primerjanju  $m_A/s_A = m_B/s_B$ , namesto podaljšane sekunde v B med – v A – razmaknjenima dogodkoma  $D_1$  in  $D_2$  – moramo med dvema dogodkoma na istem mestu, npr. v izhodišču A, ugotavljati v B **skrajšano sekundo** med  $D_1$  in  $D_3$  (in v B meriti koordinatni časovni presledek, saj vendar ne moremo hitrosti  $c$  meriti med dogodkoma na istem mestu!).

(Še to: časovni presledek med istima dogodkoma je daljši  $\rightarrow$  če je uporabljena sekunda krajša in obratno! Podobno velja za razdalje in meter!)

V tem je **miselna novost in težava nove teorije**: če dokažemo, da ure B prehitevajo, velja to vedno, pa če to merimo ali ne, hkrati tudi vedno zaostajajo, predmeti v B pa so hkrati vedno daljši in krajši kot v A! Ta – v klasični fiziki – napačna, nelogična trditev je v relativnosti pravilna in logična. V tem je pa glavna vrednost govorjenja o relativnosti v srednji šoli, to je nekaj, kar bi bodoči izobraženec moral vedeti!!

**7. posledica:** Pa še ena posebnost: če na 2. sliki levo premaknem Vladko še za dva vagona A desno, bo tam dogodek  $D_5$  (200//400). V primerjavi s  $D_4$  (400//200) imata dogodka nasprotni časovni usmeritvi – za A-jevca je najprej  $D_4$  (200) in potem  $D_5$  (400), za B-jevca nasprotno: prej je  $D_5$  (200) in potem  $D_4$  (400). Pa tudi to »protislovje« je mogoče pojasniti – če upoštevamo koordinati  $x$  dogodkov in razdaljo med dogodkoma  $D_5$  in  $D_4$  vidimo, da je večja od razdalje  $c \cdot \Delta t$ , ki bi jo predmet opazovanja lahko preletel v tem času  $\Delta t = 200$  ali  $\Delta t = 200$  – torej se taka dogodka ne moreta zgoditi ob istem predmetu (in posledica nekega dejanja na predmetu ne more biti pred vzrokom tega dejanja, v 7. posledici ni logičnega protislovja!).

Ob številkah 2. slike je pa mogoče odgovoriti tudi na ostala »protislovna« vprašanja relativnostne teorije. Da pa članek ne bo predolg, lahko to dodatno besedilo dobite po emailu, če to želite, mi sporočite.

peter.prelog@siol.net

Pripombe in dodatek k temu članku sta dosegljiva na spletni strani:  
[www.zrss.si/strokovne-revije/fizika-v-soli/fizika-v-soli-video-vsebine/](http://www.zrss.si/strokovne-revije/fizika-v-soli/fizika-v-soli-video-vsebine/)



# Mednarodna mladinska naravoslovna olimpijada, četrtrič

dr. Barbara Rovšek

Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta



## Izvleček

V članku predstavim Mednarodno mladinsko naravoslovno olimpijado: opišem, komu je namenjena, kako poteka, kako izberemo ekipo, kako jo na tekmovanje pripravljamo, naštejemo fizikalne vsebine, iz katerih so na tekmovanju lahko sestavljene naloge, in kakšne rezultate dosegamo. Ne nujno v tem vrstnem redu.

**Ključne besede:** naravoslovje, priprave na tekmovanje v znanju, olimpijada, IJSO

## International Youth Science Olympiad, 4th Edition

### Abstract

The author describes the International Youth Science Olympiad, including the students it aims at, the conduction process, the choice of teams, competition preparation, the potential topics of assignments, and the results we achieve, not necessarily in that sequence.

**Keywords:** science, preparation for a knowledge competition, Olympiad, and IJSO.

Na začetku decembra 2023 je v Bangkoku na Tajskem potekala 20. Mednarodna mladinska naravoslovna olimpijada (International Junior Science Olympiad, IJSO) [1, 2]. Letos so se olimpijade udeležili 304 tekmovalke in tekmovalci iz 54 držav (od tega je bilo 17 evropskih; podroben seznam sodelujočih je na spletni strani [3]).



**Slika 1:** Slovenska ekipa na IJSO 2023, ovenčana z odličji, z leve: Aleksander Jotanovič, Niko Habinc, Primož Markovič, Andraž Čadež, Izadora Kopač, Lea Hrvatin (december 2023). Niko in Andraž sta v šolskem letu 2023/2024 devetošolca, preostali pa dijakinji in dijaka 1. letnikov gimnazij.

Ta olimpijada se je že četrtrič udeležila tudi slovenska ekipa in na njej ponovno dosegla zelo dober rezultat. Vsi člani ekipe so se domov vrnili z odličji: osvojili so eno zlato (prvo zlato odličje na IJSO), štiri srebrna in eno bronasto odličje [4]. Ekipni uspeh slovenske ekipe je izjemen: med vsemi državami so dosegli skupno deveto mesto, med evropskimi pa drugo; eno srebrno odličje več je osvojila le ekipa Madžarske.

Olimpijada je namenjena učencem oziroma dijakom, ki do konca koledarskega leta, v katerem tekmovanje poteka, še ne dopolnijo 16. let. V našem primeru to pomeni, da se je praviloma udeležujejo dijakinje in dijaki 1. letnika srednje šole pa tudi – to je naša želja, ki se je doslej še vedno uresničila – še kak učenec ali učenka 9. razreda osnovne šole.

### Vsebinska olimpijade in naloge

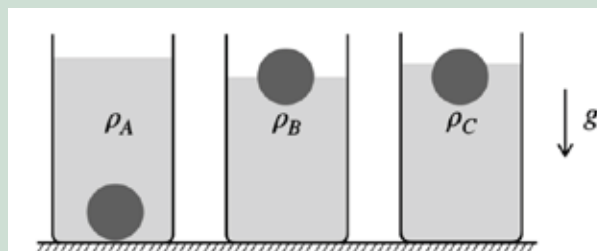
Olimpijada je naravoslovna, kar pomeni, da se morajo udeleženci, ki osvajajo odličja, na tekmovanju izkazati v odličnem znanju fizike, kemije in biologije. Vsa tri področja so zastopana enakomerno, pri čemer je priporočilo in želja, da so naloge vsaj v določeni meri zares interdisciplinarne. Včasih to dosežemo v zadovoljivi meri, drugič pa malo manj, odvisno od navdiha sestavljavcev nalog in tega, kako interdisciplinarne ekipe avtorjev nalog organizatorji sestavijo.

Ko kroglo spustimo v kapljevino z gostoto  $\rho_A$ , se krogla potopi do dna, kot prikazuje slika na levi. Krogla pri tem izpodrine prostornino kapljevine  $V_A$ .

Ko isto kroglo spustimo v kapljevino z gostoto  $\rho_B$ , krogla v njej plava potopljena do polovice, kot prikazuje slika v sredini.

Ko isto kroglo spustimo v kapljevino z gostoto  $\rho_C$ , krogla v njej plava, kot prikazuje slika na desni.

Kolikšna je sila vzgona na kroglo, ko plava v kapljevini z gostoto  $\rho_C$ ?



- A.  $\rho_C V_A g$       B.  $\frac{1}{2} \rho_A V_A g$       C.  $\frac{1}{2} \rho_B V_A g$       D. ni dovolj podatkov

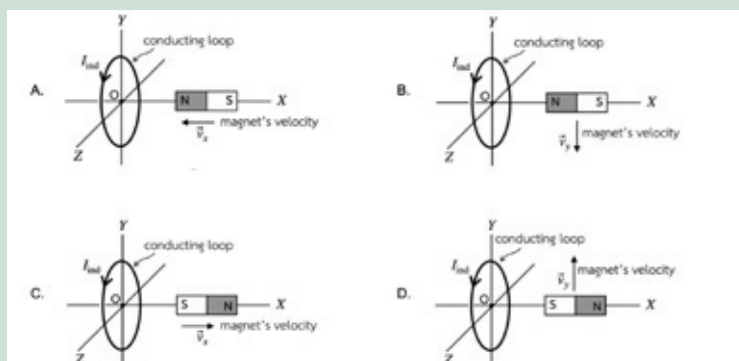
Slika 2: Konceptualna fizikalna naloga iz vzgona z IJSO 2023.

Na eni od slik je **napačno** prikazana smer električnega toka  $I_{\text{ind}}$ , inducirane v prevodni zanki. Na kateri?

(Prevodna zanka leži v ravnini  $y$ - $z$ , inducirani tok pa teče v nasprotni smeri urinega kazalca, če na zanko gledamo od strani, kjer je  $x > 0$ .)

magnet's velocity = hitrost magneta

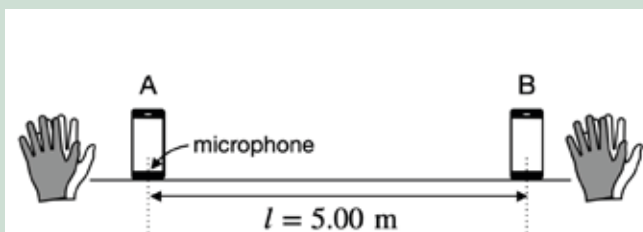
conducting loop = prevodna zanka



Slika 3: Konceptualna fizikalna naloga iz indukcije z IJSO 2023.

Pametni telefon lahko uporabimo kot zvočno štoparico, ki meri časovni interval med zaporednima zvočnima dogodkoma, ki ju zazna mikrofonski telefon. Štoparica se sproži, ko telefon zazna prvi zvočni signal, in ustavi, ko zazna drugi zvočni signal.

Z zvočno štoparico dveh telefonov, ki sta na razdalji  $l = 5,00$  m, merimo hitrost zvoka v zraku ( $v = 340$  m/s), kot prikazuje slika. Najprej prva dijakinja zaploska zraven telefona A in čez kratek čas druga dijakinja zaploska zraven telefona B. Obe ploskanji zaznata zvočni štoparici obeh telefonov, a ob različnih trenutkih, ker zvok potuje s končno hitrostjo. Katera časovna intervala prikazeta zvočni štoparici telefonov A in B?



- A. A: 0.0147 s, B: 0.0147 s      C. A: 3.1000 s, B: 3.1294 s  
B. A: 2.0147 s, B: 2.0000 s      D. A: 2.1294 s, B: 2.1000 s

Slika 4: Fizikalna naloga iz kinematike z IJSO 2023.

Delegacijo iz posamezne države sestavlja devet članov, med katerimi je šest tekmovalk in tekmovalcev ter trije vodje ekipe (za vsako od treh področij je zadolžen eden od njih). Tekmovanje je sestavljeno iz treh delov: testa s 30 nalogami izbirnega tipa, testa z daljšimi računskimi teoretičnimi nalogami in eksperimentalnega testa. Na zadnji olimpijadi je vsak test trajal tri polne ure (kar pa ni pravilo; posamezni test lahko traja tudi dlje), potekali pa so na različne dneve tako, da je bil med dvema testoma dan odmora. Teoretične naloge tekmovalci rešujejo kot posamezniki, pri eksperimentalnem delu pa se združijo v ekipe s po tremi člani. Pri slednjem praviloma izvedejo vsaj tri različne eksperimente (tri je značilna številka za IJSO), pri čemer se vsak član eksperimentalne ekipe loti enega. Med seboj si seveda tudi pomagajo, ker običajno vsi eksperimenti niso enako časovno zahtevni.

Naloga vodij ekip je, da skupaj z avtorji naloge pregledajo, o njih razmislijo in predlagajo spremembe ali izboljšave. Ko naloge po krajši ali daljši diskusiji dobijo končno obliko, jih prevedemo v svoje jezike. Pri prevajanju se vsi držimo pravila, da ne povemo nič več, kot piše v izvirni angleški verziji nalog; lahko pa seveda to povemo

na način, ki je našim tekmovalcem znan in domač. Vsak lahko na spletu najde uradne angleške verzije nalog z olimpijad [5] in jih primerja s prevodi; nekaj slovenskih prevodov nalog je objavljenih na spletu [6, 7]. Za prvi vtis so na slikah od 2 do 4 trije primeri fizikalnih nalog izbirnega tipa z letošnje olimpijade (rešitve nalog bodo objavljene v naslednji številki *Fizike v šoli*). Omenimo, da so vseh deset fizikalnih nalog izbirnega tipa naši tekmovalci rešili v povprečju bolje od povprečja vseh 304 tekmovalcev (od desetih kemijskih nalog so jih bolje rešili devet, od bioloških pa osem, kar je v celoti zavidljivo dobro). Nalogi na slikah 2 in 3 je pravilno rešilo pet naših tekmovalcev, nalogo na sliki 4 pa so pravilno rešili vsi naši tekmovalci.

Poleg diskusije o nalogah in prevajanja vodje ekip po tekmovalstvu tudi ocenjujemo skenirane pole svojih tekmovalcev. Obenem vse pole ocenijo tudi organizatorji. Če se točke enih in drugih razlikujejo in smo hkrati mi izdelke ocenili bolje od organizatorjev, imamo po ocenjevanju priložnost, da svoje točkovanje utemeljimo na tako imenovani moderaciji. Včasih nam uspe dokazati, da so uradni ocenjevalci pri ocenjevanju posamezne naloge kaj spregledali ali napačno točkovali, in takrat se vsota točk nekoliko poveča.



**Slika 5:** Udeleženci prvih priprav na IJSO 2023 pred zgradbo Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani (junij 2023). Tistih, ki so predavanja poslušali na daljavo, na fotografiji ni.

Pravilo za osvajanje odličij na IJSO je podobno pravilom na drugih olimpijadah v znanju; nekoliko se ta pravila razlikujejo le v mejah za barvo odličja. Na IJSO prejme zlato odličje 10 % tekmovalcev z najboljšimi dosežki, naslednjih 20 % prejme srebrno in naslednjih 30 % bronasto odličje. Odkar smo po prvi poskusni udeležbi nekoliko ad hoc sestavljene slovenske ekipe na IJSO leta 2019 (Doha, Katar) zasnovali in organizirali sistematične priprave na olimpijado, so vsako leto vsi člani naših ekip osvojili odličja. Skupaj se nam je tako nabralo 18 odličij: eno zlato, devet srebrnih in osem bronastih (k vsoti lahko prištejemo še dve bronasti odličji, ki sta jih osvojila člana prve poskusne ekipe na IJSO 2019). Več o vsem dogajanju na olimpijadah in tudi dosežkih naših učenk in učencev lahko preberete v novicah v Arhivu na spletnih straneh DMFA Slovenije [8].



**Slika 6:** Prvi izbirni test je za vse potekal v živo na Pedagoški fakulteti Univerze v Ljubljani (julij 2023).



**Slika 7:** Prostočasne aktivnosti v Trenti (avgust 2023).

## Priprave

Ker so na olimpijadi naloge sestavljene tudi iz vsebin (»učni načrt olimpijade«, [9]), ki jih naši osnovnošolci ne spoznajo v šoli pri pouku fizike, kemije in biologije (pa tudi pri matematiki), za širšo množico kandidatov za slovensko olimpijsko ekipo organiziramo priprave [10, 11]. Na prve enotedenske priprave, ki jih priredimo na fakultetah v Ljubljani (Pedagoški in Biotehniški, Oddelku za biologijo) ob zaključku šolskega leta (konec junija), povabimo okoli 70 učenk in učencev 8. in 9. razreda, ki so dosegli najboljše rezultate na državnih tekmovanjih v znanju fizike, kemije in biologije. Priprav so se doslej udeležili v velikem številu. Za vse, ki so doma daleč od Ljubljane, priprave prenašamo tudi na daljavo. Kmalu po prvih pripravah izvedemo prvi izbirni test (ki traja tri



**Slika 9:** Eksperimentalni del tretjih priprav na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani (november 2023).



**Slika 8:** Predavanja v kinodvorani TIC TNP v Trenti. Tam se počutimo zelo dobro in imamo vse, kar potrebujemo.

polne ure), po katerem število kandidatov za olimpijsko ekipo zmanjšamo na ducat.

Za izbrano dvanajsterico konec avgusta organiziramo drugi teden priprav. Praviloma se druge priprave dogajajo zunaj Ljubljane (doslej so enkrat potekale na Bledu in dvakrat v Trenti). Letos smo v program vključili novo področje, astronomijo. S seboj smo imeli teleskop, s katerim smo nekega jasnega večera opazovali zvezde nad Trento. Druge priprave so pomembne tudi zaradi socializacije: učenke in učenci živijo skupaj v razmeroma sproščenem vzdušju, kjer se poleg predavanj dogaja še marsikaj. V tem času se zblížajo, povežejo in postanejo zares iskriva družčina mladih, ki se tudi igra in zabava.

Drugi in zadnji izbirni test izvedemo septembra. Z njim dobimo olimpijsko ekipo. Na tretje priprave, ki so v času jesenskih počitnic, pa spet povabimo vseh 12 učencev iz najožjega izbora. Priprave organiziramo na fakultetah v Ljubljani (Pedagoški, Biotehniški in Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo) in so delno tudi eksperimentalne, kjer se učenci na primer naučijo titracije, vezave električnih krogov in mikroskopiranja. V vsem času priprav izvedemo več kot sto ur predavanj iz biologije, kemije, fizike in matematike, za kar se je v zadnjem letu trudilo 16 mentorjev.

Brez sistematičnih priprav sodelovanje na olimpijadi ne bi imelo smisla; bilo bi celo škodljivo. Z luknjami v znanju, ki so posledica razlik v učnih načrtih, bi naši učenci na tekmovanju naloge reševali slabše in dosegali slabše rezultate. Zakaj bi na drugi konec sveta pošiljali najbolj nadarjene slovenske učenke in učence, zmagovalce slovenskih tekmovanj v znanju najtežjih predmetov, če bi potem tam zelo verjetno doživeli neuspeh in razočaranje? Tako pa se zgodi ravno nasprotno. Doživijo uspeh in spoznajo, česa vsega so sposobni, če se za to potrudijo.

V nadaljevanju bom navedla matematične in fizikalne teme, ki jih na pripravah obravnavamo. Obravnava je zelo kompaktna, ker je za celotno fiziko z matematiko na pripravah na voljo le okoli 40 ur (upoštevajmo, da je na naravoslovni olimpijadi fizika le eno od treh enakovrednih področij). Vsebine zanesljivo niso dobro utrjene; se pa, z vložkom še nekaj dodatnega truda vsakega posameznika, dovolj zasidrajo v njegov srednjeročni spomin, da jih večinoma med tekmovanjem (očitno) lahko priključijo in uporabijo. Matematične vsebine, ki jih obravnavamo, so na primer funkcije (eksponentna, logaritemska, polinomi, trigonometrijske), reševanje kvadratne enačbe in osnove vektorskega računa (skalarni produkt, tudi vektorski produkt med seboj pravokotnih vektorjev). Fizikalne vsebine, ki jih obravnavamo, pa vključujejo plinske zakone (splošno plinsko enačbo), parcialne tlake, lomni zakon (kvantitativno, z uporabo lomnega količnika), enačbo leče, gravitacijski zakon, kinematiko kroženja in sile pri kroženju, gibalno količino (z izreki), statično in dinamično trenje, navor, Dopplerjev pojav pri zvoku, Coulombov zakon, indukcijo (Faradayev zakon), silo na vodnik v magnetnem polju. Pa še kaj. Popoln spisek vsebin je v učnem načrtu olimpijade [9]. Spomnim naj še, da so na priprave vabljeni tudi učenke in učenci,

ki so zaključili šele 8. razred osnovne šole (in da sta se dva osmošolca uvrstila v olimpijsko ekipo).

## Zaključek

Popolnoma jasno je, da samo tekmovanje ni edini in morda niti ne najpomembnejši namen olimpijad v znanju. Vsaj enako pomembno je, da se imajo na takih dogodkih priložnost spoznati mladi z vsega sveta, ki jih družijo podobni interesi, zanimanje za naravoslovje in sposobnosti. Ugotovijo lahko, da nismo le različni, ampak da smo si podobni in da nas tisto, v čemer se razlikujemo, naredi zanimive. Upamo, da bomo lahko aktivnosti nadaljevali in še mnogim nadarjenim učenkam in učencem dali priložnost, da vidijo nekaj sveta in si razširijo obzorja. Naslednjega decembra nam na olimpijadi ne bo vroče, upamo pa, da nas ne bo preveč zeblo. Potekala bo namreč kot običajno decembra, in sicer v glavnem mestu Romunije, Bukarešti [12].

Projekt sodelovanja Slovenije na IJSO se je pričel leta 2019 kot skupni projekt Zveze za tehniško kulturo Slovenije, ki organizira tekmovanje v znanju kemije, in Društva matematikov, fizikov in astronomov Slovenije, ki organizira tekmovanje v znanju fizike.

## Viri

- [1] Spletna stran olimpijade: <https://www.ijsoweb.org/> (14. 1. 2024).
- [2] Spletna stran IJSO 2023: <https://ijso2023.in.th/> (14. 1. 2024).
- [3] Seznam sodelujočih držav na IJSO: <https://iisoweb.org/participating-countries> (14. 1. 2024).
- [4] Novica o dosežkih na spletni strani ZOTKS: <https://zotks.si/izjemen-uspeh-na-mednarodni-mladinski-naravoslovni-olimpijadi/> (14. 1. 2024).
- [5] Spletna stran z zbirko nalog (in njihovih uradnih rešitev) s preteklih olimpijad: <https://iisoweb.org/downloads> (14. 1. 2024).
- [6] V slovenščino prevedene naloge izbirnega tipa z IJSO 2022: [https://www.dmfa.si/\\_Cms-Files/2022/12/ijso-2022-mcq.pdf](https://www.dmfa.si/_Cms-Files/2022/12/ijso-2022-mcq.pdf) (14. 1. 2024).
- [7] V slovenščino prevedene naloge izbirnega tipa z IJSO 2021: [https://www.dmfa.si/\\_Cms-Files/2021/12/mcq-physics-q.pdf](https://www.dmfa.si/_Cms-Files/2021/12/mcq-physics-q.pdf) (14. 1. 2024).
- [8] Arhiv novic: <https://www.dmfa.si/Tekmovanja/FIOS/ArhivNovic.aspx> (14. 1. 2024).
- [9] Učni načrt olimpijade: <https://iisoweb.org/qna/IJSO-Syllabus-2020-update-corrected-version.pdf> (14. 1. 2024).
- [10] Rovšek, B., in Vaupotič, D. (2021). Priprave na mednarodno mladinsko naravoslovno olimpijado, *Presek* 49(4), 12–14.
- [11] 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.
- [12] Spletna stran prihodnje olimpijade IJSO 2024: <https://ijso2024.com/> (14. 1. 2024).

# Astronomsko izobraževanje sredi Atlantika

**Rasto Snoj**

Elektrotehniško-računalniška strokovna šola in gimnazija Ljubljana, Vegova

## Izveleček

Med poletnimi počitnicami je potekalo zanimivo enotedensko usposabljanje iz astronomije, namenjeno predvsem učiteljem fizike iz različnih evropskih držav. Mednarodna poletna šola se je odvijala v kraju San Cristobal de La Laguna na kanarskem otoku Tenerife, in sicer v hibridni obliki, v živo in na daljavo prek spleta. Šolo sta organizirala Inštitut za astrofiziko Kanarskih otokov (IAC) [1] in koordinator programa za usposabljanje učiteljev Galileo (NUCLIO) [2] v sodelovanju s projektom teleskopov Faulkes [3], nacionalnim šolskim observatorijem in ekipo CESAR (ESA-INTA-ISDEFE) [4] ter v partnerstvu z European School Innovation Academy (ESIA) [5]. Zasluge za finančno podporo udeležencem pa gredo projektu Erasmus+.

**Glavne besede:** astronomija v izobraževanju, teleskopi, drugi svetovi (eksoplaneti)

## Mid-Atlantic Astronomy Summer Programme

### Abstract

During last summer school holidays, an engaging week-long astronomy course took place aimed primarily at physics teachers from various European countries. The venue of the international summer school was held in a hybrid format, i.e., partly 'online' in San Cristobal de La Laguna on the island of Tenerife. The school was organised by the Astrophysics Institute of the Canary Islands [1] IAC and [2] NUCLIO (coordinator of the Galileo teacher training program) in collaboration with [3] the Faulkes telescope project, [4] the National School Observatory and the CESAR team (ESA-INTA-ISDEFE) in partnership with [5] the European School Innovation Academy (ESIA). Credit for the financial support of the participants goes to the Erasmus+ project.

**Keywords:** astronomy in education, telescopes, other worlds (exoplanets).

## Namen izobraževanja

Zares kakovostna izobraževanja so razmeroma redka, kar še toliko bolj velja za izvedbeno zahtevne naravoslovne predmete. Seveda je smiselnost povedanega odvisna od tega, kaj naj bi med izobraževanjem pridobili koristnega za svoje poklicno delo in strokovni razvoj. Resnično si je težko predstavljati odmevno mednarodno astronomsko izobraževanje, ki bi se ga aktivno udeležila široka paleta učiteljev in profesorjev naravoslovja, predvsem fizike in astronomije, in pri tem (to velja vsaj za tiste, ki so se izobraževanja udeležili osebno) imeti privilegij ogledati si tudi največje in najsodobnejše teleskope, ki jih uporabljajo poklicni astronomi.

Vse te vrline opisuje program »Astronomy Education Adventure in the Canary Islands 2023«, kar je uradni naziv lanske enotedenske poletne šole na Kanarskih otokih, in sicer na otoku Tenerife in delno tudi na sto kilometrov oddaljenem otoku La Palma. Glavni namen

izobraževanja je bil seznanitev udeležencev z najnovejšimi spoznanji na področju raziskav eksoplanetov in z uporabo vesoljskih tehnologij za npr. opazovanja Zemlje iz vesolja. Poseben poudarek je bil na spoznavanju nekaterih računalniških orodij, s katerimi lahko učitelji v šoli popestrijo pouk in pomagajo učencem pri raziskovalnem delu. Zaradi velikega števila udeležencev (okoli 200) je bilo izobraževanje izvedeno v hibridni obliki. Za večino udeležencev je to pomenilo spletno sodelovanje, le kakih 50 srečnežev pa je lahko osebno sodelovalo na predavanjih in delavnicah v veliki dvorani Inštituta za astrofiziko Kanarskih otokov (IAC).

Na IAC načrtujejo tudi spektrografe in astronomske kamere za opazovanje v vidni in infrardeči (IR) svetlobi, različne znanstvene instrumente in celo največje teleskope, kot je znameniti Gran Telescopio Canarias (GTC). Njihov naslednji pomembni projekt je teleskop ExoLifeFinder (ELF), ki je namenjen odkrivanju in sli-



Slika 1: Udeleženci izobraževanja stojijo pred maketo prihodnjega ogromnega teleskopa ELF. (Foto: IAC)

kanju planetov zunaj našega Osončja. Na sliki 1 vidimo v ospredju maketo teleskopa ELF. Več manjših zrcal bo nameščenih na posebnih nosilcih, postavljenih na večji medsebojni razdalji, podobno, kot če bi imeli eno zelo veliko zrcalo in bi uporabili samo njegov zunanji del. Ta pristop zmanjšuje celotno maso, poenostavlja mehaniko ter občutno znižuje stroške. Ločljivost se skoraj ne bo razlikovala od klasičnega teleskopa z zrcalom enakega premera, bo pa imel slabši kontrast. Na inštitutu IAC trdijo, da to ne bo predstavljalo večjih težav za specifične raziskovalne namene. Gre namreč za teleskop - interferometer, ki bo analiziral površine in atmosfere eksoplanetov s ciljem pridobitve dokazov o možnem obstoju življenja. Naredili so že tudi manjši prototip tega sistema, ki se je dobro izkazal.

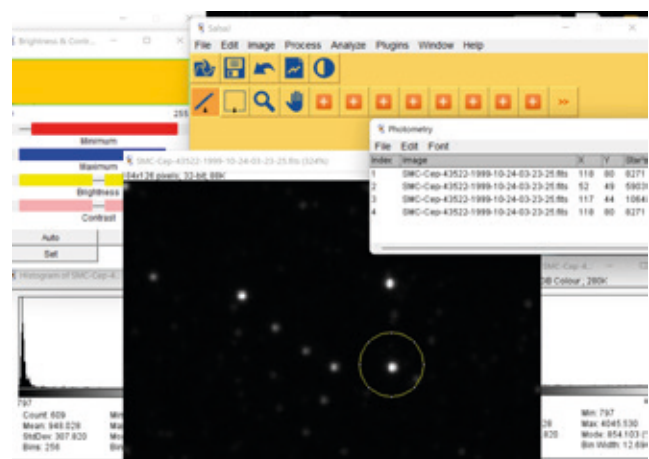
## Program in izvedba

Prvih pet dni izobraževanja, ki je potekalo v veliki dvorani IAC (natančneje IACtec, kjer je tudi center za medicinsko tehnologijo in velike teleskope), je bilo namenjenih astronomiji in robotskim teleskopom v izobraževanju, t. i. drugim svetovom v našem Osončju in drugim svetovom zunaj njega. Nekoliko nejasna, morda celo nerodna opredelitev teme ni nikogar posebej motila, saj so bile posamezne vsebine oz. sklopi konkretnije predstavljeni.

Po uvodni predstavitvi s strani vodstva inštituta in po vodenem ogledu IAC ter spoznavanju posebnosti kopice observatorijev na Kanarskih otokih je sledil še kratek uvod v astronomijo in astrofiziko, pri čemer je seveda treba upoštevati, da so organizatorji zagotovo že vnaprej vsaj približno poznali zelo različna predznanja udeležencev in temu prilagodili vsebino, kar pomeni, da je bilo tukaj povedanega za nekatere premalo, za druge preveč. Za ogrevanje smo preizkusili prosto dostopen interaktivni planetarij Celestia [6], s katerim se nazorno »sprehodimo« po vesolju.

Kasneje je bilo govora tudi o projektu robotskih teleskopov PETeR [7], podrobneje pa smo spoznali še računalniški program SalsaJ (slika 2) in merjenje svetlosti različnih nebesnih teles – osnove fotometrije. Omenjeni javanski program SalsaJ ni novost, vendar je vsaj prosto dostopen in si ga lahko skupaj z navodili prenesemo npr. s spletnega naslova <https://salsaj.software.informer.com/2.1/>. Nekateri so njegovo ime komentirali kar kot »Such A Lovely Software for Astronomy in Java«. SalsaJ je zelo dobro opisan tudi na spletni strani <http://www.euhou.net/www.euhou.net/index.php/what-is-eu-hou-mainmenu-3e84e.html?task=view&id=1> projekta European Hands-on Universe (EU-HOU) [8], ki je že na začetku prejšnjega desetletja nastal v sodelovanju s številnimi učitelji in znanstveniki z namenom uporabe resničnih podatkov (npr. z analizo digitalnih astronomskih fotografij) pri pouku astronomije.

V nadaljevanju smo se posvetili nekaterim zanimivim vsebinam, kot je uporaba programa GeoGebra za simulacijo prekrivalnih dvojnih zvezd in za izdelavo pregled-



Slika 2: Program SalsaJ omogoča delo z astronomskimi fotografijami v formatih .fits in .jpg, kot sta fotometrija in merjenje relativnih razdalj.

nice v Excelu za določitev mase Jupitra, pri čemer smo uporabili posnetke, ki smo jih obdelali s programom SalsaJ.

Zdaj že legendarna Rosa Doran, koordinatorka interaktivnega centra za astronomijo in inovacije v izobraževanju [9], je navzočim predstavila številne projekte programa za usposabljanje učiteljev Galileo (NUCLIO) [2], vmes pa so bile na programu nekako samoumevno še razne delavnice, debate in podobne vsebine pa tudi taki »izumi«, kot so »*warm up activities*«, ki pa so zaradi stalnega ponavljanja večkrat na dan delovali že skoraj moteče. Večino dejavnosti sta suvereno vodila in udeležencem pomagala s koristnimi nasveti (še posebej glede uporabe različnih programskih orodij in odpravljanja pogostih težav z internetom) vedno prijazna Nayra Rodriguez z IAC in vsestranski Portugalec Gustavo Rojas, ki se je spoznal na tako rekoč vse.

A vseh teh silnih teorij in (pre)številnih Zoom delavnic so se (vsaj nekateri) udeleženci kmalu naveličali, saj celodnevno sedenje v klimatizirani umetno razsvetljeni dvorani IAC na Kanarskih otokih ni tisto, za kar bi se človek odločil oditi na rahlo naporno potovanje in pri tem porabiti še dober teden dragocenih poletnih počitnic. Posebej »zabavno« je bilo tedaj, ko so te na kateri od delavnic uvrstili v virtualno sobo skupaj s kolegom, ki je sedel poleg tebe za isto mizo, a sta se oba morala pogovarjati po Zoomu. Človek se zamisli, čemu vendarle služi vsa ta tehnika, oziroma bolje, ali je že napočil čas, ko človek služi tehniki ...

No, za tolažbo pa sta bila tukaj še dva res vrhunsko zanimiva ter nepozabna izleta na teren, v okolje pravih teleskopov, eden celo ponoči, kjer smo skozi teleskop lahko opazovali lepote svetlobno še neonesnaženega nočnega neba. Tako je bilo dolgotrajno petdnevno naporno sedenje v umetnem okolju velike klimatizirane dvorane



**Slika 3:** Skupinska slika na observatoriju Teide (2400 m) [10], imenovanem po istoimenski gori na otoku Tenerife, vidni na sliki desno zgoraj. (Foto: IAC.)

kaj hitro pozabljeno, saj smo si lahko od blizu ogledali vsaj delček tiste prave astronomije.

Najprej smo se odpravili proti najvišji španski gori vulkanskega porekla El Teide (3715 m) in si na grebenu pod vrhom ogledali več sončevih in robotskih observatorijev (tudi tistih, ki so del projekta Faulkes), kar je razvidno s slik 3 in 4. Žal pa ni bilo dovolj časa, da bi uživali v čudovitem razgledu na Kanarske otoke, ki ga ponuja obisk najbolj obiskanega španskega narodnega parka Teide.

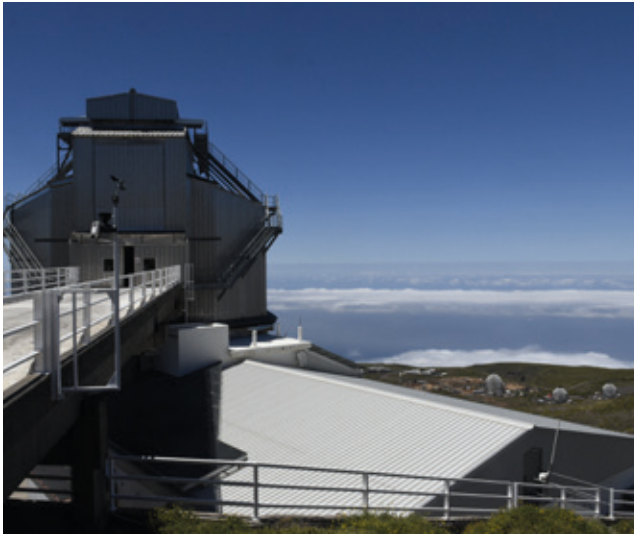
Smo pa v zameno za lep razgled del jasne noči preživeli pod zvezdnatim nebom ob sicer majhnem, 20-centimetrskem amaterskem teleskopu znamke Vixen. Večina udeležencev se ne ukvarja z ljubiteljsko astronomijo, zato so bili zadovoljni s tem, kar so videli skozi amaterski teleskop. Zavedati pa se je treba, da sodobni profesionalni teleskopi niso namenjeni vizualnemu opazovanju. Vseeno smo lahko občudovali nekatere znamenitosti južnega neba, ki jih z naših geografskih širin ne moremo videti.

## Veliki finale

V soboto je napočil tisti pravi vrhunec (sicer le za kakih 30 udeležencev), obisk znamenitih observatorijev na gori Roque de los Muchacos na sosednjem otoku La Palma. Let do tja je trajal pol ure. Po dobri uri zanimive vožnje po ozki ovinkasti gorski cesti nad prepadi smo se ob neizogibni pomoči tablet proti slabosti med prekrasnimi gozdovi in mimo spečih vulkanov le povzpeli na goro teleskopov. Program samega ogleda je bil tako natrpan, da je naša skupina zaradi prepoznega prihoda na lokalno letališče pri povratku celo zamudila let na Tenerife, vendar se je k sreči našlo še dovolj prostora na zadnjem večernem letu.

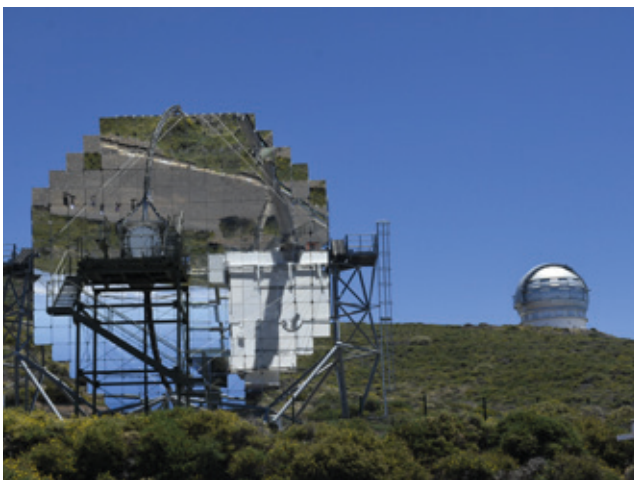


**Slika 4:** Del verige teleskopov na observatoriju Teide: Center za obiskovalce, največji evropski (nemški) 1,5-metrski sončni teleskop Gregor, nemški 70-centimetrski teleskop VTT z vakuumskim stolpom in manjši belgijski 50-centimetrski teleskop MONS, gledano od leve proti desni. (Foto: R. Snoj.)

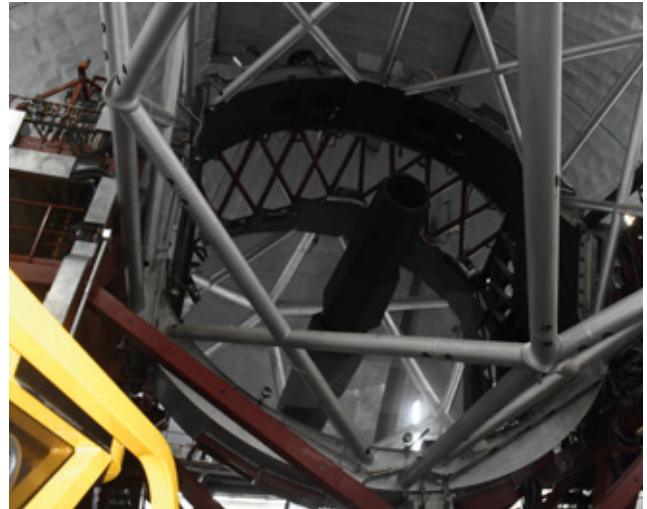


**Slika 5:** Največji italijanski 1,5-metrski teleskop Galileo. V ozadju vidimo še nekaj podobnih velikanov. (Foto: R. Snoj.)

Že sama geografska širina La Palme in Tenerifa omogoča opazovanje velikega dela južnega neba, svetlobne razmere pa so naravnost izjemne, kar še prav posebej velja za otok La Palma, ki leži globoko v Atlantiku. Vsi tamkajšnji teleskopi so nameščeni visoko nad oblaki, ki pogosto prekrivajo Atlantik in tako še zmanjšujejo svetlobno onesnaževanje iz redkih priobalnih naselij in mimoidočih ladij. Včasih astronome sicer moti t. i. »calima«, topel saharski veter, ki odnaša velike količine drobnega puščavskega prahu čez morje na več sto kilometrov oddaljene Kanarske otoke in tedaj se opazovalne razmere precej poslabšajo. To ni moteče le za občutljivo optiko velikih profesionalnih teleskopov, ampak je zaradi zmanjšane vidljivosti občasno treba zapreti lokalna letališča, prebivalci pa imajo včasih težave z dihanjem (teh informacij ne boste našli v katalogih potovalnih agencij).



**Slika 7:** Teleskop sistema MAGIC za zaznavanje Čerenkovega sevanja. Na sliki desno je kupola teleskopa GTC. Obiskovalci se lahko za zabavo opazujejo v obrnjeni sliki Čerenkovega teleskopa, kar je posledica geometrijske optike. (Foto: R. Snoj.)



**Slika 6:** V kupoli 10,4-metrskega teleskopa GTC je bolj malo prostora, zato kamera ni zajela naprave v vsej njeni osupljivi velikosti, le del s primarnim zrcalom. (Foto: R. Snoj.)

Po ogledu mnogih teleskopov od daleč in obisku informacijskega centra je sledil še nepozaben neposredni ogled teleskopa Galileo, katerega posebnost je, da se med delovanjem ne vrti le optični del in tako kompenzira vrtenje Zemlje, ampak kar celotna zgradba (slika 5).

Na koncu smo si pobliže ogledali še GTC, največji teleskop za nočno opazovanje v vidni in IR-svetlobi na svetu (slika 6). Ta velikanski reflektor je začel delovati leta 2007. Premer njegovega 17-tonskega primarnega zrcala je 10,4 metra. Sestavljeno je iz 36 manjših šesterokotnih zrcal iz stekla Zerodur podjetja Schott, saj sicer velikanska konstrukcija ne bi brez posledic zdržala lastne teže. Postavitev teleskopa je altazimutna, kar pomeni, da se vrti okoli horizontalne višinske osi in vertikalne azimutne osi. Težavo z vrtenjem vidnega polja, ki je značilna za to postavitve, pa odpravlja poseben derotator vidnega polja. Med amaterji razširjena ekvatorialna postavitve tukaj ne pride v poštev zaradi velike teže teleskopa. Teleskop in obiskovalci stojijo na vrtljivi platformi z maso 400 ton, vendar je vrtenje tako precizno in gladko, da ni slišati niti brnenja motorjev velikanske konstrukcije. Teleskop je vrste Ritchey-Chretien z goriščno razdaljo 170 m in aktivno optiko [11], ki prilagaja obliko zrcala. V kratkem načrtujejo nadgradnjo z najnaprednejšo adaptivno optiko, ki kompenzira še popačenje slike zaradi Zemljinega ozračja. [12].

Slika 7 prikazuje enega v sistemu dveh 17-metrskih teleskopov Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov (MAGIC), ki sta namenjena raziskovanju dinamičnih visokoenergijskih pojavov v vesolju v območju žarkov gama [13]. Na gori pa gradijo že naslednjo generacijo Čerenkovih teleskopov Cherenkov Telescope Array (CTA).

## Za konec

Izobraževanje je bilo intenzivno, tudi malo naporno, izbrane astronomske teme pa so uporabne le deloma. Seveda kakor za koga, saj je vključenost astronomije v šolsko delo zelo različna v različnih državah, enako velja za opremo, ki je nujna pri astronomskih opazovanjih. Večinoma je šolska astronomija nekako pridružena fiziki ali naravoslovju na splošno, pogosto pa se pojavlja v dijaških raziskovalnih nalogah.

Ob večerih je bilo zanimivo posedeti z evropskimi kolegi in izmenjavati mnenja. Ob tem sem bil kar ponosen na naše dolgoletne izkušnje, saj je že učni načrt za gimnazijsko astronomijo [14] prava redkost, a mi ga imamo že od leta 2012, osnovnošolskega [15] pa že od uvedbe

devetletke. Na področju učbenikov smo že na začetku sedemdesetih let prejšnjega stoletja dobili *Astronomijo za 4. letnik gimnazije* [16], od lani pa premoremo še knjigo *Astronomija za gimnazije* [17], ki lahko delno služi kot učbenik ali kot dodatna literatura, že skoraj tri desetletja pa izhaja tudi domača astronomska revija *Spika* [18]. V Sloveniji se lahko ponašamo še z večjim številom vrhunskih amaterskih astronomov, ki k sreči radi sodelujejo s šolami, in še bi lahko naštevali.

Kaj želim s tem sporočiti bralcem? Očitno za razliko od mnogih drugih držav pri nas izpolnujemo že kar nekaj pogojev za širšo uvedbo astronomije v srednje šole. Zakaj se to ne zgodi, čeprav bi se že zdavnaj lahko, pa je seveda druga zgodba.

### Viri

- [1] <https://nuclio.org/en/astronomy-education-adventure-in-the-canary-islands-2023-en/>
- [2] <https://nuclio.org/en/>
- [3] <https://www.faulkes.com/ Faulkes-telescope-project>
- [4] <https://cesar.esa.int/index.php>
- [5] <https://esia.ea.gr/>
- [6] <https://celestiaproject.space/>
- [7] <https://www.iac.es/en/projects/peter>
- [8] <https://www.facebook.com/EuropeanHOU/>
- [9] <https://nuclio.org/en/the-team/>
- [10] [https://www.iac.es/en/observatorios-de-canarias/teide-observatory?page\\_manager\\_page\\_variant\\_weight=-5&overridden\\_route\\_name=entity.taxonomy\\_term.canonical&base\\_route\\_name=entity.taxonomy\\_term.canonical&page\\_manager\\_page=taxonomy\\_term&page\\_manager\\_page\\_variant=taxonomy\\_term-panels\\_variant-1](https://www.iac.es/en/observatorios-de-canarias/teide-observatory?page_manager_page_variant_weight=-5&overridden_route_name=entity.taxonomy_term.canonical&base_route_name=entity.taxonomy_term.canonical&page_manager_page=taxonomy_term&page_manager_page_variant=taxonomy_term-panels_variant-1)
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Active\\_optics](https://en.wikipedia.org/wiki/Active_optics)
- [12] [https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/is\\_bejar\\_v.pdf](https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/is_bejar_v.pdf)
- [13] <https://ipa.phys.ethz.ch/research/ResearchProjects/magic.html>
- [14] [http://eportal.mss.edus.si/msswww/programi2018/programi/media/pdf/un\\_gimnazija/2015/UN-IP-ASTRONOMIJA.pdf](http://eportal.mss.edus.si/msswww/programi2018/programi/media/pdf/un_gimnazija/2015/UN-IP-ASTRONOMIJA.pdf)
- [15] [https://www.gov.si/assets/ministrstva/MIZS/Dokumenti/Osnovna-sola/Ucni-nacrti/izbirni/1-letni/Astronomija\\_izbirni.pdf](https://www.gov.si/assets/ministrstva/MIZS/Dokumenti/Osnovna-sola/Ucni-nacrti/izbirni/1-letni/Astronomija_izbirni.pdf)
- [16] [https://www.google.si/books/edition/Astronomija\\_za\\_4\\_razred\\_gimnazije/n070AAAACAAJ?hl=sl](https://www.google.si/books/edition/Astronomija_za_4_razred_gimnazije/n070AAAACAAJ?hl=sl)
- [17] <https://buca.si/knjigarna/ucbeniki/astronomija-za-gimnazije/>
- [18] <https://astronomska-revija-spika.si/>

# Udeležba dijaka na taboru v Cernu

Naš dijak Jure Kreže se je med 1. in 8. oktobrom 2023 udeležil tabora v Cernu v Švici.

Na tabor se je prijavilo več kot 600 dijakov iz več kot 60 držav. Med vsemi kandidati so z različnimi testi, intervjuji ... izbrali 30 najboljših. Med njimi je bil edini Slovenec Jure Kreže, dijak Gimnazije in ekonomske srednje šole Trbovlje.

Med taborom je imel Jure priložnost sodelovati z znanstveniki in inženirji iz Cerna, se vključiti v praktične dejavnosti in eksperimente ter spoznati vrhunske raziskave, ki se izvajajo v Cernu.

Dijaški tabori CERN-Solvay so rezidenčni tabori za srednješolce, starejše od 16 let, ki jih zanima in želijo raziskovati fiziko delcev. Vsi udeleženci so v majhnih skupinah sodelovali pri namenskih raziskovalnih projektih, ki so jih vodili prostovoljci iz znanstvene skupnosti CERN. Tabori v celoti potekajo v angleškem jeziku. Jure se je domov vrnil navdušen nad novimi izkušnjami, poln znanja in fizikalnih dogodivščin.



Slika 1: Dijak Jure Kreže v fizikalnem kabinetu

## Prvi dan v Cernu

Dijaki so bili deležni uvodnih besed organizatorja. Sledila je igra lov na zaklad po Cernu v skupinah.

Pozneje so dijake zbrali v različne skupine (glede na njihova zanimanja) za projektni dan. Na izbiro so imeli različne tematike: Data, Theory, CLEAR, Polymer, Crystal in Cryo. Jure je bil izbran v skupino Data.



Slika 2: Podatki iz CMS eksperimenta



Slika 3: Skupina dijakov s profesorjem pred kipom „Wandering the immeasurable“

## Drugi dan

Drugi dan je najprej sledila predstavitev administrativnih zadev (držav članic, poklicev, oddelkov, ki so zastopani v Cernu). Nato je bilo na sporedu predavanje »Uvod v pospeševalce delcev«. Govorili so o sestavi Cerna in o procesu oziroma poteku eksperimentalne dobe. Predstavljena sta bila tudi poskusa »Electron beam« (naprava, sestavljena iz ekrana, izvora napetosti in elektronskega

žarka) in »Seeing the invisible« (zaprta škatla z labirintom in žogicami za namizni tenis, s pomočjo katerih so sklepali o obliki labirinta).



Slika 4: Slike najpomembnejših znanstvenikov, ki so prispevali k fiziki delcev.

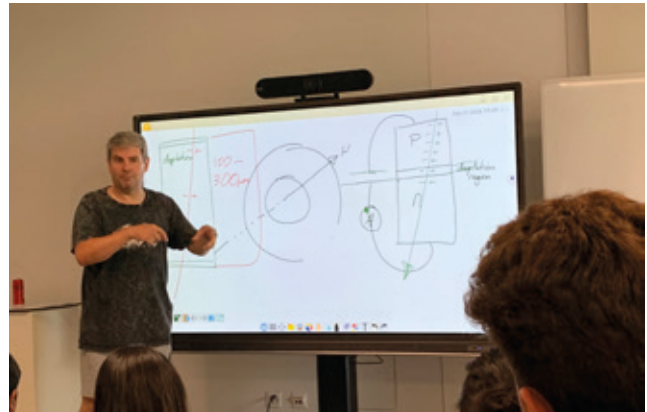
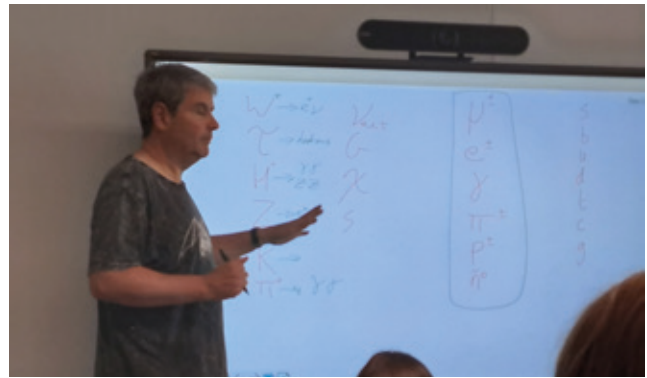


Slika 5: Pospeševalec delcev sinhrociklotron (ang. Synchrocyclotron)

### Tretji dan

Zjutraj so dijaki izvedli poskus »Cloud chambers« s preprostim detektorjem delcev. Sledilo je predavanje »Uvod v detektorje delcev«, pri katerem so najprej razmišljali in razpravljali o vseh nujnih delih detektorja, potem pa so se pogovarjali o detektorjih Atlas in Eksperiment CMS.

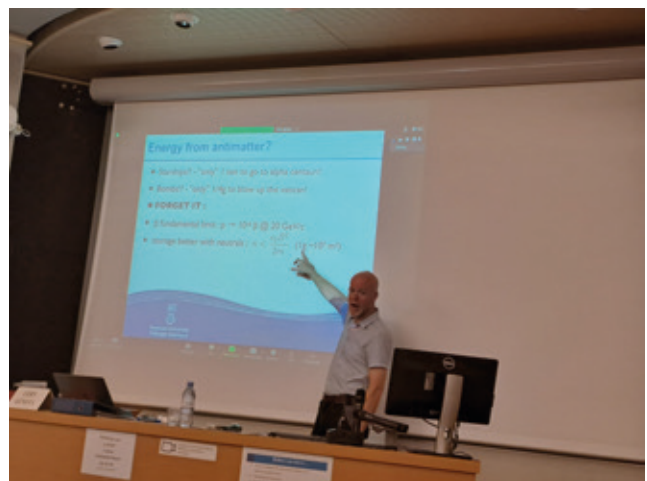
Dijaki so si kasneje šli pogledat detektor Eksperiment CMS v francoskem delu Cerna. Proti koncu dneva pa so si ogledali film z naslovom *Particle fever* v glavni predavalnici.



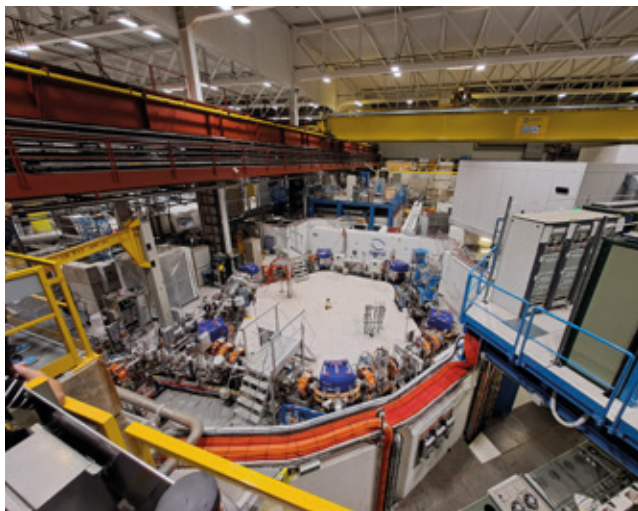
Slika 6 in 7: Predavanje o detektorjih delcev (predavatelj David Barney)

### Četrti dan

Četrti dan so imeli zjutraj predavanje z naslovom »Antimaterija«, sledilo je predavanje o standardnem modelu delcev. Pozneje so dijaki obiskali dva pospeševalnika, Leir in Linac 2. Konec dneva pa so dijaki odšli na obisk v Antimatter Factory, vodilni kraj za raziskave antimaterije na svetu. Tam so jim povedali, kako je potekal eksperiment z antimaterijo, kjer so merili silo gravitacije na antiatomih. Imajo najsposobnejši sistem za ustvarjanje in hranjenje antidelcev, zato je tudi glavni kraj na svetu za raziskovanje antimaterije.



Slika 8: Predavanje o antimateriji (predavatelj prof. Niels Madsen)



Slika 9: Eksperiment/stroj v Antimatter Factory

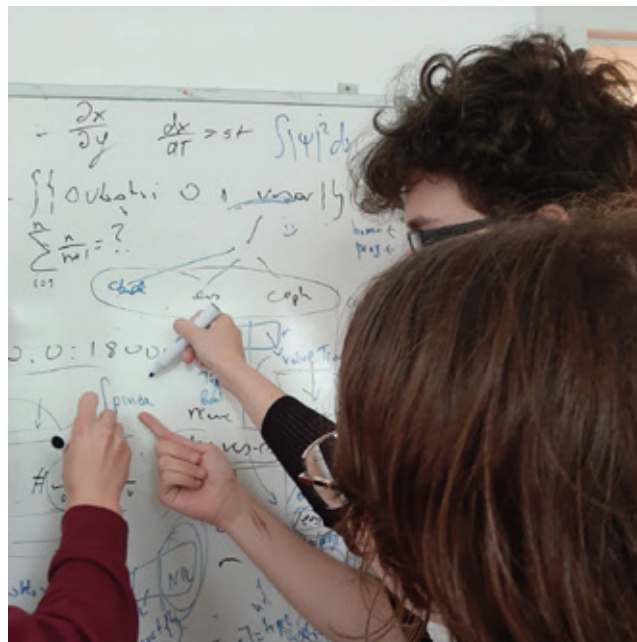
## Peti dan

Peti dan so imeli vsi dijaki projektni dan. Na začetku so oblikovali skupine dijakov. Vsaka skupina je bila zadolžena za določeno tematiko. Jure je pri programerjih nadzoroval strežnike in programiral.

Specifično so programirali v pythonu, naloga dijakov je bila, da so prebrali ogromen kup podatkov iz ene datoteke in z njimi delali. Težave se v Cernu pojavijo zato, ker imajo enostavno preveč podatkov.



Slika 10: Skupina dijakov na stopnišču v glavni stavbi



Slika 11: Dijaki skupine Data med reševanjem problema

## Šesti dan

Najprej so dijaki poslušali predavanje o kozmologiji. Sledilo je predavanje o pospeševalni tehnologiji *plazma wakefield* in o eksperimentu AWAKE. Dijaki so se pozneje pogovarjali z gospodom Frederikom Florentinusom Van der Vekenom, doktorjem fizike v Cernu, ki ima dokaj pomembno vlogo na področju kvantne teorije polja. Dijakom je razjasnil vsa vprašanja, ki so se nabrala med tednom. Govorili so tudi o priložnostih za študentsko delo v Cernu.

Obiskali so še en pospeševalec delcev – Synchrocyclotron. Jure je poudaril, da so bili vsi ogledi zelo zanimivi in da bi bilo o njih mogoče napisati še več, težko pa bi bilo to izraziti samo z besedami, ne da bi bilo predolgo ali da bi zvenelo nerodno.

Za razvedrilo so igrali bingo z zaposlenimi v Cernu in pri tem je zmagal naš Jure. Konec dneva je sledila izmenjava daril med udeleženci, predavatelji, zaposlenimi ... Tudi sama sem bila deležna darila: literature o Cernu in dišečih indijskih palčk za prijetne vonjave v fizikalni učilnici.

## Sedmi dan

Zadnji dan Juretovega bivanja v Cernu je sledila inavguracija stavbe Gateway, namenjene širjenju znanja (tu so razstave, eksperimenti ...), kjer so bili dijaki iz tabora prostovoljci pri odprtju stavbe in izvajanju različnih eksperimentov. Opravljali so poskuse s tekočim dušikom in superprevodniki. Po koncu inavguracije so skupaj odšli v Ženevo na pico in bowling.



Slika 12: Dijaki v Science Gateway stavbi na dan odpiranja



Slika 13: Jure in Iklhas s potrdili o obisku tabora

## Za konec še nekaj besed o Juretu

Naš dijak 4. letnika Jure Kreže je prišel na našo gimnazijo kot običajen prvošolec. V prvem letniku ni pokazal posebnega navdušenja za fiziko. Sam večkrat pove, da mu je snov prve kontrolne naloge v prvem letniku delala težave. Malo pozneje, proti koncu drugega letnika, je imel že dovolj matematičnega znanja, da ga je fizika pritegnila. Takrat je pokazal zanimanje za pomoč mlajšim dijakom in sošolcem kot tutor za fiziko.

Preteklo šolsko leto je osvojil dve zlati priznanji na državnih tekmovanjih s področja matematike in fizike. Na

tekmovanju za Stefanovo priznanje iz fizike je osvojil tretjo nagrado in zlato Stefanovo priznanje. Prav tako že od lanskega šolskega leta obiskuje (vsak teden) konzultacije iz fizike, zato da mi pomaga pri ponovni razlagi dijakom, ki fizike ne razumejo in potrebujejo večkratno razlago in pomoč. Ker so takrat prisotni dijaki vseh letnikov, prevzame svojo skupino in jim pomaga pri reševanju domače naloge. Zelo uživa, ko je pred tablo in razlaga različne fizikalne tematike.

Jure je tudi že nekaj časa odločen, da bo šel študirat fiziko na Fakulteto za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani.

Ker sem vsa štiri leta tudi njegova razredničarka, lahko povem, da je Jure zelo pošten, iznajdljiv, vesten, vljuden in seveda zelo razgledan na vseh področjih. Ni dijaka na naši šoli, ki ne bi poznal Jureta.

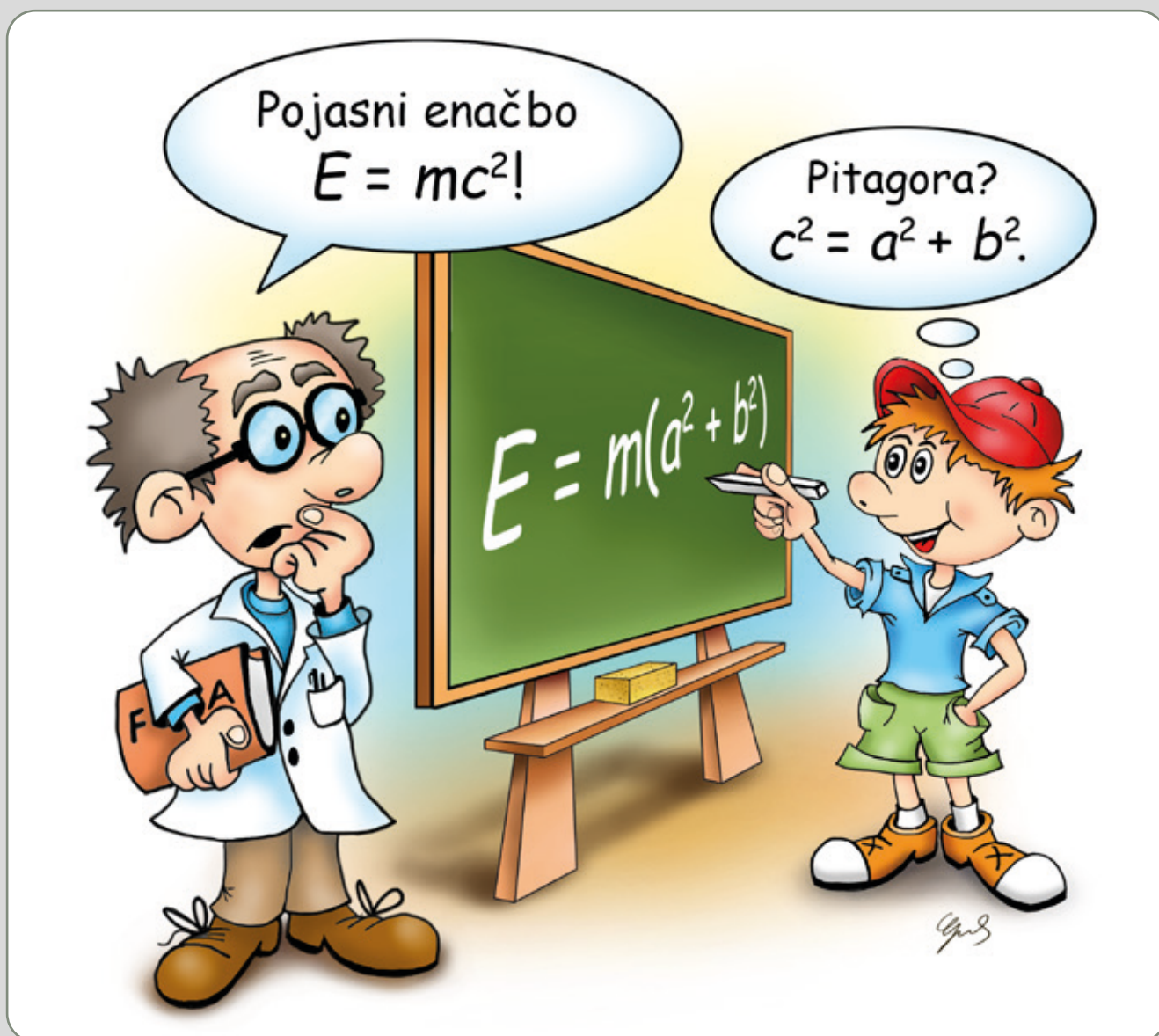
## Še nekaj o mojem poslanstvu

Svoje dijake poskušam čim bolj navdušiti nad fiziko, čeprav se zavedam, da imam zelo težko nalogo. Fizika je predmet, ki zahteva veliko vztrajnosti, volje, razumevanja in sprotnega dela. V gimnazijskem programu poskušamo čim več eksperimentirati tako, da eksperimente izvedejo dijaki sami, med vajami. Na šoli organiziramo naravoslovne tabor ob morju in fizikalno delavnico na morsko tematiko. Pri predmetu ITS naravoslovje si dijaki izberejo temo s področja naravoslovja, ki jih zanima, in potem izdelek ali avtentično nalogo predstavijo ciljni publiki. Letošnje šolsko leto nameravamo izdelati npr. raketo, literaturo o eksperimentih iz naravoslovja za srednješolce in srednješolske profesorje ..., minulo leto pa so dijaki izdelali polnilnik baterij in ugotavljali, ali polnjenje telefona, ko je baterija že polna, vpliva na njeno življenjsko dobo ... Sama sem tudi že več let vključena v projekte za podporo učenju in zelo podpiram formativno spremljanje dijakov pri pouku fizike.

Dijaki, ki po končani maturi odidejo naprej na fakultete, kjer imajo v programu fiziko, se radi vračajo in mi povedo, kako uspešni so na svoji poklicni poti. Nekajkrat se mi je že zgodilo, da so mi dijaki med študijem prišli povedat, kako veliko znanja so »odnesli« z naše šole (ne samo na področju fizike) in da so potem na fakulteti tako blesteli, da so tudi vsem preostalim sošolcem razlagali fiziko.

Sama menim, da je učiteljski poklic poslanstvo in da je to moj vseživljenjski cilj. V svojem poklicu zelo uživam, sploh pa rada delam z mladimi. Konec koncev še vedno velja rek, da na njih svet stoji ... ■

Zapisala:  
Petra Zelenšek, prof. fizike



# DIGITALNA BRALNICA ZAVODA RS ZA ŠOLSTVO



## Protokoli za ravnanje

Publikaciji poleg **protokolov za ravnanje ob zaznavi in obravnavi nasilja** prinašata še besedilo, ki poglobljeno, z dodatno razlago in konkretnimi primeri pojasnjuje ključne vidike obravnave nasilja.

Dostopno v Digitalni bralnici ZRSŠ:

[www.zrss.si/digitalna-bralnica/protokoli-za-ravnanje-ob-nasilju](http://www.zrss.si/digitalna-bralnica/protokoli-za-ravnanje-ob-nasilju)

