

# 1

2019

Letnik 24

# Fizika v šoli

Poštšina plačana pri pošti 1102 Ljubljana



**STROKOVNI PRISPEVEK:**

## Redefinicija enot mednarodnega sistema SI

**DIDAKTIČNI PRISPEVKI:**

Počitniška fizika

Splošna matura iz fizike 2018

Tabele za samoevalvacijo – orodje za pomoč  
pri vodenju in ocenjevanju eksperimentalnega dela



Zavod  
Republike  
Slovenije  
za šolstvo



## KAZALO

Jaka Banko

**Učenje z raziskovanjem** 1

### STROKOVNI PRISPEVEK

Rado Lapuh, Matej Grum, Samo Kopač

**Redefinicija enot mednarodnega sistema SI** 2

Peter Jevšenak

**Gravitacijska interakcija množice teles** 8

Janez Strnad

**Kvantne pike** 20

### DIDAKTIČNI PRISPEVKI

Tilka Jakob

**Počitniška fizika** 24

Peter Gabrovec

**Splošna matura iz fizike 2018** 28

Sergej Faletič

**Tabele za samoevalvacijo – orodje za pomoč pri vodenju in ocenjevanju eksperimentalnega dela** 37

Jože Pernar

**Vetrovnik – raziskovalno delo** 44

Aleš Mohorič

**Preprosta demonstracija fosforescence pri fluorescentni sijalki** 52

Karel Šmigoc

**Moč vetra na klopotcu v Hermancih pri Ljutomeru** 56

### UPODOBITVE V FIZIKI

Mojca Čepič

**Energija IV: Električna, električno delo in električna energija** 59

### UČITELJEV POGLED

Peter Prelog

**Drugi tvit: Učenje »na pamet«** 62

### STRIP

Milenko Stiplovšek

**Eksperimentiranje** 65



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

ISSN 1318-6388

**FIZIKA V ŠOLI**  
letnik XXIV, številka 1, 2019

Izdajatelj in založnik:

**Zavod RS za šolstvo**

Predstavniki:

**dr. Vinko Logaj**

Odgovorni urednik:

**Jaka Banko**

Uredniški odbor:

**dr. Vladimir Grubelnik, dr. Tomaž Kranjc,**

**dr. Marko Marhl, Milenko Stiplošek,**

**dr. Barbara Šetina Batič, dr. Saša Zihler,**

**dr. Mojca Čepič, Goran Bezjak, Tatjana Gulič**

Jezikovni pregled:

**Andraž Polončič Ruparčič**

Prevod povzetkov

**Enitra prevajanje, Brigita Vogrinec, s. p.**

Urednica založbe:

**Andreja Nagode**

Oblikovanje:

**Simon Kajtna, akad. slik.**

Fotografije:

**avtorji člankov**

Ilustracije in tehnične risbe:

**Davor Grgičević**

Računalniški prelom in tisk:

**Design Demšar d. o. o., Present d. o. o.**

Naklada: 400 izvodov

Pripravke 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 upokojeince. 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.

© Zavod Republike Slovenije za šolstvo, 2019

Vse pravice pridržane. Brez založnikovega pisnega

dovoljenja ni dovoljeno nobenega dela te revije na

kakršenkoli način reproducirati, kopirati ali kako

drugače razširjati. Ta prepoved se nanaša tako na

mehanske oblike reprodukcije (fotokopiranje) kot

na elektronske (snemanje ali prepisovanje na

kakršenkoli pomnilniški medij).

Poštnina plačana pri pošti 1102 Ljubljana.

## Učenje z raziskovanjem

Spoštovani bralci, pred vami je prva številka revije *Fizika v šoli*, letnik 2019, katere vodilna tema je učenje z raziskovanjem/preiskovanjem (v nadaljevanju učenje z raziskovanjem). Glede na to, da bo vodilna tema enaka tudi v naslednji številki, uvodnik začenjam s povabilom vsem vam, da svoje izkušnje, ideje, primere dejavnosti ali zgolj razmišljanja delite z nami.

Učenje z raziskovanjem je proces, ki učečega človeka spremlja vse življenje. Je proces, ki ni vezan na starostno obdobje niti na raziskovanje zgolj naravoslovnih pojavov/procesov. Učenje z raziskovanjem je univerzalni pristop, ki vključuje spoznavne postopke (procesna znanja in veščine), je pot, ki vodi od poznavanja dejstev, pojavov/procesov k razumevanju le-teh. In pot k razumevanju ni vselej lahka. Kljub temu je lahko zanimiva in razburljiva za vse, tako za učence in dijake kot za učitelja. Kako? Nekaj idej lahko preberete tudi v tej in prejšnjih številkah revije *Fizika v šoli*.

Ena od pomembnih dimenzij učenja z raziskovanjem je tudi učiteljevo raziskovanje lastne prakse. Ker na to temo ni napisanega veliko, si želimo vaših izkušenj, kaj je vas prepričalo v spremembi in kje vidite prednost uporabljenih oblik in metod dela, skratka, kaj po vašem mnenju v razredu »deluje«. Pogosto učitelji preizkušamo nove strategije in niso vse učinkovite. Te strategije opustimo tako, kot opustimo možno razlago pojava, ki se izkaže za napačno, vendar je tudi to spoznanje dragocena informacija tako za načrtovanje lastnega dela kot tudi za vse nas.

Kako sploh »izmeriti« učinkovitost uporabljenih oblik in metod dela? Kako sploh »izmeriti«, kaj »deluje«? Možnih pristopov je več, vse pa spremlja skrbna meritev. Eden izmed pristopov je opisan v nadaljevanju revije.

Prav je, da se zavedamo in smo ponosni na velike uspehe svojih otrok v mednarodnih raziskavah, in prav je, da se zavedamo, da smo lahko skupaj še uspešnejši. Veliko se lahko naučimo drug od drugega. Z vsakim, še tako majhnim korakom vsakega izmed nas bo Zemlja manj ravna, beseda astrologija vedno bolj prazna in eksperiment vedno višja avtoriteta.

Za konec vas lepo vabim, da se **nam pridružite tudi na 5. konferenci za učitelje naravoslovnih predmetov – NAK, ki bo 23. in 24. oktobra 2019 v kongresnem centru hotela Thermana Park Laško.**

Želim vam prijetno branje.

*Jaka Banko*

# Redefinicija enot mednarodnega sistema SI

dr. Rado Lapuh, mag. Matej Grum,  
dr. Samo Kopač

Ministrstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo,  
Urad RS za meroslovje, Celje



## Izvelek

Mednarodni sistem enot doživlja redefinicijo štirih osnovnih enot. Osnova za nove definicije so izbrane naravne konstante, ki so jim z redefinicijo pripisane tudi fiksne numerične vrednosti. S tem je v mednarodnem merskem sistemu odpravljen tudi zadnji artefakt – prakilogram. Pot do sprejetja redefinicije je zahtevala skoraj desetletje raziskav, ki so na koncu dale dovolj točne realizacije enot neposredno in zgolj glede na vrednosti naravnih konstant. Točnost realizacij enot po novi definiciji je enaka ali boljša od do sedaj veljavnih realizacij. Nove definicije enot so sicer abstraktnije, omogočajo pa realizacijo enot kjerkoli in kadarkoli v nam znanem vesolju.

**Ključne besede:** merske enote, redefinicija, sistem enot SI, naravne konstante

## Redefining the International System of Units (SI)

### Abstract

Four base units of the International System of Units are being redefined. The basis of the new definitions are selected physical constants which have been given fixed numerical values. With the redefinition, the definition of a kilogram will change, removing the last artefact – the International Prototype Kilogram – from the International System of Units. The path to the redefinition took almost a decade of research which in the end yielded sufficiently accurate realizations of the units directly and merely based on the values of universal constants in nature. The accuracy of unit realizations according to the new definition is equal or better than the currently accepted ones. Although the new definitions are more abstract, they provide stable values that remain unchanged everywhere and everywhen in the universe as-we-know-it.

**Keywords:** units of measurement, redefinition, System of Units (SI), universal constants in nature

### Uvod

16. novembra 2018 so v odmevni odločitvi članice Meterske konvencije glasovale za revizijo mednarodnega sistema enot (SI) in s tem spremenile svetovno definicijo kilograma, ampera, kelvina in mola. Redefinicija velja od 20. maja 2019.

Odločitev, ki je bila sprejeta na 26. zasedanju Generalne konference za uteži in mere (CGPM) v Versaillesu v Franciji in na kateri je redefinicijo podprla tudi Slovenija, od sedaj vse enote opredeljuje in določa na osnovi naravnih konstant, ki opredeljujejo naravo in njene zakone. Tako definirane enote bodo zagotovile stabilnost SI v prihodnosti in odprle možnosti za nove tehnologije, neposredno predvsem s kvantnimi tehnologijami, s katerimi bo mogoče merske enote neodvisno realizirati kjerkoli in kadarkoli.

## Zgodovina

Mere za čas, dolžino, volumen in maso so ljudje uporabljali že od začetkov razvoja civilizacij. Z razvojem se je njihova vloga le še povečevala, vendar je število mer za iste stvari do 18. stoletja tako naraslo, da vsem ni bilo mogoče več slediti. Med francosko revolucijo je francoska akademija za znanost predlagala uporabo enot za maso in dolžino, izbranih po načelih logike in naravnih pojavov, s ciljem, da določi mere, dostopne vsem in vsakomur, kjerkoli in kadarkoli. S to ambicijo so mero za dolžino iztrgali iz velikosti Zemlje. Izmerili so dolžino poldnevnikarja, ki teče skozi Pariz. Méritev sta s triangulacijo med mestom Dunquerque in Barcelono v letih od 1792 do 1799 izvedla Jean-Baptiste Joseph Delambre in Pierre-François-André Méchain. Ena desetmilijoninka te razdalje je definirala dolžino metra. To dolžino so prenesli v meter dolgo palico iz platine, ki je potem postala arhivski meter. Tisočinka kubičnega metra vode pri  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  je bila določena za osnovno enoto mase kilogram in je bila zaradi težavnosti določanja mase z volumnom vode prav tako izvedena iz platine v obliki valja, ta pa je postal arhivski kilogram. Kot zanimivost: Méchain in Delambre sta kasneje s podrobnejšimi izračuni ugotovila, da je bil njun meter za 0,2 milimetra prekratek (posledično je prelahek tudi kilogram ...), vendar je bil prameter že določen in izdelan. Tako imamo še zdaj osnovno enoto za dolžino prekratko glede na takratno definicijo in to bo ostalo nespremenjeno tudi po redefiniciji.

Tako določeni enoti za dolžino in maso sta bili kasneje tudi mednarodno sprejeti s podpisom Meterske konvencije leta 1875 v Parizu, kjer je med sedemnajstimi podpisnicami sodelovala tudi Avstro-Ogrska. Zaradi težav z arhivskim metrom in arhivskim kilogramom so obe meri izdelali iz zlitine 90 % platine in 10 % iridija, izraženo v masnih odstotkih, kar je bistveno izboljšalo njuno stabilnost, enake kopije pa so dobile države članice Meterske konvencije. Leta 1921 je bila Meterska konvencija dopolnjena, tako da je vključevala tudi osnovne enote za druge veličine poleg dolžine in mase. Leta 1960 se je sistem enot preimenoval v mednarodni sistem SI (Système international d'unités). Sledile so prve redefinicije osnovnih enot za čas in dolžino, ki sta bili opredeljeni neposredno prek osnovnih naravnih pojavov.

## Ideja

Tako sta sekunda in meter uživala položaj, ki so jima ga lahko druge enote zgolj zavidale: temeljila sta na nespremenljivih fizikalnih lastnostih. Sekunda na primer temelji na določeni frekvenci elektromagnetnih nihanj, ki ustrezajo prehodu med dvema nivojema hiperfinega razcepa osnovnega stanja atoma cezija 133, medtem ko meter izkorišča konstantno hitrost svetlobe kot fundamentalno lastnost narave. Odločilna prednost uporabe temeljnih naravnih konstant kot podlage za definicijo enot je, da so točno to, kar njihovo ime nakazuje – konstante.

Nasprotno, če bi bil meter še vedno definiran kot prvotni prototip prametra (v obliki palice iz platine in iridija s presekom v obliki črke X), bi bilo danes v bistvu nemogoče doseči skladnost merjenj. Že najmanjše razlike v temperaturi bi povzročile spremembo dolžine tega merila in stvari bi postale še hujše, če bi se prameter poškodoval. Pri vsakem materializiranem merilu dolžine so spremembe reda mikrometrov neizogibne, tudi če se z njimi ravna z največjo skrbnostjo. Ob današnjih tehnoloških izzivih, ko je nanometer že nekaj vsakdanjega, so takšne napake prevelike in jih je treba odpraviti.

Rešitev za vse druge osnovne enote so našli v umiku materializiranih pramer in v uporabi temeljnih naravnih konstant pri definiciji osnovnih enot. Seveda pa je bilo to lažje reči kot storiti, saj je bil nujni pogoj, da vse enote tudi po redefiniciji ostanejo enako velike.

## Koraki pred redefinicijo

V sistemu enot, kot jih poznamo pred uveljavitvijo redefinicije, lahko ugotavljamo vrednosti temeljnih naravnih konstant z meritvami. Kilogram smo namreč določili s prakilogramom in na njegovi osnovi določamo maso protonu, elektronu in drugim osnovnim delcem. To pa pomeni, da se vrednosti teh naravnih konstant neprenehoma spreminjajo, odvisno pač od

Leta 1960 se je sistem enot preimenoval v mednarodni sistem SI (Système international d'unités).

Sekunda in meter sta uživala položaj, ki so jima ga lahko druge enote zgolj zavidale: temeljila sta na nespremenljivih fizikalnih lastnostih.

Rešitev za vse druge osnovne enote so našli v umiku materializiranih pramer in v uporabi temeljnih naravnih konstant pri definiciji osnovnih enot.

točnosti trenutnih meritev. Skupina strokovnjakov v okviru CODATA, delovne skupine za temeljne konstante, je tako primerjala in ocenjevala rezultate izmerjenih vrednosti fundamentalnih konstant v laboratorijih po svetu. Vsake štiri leta so potem na primer določili novo numerično vrednost za naboj elektrona, čeprav se – v resnici – seveda sploh ni spremenil. Kar se je spremenilo, je bila naša zmožnost točnega merjenja in s tem poznavanja narave.

Leta 2007 je CGPM zadolžila Mednarodni odbor za uteži in mere (CIPM), da preuči možnost uporabe naravnih konstant kot osnove za definicijo enot SI namesto artefaktov, ki so bili takrat v uporabi (edini artefakt v tem času je bil prakilogram kot definicija enega kilograma). Eden od najpomembnejših pogojev je seveda bil, da redefinicija ne bo povzročila nobenih sprememb za uporabnike, kar pomeni, da se velikosti enot ne bodo spremenile. Prav tako je bilo pred redefinicijo treba za vsako redefinirano enoto izvesti vsaj dve neodvisni realizaciji, katerih rezultati meritev se bodo ujemali v okviru najmanjše danes dosegljive negotovosti. Na osnovi tega bi bile določene numerične vrednosti naravnih konstant, ki bi zagotavljale enako velikost osnovnih enot tudi po redefiniciji. Znanstveniki so ta problem reševali celo desetletje, CODATA pa je zbirala in primerjala rezultate. Osnovo za rešitev sta predstavljala takrat že dobro poznana in uporabljana kvantna pojava: Josephsonov efekt za določitev električne napetosti in von Klitzingov efekt za določitev električne upornosti, ki sta ti dve veličini neposredno povezovala zgolj z električnim nabojem elektrona  $e$  in s Planckovo konstanto  $h$ . Dodatno sta ključno vlogo v raziskavah odigrala Kibblova tehtnica in Avogadrov projekt s silicijevo kroglo (slika 1), ki sta obljubljala posredno meritev mase z izjemno točnostjo z navezavo na Planckovo konstanto  $h$  in Avogadrovo konstanto  $N_A$ . Na področju temperature obstoječa

Eden od najpomembnejših pogojev je seveda bil, da redefinicija ne bo povzročila nobenih sprememb za uporabnike, kar pomeni, da se velikosti enot ne bodo spremenile.



**Slika 1:** Krogla iz čistega silicija, ki je ta hip najbolj okrogel predmet na Zemlji. Težka je en kilogram, iz njene sestave in mer pa je mogoče določiti njeno težo s podobno negotovostjo, kot to lahko dosežemo s Kibblovo tehtnico. (Vir: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)

definicija enote kelvin pri eni sami temperaturi trojne točke vode ( $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ni več omogočala dovolj točnih meritev pri temperaturah pod  $20\text{ K}$  in nad  $1300\text{ K}$ , pri čemer so vrhunski strokovnjaki, zbrani v Posvetovalnem odboru za temperaturo (CCT) pri CIPM, predlagali možnost uporabe Boltzmannove konstante  $k_B$  kot osnove za definicijo enote kelvin.

Kljub napovedim in znatnemu napredku leta 2014 ti rezultati še niso bili dovolj zanesljivi in odločanje o redefiniciji je bilo preloženo za štiri leta. Leta 2017 pa so bili dovolj točni rezultati vendarle na razpolago in na 26. Generalni konferenci za uteži in mere novembra 2018 so države članice Metrske konvencije soglasno potrdile in sprejele nove definicije. Mednarodni urad za uteži in mere (BIPM) je ob tem izdal več publikacij z opredelitvami dogovorjenih sprememb tudi za splošno javnost [1], [2].

## Nove definicije

Nove definicije enot sistema SI so bile zaradi potrebne spremembe zakonodaj uveljavljene 20. maja 2019. Temeljijo na določitvi naslednjih fiksnih vrednosti naravnih konstant:

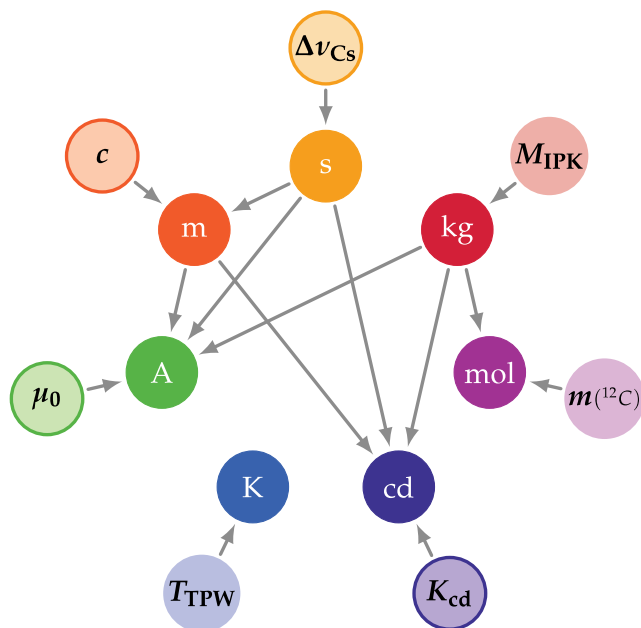
- frekvenca prehoda cezijevega atoma 133 v nemotenem osnovnem stanju  
 $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770\text{ s}^{-1}$ ,
- hitrost svetlobe v vakuumu  $c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$ ,
- Planckova konstanta  $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}\text{ kg m}^2\text{s}^{-1}$ ,
- osnovni naboj  $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}\text{ As}$ ,
- Boltzmannova konstanta  $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ kg m}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$ ,
- Avogadrova konstanta  $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$ ,
- svetlobna učinkovitost monokromatskega sevanja s frekvenco  $540 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$ ,  
 $K_{\text{cd}} = 683\text{ cd sr kg}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^3$ .

Sprejete nove definicije štirih enot SI so:

- Enota SI za maso je kilogram s simbolom kg. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo Planckove konstante  $h$ , enako  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  in izraženo z enoto Js, kar je enako  $\text{kg m}^2\text{s}^{-1}$ , kjer sta meter in sekunda definirana s  $c$  in  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- Enota SI za električni tok je amper s simbolom A. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo osnovnega naboja  $e$ , enako  $1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  in izraženo z enoto C, kar je enako As, kjer je sekunda definirana z  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- Enota SI za termodinamično temperaturo je kelvin s simbolom K. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo Boltzmannove konstante  $k_B$ , enako  $1,380\,649 \cdot 10^{-23}\text{ JK}^{-1}$ , kar je enako  $\text{kg m}^2\text{s}^{-2}\text{K}^{-1}$ , kjer so kilogram, meter in sekunda definirani s  $h$ ,  $c$  in  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- Enota SI za množino snovi je mol s simbolom mol. En mol vsebuje natančno  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  elementarnih enot. Ta vrednost je fiksna numerična vrednost Avogadrove konstante  $N_A$ , izražena z enoto  $\text{mol}^{-1}$ , in se imenuje Avogadrovo število. Množina snovi sistema s simbolom  $n$  je mera števila opredeljenih elementarnih enot. Elementarna enota je lahko atom, molekula, ion, elektron ali katerikoli drug osnovni delec ali opredeljena skupina delcev.

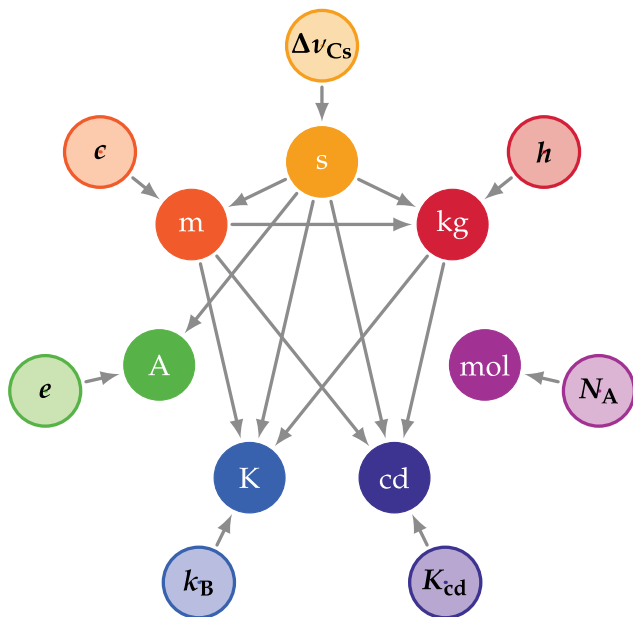
Sprejete preoblikovane definicije preostalih treh enot SI so:

- Enota SI za čas je sekunda s simbolom s. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo frekvence hiperfinega prehoda cezijevega atoma 133 v nemotenem osnovnem stanju  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , enako  $9\,192\,631\,770$  in izraženo z enoto Hz, kar je enako  $\text{s}^{-1}$ .
- Enota SI za dolžino je meter s simbolom m. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo hitrosti svetlobe v vakuumu  $c$ , enako  $299\,792\,458$  in izraženo z enoto  $\text{m s}^{-1}$ , kjer je sekunda definirana z  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .
- Enota SI za svetilnost v dani smeri je kandela s simbolom cd. Definirana je s fiksno numerično vrednostjo svetilne učinkovitosti monokromatskega sevanja s frekvenco  $540 \cdot 10^{12}\text{ Hz}$ ,  $K_{\text{cd}}$ , enako  $683$  in izraženo z enoto  $\text{lm W}^{-1}$ , kar je enako  $\text{cd sr W}^{-1}$  ali  $\text{cd sr kg}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^3$ , kjer so kilogram, meter in sekunda definirani s  $h$ ,  $c$  in  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .



**Slika 2:** Pred redefinicijo sistema SI. Odnosi med osnovnimi enotami, nekaterimi fiksnimi naravnimi konstantami ( $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ,  $c$ ,  $\mu_0$  in  $K_{\text{cd}}$ ) in maso prakilograma  $M_{\text{IPK}}$ , molskim številom  $m(^{12}\text{C})$  ter temperaturo trojne točke vode  $T_{\text{TPW}}$ . Samo sekunda in meter sta dejansko definirana zgolj prek naravnih konstant.

Odnosi med osnovnimi enotami in naravnimi konstantami pred redefinicijo sistema SI so prikazani na sliki 2, na sliki 3 pa so prikazani odnosi med sedmimi fiksnimi naravnimi konstantami in osnovnimi enotami po redefiniciji.



**Slika 3:** Po redefiniciji sistema SI. Odnosi med osnovnimi enotami in sedmimi fiksnimi naravnimi konstantami. Vsako enoto je mogoče izraziti zgolj s fiksnimi naravnimi konstantami.

Fizikalna ozadja redefinicije so bila lepo predstavljena v šesti številki lanskega Obzornika za matematiko in fiziko v prispevku dr. Aleša Mohoriča [3].

## Pomen redefinicije

Čeprav je bila redefinicija enot SI namenoma zasnovana in izvedena tako, da se velikosti enot ne spremenijo in da uporabniki te spremembe ne bomo čutili, pa bo redefinicija vendarle pustila pečat neposredno po svoji uveljavitvi, seveda pa še toliko bolj v prihodnosti.

Zanimiv in pomemben vidik se na primer skriva že v izobraževalnem procesu [4]. Učitelj je do zdaj lahko postavil vprašanje »Kaj je kilogram« in odgovor, sestavljen iz »prototip kilograma«, »zelo star« in »Pariz«, je pravzaprav povedal skoraj vse. Glede na novo definicijo pa bo isto vprašanje, če ga bo učitelj sploh postavil, k dvigu roke izzvalo zgolj mlade nadobudne fizike, kajti nova definicija je bistveno abstraktnejša in intelektualno zahtevnejša kot dosedanji sistem. Učenci bodo morali najprej razumeti, kaj so naravne konstante, od kod so prišle in zakaj so takšne, kot so. Nato pa morajo biti izbrane naravne konstante razumljene še podrobneje. S svetlobno hitrostjo bo to razumevanje gotovo lažje kot na primer s Planckovo ali Boltzmannovo konstanto. Nove definicije SI namreč ne opisujejo več eksperimenta za določitev posamezne osnovne enote, za celotno sliko in razumevanje posamezne enote pa bo treba razumeti tudi možne realizacije posameznih enot. To bo izziv že za učitelje na vseh ravneh učnega procesa.

Vsekakor bo redefinicija pustila takojšen pečat v znanosti in kmalu zatem tudi v tehnologiji. Meritve, povezane s sekundo in metrom, so po njuni navezavi na naravne konstante leta 1983 dosegle zmanjšanje negotovosti za več velikostnih razredov in vsi ti dosežki so bili kmalu uporabljeni tudi v tehnologiji. Lep primer je na primer GPS, ki ga brez atomskih ur tako na Zemlji kot v satelitih ne bi bilo mogoče izdelati. Nadalje znamo zdaj izmeriti jakost gravitacijskega polja  $g$  z relativno negotovostjo blizu  $1 \cdot 10^{-9}$  prav prek definicij sekunde in metra [5], torej prek konstant frekvence cezijevega atoma in hitrosti svetlobe. Pri tem uporabljamo znano zgodbo o padcu jabolka na Newtonovo glavo, na osnovi katere naj bi ta genij zapisal svoj gravitacijski zakon. Namesto jabolka uporabimo posebno ogledalo, ki ga v vakuumu v

Nove definicije SI namreč ne opisujejo več eksperimenta za določitev posamezne osnovne enote, za celotno sliko in razumevanje posamezne enote pa bo treba razumeti tudi možne realizacije posameznih enot.



prostem padu spuščamo na razdalji nekaj decimetrov, pri tem pa z laserskim interferometrom in s števcem časovnih intervalov natančno merimo pot in hitrost ogledala pri padcu (slika 4). Laserski interferometer pri padanju ogledala ustvarja signal z naraščajočo frekvenco, ki pri razdalji padca 20 cm zaniha kar 640-tisočkrat, njegova frekvenca pa na koncu doseže 6 MHz. S hitrim ponavljanjem (tudi do tri meritve na sekundo!) zberemo toliko meritev, da lahko ustrezno zmanjšamo vpliv naključnih napak. Meritve so tako točne, da lahko izmerimo tudi lokalne spremembe gravitacijskega polja zaradi plime in oseke, zračnega tlaka, premikanja osi vrtenja Zemlje in gravitacijskega polja bližnjih težkih objektov. Zdaj je pot za takšen razvoj odprta tudi na vseh drugih področjih merjenj in z njimi povezanih tehnologij.



**Slika 4:** Instrument FG5-X podjetja Micro *g* LaCoste, ki z merjenjem padca ogledala meri težnostni pospešek  $g$  na izbrani lokaciji. (Vir: spletna stran Micro *g* LaCoste)

Definicije enot so opravile pot od regionalnih mer, ki so jih določali tamkaj živeči trenutni vladarji, do mer, iztrganih iz našega planeta in univerzalnega merskega sistema, uporabljanega po vsem svetu. Zdaj pa smo prestopili meje našega malega planeta. Nove merske enote bodo namreč univerzalno uporabne po celotnem nam znanem vesolju. To je gotovo nov mejnik naše civilizacije.

V Sloveniji je za uporabo enot sistema SI in za sledljivost meritev do teh enot pristojen in odgovoren Urad RS za meroslovje. Več informacij o sistemu enot SI in prihajajočih spremembah lahko dobite na Uradu RS za meroslovje, z delom Urada in njegovimi laboratoriji pa se lahko seznanite na dnevih odprtih vrat, ki jih vsako leto odpremo v mesecu maju in oktobru tako na Grudnovem nabrežju 17 v Ljubljani kot na Tkalski ulici 15 v Celju.

**Nove merske enote bodo namreč univerzalno uporabne po celotnem nam znanem vesolju.**

## Viri

- [1] BIPM, Forthcoming Revision of the SI, SI Campaign Launch – Press Pack, maj 2018.
- [2] BIPM, Future Revision of the SI, Brand Book, april 2017.
- [3] Mohorič, Redefinicije enot SI, Obzornik za matematiko in fiziko, št. 6, letnik 65, 2018.
- [4] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, The new International System of Units (SI), PTB Info Sheet, november 2017.
- [5] D. B. Newell in drugi, A determination of the local acceleration of gravity for the NIST-4 watt balance, IEEE Trans. Instrum. Meas, izv. 64, št. 4, januar 2015.

# Gravitacijska interakcija množice teles

**Peter Jevšenak**

Šolski center Velenje, Gimnazija Velenje

---

## Izvleček

Galaksije so osnovni gradnik vidnega vesolja. Dinamiko teles, ki tvorijo galaksijo, usmerja gravitacijska interakcija med njimi. Gravitacija je s fizikalnega in matematičnega stališča dobro poznana, a enormno število teles v galaksiji vseeno povzroča težave. Vsako telo z gravitacijsko silo vpliva na vsa druga telesa in s tem na njihovo gibanje. Pri sto milijardah zvezd v galaksiji je natančen izračun vseh interakcij in premikov nemogoč tudi z najboljšimi računalniki na svetu.

Katere metode se potem uporabljajo, da se simulacije vseeno zanesljivo izvajajo?

Ali so tega sposobni že običajni osebni računalniki?

Ali lahko sami z računalnikom ustvarimo svojo galaksijo ali celo galaktični trk v tridimenzionalnem prostoru?

Kljub pomislekom, da odgovori na zgornja vprašanja presegajo naše trenutne zmožnosti in (srednješolsko) znanje, smo si postavili cilj, napisati računalniški program, kjer bi gibanje množice teles usmerjala gravitacijska interakcija med njimi.

**Gljučne besede:** gravitacijska interakcija, računalniške simulacije, Barnes-Hutov algoritem, galaksije

## Gravitational Interaction of a Mass of Bodies

### Abstract

Galaxies are primary components of the structure of observable universe. The dynamics between the bodies forming a galaxy depends on their gravitational interactions. Although gravitation has been well defined by physics and mathematics, the enormous number of galactic bodies continues to cause problems. Each body having a gravitational pull affects all other bodies, thus influencing their movements. With a hundred billion stars in a galaxy, a precise calculation of all interactions and movements is impossible even when using the best computers in the world.

With this in mind, which methods can therefore be used to carry out reliable simulations?

Can our personal computers do that?

Can we use our computer to create our own galaxy or even a galactic collision in three-dimensional space?

Despite any doubts that the answers to these questions might go beyond our current capabilities and (high school) knowledge, our goal was to write a computer program where the movements of a mass of bodies would be influenced by their gravitational interactions.

**Keywords:** gravitational interaction, computer simulation, Barnes-Hut Algorithm, galaxies

---

Z gravitacijo in računalniškimi simulacijami smo imeli že kar nekaj izkušenj, tako smo v programskem jeziku C++ simulirali gravitacijsko polje teles nepravilnih oblik [1] in gibanje zvezd v dvozvezdijh ter proučevali stabilnost orbit planetov v takih sistemih [2]. Da smo se lahko lotili novega problema, pa smo morali najprej usvojiti programiranje grafike v tridimenzionalnem (3D) prostoru. Odločili smo se za uporabo aplikacijskega programskega vmesnika OpenGL, ki omogoča izrisovanje 2D- in 3D-vektorske grafike z optimizirano uporabo grafičnega procesorja. Vmesnik deluje neodvisno od izbire programskega jezika in je podprt na več platformah [3]. Naslednja faza je bila usvojitev Barnes-Hutovega algoritma. Ta algoritem uspešno zmanjšuje število potrebnih izračunov v simulacijah z velikim številom teles na račun združevanja oddaljenejših teles po določenem kriteriju. Po pregledu obstoječih simulacij na spletu smo ugotovili, da se te med seboj močno razlikujejo po številu teles. Razpon sega od deset tisoč do milijon teles. Glede na to, da se z omenjenimi problemi, programi in metodami srečujemo prvič, smo si kriterij za uspešnost svojega dela postavili na spodnjo mejo. Zadovoljni bomo, če bomo na zaslonu osebnega računalnika lahko opazovali zvezno gibanje (vsaj) 10.000 teles hkrati.

Naš namen ni natančno simuliranje procesov, ki potekajo v vesolju, saj je gravitacija vidne snovi le redko edini odločilni dejavnik od začetka do konca. Na tvorbo, vrtenje in razporeditev galaksij odločilno vpliva skrivnostna temna snov, znaten del mase galaksij pa predstavljajo tudi ogromni oblaki prahu in plina, ki jih ne moremo šteti za točkasta telesa tako kot zvezde. Z reševanjem zastavljenega fizikalnega problema – proučiti dogajanje, ko med  $n$  telesi po izbrani začetni postavitvi v 3D-prostoru deluje samo gravitacijska interakcija – bi radi predvsem pridobili veliko novega in uporabnega fizikalnega, matematičnega in računalniškega znanja.

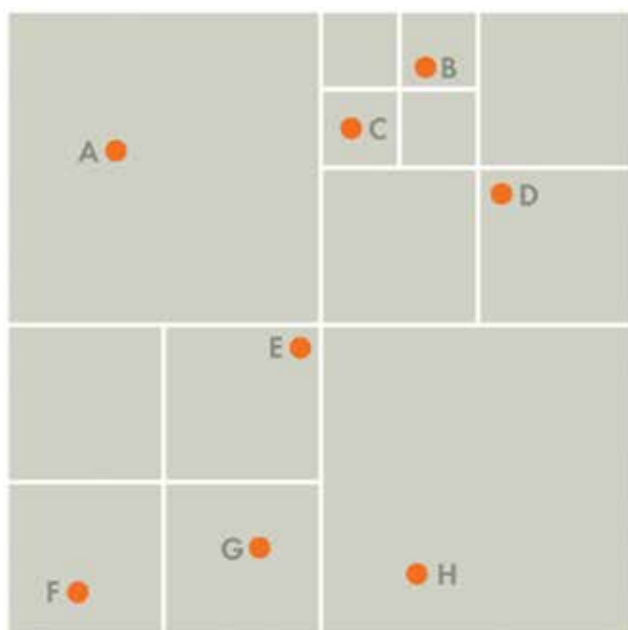
## Barnes-Hutov algoritem

Josh Barnes in Piet Hut sta se domislila učinkovite sheme, kako različna telesa, ki so dovolj blizu skupaj, združiti v eno telo. To je ključna ideja, kako pospešiti algoritme z množico teles, ki vplivajo drugo na drugo. Če smo v točki prostora dovolj daleč od gruče teles, lahko dejanski gravitacijski vpliv gruče (približno) izenačimo z gravitacijskim vplivom telesa, ki ima skupno maso gruče in se nahaja v njenem težišču.

V 3D-prostoru, recimo v kocki s stranico  $a$ , imamo razporejenih  $n$  teles. Kocko razdelimo na osem manjših, enako velikih kock s stranico  $a/2$  in vsaka taka kocka predstavlja nov podprostor. Vsak podprostor, v katerem je več teles, rekurzivno delimo naprej na osem nadaljnjih podprostorov, dokler se vsa telesa ne razporedijo vsako v svoj podprostor. Delitev v dveh dimenzijah je prikazana na sliki 1. Algoritem gradi drevesno strukturo, kjer podprostori pred-

Da smo se lahko lotili novega problema, pa smo morali najprej usvojiti programiranje grafike v tridimenzionalnem (3D) prostoru.

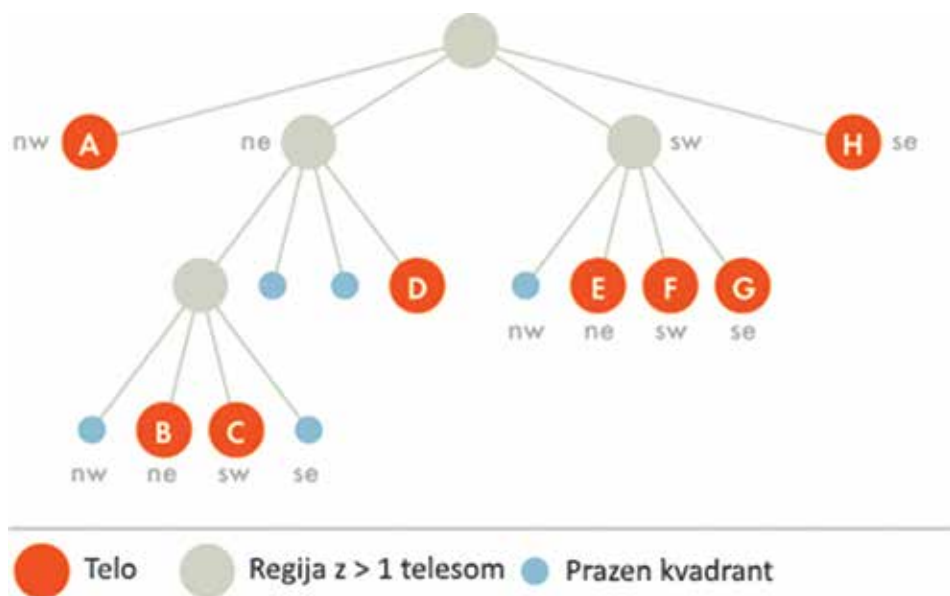
Na tvorbo, vrtenje in razporeditev galaksij odločilno vpliva skrivnostna temna snov, znaten del mase galaksij pa predstavljajo tudi ogromni oblaki prahu in plina, ki jih ne moremo šteti za točkasta telesa tako kot zvezde.



**Slika 1:** Razdelitev prostora na podprostore (kvadrante) v 2D.

stavljajo vozlišča, iz katerih se spušča osem vej do novih vozlišč nivo nižje (štiri veje v 2D, slika 2). Zapolnjeni kvadranti na zunanjih položajih drevesa predstavljajo posamezna telesa, vozlišča znotraj drevesa pa skupino teles pod njim in hranijo lego težišča ter skupno maso.

Pri izračunu težnega pospeška na izbrano telo se postopek začne pri korenu drevesa (prvi vozlel – ves prostor) in se nato spušča po nivojih. Za vsak vozlel se preveri, ali je težišče skupine, ki jo predstavlja, dovolj daleč od izbranega telesa. Če je pogoj izpolnjen, se ves del drevesa pod vozliščem obravnava kot eno telo s skupno maso v težišču te skupine. Kriterij, ali je vozlišče dovolj oddaljeno od telesa, določa kvocient  $s/d$ , kjer je  $s$  značilna dimenzija podprostoru, ki ga vozlišče predstavlja (običajno stranica kocke),  $d$  pa razdalja med izbranim telesom in težiščem skupine teles pod vozliščem. Kvocient nato primerjamo z referenčno vrednostjo  $\theta$ . Če je  $s/d < \theta$ , potem je vozlišče dovolj oddaljeno za združevanje. S spreminjanjem parametra  $\theta$  vplivamo na hitrost in natančnost simulacij. Za gravitacijsko interakcijo se običajno vzame vrednost  $\theta = 0,5$ . Če  $\theta$  spuščamo proti nič, potem je združevanja vse manj, čas simulacij se podaljšuje, povečuje pa se natančnost.



**Slika 2:** Drevesna shema algoritma v 2D. Vsak podprostor na sliki 1, ki vsebuje več kot eno telo, postane (sivo) vozlišče v drevesni strukturi in se razdeli naprej na štiri podprostore en nivo nižje z oznakami nw, ne, sw, se (po straneh neba v angleškem jeziku). Proces se nadaljuje, dokler ni vsako telo v svojem podprostoru.

Pri računanju vseh medsebojnih interakcij med  $n$  telesi je treba opraviti  $n^2$  izračunov. Pri deset tisoč telesih to pomeni sto milijonov izračunov za en korak. Barnes-Hutov algoritem za isti problem potrebuje  $n \cdot \log_2 n$  izračunov. Pri deset tisoč telesih torej le 133.000 izračunov, kar je 750-krat manj [4, 5].

## Metode dela

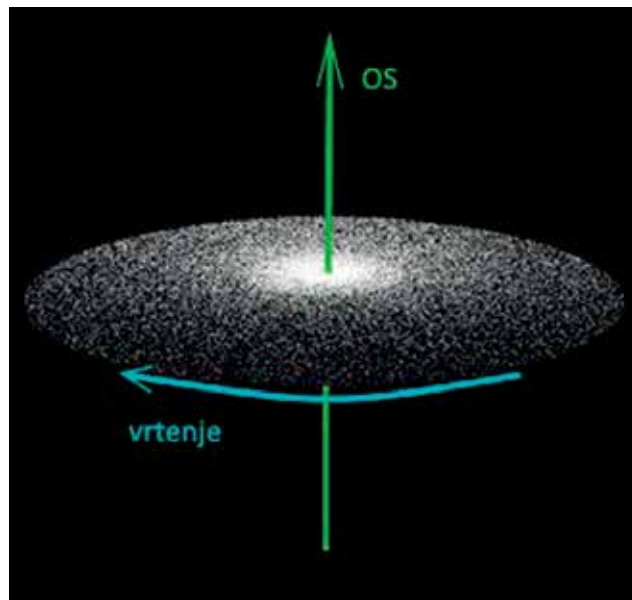
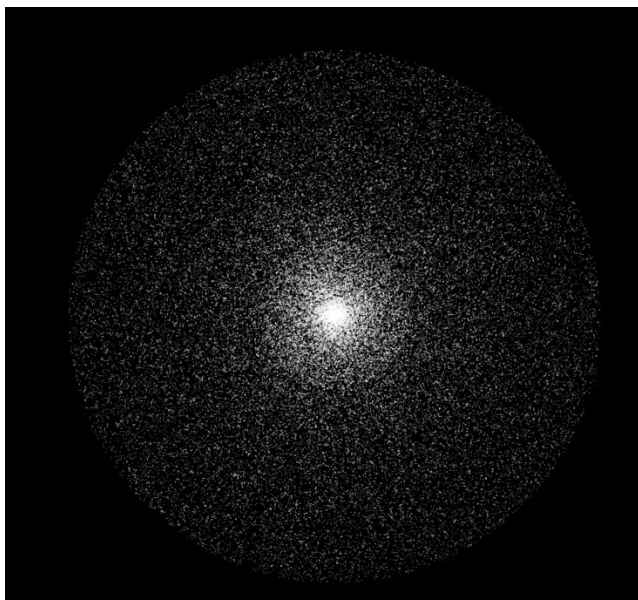
Programirali smo v programskem jeziku C++ v okolju Visual studio 2015. Program ima več faz. Najprej moramo odpreti grafično okno na zaslonu računalnika in v 3D-prostor, ki ga okno predstavlja, postaviti telesa. Najbolj smiselni začetni postavitvi glede na obliko galaksij se nam zdita razporeditev teles znotraj kroga ali znotraj krogle. Razporeditev teles po krogu lahko predstavlja disk spiralne galaksije (v nadaljevanju disk), razporeditev teles po krogli pa kroglasto kopico ali eliptično galaksijo. Telesa smo naključno porazdelili po ploskvi znotraj diska oziroma po notranjosti krogle. To smo storili tako, da smo naključno izbrali dve števili med 0 in 1. Prvo smo pomnožili s polmerom, drugo pa z  $2\pi$ . Tako smo dobili polarni koordinati točke na disku, kamor smo postavili telo. Dobljeno porazdelitev, kjer gostota teles pada od sredine proti robu, prikazuje slika 3a. Podoben, a ustrezno prilagojen postopek smo uporabili

Josh Barnes in Piet Hut sta se domislila učinkovite sheme, kako različna telesa, ki so dovolj blizu skupaj, združiti v eno telo.

Najbolj smiselni začetni postavitvi glede na obliko galaksij se nam zdita razporeditev teles znotraj kroga ali znotraj krogle. Razporeditev teles po krogu lahko predstavlja disk spiralne galaksije, razporeditev teles po krogli pa kroglasto kopico ali eliptično galaksijo.

tudi pri krogli [6]. Telesa lahko v začetnem položaju mirujejo, lahko pa se jim določi začetna hitrost. Telesom, razporejenim po disku, smo določili začetno hitrost tako, da se glede na navpično os skozi središče vsa na začetku vrtijo v smeri urinih kazalcev (slika 3b). Za vsako telo leži vektor hitrosti v ravnini diska in je pravokoten na zveznico med izbranim telesom in središčem diska. Po velikosti pa smo preizkušali različne možnosti, tako enako hitrost za vsa telesa kot enakomerno in neenakomerno naraščanje hitrosti od sredine proti robu. Skupaj z začetnim položajem določimo tudi maso telesa. Vsem telesom smo najprej določili isto maso, kasneje pa smo jo določali naključno, vendar smo omejili razmerje med največjo in najmanjšo maso na 10. Izvajali smo tudi simulacije, pri katerih smo dodatno v prostor (v sredino ali še bolj na rob) postavili telo z zelo veliko maso (recimo toliko kot vsa preostala telesa skupaj) po analogiji supermasivnih črnih lukenj.

Telesom, razporejenim po disku, smo določili začetno hitrost tako, da se glede na navpično os skozi središče vsa na začetku vrtijo v smeri urinih kazalcev.



Slika 3a, b: Disk s 50.000 teles, pogled od zgoraj in s strani.

Med drugim lahko med začetne pogoje štejemo odločitev, ali med simulacijo dopustimo trke med telesom in s tem »lepljenje« teles ali ne. Najpreprostejša možnost je, da so vsa telesa točkasta in do trkov ne prihaja. Realno, če pogledamo trk dveh galaksij, trkov praktično ni, ker so razdalje med zvezdami zelo velike v primerjavi z velikostjo zvezd. Če pa pogledamo oblikovanje sončnega sistema, so trki v tem procesu nujni. Tako smo preverili tudi možnost, da se telesa, ki se približata na neko minimalno razdaljo, zlepita. Pri tem se masi seštejeta, hitrost novega telesa pa se določi z ohranitvijo gibalne količine.

Ko določimo vse začetne pogoje, program izvaja Barnes-Hutov algoritem. Program dopušča globino do 20 nivojev, kar pomeni do  $8^{19}$  vozlišč. Pri ciljnem številu nekaj deset tisoč teles taka globina več kot zadošča. Za vsako telo se izračuna težni pospešek, ki je vektorska vsota posameznih težnih pospeškov, ki jih povzročajo vsa druga telesa, in se izračunajo po enačbi  $\vec{g} = \frac{GM}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ . Bližnja telesa so obravnavana samostojno, bolj oddaljena pa algoritem združuje. Iz znanih začetne lege, začetne hitrosti in težnega pospeška, ki se v (kratkem) časovnem intervalu  $\Delta t$  obravnava kot konstanten, se izračunata nova lega telesa

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot \Delta t \quad (1)$$

in hitrost v naslednjem koraku

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g} \cdot \Delta t \quad (2).$$

Začetne polarne koordinate teles se pretvorijo v kartezične in v kartezičnem koordinatnem sistemu potekajo vsi nadaljnji izračuni. Nove lege teles se sproti nalagajo v grafični spomin, na zaslonu se točke prestavijo v novo lego in lahko se začne nov korak. Človeški vid ima gibanje za zvezno, če se slika osveži vsaj 12-krat v sekundi, pri nižjih frekvencah osveževanja pa si

Za vsako telo se izračuna težni pospešek, ki je vektorska vsota posameznih težnih pospeškov, ki jih povzročajo vsa druga telesa, in se izračunajo po enačbi.

lahko pomagamo s snemalnikom zaslona in potem posnetek hitreje zavrtimo. Procesi, ki so predmet simulacij, v veselju trajajo na milijone let. Za pospešitev poteka dogajanja v simulacijah smo vzeli točkasta kilogramska telesa na metriških razdaljah in povečali gravitacijsko konstanto  $G$  za faktor sto tisoč. Med izvajanjem simulacij je omogočeno spreminjanje perspektive s tipkovnico in z miško. Objektu se lahko približamo, ga zavrtimo in nanj pogledamo s katere koli strani.

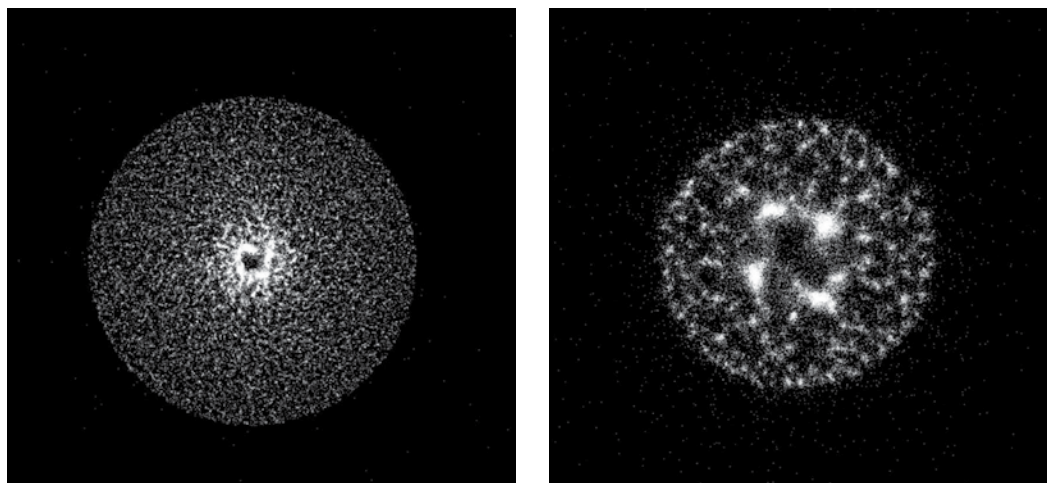
## Rezultati

Pri pisanju programa smo imeli v mislih predvsem pravilnost delovanja. Ko pa so prve simulacije potekale zelo počasi že pri postavitvi nekaj sto teles, smo bili prisiljeni razmišljati tudi o optimizaciji postopkov. V programu smo namesto spremenljivk uporabili kazalce, kar močno zmanjša obremenitev računalniškega spomina, v standardnih knjižnicah C++ pa smo našli funkcije, ki omogočajo polno obremenitev vseh jeder računalniškega procesorja. S temi spremembami smo uspeli hitrost simulacij zvišati za faktor sto. Posledično smo lahko povečali število teles v simulacijah na deset tisoč. Končni rezultat je, da pri deset tisoč telesih v disku procesor (Intel i5) zmore 26 slik na sekundo, pri deset tisoč telesih znotraj krogle z enakim polmerom pa 16 slik na sekundo. Pri disku gre hitreje najbrž zato, ker so telesa gosteje porazdeljena in je več združevanja (Barnes-Hutov algoritem, poglavje 2).

Začetni pogoji ponujajo praktično neskončno različnih možnosti pri simuliranju. Primeri v nadaljevanju po naši oceni predstavljajo izbor najbolj karakterističnih, najzanimivejših in tudi najzahtevnejših simulacij. V vseh primerih je teles vsaj petdeset tisoč. Večje število teles pomeni, da je kakovost slike na zaslonu bistveno boljša in omogoča vsaj približno predstavo o trenutni razporeditvi. Simulacije so bile zato počasne, v večini primerov jih je bilo treba pustiti teči več kot eno uro, celotno dogajanje pa smo posneli s snemalnikom zaslona in nato naredili video posnetke z 32-kratno hitrostjo. Uporaba snemalnika zaslona hitrost simulacij še dodatno zniža za približno dvajset odstotkov.

## Razporeditev teles po disku

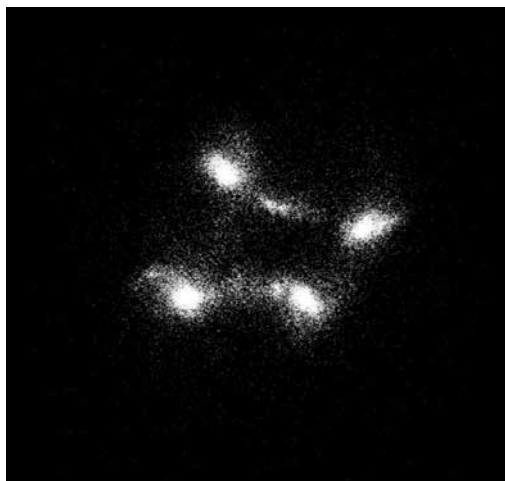
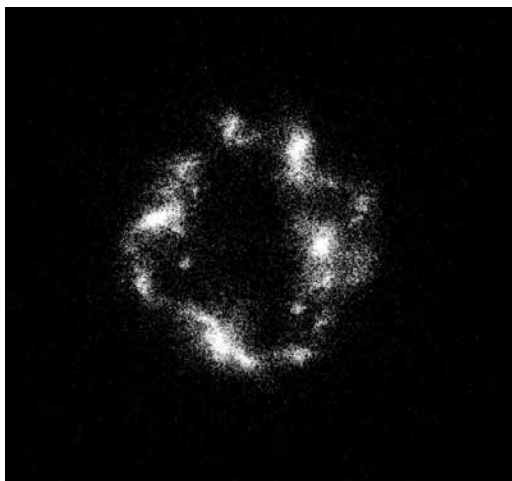
50.000 teles istih mas smo razporedili po disku tako, kot je prikazano na sliki 3a. Velikost hitrosti je enaka za vsa telesa, disk pa se vrti v smeri urinih kazalcev (poglavje 3, slika 3b). Rezultat takega pogoja je, da pri telesih blizu središča, kjer je težnost majhna, prevlada centrifugalna sila in ta telesa se začnejo premikati po spirali navzven (praznina v središču), medtem ko pri telesih na obrobju diska prevlada težnost in se začnejo premikati po spirali navznoter (disk se manjša, sliki 4a, b). Blizu krožnice s polovičnim polmerom prvotnega diska se telesa zgostijo v neenakomeren obroč (slika 4c), čez čas prevladajo štiri večje zgoščine (slika 4d), ki se postopoma ena po ena sesedajo v osrednjo zgoščino eliptične oblike (sliki 4e, f).



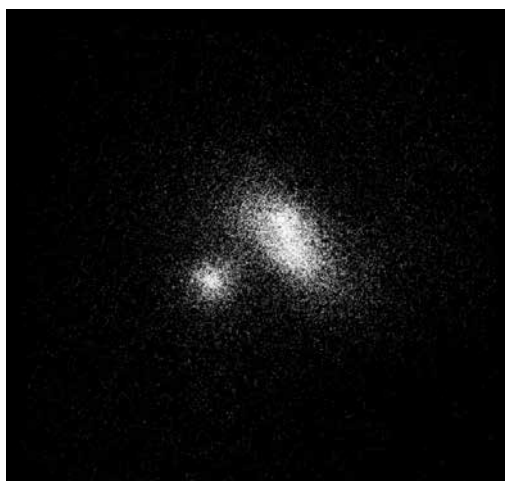
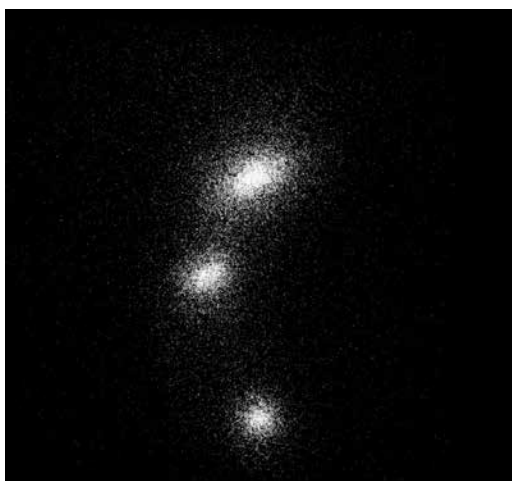
Slika 4a, b: Praznina v sredini in sesedanje diska.

Posnetke simulacij si lahko ogledate na spletni strani revije.

<https://www.zrssi.si/strokovne-resitve/revije/fizika-vsoli/fizika-v-solivideovsebine>



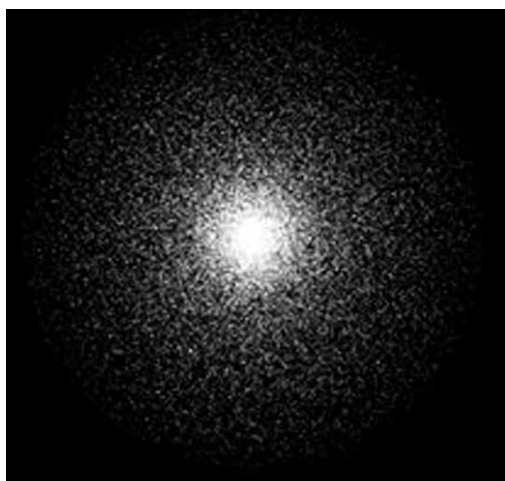
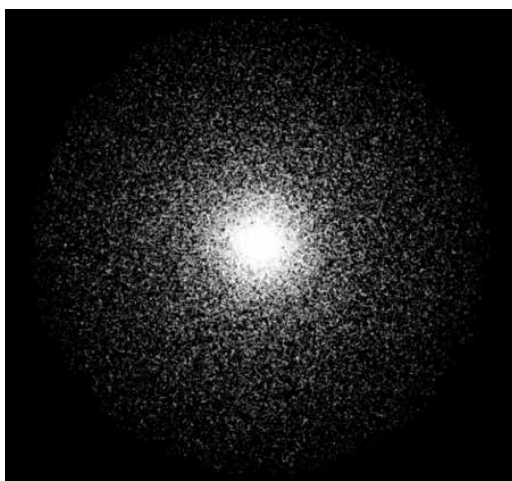
Slika 4c, d: Obroč in štiri lokalne zgoščine.



Slika 4e, f: Postopno sesedanje v enotno zgoščino.

### Razporeditev teles po krogli

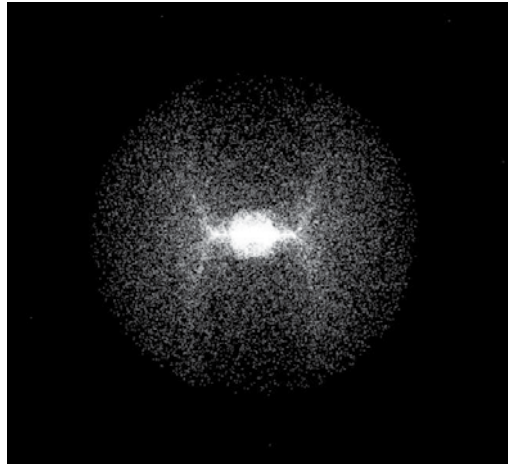
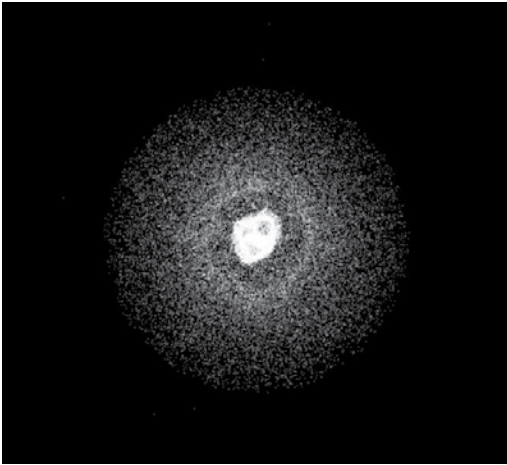
50.000 teles istih mas in istih velikosti hitrosti z naključno razporeditvijo po notranjosti krogle smo pognali v taki smeri, da se pri pogledu na kroglo od zgoraj vsa vrtijo v isto smer okoli navpične osi skozi središče. Slike od 5a do 5j so združene v pare, kjer leva slika prikazuje pogled



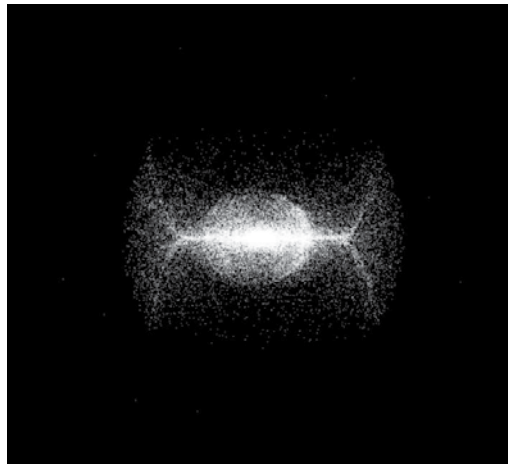
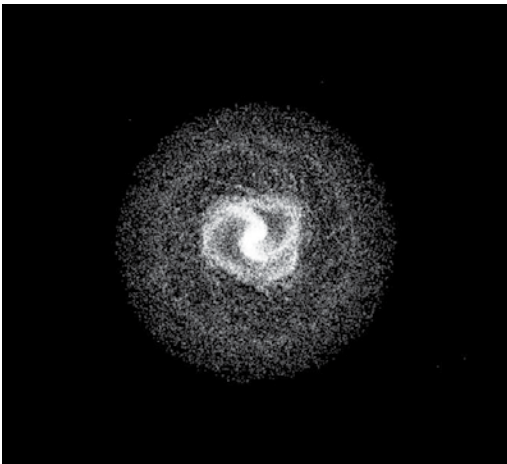
Slika 5a, b: Začetna krogelna postavitev.

na dogajanje od zgoraj, desna slika pa pogled v približno istem trenutku s strani. Pogled na začetno postavitev je skoraj enak z obeh perspektiv (sliki 5a, b), razlike so malenkostne zaradi naključne razdelitve. Po zagonu simulacije opazimo, da se telesa v sredini najprej združijo v jedro (slika 5c), pogled s strani pa odkrije, da se tudi zgornji in spodnji del krogle sesedeta proti jedru (slika 5d). Telesa daleč od osi (ob ekvatorju) se gravitaciji močneje upirajo, vseeno pa se doseže največja zgostitev na slikah 5g in 5h. V nadaljevanju lahko opazujemo vrtenje dveh spiralnih krakov (slika 5i), dokler ne zbledita v končni kroglasti obliki.

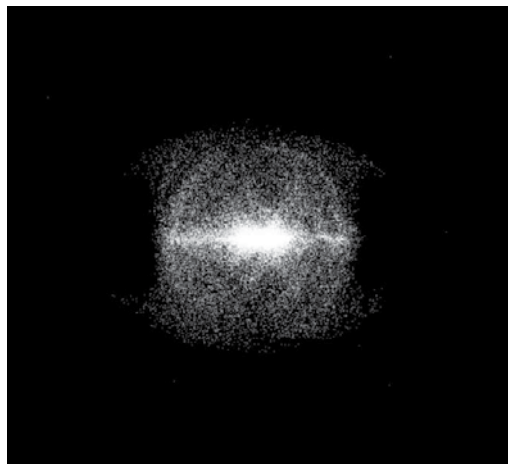
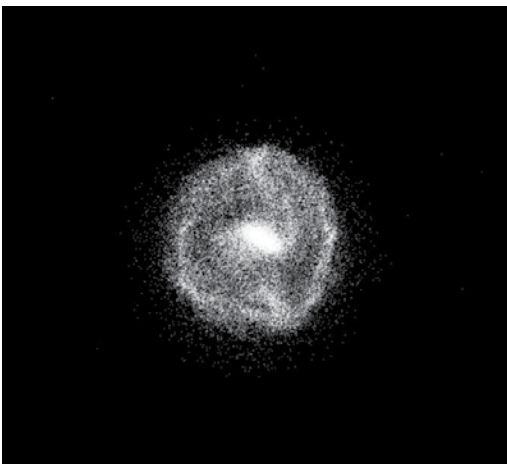
Po zagonu simulacije opazimo, da se telesa v sredini najprej združijo v jedro (slika 5c), pogled s strani pa odkrije, da se tudi zgornji in spodnji del krogle sesedeta proti jedru (slika 5d).



**Slika 5c, d:** Vrh in dno krogle padeta skupaj.

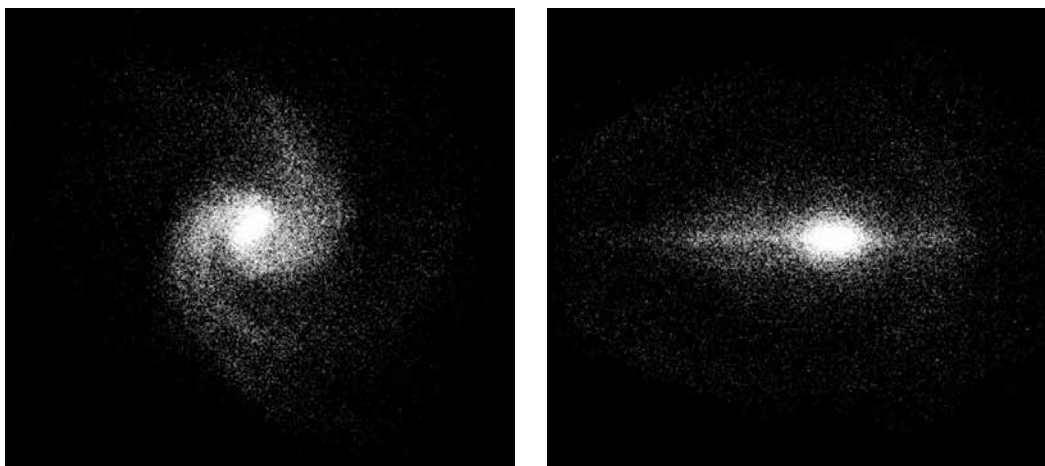


**Slika 5e, f:** Iz jedra se razvijeta manjša kraka.



**Slika 5g, h:** Največja zgostitev.





Slika 5i, j: Močna spiralna kraka.

## Disk in črna luknja

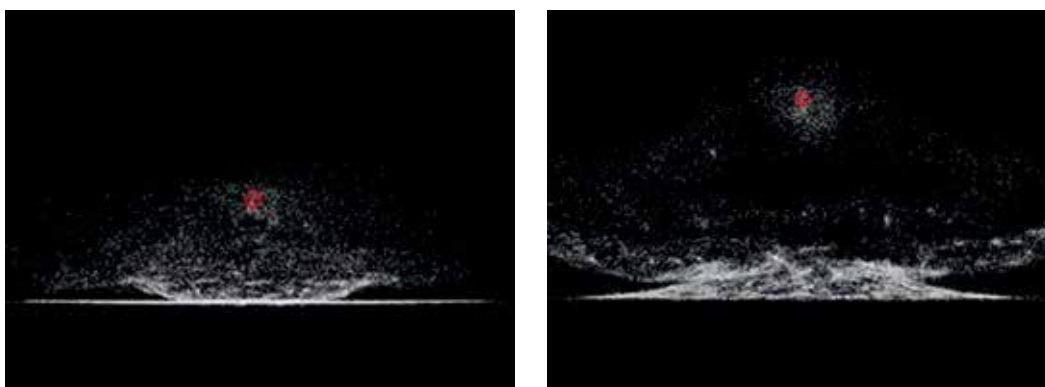
Zanimalo nas je, kolikšno hitrost bi morala imeti telesa v disku, da bi disk vsaj nekaj časa obdržal svojo značilno obliko. Preizkusili smo različne možnosti, kot najbolj zadovoljivo pa smo izbrali naraščanje hitrosti od sredne proti robu po funkciji, ki je sorazmerna s kvadratnim korenem iz radija. Proti disku s 50.000 telesi smo nato iz bližnje okolice poslali točkasto telo z maso 20.000 teles, ki predstavlja (supermasivno) črna luknja. V primerih, ko črna luknja potuje skozi sredino diska v navpični ali vodoravni smeri, pride do popolnega uničenja oblike diska. Na tisoče teles se razprši po prostoru, okrog črne luknje pa se ustvari zgoščina hitro krožečih zvezd. Slike od 6a do 6f prikazujejo primer, ko se črna luknja v navpični smeri približa sredini diska, ki leži v vodoravni ravnini. Slike od 6a do 6e prikazujejo pogled s strani, pri sliki 6f pa je »kamera« nekoliko dvignjena nad ravnino diska. Črna luknja že med približevanjem upogne disk proti sebi, tako da ta dobi obliko plitkega lijaka. Po trku se večina teles z območja jedra diska razbeži navzgor in navzven, v sredini pa zeva velika praznina, lepo vidna na sliki 6f. V nadaljevanju simulacije črna luknja z rojem ujetih zvezd odtava proč, preostala telesa pa se brez osrednje zgoščine, ki bi jih držala skupaj, porazgubijo po prostoru.

Zanimalo nas je, kolikšno hitrost bi morala imeti telesa v disku, da bi disk vsaj nekaj časa obdržal svojo značilno obliko.

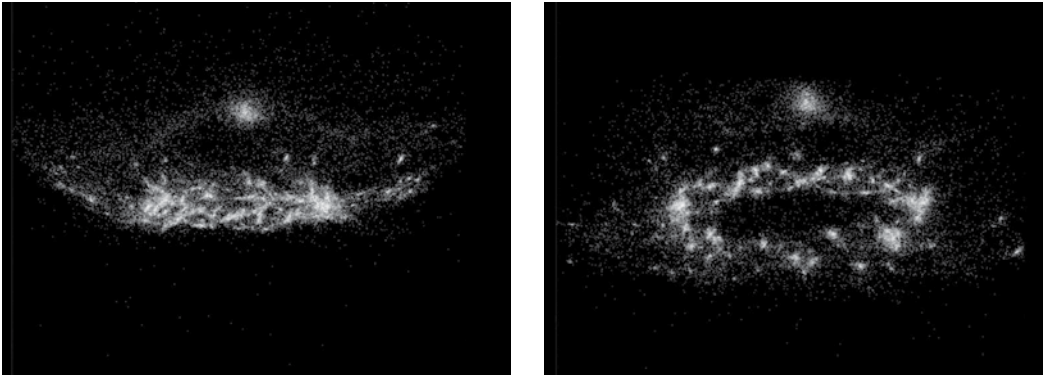


Slika 6a, b: Približevanje črne luknje disku in trenutek trka (lega črne luknje je označena z rdečim krožcem).

V primerih, ko črna luknja potuje skozi sredino diska v navpični ali vodoravni smeri, pride do popolnega uničenja oblike diska.



Slika 6c, d: Uničenje jedra diska.



**Slika 6e, f:** Pogled z oddaljenejši perspektive. Črna luknja je sredi zgoščine na vrhu slike.

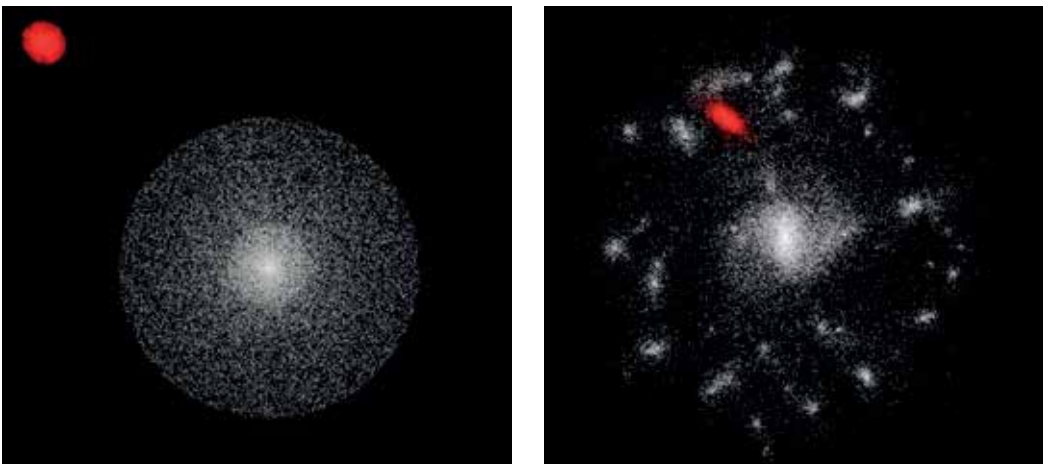
Črno luknjo smo poslali še mimo diska tako, da se je nekaj časa gibala po njegovem robu (slika 7). V tem primeru jedro »preživi«, črna luknja pa na disku vseeno pusti močan pečat.



**Slika 7:** Črna luknja potegne telesa z roba diska v »slonji rillec«.

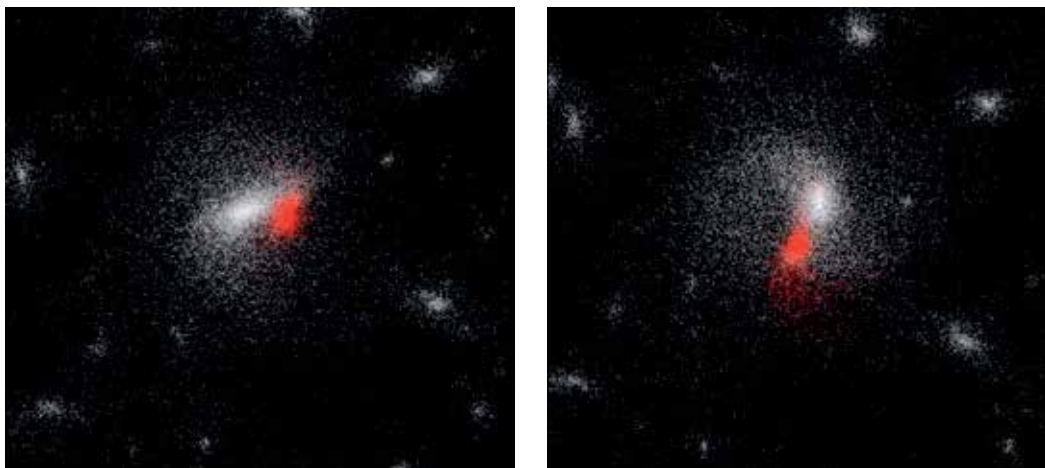
### Trk diska in krogle

V 3D-sceni smo v sredino postavili disk s 50.000 teles, na obrobje pa še 10.000 teles, razporejenih v kroglo. Telesa v krogli smo obarvali rdeče. Začetna postavitev je vidna na sliki 8a, ki

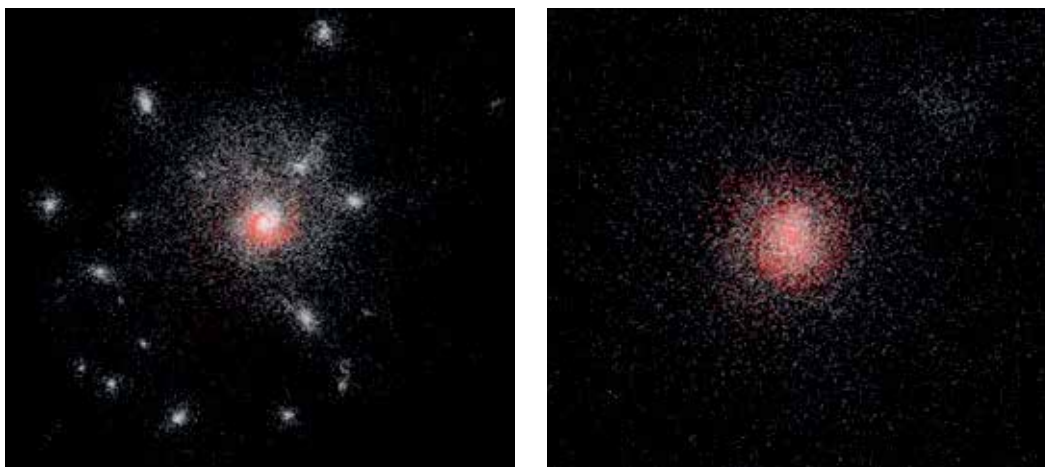


**Slika 8a, b:** Začetna postavitev in približevanje (rdeče) krogle jedru (belega) diska.

prikazuje pogled od zgoraj na ravnino diska. Središče krogle leži v isti ravnini. S takšno postavitvijo smo se hoteli približati trku dveh galaksij, recimo večje spiralne in manjše eliptične. Telesa iz diska in krogle smo obarvali različno, da bi iz simulacij lažje ocenili, kako poteka trk in kako se razporedijo telesa iz krogle v novi združbi. Jedro krogle se sprva počasi približuje jedru diska (slika 8b), po stiku obeh jedr (slika 8c) pa dogajanje postane bolj dinamično. Jedri se začneta pospešeno vrteti v smeri urinih kazalcev. Vedno večja centrifugalna sila začne razprševati šibkeje vezana telesa in obe jedri dobita širok rep (slika 8d). Ker pa jedro krogle vsebuje bistveno manj teles od jedra diska, se prej razprši med gibanjem po spirali (slika 8e).



**Slika 8c, d:** Bližja perspektiva stika obeh jedr in začetek pospeševanja v smeri urinih kazalcev.



**Slika 8e, f:** Rdeča spirala od daleč in blizu.

Slika 8f prikazuje približano jedro. Na sliki je še vidna spirala, ki pa čez čas izgine, ko se bela in rdeča telesa pomešajo v novonastalo elipsoidno zgoščino.

## Razprava

V simulacijah prihaja do primerov, ko dve telesi v paru z veliko hitrostjo v nasprotnih smereh pobegneta iz ustvarjenega 3D-prostora. To se zgodi takrat, ko se telesi zelo približata in se pospešek v kratkem času (krajšem od časovnega koraka  $\Delta t$ , poglavje 3) močno spremeni. Posledično je izračunana hitrost teles napačna (enačba 2). Telesi lahko dobijo nerealno veliko hitrost, ki ju odnese iz prostora. To je problem numeričnega računanja premikov in ga je mogoče omiliti s posebnimi prijemi, kot je »mehčanje sile« (angl. *force softening*). Vemo, da simulacije predstavljajo približek resničnega dogajanja, zato je vsak naslednji računski korak

nekoliko manj natančen. Računalniški program računa premike teles po najenostavnejši metodi numerične integracije (enačbi 1 in 2), za katero je značilno, da zaradi nenatančnosti povečuje skupno energijo sistema teles. Slika 9 prikazuje, kako program računa gibanje telesa po krožnici. Po izračunih se telo dejansko giblje po spirali navzven, a če je časovni korak kratek, je to opazno šele po večjem številu obhodov.

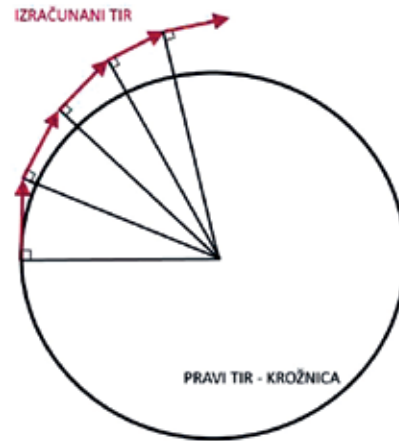
Posledica takega gibanja je povečevanje potencialne energije telesa. Zato smo preverili, kako je s skupno energijo vseh teles med simulacijami. Skupna energija je vsota potencialne in kinetične energije ter je teoretično ves čas konstantna. Potencialna energija je negativna, kinetična pa pozitivna, in dokler je skupna energija negativna, je sistem gravitacijsko vezan. Za preizkus smo vzeli disk z 10.000 telesi, začetna hitrost teles pa je naraščala od sredine proti robu sorazmerno s kvadratnim korenom iz radija. Največjo hitrost smo omejili na tako vrednost, da se je disk po zagonu simulacije začel gravitacijsko sesedati. Simulacijo smo pustili teči tako dolgo, da se je slika na zaslonu ustalila in smo lahko spremljali samo še dinamiko teles, ki jo je narekovala nastala osrednja zgoščina. Analiza vrednosti je pokazala, da se je skupna vrednost energije v tem času povečala za 35 %. Pri ogledu simulacije se to kaže tako, da se telesa postopoma izmikajo težnosti osrednje zgoščine in odtavajo iz 3D-prostora. Število teles v simulaciji se zato zmanjšuje, in če bi pustili simulacijo teči dovolj časa (recimo 10 ur), bi najbrž lahko dočakali razpad osrednje zgoščine in odhod vseh teles iz prostora. Problem omilijo natančnejše metode numeričnega integriranja, ki pa so matematično in računalniško zahtevnejše in jih v tej fazi še nismo preučili.

Poskusili smo tudi združevanje teles. Telesi, ki se dovolj približata drugo drugemu, smo združili v novo telo s skupno maso. A ta sprememba ni bistveno vplivala ne na število pobeglih teles ne na potek simulacij. Tudi testne simulacije z različnimi masami teles niso bistveno odstopale od predstavljenih simulacij s telesi z isto maso, vendar je tu še možnost za nadaljnje raziskovanje.

## Zaključek

Menimo, da smo nalogo, ki smo si jo zadali, uspešno opravili. Pri deset tisoč telesih v gravitacijski interakciji je dinamika osveževanja slike na zaslonu dovolj visoka, da lahko proces brez težav spremljamo »v živo«. Pri petdeset tisoč telesih pa smo uporabljali snemalnik zaslona *Icecream Screen Recorder* ter nato v programu *Movie maker* naredili videoposnetek z 32-kratno hitrostjo predvajanja. Ocenjujemo, da je petdeset tisoč teles optimalno število za simulacije z osebnim računalnikom glede na simulacijski čas in kakovost slike. Napisani računalniški program je dobra osnova za postopno približevanje realnejšim situacijam, kar se tiče števila teles in začetnih pogojev, vendar pa je vzporedno s tem treba razmišljati o možnostih uporabe hitrejših računalnikov in natančnejših numeričnih metod integracije.

Ta članek je povzetek raziskovalne naloge z naslovom Projekt gravitacija [7], ki je bila v šolskem letu 2017/18 izdelana na Gimnaziji Velenje in predstavljena v okviru gibanja »Mladi raziskovalci« na interdisciplinarnem področju fizike in računalništva. Kljub fizikalni tematiki je mladi raziskovalec najbolj napredoval ravno v znanju računalništva, zato se nam je zdela izbira področja ustrezna. V nalogi nismo postavili nobene hipoteze, zastavili pa smo si jasen cilj in na koncu naredili analizo doseženega. Pridobljeno znanje je zelo uporabno na več področjih in bo avtorju nedvomno zelo pomagalo pri študiju fizike.



Slika 9: Izvor napak pri računanju tira telesa.

Potencialna energija je negativna, kinetična pa pozitivna, in dokler je skupna energija negativna, je sistem gravitacijsko vezan.

## Literatura in viri

- [1] Jevšenak, P. (2017). O gravitaciji teles nepravilnih oblik. *Fizika v šoli*, 22(1), 16–21.
- [2] Jevšenak, P. (2018). Planeti v dvozvezdijh. *Fizika v šoli*, 23(1), 9–16.
- [3] <https://learnopengl.com/> (28. 10. 2017).
- [4] Wikipedia, Barnes – Hut simulation. [https://en.wikipedia.org/wiki/Barnes%E2%80%93Hut\\_simulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Barnes%E2%80%93Hut_simulation) (30. 11. 2017).
- [5] Ventimiglia, T., Wayne, K. (2012). The Barnes-Hut Algorithm. <http://arborjs.org/docs/barnes-hut> (30. 11. 2017).
- [6] Naključna porazdelitev teles po notranjosti krogle. <http://mathworld.wolfram.com/SpherePointPicking.html> (4. 12. 2017).
- [7] Jevšenak, L. (2018). *Projekt gravitacija, raziskovalna naloga*. Velenje: Šolski center Velenje.



Konferenca NAK – za učitelje naravoslovnih predmetov

# NAPOVEDUJEMO

## 5. konferenco učiteljev naravoslovnih predmetov – NAK 2019

Laško, 23. in 24. oktober 2019



Zavod  
Republike  
Slovenije  
za šolstvo



REPUBLIKA SLOVENIJA  
MINISTRSTVO ZA IZOBRAŽEVANJE,  
ZNANOST IN ŠPORT



EVROPSKA UNIJA  
EVROPSKI SKLAD  
SOCIALNI SKLAD  
NALOŽBA V VAŠO PRIHODNOST

Naložbo sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada

# Kvantne pike

dr. Janez Strnad

Članek »Kvantne pike« Janeza Strnada je nadaljevanje članka »Delec v škatli« istega avtorja, ki je bil objavljen v reviji *Fizika v šoli* [letnik 23, št. 2, 2018] lani. Oba članka objavljamo z dovoljenjem uredništva revije *Kemija v šoli in družbi*, št. 1, 2015, kjer sta bila članka prvič objavljena.

## Sistemi z manj dimenzijami

V fiziki že nekaj desetletij raziskujejo *sisteme z manj dimenzijami*. V teh sistemih omejuje gibanje elektronov na dve dimenziji, kar ustreza ravnini, na eno dimenzijo, kar ustreza premici, in na nobeno dimenzijo, kar ustreza točki. V prvem primeru nastane *kvantna plast*, v drugem *kvantna žica* in v tretjem *kvantna točka* (slika 1) [1]. Sisteme raziskujejo s prijemi *nanotehnologije*, ki seže od velikosti nanometra do nekaj sto nanometrov. (Nanometer, nm, je milijardina metra,  $10^{-9}$  m, in milijonina milimetra,  $10^{-6}$  mm.)

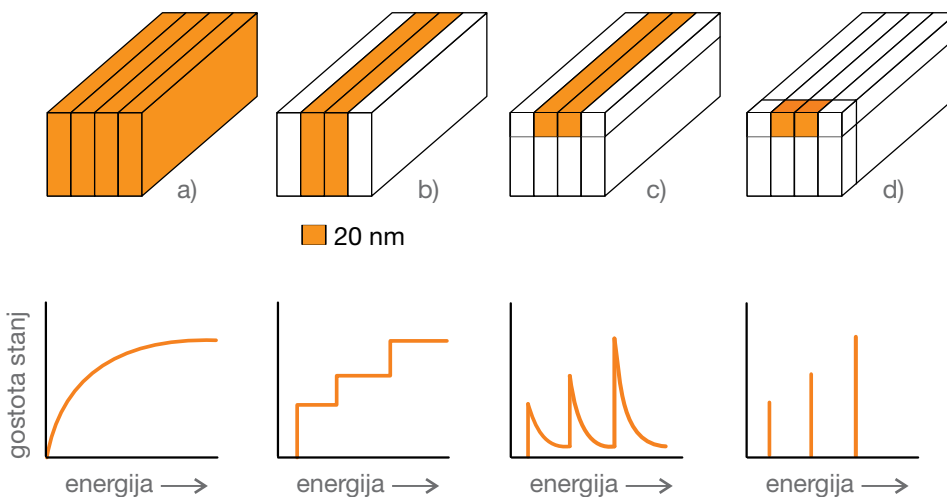
V kvantni plasti je gibanje elektronov omejeno na dve smeri. Dokler elektroni nimajo dovolj energije, da bi območje zapustili, se ne morejo prosto gibati v tretji smeri, pravokotno na ravnino. V kvantni žici je gibanje elektronov omejeno na eno smer. Dokler elektroni nimajo dovolj energije, da bi območje zapustili, se ne morejo prosto gibati v drugi in v tretji smeri, pravokotni na žico. V kvantni piki se elektroni ne morejo prosto gibati v nobeni od treh pravokotnih smeri. Dokler elektroni nimajo dovolj energije, da bi območje zapustili, so *ujeti*. Najmanjše

razsežnosti kvantne plasti, kvantne žice ali kvantne točke v polprevodnikih ocenimo z desetimi nanometri, kar se razlikuje od pogleda v geometriji.

Pri raziskovanju elektronov v teh sistemih koristijo rezultati za elektrone v dolgih organskih molekulah, ki jih je približno mogoče opisati kot delce v škatli [2], [3]. Pomembno lastnost sistemov z manj dimenzijami pojasni Heisenbergova neenačba:

$$\Delta x \Delta G > h. \quad (1)$$

$\Delta x$  je nedoločenost koordinate in  $\Delta G$  nedoločenost ustrezne komponente gibalne količine  $G = mv_x$ . Elektron, ujet v prostor z vse manjšimi razsežnostmi, ima vse natančnejše določeno lego. Zato je vse manj natančno določena njegova gibalna količina. S tem je povezana vse večja gibalna količina in z njo vse večja energija. Energija elektrona, ujetega v zelo majhno območje, je zelo velika. Vedenje elektronov v polprevodniku je sicer odvisno od vrste polprevodnika in od temperature. Iz načela (1) pa izhaja, da vedenje elektronov v sistemih z manj dimenzijami postane odvisno od velikosti območja, na katero so ujeti.



**Slika 1:** Shematična porazdelitev stanj po energiji v sistemih s tremi (a), z dvema (b), z eno (c) in z nič (d) dimenzijami [1].

Prve poskuse so naredili s kvantnimi plastmi. Kvantne plasti je mogoče izdelati z *epitaksijo z molekulskimi curki*. V visokem vakuumu pri tlaku preostalega plina, manjšem od  $10^{-10}$  milibara, in pri nizki temperaturi na kristal usmerijo curek atomov izbrane sorodne vrste. Na kristalu se na vrhno plast atomov nalagajo nove plasti atomov, ki sledijo zgradbi nižje plasti. Kristal počasi raste s hitrostjo manj kot deset nanometrov na minuto. Po načrtu spreminjajo vrsto atomov, da dobijo plasti z želeno debelino, ki jo na obeh straneh obdajata za elektrone nedostopni območji. Kvantne plasti izdelajo tudi s *tehniko kovine, oksida in polprevodnika*. Površje ploščice iz silicija z določeno primesjo oksidirajo, da nastane tanka plast silicijevega dioksida kot izolatorja. Nanjo naparijo tanko plast silicija z izbranimi primesmi. Tako izdelujejo na primer tudi tranzistorje za mobilne telefone in sončne celice. Nazadnje naparijo ozke kovinske pasove, ki rabijo kot elektrode, s katerimi pri poskusih vplivajo na pojave. S kvantnimi plastmi so naredili veliko poskusov in raziskovali pojave, ki jih pri polprevodnikih v kosu niso zasledili.

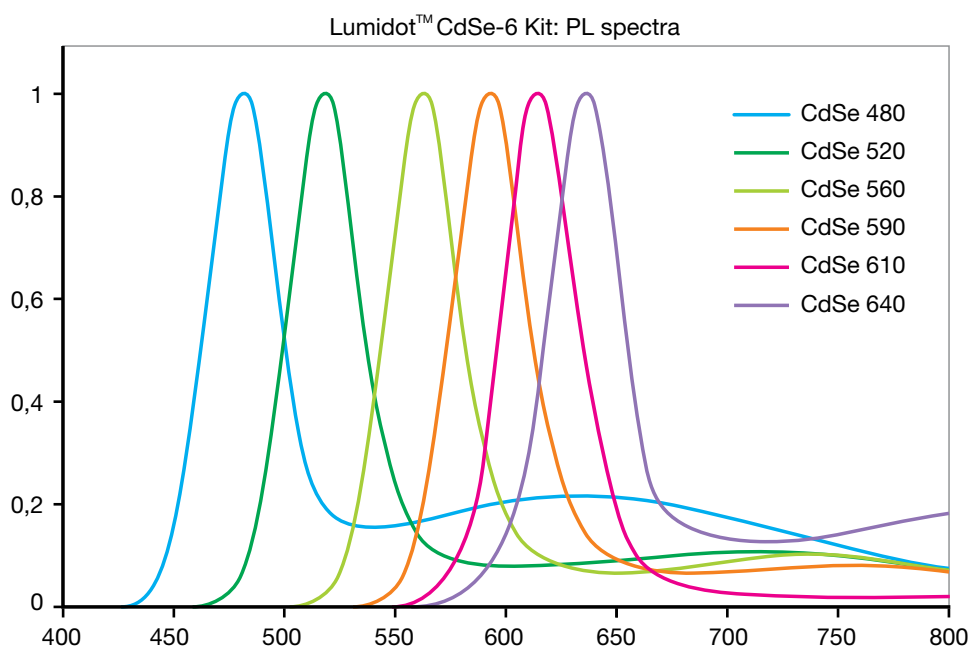
### Samorastne kvantne pike

Aleksej I. Ekimov in A. A. Onuščenko sta na Fizikalno-tehniškem inštitutu v Sankt Peterburgu leta 1981 delala poskuse s silikatnimi stekli z majhno primesjo klorovih in bakrovih spojin. Opazovala sta spremembe v steklu pri različnih temperaturah v odvisnosti od časa. Ugotovila sta, da so v steklu zrastle zelo majhni *nanokristali* polprevodnika bakrovega klorida (CuCl). Kristali so ras-

li tem hitreje, čim višja je bila temperatura. Ker je bil bakrov klorid najprej tekoč, so nanokristali imeli obliko kroglic. Z rentgensko svetlobo sta zasledovala spreminjanje velikosti nanokristalov od nekaj nanometrov do nekaj deset nanometrov. Nanokristali so absorbirali svetlobo s tem manjšo valovno dolžino, čim manjši so bili. Pri fluorescenci so to svetlobo sevali na vse strani. Potem so namesto bakrovega klorida uporabili druge polprevodnike, na primer kadmijev sulfid in kadmijev selenid. Pozneje so nanokristali, ki so nastali v množici sami od sebe, dobili ime *samorastne kvantne pike* (angl. *self-organized quantum dots*) [4].

Louis E. Brus je s sodelavci v Bellovih laboratorijih leta 1984 dobil nanokristale po drugi poti. Iz raztopine spojine polprevodnika v topilu z dodatkom površinsko aktivne snovi so se pri povišani temperaturi nanokristali izločili kot *koloidna suspenzija*. V taki suspenziji so delci lebdeli v topilu. Z uravnavanjem okoliščin so pridobili nanokristale z velikostjo od poldruga nanometra do sto nanometrov in več. Velikosti nanokristalov se pri danem poskusu med seboj niso razlikovale za več kot 15 %. Tudi drugi so opazovali podobne pojave. S časom so se prepričali, da so elektroni v nanokristalih ujeti. Številna merjenja so pokazala, da ne glede na lastnost spojine absorbirajo svetlobo s tem manjšo valovno dolžino, čim manjše so. Ko jih obsevamo s kratkovalovno svetlobo, pride do fluorescencie. Pri tem na vse strani sevajo svetlobo z valovno dolžino, ki jo najmočneje absorbirajo (slika 2).

Samorastne kvantne pike dobijo še na tretji način. Na podlagi z epitaksijo z molekulskimi curki ustvarijo nekaj



**Slika 2:** Absorpcijski koeficient svetlobe v odvisnosti od valovne dolžine za nanokristale kadmijevega selenida s tanko prevleko cinkovega sulfida za različne velikosti. Valovna dolžina pri najmočnejši absorpciji se z naraščajočo velikostjo premika k večji valovni dolžini.

atomov debelo plast. Nanjo usmerijo curek molekul z malo različno kristalno mrežo. Med prvotno tanko plastjo in novo plastjo nastanejo močne mehanske napetosti, zaradi katerih se nova plast mehurjasto izboči. Nastanejo otoki, ki nazadnje postanejo nanokristali v obliki krogelnih kapic.

Samorastne kvantne pike postanejo obstojnejše, če jih prevlečejo z zelo tanko plastjo varovalne snovi, na primer cinkovega sulfida (ZnS). Tako preprečijo, da bi se atomi na površju spojili z atomi snovi v okolici.

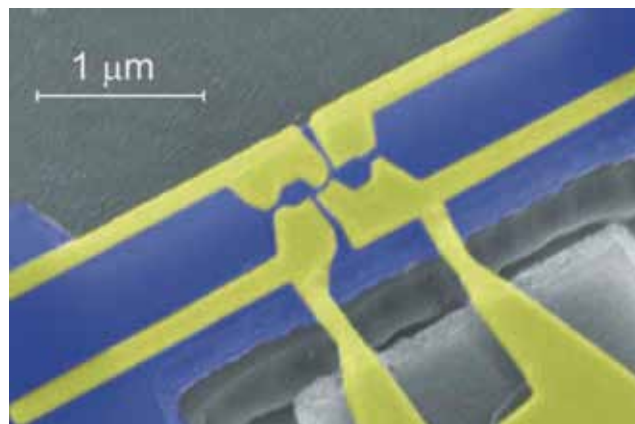
Samorastne kvantne pike izdelujejo industrijsko. Končni izdelek je prah ali suspenzija v tekočini (slika 3). Ugotovili so, da zelo majhne kvantne pike sevajo belo svetlobo, če jih osvetlijo s tako svetlobo. V pikah z nekaj deset atomi so skoraj vsi atomi na površju, in ti sevajo belo svetlobo. Z njimi bo mogoče izboljšati razsvetljavo.



**Slika 3:** Koloidne suspenzije nanokristalov kadmijevega selenida pri obsevanju s kratkovalovno svetlobo fluorescirajo v barvah, katerih valovna dolžina narašča z naraščajočo povprečno velikostjo od 2 do 7 nanometrov.

### Samostojne kvantne pike

Mark A. Reed in njegovi sodelavci pri družbi Texas Instruments so leta 1987 delali drugačne poskuse [5]. Uporabili so *litografijo z elektronskim curkom*, ki so jo razvili za izdelavo polprevodniških elementov. Polprevodnik s plastmi zelenih primesi prevlečejo s tanko zaščitno plastjo. Z zelo tankim curkom elektronov na določenih mestih zaščitno plast odstranijo in tam narišejo plast kovine. (Namesto elektronskega curka je mogoče uporabiti tudi curek rentgenske svetlobe ali curek molekul.) Potem s topli odstranijo preostalo zaščitno plast. Postopek ponovijo, da nastane droben stebriček polprevodnika s plastmi z zelenimi lastnostmi (slika 4) [5]. Nazadnje narišejo ozke kovinske pasove, ki delujejo kot elektrode, s katerimi vplivajo na razmere. Leta 1988 je Reed uvedel ime kvantna pika. Pozneje so posamične kvantne pike, na katere je mogoče vplivati preko elektrod, poimenovali *samostojne kvantne pike* (angl. *free-standing quantum dots*). Z elektronskim curkom ne morejo izdelati tvorb, ki bi bile manjše od deset nanometrov. To pomeni, da samostojne kvantne pike ne morejo biti manjše od deset nanometrov. Samorastne kvantne pike so lahko manjše.



**Slika 4:** Samostojna kvantna pika. Do takih pik je mogoče speljati elektrode in nanje vplivati z električno napetostjo.

### Zakaj polprevodnik?

Prve poskuse s samostojnimi kvantnimi pikami so delali z elementi druge in šeste skupine v periodnem sistemu, na primer s kadmijevim sulfidom (CdS) ali kadmijevim selenidom (CdSe). Nato so prešli h kvantnim pikam iz elementov tretje in pete skupine, na primer z galijevim arzenidom (GaAs). Tako so se tudi izognili uporabi strupenih kadmijevih spojin. Obstaja razlog, da so samostojne kvantne pike iz polprevodnikov. Ugotovimo ga, če se opremo na račun za vodikov atom [2].

Kot pripravno enoto za velikost smo pri vodikovem atomu dobili Bohrov polmer:

$$r_B = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{e_0^2m} = 0,0528 \text{ nm.} \quad (2)$$

Če bi elektron hoteli ujeti kot v vodikovem atomu, bi atom morali zapreti v votlino z velikostjo  $2r_B \approx 0,1 \text{ nm}$ . Z elektronsko litografijo pa ni mogoče dobiti razsežnosti, manjših od deset nanometrov, in ni mogoče izdelati manjših samostojnih kvantnih pik.

Elektron, ki se giblje okoli jedra v kristalu polprevodnika, moramo obravnavati drugače kot elektron v vodikovem atomu. Elektron se giblje med atomi po kristalu in ne po praznem prostoru. Povprečni vpliv atomov v kristalu na gibanje elektrona opišemo z dielektričnostjo  $\epsilon$ , ki jo dodamo influenčni konstanti  $\epsilon_0$ . V enačbi (1)  $\epsilon_0$  nadomestimo z  $\epsilon\epsilon_0$ . V periodičnem polprevodniškem kristalu elektron lažje sledi električnemu polju kot v praznem prostoru. To opišemo z efektivno maso  $m^*$ , ki je precej manjša kot masa elektrona v praznem prostoru. V številnih polprevodnikih dielektričnost doseže velikostno stopnjo 10 in razmerje efektivne in proste mase  $m^*/m$  velikostno stopnjo 0,1. (Razmerje je na primer enako 0,14 v siliciju in 0,07 v galijevem arzenidu.) To pripelje do Bohrovega polmera v polprevodniku:

$$r_B^* = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0\hbar^2}{e_0^2m^*},$$



kar v našem primeru ocenimo s 5 nm. Ustrezni premer meri 10 nm, to je toliko, kolikor še zmorejo pri elektronski litografiji.

### Uporaba kvantnih pik

Samorastne kvantne pike so vgradili v barvne zaslone s tekočimi kristali, sončne celice, sveteče diode in polprevodniške laserje ter s tem izboljšali njihovo delovanje. V medicini so s kvantnimi pikami nadomestili organska barvila, s katerimi so barvali biološke preparate. Kvantne pike oddajajo veliko več svetlobe kot barvila, ko jih osvetlijo, in so kemijsko odpornejše. Poleg tega jih je mogoče vgraditi v žive celice, jih osvetliti in po fluorescentni svetlobi slediti celici. Raziskujejo možnosti, da bi na ta način zasledovali skupine molekul in dosegli, da se nanokristali naberejo v bolnem delu telesa.

Danes raziskujejo kvantne pike v številnih laboratorijih po vsem svetu. S samostojnimi kvantnimi pikami, na katere je mogoče vplivati z zunanjo napetostjo in ki jih med seboj povezujejo, si obetajo izboljšati delovanje računalnikov. Kvantne pike izkoriščajo v elektroniki in optiki. Z njimi so naredili tranzistor z enim samim elektronom. S spreminjanjem napetosti na elektrodah je mogoče dodajati elektrone in s tem raziskovati »umetne atome« [6]. Kvantne pike je mogoče urediti v mrežo in raziskovati »umetne kristale«. Vse to odpira številne nove možnosti za poskuse v kvantni mehaniki, ki so jih prej obravnavale le računske naloge v učbenikih. M. Reed je zapisal: »Možnost, vplivati na snov v merilu atomov in po premišljenem načrtu ustvariti edinstvene materiale in naprave, je na splošno privlačna. Kaže na moč človeške bistroumnosti in domišljije nad pravili, po katerih nastanejo materiali v naravi.« [5]

### Literatura

- [1] E. Corcoran (1990). Trends in materials: diminishing dimensions, *Scientific American* 263 (5) 74–83.
- [2] J. Strnad (2015). Delec v škatli. *Kemija v šoli in družbi* [elektronski vir], št. 1. <https://kemija.net/stevilke/217>.
- J. Strnad (2018). Delec v škatli. *Fizika v šoli*, 23(2), 2–7.
- [3] T. Kippenry, L. A. Swafford, S. J. Rosenthal (2002). A powerful visual aid for introducing the particle in a box, *Journal of Chemical Education* 79, 1094–1100.
- [4] M. G. Lagally (1998). Self-organized quantum dots. *Journal of Chemical Education* 75, 277–279.
- [5] M. A. Reed (1993). Quantum dots, *Scientific American*, 98–103 (1).
- [6] M. A. Kastner (1993). Artificial atoms, *Physics Today*, 24–31.

# Počitniška fizika

mag. Tilka Jakob

Osnovna šola Vitanje

---

## Povzetek

V prispevku je opisan primer izvedbe fizikalne delavnice, kjer so devetošolci uporabljali fizikalno znanje pri dveh preprostih nalogah. Delavnica je razdeljena na dva dela: reševanje naloge oz. merjenje ustreznih količin ter ponovitev snovi z izdelavo in igranjem didaktične igre »spomin«. Nalogi sta iz sklopov »toplota« in »teža«. Ker opažam, da imajo učenci težave z ocenjevanjem fizikalnih količin, sem se odločila, da tudi temu namenim nekaj časa. Rezultati so bili presenetljivi, saj so se nekatere ocenjene vrednosti precej razlikovale od izračunanih.

**Ključne besede:** oceni količino, toplota, gostota, teža, merjenje, spomin

## Holiday Physics

### Abstract

The article describes an example of a physics workshop where nine-graders used their physics knowledge to solve two simple tasks. The workshop consisted of two parts: solving a task or measuring appropriate quantities and practicing the learned material by creating and playing a didactic game – memory. The tasks covered the chapter Heat and Weight. As I have noticed that students have difficulties in estimating physical quantities, I decided to focus on this area as well. The results were surprising, because some of the estimated values differed considerably from the calculated values.

**Keywords:** quantity estimate, heat, weight, measurement, memory

---

## Uvod

Delavnice med zimskimi počitnicami izvajam že nekaj let. K temu me že na začetku šolskega leta spodbudijo učenci z vprašanjem, ali bodo delavnice tudi letos. Ker imamo v tem šolskem letu tudi nacionalno preverjanje znanja iz fizike, sem se odločila, da k počitniški dejavnosti še posebej povabim učence, ki bi radi osvežili oz. poglobili svoje znanje fizike. Odzvala se je tretjina učencev iz 9. razreda. Izbrala sem dve temi, »toploto« zato, ker je snov, ki sem jo pred tem obravnavala, »težo« pa, ker je snov preteklega šolskega leta in lahko opazujem, v kolikšni meri je prisoten dejavnik pozabljanja.

## Izvedba fizikalne delavnice

Delavnica je potekala med zimskimi počitnicami. Letos sem jo razdelila na dva dela: ocenjevanje količin in reševanje (eksperimentalne) naloge oz. merjenje ustreznih količin ter ponovitev te snovi z izdelavo in igranjem didaktične igre »spomin«. Oblikovala sem skupine po tri učence. Celotna delavnica je trajala dve uri in pol.

Začeli smo s pregledom mize, na kateri so imeli pripravljene različne pripomočke, ki so jih lahko uporabili pri reševanju nalog (slika 1): merilni valj, tračni meter, termometer, kljunasto merilo, košček bakrene žice, košček železne žice in list s podanimi gostotami ter specifičnimi težami snovi. Nalogi sta bili naslednji.



**Slika 1:** Pripomočki za izvajanje meritev.

### 1. Toplota in toplotni tok

Oceni, koliko kilogramov in kubičnih metrov zraka je v učilnici. Nato ti količini še izračunaj in odgovori na vprašanje.

Koliko toplote potrebujemo, da zrak v učilnici segrejemo za dve stopinji Celzija?

Določi toplotni tok v učilnici v času naše delavnice.

### 2. Teža žice

a) Na mizi imaš košček bakrene žice. Oceni, koliko tehta.

Koliko pa tehta 25 metrov take žice? Sedaj pa to težo še izračunaj.

b) Na mizi imaš košček železne žice. Oceni, koliko tehta.

Koliko pa tehta 25 metrov take žice? Sedaj pa to težo še izračunaj.

Učenci so pri vsaki nalogi najprej morali oceniti količine, nato pa napisati čim več idej, kako bi nalogo rešili. Napisati so morali tudi, katere količine in medsebojne zveze med količinami so potrebne za izračune. Zapisali so, kaj bodo izmerili in katere podatke bodo razbrali iz tabel.

Pri prvi nalogi so učenci najprej ocenili maso in prostornino zraka v učilnici. Ocenjene mase zraka so se gibale med 90 in 110 kg, prostornine pa med 200 in 210 m<sup>3</sup>. Nato so pričeli razmišljati, kako bi izračunali maso zraka v učilnici. Spomnili so se na povezavo med količinami »masa«, »prostornina« in »gostota«, ter da bodo gostoto zraka poiskali v tabeli, prostornino zraka pa določili z merjenjem dolžine, širine in višine učilnice. Izračunali so prostornino zraka in iz enačbe za gostoto izrazili maso ter jo izračunali. Izračunani količini: prostornina zraka 226 m<sup>3</sup>, masa zraka 271,2 kg.

Zapisali so enačbo za toploto ( $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ ) in toplotni tok ( $P = Q/t$ ). Poiskali so še specifično toploto zraka in izračunali toploto, ki jo potrebujemo, da zrak segrejemo za 2 °C. Nato

so izračunali še toplotni tok, ki je tekel od radiatorjev na zrak v učilnici, v času 2,5 ure. Izračunana toplota 542,4 kJ, izračunani toplotni tok 60,27 W.

Pri drugi nalogi so najprej ocenili maso oz. težo koščkov žice, ki so jih imeli na mizi. Ocenjena masa 25-centimeterskega kosa bakrene žice se je gibala okoli 1 g, železne pa okoli 4 g. Nato so si zapisali enačbi za izračun gostote ( $\rho = m/V$ ) in teže ( $F_g = m \cdot g$ ). V tabelah so poiskali gostoto posamezne snovi (baker, železo). Prostornino žice so določali na dva načina. Pri prvem so zapisali enačbo za izračun prostornine žice (valja). S kljunastim merilom so izmerili debelino žice in izračunali njen polmer ( $r = d/2$ ). Nato so izračunali še ploščino prečnega preseka žice – ploščino kroga ( $S = 3,14 \cdot r^2$ ). Tako so imeli ustrezne podatke za izračun prostornine žice. Pri drugem načinu so si pomagali z merilnim valjem, v katerega so natočili določeno količino vode. Kos žice so v celoti potopili v vodo in prostornino določili z merjenjem izpodrinjene vode.

Sledil je izračun mase in teže žice. Za 25 cm dolga kosa žice so izračunali:  $m_{Cu} = 0,044$  g,  $F_g = 0,44$  mN;  $m_{Fe} = 6,2$  g,  $F_g = 0,062$  N. Za 25 m dolgi žici pa:  $m_{Cu} = 4,4$  g,  $F_g = 0,044$  N;  $m_{Fe} = 620$  g,  $F_g = 6,2$  N. Elektronske tehtnice učenci niso imeli na voljo. Učenci so z opazovanjem pripomočkov, ki so bili na mizi, prišli na idejo, kako nalogo rešiti in kaj izmeriti. Podatke so si lepo uredili, jih zapisali v ustrezni enoti in izračunali ustrezno količino. Tako so se s poskusi in logičnim sklepanjem dokopali do povezav med fizikalnimi količinami, s katerimi so opisali proces.

Drugi del delavnice je bil namenjen osvežitvi znanja, ki so ga uporabili pri reševanju nalog. Ob pripravi didaktične igre so utrdili in še enkrat obnovili svoje znanje. Pripravili so si ustrezno podlago, kamor so zapisali logične pare (slika 2). Nato so si izdelali kartončke za igro, na katere so zapisali pare. Pred igro je eden od učencev premešal kartončke in jih v obliki pravokotnika položil na mizo. Izbrali so igralca, ki je igro začel, in nadaljevali v smeri urinih kazalcev. Igralec, ki je bil na vrsti, je obrnil dva kartončka tako, da sta ju soigralca videla (slika 3). Če je bil na obeh kartončkih ustrezen par (enaki sličici, sorodni sličici, ki po nekem kriteriju spadata skupaj, enaka zapisa oziroma sličica in zapis), ju je igralec vzel in nadaljeval igro. Če pa sta bila kartončka različna, ju je položil nazaj na isto mesto in igro je nadaljeval sosednji igralec. Igra je bila končana, ko je zmanjkalo kartončkov na mizi. Zmagal je tisti, ki je zbral največ parov.

Ob pripravi didaktične igre so utrdili in še enkrat obnovili svoje znanje.

Tema: Toplota, teža, gostota

	A	B	C	D
1	$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$	teža	$1,3 \text{ kg/m}^3$	železna žica
2	toplota	$F_g = m \cdot g$	gostota zraza	homogena snov
3	$P = \frac{Q}{t}$	gostota snovi	$c = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$	$\rho_{Cu} = 8,96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
4	toplotni tok	$\rho = \frac{m}{V}$	specifična toplota zraza	gostota bakra

Slika 2: Priprava igre »spomin«.



**Slika 3:** Igranje igre »spomin«.

## Zaključek

Med celotno dejavnostjo (trajala je tri šolske ure) sem bila učencem na razpolago za pomoč oz. bolj za napotke pri delu, vendar me niso veliko potrebovali. Nekaterim je bilo bližje izvajanje meritev, drugi pa so zelo dobro razložili snov, zapisali enačbe in vodili skupino do zapisa ugotovitev. Vsi učenci pa so imeli pri obeh nalogah težave z oceno velikosti določene količine. Dolžino, širino in višino učilnice so ocenili dokaj natančno, tudi ocena prostornine učilnice je bila primerljiva z izračunano. Ocena mase zraka pa je bila zelo majhna v primerjavi z izračunano. Tudi ocena mase oz. teže žice jim je delala precejšnje težave. Ocena mase bakrene žice je bila prevelika, ocena mase železne žice pa premajhna v primerjavi z izračunano. Za določitev prostornine žice sta se jim porodili dve ideji, obe so preverili in dobili enako rešitev. Učenci so pokazali navdušenje nad delom, zlasti nad določanjem teže žice. Presenečeni pa so bili, kako napačno so ocenili maso žice.

Tekmovali so ob igranju igre »spomin«. Ker so igro pripravljali sami, so si dobro zapomnili ustrezne pare in jih tudi poiskali. Skupine so si izdelane igre med seboj tudi izmenjale. Igra je naredila delavnico zanimivejšo.

## Literatura

Žigon, S., Pintarič M., Jagodic A. (2017). *Fizika 9*, Samostojni delovni zvezek s poskusi za fiziko v devetem razredu OŠ, Ljubljana: Mladinska knjiga.

# Splošna matura iz fizike 2018

## Poročilo Državne predmetne komisije za splošno maturo (DPK SM) za fiziko

Peter Gabrovec, glavni ocenjevalec DPK SM za fiziko

### 1 Splošni podatki

#### 1.1 Število kandidatov po izobraževalnem programu in statusu

Pisni izpit splošne mature (SM) iz fizike je v šolskem letu 2017/18 potekal v spomladanskem roku 8. junija 2018. Opravljalo ga je 1495 kandidatov. Struktura kandidatov glede na izobraževalni program je podobna kot prejšnja leta.

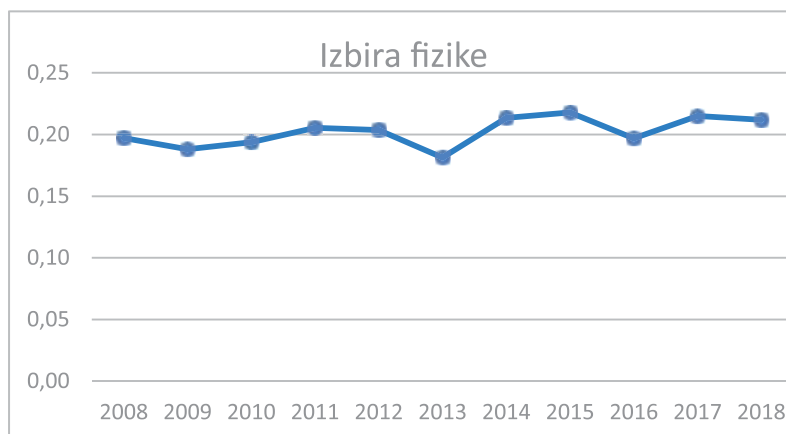
**Preglednica 1:** Število kandidatov na spomladanskem roku splošne mature iz fizike 2018.

	Referenčna skupina – dijaki, ki opravljajo maturo prvič			Vsi drugi	
	Skupaj gimnazije	Splošne gimnazije	Strokovne gimnazije	Poklicna matura	Popravni izpiti, ponovno opravljanje ...
Št. kandidatov	1183	1017	166	90	61

Število kandidatov, ki na maturi izberejo fiziko, sicer pada, kar je posledica zmanjšanja števila vseh kandidatov na maturi. Delež kandidatov, ki izberejo fiziko, je podoben kot prejšnja leta in ne kaže izrazitega trenda.

**Preglednica 2:** Število kandidatov na maturi iz fizike med letoma 2011 in 2018.

Leto	Število vseh kandidatov SM
2011	1685
2012	1531
2013	1374
2014	1495
2015	1487
2016	1353
2017	1539
2018	1334



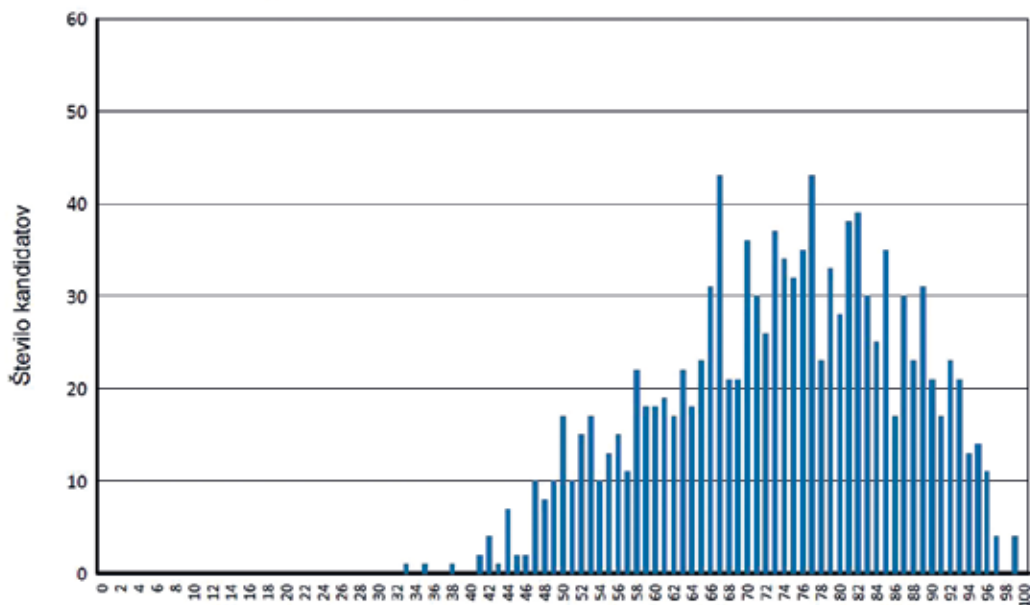
**Slika 1.1:** Delež kandidatov SM, ki so opravljali maturo iz fizike med letoma 2008 in 2018.

### 2 Analiza dosežkov kandidatov

#### 2.1 Porazdelitev dosežkov kandidatov po odstotnih točkah

Analiza dosežkov kandidatov je opravljena za referenčno skupino kandidatov. To skupino sestavljajo redni dijaki, ki prvič opravljajo splošno maturo v celoti (brez kandidatov z maturitetnim tečajem, 21-letnikov, odraslih in poklicnih maturantov). Referenčna skupina zajema 88,6 % kandidatov, ki so junija 2018 opravljali izpit splošne mature iz fizike.

## Razporeditev po doseženih točkah



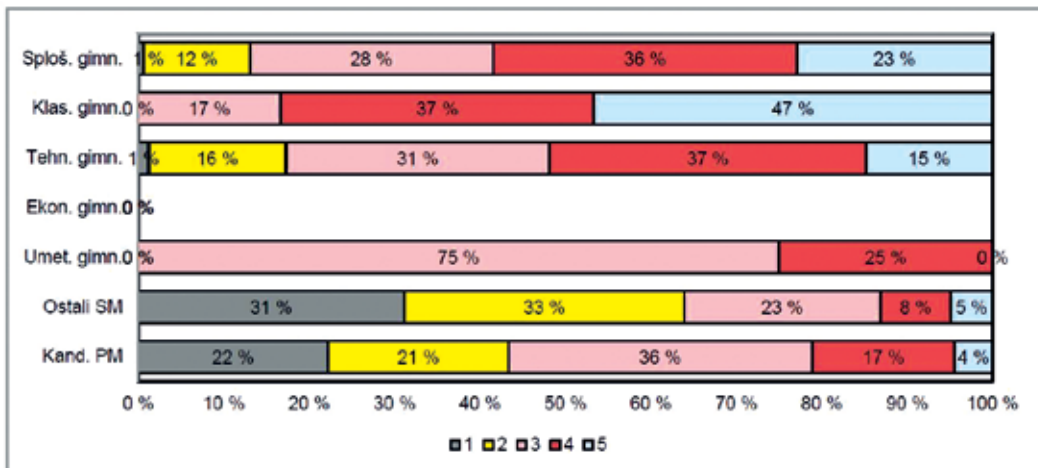
Slika 2.1: Porazdelitev kandidatov referenčne skupine po doseženih točkah.

### 2.2 Porazdelitev dosežkov kandidatov glede na ocene

Meje za izpitne ocene določi komisija glede na dosežke kandidatov referenčne skupine. Letošnje mejne točke in primerjavo s preteklimi leti kaže spodnja preglednica. Glede na leto prej so bile meje nekoliko višje.

Preglednica 3: Meje med ocenami za zadnjih pet let.

Ocene	5	4	3	2
2014	83	70	57	45
2015	84	72	59	46
2016	85	73	60	47
2017	84	71	58	46
2018	85	72	58	47



Slika 2.2: Relativna frekvenčna porazdelitev kandidatov po ocenah za vse kandidate na letošnji maturi. S PM so označeni maturantje poklicne mature, ki so fiziko opravljali kot peti predmet.

Razporeditev kandidatov po ocenah je v številčnejših skupinah kandidatov podobna kot v preteklih letih, v manjših skupinah pa je razumljivo podvržena večjim odstopanjem. V zadnjih nekaj letih lahko vseeno opazimo jasen trend dviga uspeha kandidatov poklicne mature.

### 3 Vsebinska analiza nalog in vprašanj ter uspeha po posameznih delih izpita

#### 3.1 Analiza uspeha pri prvi izpitni poli



**Slika 3.1.1:** Razporeditev kandidatov po točkah. Upoštevani so kandidati referenčne skupine.

Prva izpitna pola je sestavljena iz 35 vprašanj izbirnega tipa. Kandidati izberejo enega od ponujenih odgovorov na zastavljeno vprašanje. Vprašanja preverjajo le tiste cilje v katalogu, ki spadajo med splošna znanja. Kandidati referenčne skupine SM so pri tem delu izpita v povprečju dosegli 22,47 točke, indeks težavnosti<sup>1</sup> (IT) je bil 0,64, kar je nekoliko manj kot leto prej, a v rangu dosežkov preteklih let (2017: 0,70; 2016: 0,69; 2015: 0,71; 2014: 0,61).

Državna predmetna komisija je v izpitno polo tako kot vedno vključila nekaj težjih in nekaj zelo lahkih vprašanj. V prvem približku se postavimo na stališče, da je »lahka« naloga tista, ki so jo kandidati uspešno reševali (visok IT), »težke« naloge pa so tiste, pri katerih je uspeh kandidatov zelo slab (nizek IT). Seveda na zahtevnost naloge vpliva (poleg objektivne kognitivne zahtevnostne stopnje) še marsikaj drugega – npr. jasna definicija problema, hitro razumljivi in pregledni odgovori, skice pri nalogi in še kaj. Kljub temu je IT nekakšno okvirno sporočilo o uspehu kandidatov pri splošni maturi. Kandidati so prvo polo na splošno reševali dobro, najnižji IT je bil letos 0,24 pri vprašanju 4, sledilo je vprašanje 28 z IT 0,27, vsa preostala vprašanja pa so imela IT nad 0,37, kar pomeni, da je bilo letos v prvi izpitni poli sorazmerno malo vprašanj, pri katerih bi imeli kandidati zelo izrazite težave.

<sup>1</sup> Indeks težavnosti (IT) – razmerje med povprečnim številom doseženih točk in največjim številom točk, ki jih je mogoče doseči.



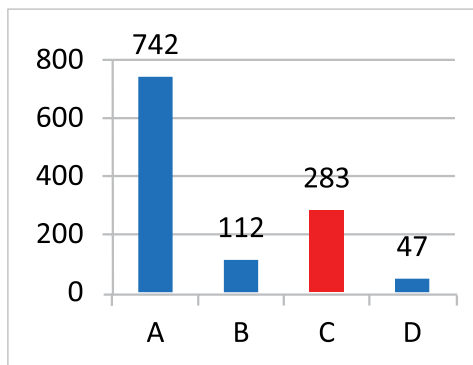
## 3.1.1. Naloge z nizkim indeksom težavnosti

## Naloga 4 (IT = 0,24; ID = 0,09)

4. Škatlo, ki miruje na vodoravni podlagi, začnemo potiskati v vodoravni smeri s silo 10 N. Škatla še vedno miruje. Katera od spodnjih izjav je pravilna?
- A Sila škatle na podlago se zaradi potiskanja ne spremeni.
  - B Sila škatle na podlago se poveča za 10 N.
  - C Sila škatle na podlago se poveča, vendar za manj kot 10 N.
  - D Sila škatle na podlago se poveča, vendar za več kot 10 N.

## Komentar:

Naloga 4 ima v prvi izpitni poli najnižji indeks težavnosti, torej so jo kandidati reševali najslabše. Najpogosteje so kandidati izbrali odgovor A. Pri tem niso upoštevali, da je sila škatle na podlago vektor, katerega navpična komponenta se v opisanem primeru res ne spremeni, poveča pa se vodoravna komponenta. Težava je verjetno tudi v tem, da lepenje pogosto obravnavamo kot ločeno silo in ne le kot komponento sile podlage, zato kandidati verjetno niso mislili, da se vprašanje nanaša na spremembo velikosti te komponente.



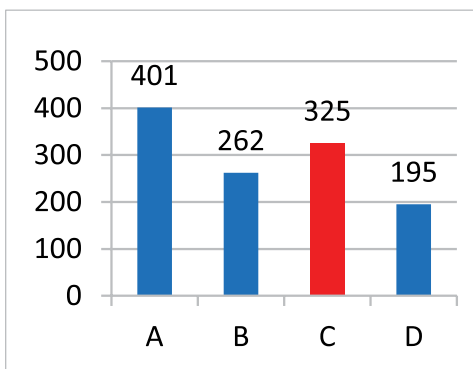
**Slika 3.1.1.1:** Število kandidatov, ki so izbrali posamezni odgovor v nalogi 4. Pravilen je odgovor C.

## Naloga 28 (IT = 0,27; ID = 0,18)

28. Palica, ki je na eni strani vpeta (to točko štejemo kot vozle) in na drugo prosta, niha z osnovno trekvenco  $v_0$ . Kolikšna mora biti frekvenca  $v$ , da bo na palici nastalo 10 vozlov?
- A  $v = 10 v_0$
  - B  $v = 11 v_0$
  - C  $v = 19 v_0$
  - D  $v = 20 v_0$

## Komentar:

Poleg naloge 4 so kandidati izrazito slabo reševali tudi nalogo 28. Ta je bila druga najslabše reševana naloga v prvi izpitni poli. Izid je pričakovan, saj gre po eni strani za primer stoječega valovanja, ki mu pri pouku gotovo namenjamo manj pozornosti kot stoječemu valovanju na struni, hkrati pa je tudi zveza med številom vozlov in frekvenco zapletenejša kot v primeru stoječega valovanja na struni.



**Slika 3.1.1.2:** Število kandidatov, ki so izbrali posamezni odgovor v nalogi 28. Pravilen je odgovor C.

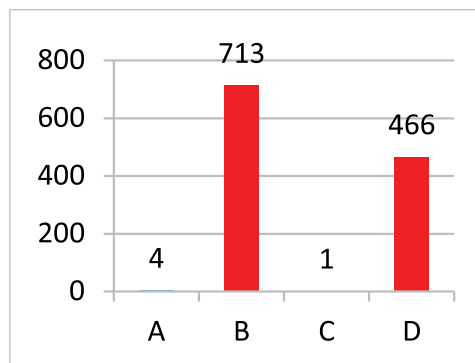
### 3.1.2 Naloga z dobrim uspehom (visok IT) in naloge, ko ločujejo »boljše« in »slabše« kandidate (visok ID<sup>2</sup>)

#### Naloga 11 (IT = 1,00; ID = 0,01)

11. Dve telesi iz mirovanja potisnemo z enako silo na enaki razdalji. Na koncu imata telesi enako gibalno količino. Katera izjava o njihovih masah sledi iz opisa?
- A Masa prvega telesa je manjša od mase drugega telesa.
  - B Masa obeh teles je enaka.
  - C Masa prvega telesa je večja od mase drugega telesa.
  - D Za odgovor nimamo dovolj podatkov.

#### Komentar:

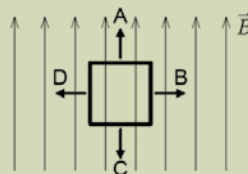
Naloga z najvišjim indeksom težavnosti (1,00) je naloga 11. Rezultat je precej razumljiv ob dejstvu, da se je predmetna maturitetna komisija odločila, da zaradi premalo natančnega besedila kot pravilna šteje odgovora B in D. Namen naloge je bil preveriti sposobnost kandidatov, da iz podatkov o enakih silah, ki delujejo na enaki poti, najprej ugotovijo, da sta obe telesi prejeli enako delo in imata zato po delovanju sile enako kinetično energijo. V kombinaciji s podatkom, da imata istočasno tudi enako gibalno količino, naj bi sklenili, da je to mogoče le pri enaki masi. Žal pa v nalogi ni bilo zapisano, da na telesi delujeta le sili, za kateri je podano, da sta enaki, in nobena druga sila. Podatek o drugih silah je torej manjkal, zato je bil pravilen odgovor D. Komisija se je odločila, da kot pravilni odgovor šteje tudi odgovor B, saj dikcija »telo potisnemo s silo ...« pogosto implicira, da je to edina sila.



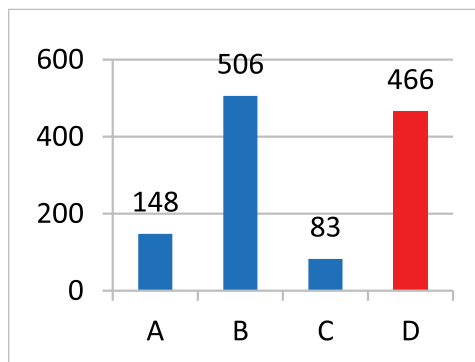
Slika 3.1.2.1: Število kandidatov, ki so izbrali posamezni odgovor v nalogi 11. Pravilna sta odgovora B in D.

#### Naloga 24 (IT = 0,38; ID = 0,47)

24. Kvadratna zanka se nahaja v magnetnem polju, kakor kaže slika. Zanko premaknemo iz narisane lege v štirih različnih smereh. Kater trditev o indukciji pri premikih zanke je pravilna?
- A Do indukcije v zanki pride le pri premikih A in C.
  - B Do indukcije v zanki pride le pri premikih B in D.
  - C Do indukcije v zanki pride pri vseh prikazanih premikih.
  - D Do indukcije v zanki ne pride pri nobenem od prikazanih premikov.



Naloga 24 je imela v tej izpitni poli največji indeks diskriminatornosti (ID), torej je najbolje ločevala med dobrimi in slabimi dijaki. Rezultat ni presenetljiv, saj gre za nalogo iz poglavja indukcije, ki spada med težje, in večina gesel v tem poglavju spada v izbirni del. Razlog za pogostejšo izbiro odgovora B je morda neustrezna uporaba pravila, da pride do indukcije v vodniku, če vodnik seka silnice magnetnega polja.



Slika 3.1.2.2: Število kandidatov, ki so izbrali posamezni odgovor v nalogi 24. Pravilen je odgovor D.

<sup>2</sup> ID naloge – statistični parameter, s katerim skušamo meriti, ali so nalogo bolje reševali dijaki, ki so imeli v celoti boljši uspeh na maturi. Naloge z visokim ID so uspešno reševali večinoma le dijaki, ki so tudi sicer dosegli zelo dober rezultat na maturi – »dobri« dijaki. Nizek ID pomeni, da so nalogo dobro reševali tako »dobri« kot »slabi« kandidati.

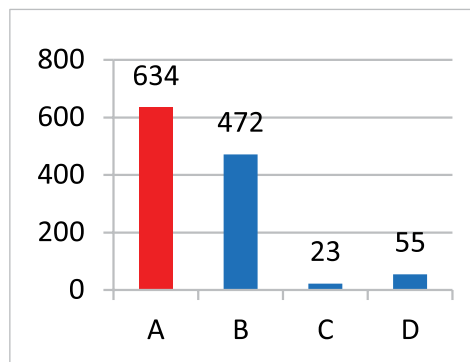
## Naloga 14 (IT = 0,54; ID = -0,24)

14. Lesena kroglica se enakomerno dviga v vodi. Katera izjava je pravilna?

- A Vzgon je večji od teže kroglice.
- B Vzgon je enak teži kroglice.
- C Vzgon je manjši od teže kroglice.
- D Vzgona in teže kroglice ne moremo primerjati, ker ne poznamo gostote kroglice.

Komentar:

Naloga 14 ima negativen indeks diskriminatornosti, kar pomeni, da so jo slabše reševali dijaki, ki so bili pri celotnem izpitu iz fizike sicer boljše. Kandidati so morali primerjati vzgon kroglice in njeno težo, pri čemer je bilo podano, da je kroglica lesena. Glede na dejstvo, da je razmerje med vzgonom in težo na potopljeno telo enako razmerju gostote vode in potopljenega telesa, ter ob običajnem privzetku, da je gostota lesa manjša od gostote vode, z naloge ne bi smelo biti težav. Glavna težava je bil odgovor B, ki so ga kandidati verjetno izbirali zaradi podatka, da se kroglica giblje enakomerno, pri čemer pa so spregledali, da teža in vzgon pri gibanju skozi vodo nista edini sili in da se kroglica giblje enakomerno, ko se vzpostavi ravnovesje med težo, vzgonom in uporom zaradi gibanja skozi vodo.



**Slika 3.1.2.3:** Število kandidatov, ki so izbrali posamezni odgovor v nalogi 14. Pravilen je odgovor A.

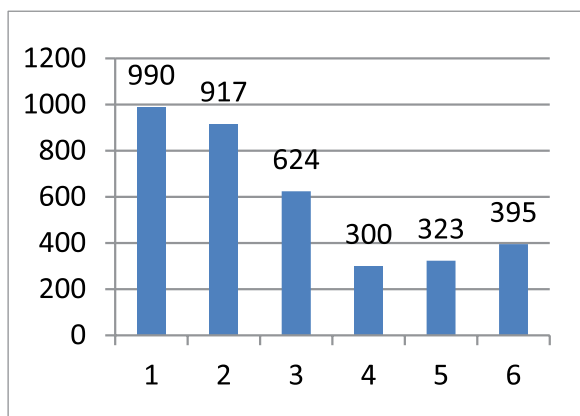
### 3.2 Analiza uspeha pri drugi izpitni poli (strukturirane naloge)

V drugi izpitni poli so kandidati izbrali tri naloge strukturiranega tipa izmed ponujenih šestih. Frekvenco izbranih nalog kaže slika 3.2.1.

Glede števila kandidatov, ki so izbrali posamezno nalogo, tudi letos izstopa naloga 1, ki jo je izbralo največ kandidatov. Tak vzorec je bil značilen že v prejšnjih letih. Pripisemo ga lahko dejstvu, da je tip naloge 1 vsa leta precej podoben in da kandidati dobro obvladajo vsebine, ki jih naloga preverja. Veščin obdelave merskih podatkov, risanja grafov in določanja napak pri merjenjih so se kandidati naučili tudi pri laboratorijskem delu, ki je po učnem načrtu prisotno v vseh letih šolanja.

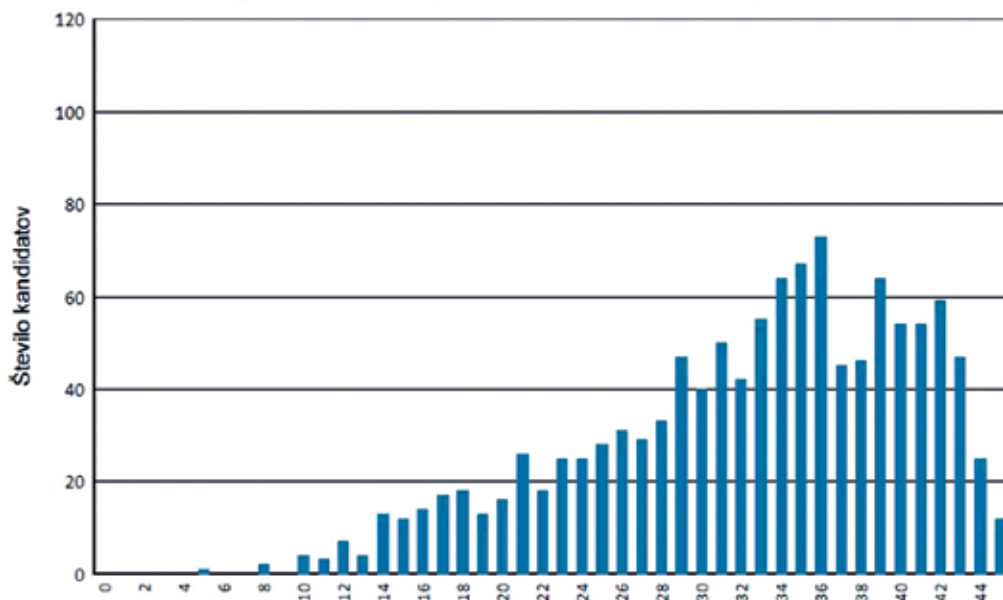
Po deležu kandidatov, ki so izbrali posamezno nalogo, letos v primerjavi s povprečjem zadnjih štirih let navzgor najbolj odstopa naloga 3, navzdol pa naloga 4. Razlike v pogostosti izbire posamezne naloge v različnih letih so pričakovane glede na različne teme, ki jih naloge obravnavajo, in se tudi letos gibljejo v običajnih vrednostih.

Vsaka naloga je bila vredna 15 točk, skupaj so torej kandidati lahko dosegli 45 točk. Slika 3.2.2 kaže razporeditev kandidatov referenčne skupine po doseženih točkah v drugi poli.



**Slika 3.2.1:** Število kandidatov, ki so izbrali posamezno nalogo. Upoštevani so kandidati referenčne skupine.

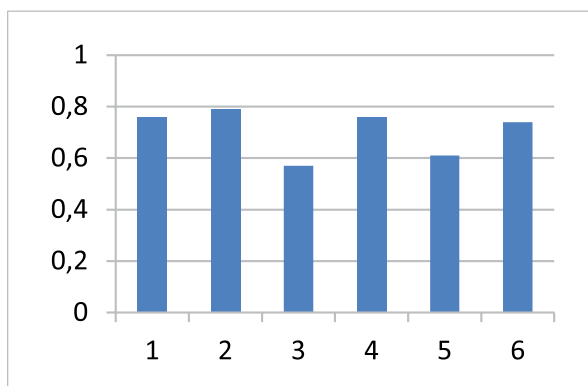
## Razporeditev po doseženih točkah



Slika 3.2.2: Razporeditev kandidatov po točkah. Upoštevani so kandidati referenčne skupine.

Kandidati referenčne skupine so v povprečju dosegli 32,26 točke, indeks težavnosti te izpitne pole je 0,72. Rezultat je podoben kot v prejšnjih letih: 2017: 0,64; 2016: 0,73; 2015: 0,67.

Glede indeksa težavnosti nalog je sicer neobičajno letos na prvem mestu naloga iz mehanike, pri preostalih nalogah pa je bila uspešnost kandidatov precej podobna kot pretekla leta. Glede na zadnja leta so bili kandidati nekoliko uspešnejši pri nalogi 2 (mehanika), nalogi 4 (elektrika in magnetizem) in nalogi 6 (moderna fizika in astronomija). Indeksi težavnosti posameznih nalog so bili letos glede na prejšnja leta med bolj izenačenimi.



Slika 3.2.3: Indeks težavnosti po posameznih nalogah druge pole.

### 3.2.1. Sestava nalog

Naloge so pokrivalo naslednje fizikalne teme:

- Naloga 1 – *Merjenje*: kandidati so obdelali in analizirali podatke o hitrosti dvigovanja vlage po zidu.
- Naloga 2 – *Mehanika*: naloga je obravnavala pospeševanje in zaviranje avtomobila s prikolico.
- Naloga 3 – *Toplota*: vprašanja pri tej nalogi so se nanašala na segrevanje vode v posodi do vrelišča in na ustrezno izmenjavo toplote med vodo in okolico.
- Naloga 4 – *Elektrika in magnetizem*: naloga je obravnavala tok naelektrenih delcev sončevega vetra.
- Naloga 5 – *Nihanje, valovanje in optika*: vprašanja naloge so obravnavala potovanje laserskega žarka skozi stekleno palico in odboj na njenih robovih.
- Naloga 6 – *Moderna fizika*: naloga je preverjala različne vidike radioaktivnega razpada joda: časovni potek razpada, razpadni produkti, sproščena energija itd.

### 3.2.2 Najpogostejši nepravilni odgovori kandidatov pri drugi izpitni poli

Težave, ki so vodile k slabšemu uspehu pri drugi izpitni poli, so v analizi združene v več sklopov, za vsakega je navedenih nekaj primerov, v oklepaju pa številka vprašanja.

1. Relativno slabše obvladanje določenih tem. Pri drugi izpitni poli so dosegli kandidati sorazmerno slab uspeh pri naslednjih vprašanjih, ki so zahtevala le priklic znanja:
  - a) odvisnost magnetne sile od kota med smerjo gibanja in smerjo magnetnega polja (4.7),
  - b) ločevanje definicije lomnega količnika od lomnega zakona (5.1).
2. Primeri nekaterih postopkov, ki so jih kandidati slabo obvladali:
  - a) določitev napake iz natančnosti zapisa – postopek so zamenjavali s postopkom določitve napake iz serije meritev (1.2),
  - b) računanje z napakami (1.5),
  - c) pri uporabi Stefanovega zakona so vstavljali temperaturo v stopinjah Celzija (3.7),
  - d) v računu so razliko  $T_2^4 - T_1^4$  zamenjavali s  $(T_2 - T_1)^4$  (3.7),
  - e) napačno so zapisovali jedrsko reakcijo, niso ločevali med vrstnimi in masnimi števili, uporabljali so napačne simbole za elemente (6.5).
3. Pogosto napake izvirajo iz slabega poznavanja, pri katerih primerih je mogoče uporabiti posamezno enačbo oziroma kaj so ustrezni podatki, ki jih morajo v enačbo vstaviti:
  - a) ne ločijo med definicijo in drugimi zvezami za dano količino: pri obravnavanem izpitu niso ločili med definicijo lomnega količnika in lomnim zakonom (5.1),
  - b) pri nalogi 2.7 so bili nepazljivi na dejstvo, da je zavirala le sila lepenja med avtom in podlago in da morajo zato v računu sile lepenja uporabiti le maso avta in ne tudi mase prikolice,
  - c) pri nalogi 3.5 so za vrelišče vode vstavili  $100\text{ }^\circ\text{C}$  in ne  $98\text{ }^\circ\text{C}$ , kot je bilo podano v besedilu naloge,
  - d) niso izračunali izmenjanega toplotnega toka med posodo in okolico, temveč le del, ki ga izseva posoda, spregledali pa so sevanje okolice (3.7),
  - e) maso atoma so računali iz mas gradnikov namesto iz mase nastalega atoma in sproščene energije pri razpadu (6.9).
4. Kandidati so pogosto slabo razbrali, kaj naloga od njih zahteva:
  - a) spregledali so, da naloga sprašuje po temperaturi spodnje strani posode in ne po temperaturni razliki (3.5),
  - b) spregledali so, da naloga ne sprašuje po odbojnem kotu, ampak po spremembi smeri curka svetlobe (5.5),
  - c) zapisali so splošni izraz za izračun števila razpadlih jeder, namesto da bi navedli, koliko jih razpade v enem razpolovnem času (6.1).
5. Med najzahtevnejša spadajo odprto zastavljena vprašanja, pri katerih morajo kandidati podati dovolj celovit odgovor in sami presoditi, kaj vse je treba za tak odgovor navesti ali kaj je treba v računu upoštevati:
  - a) običajno so imeli težave z utemeljevanjem odgovora, ki so ga sicer navedli pravilno (1.7, 3.8),
  - b) niso vedeli, kaj naj izračunajo, da se bodo lahko opredelili o zastavljenem vprašanju (3.8).
6. V nekaterih primerih so kandidati neustrezno podali rezultat pri računskih nalogah. Pri letošnji maturi iz fizike se je to kazalo v naslednjih primerih.
  - a) Kandidati so številski rezultat zapisali v obliki ulomka. Taka oblika je neustrezna, dijaki morajo rezultat izračunati in zapisati z desetiško številko, ki je ustrezno zaokrožena. Zapis rezultatov v obliki ulomka je posledica novejših kalkulatorjev, ki imajo možnost takega izpisa rezultata računske operacije, a ta pri fiziki ni primeren. Nekateri te možnosti verjetno ne znajo izklopiti.
  - b) Še vedno se pojavljajo rezultati z napačnimi enotami ali celo brez enot. Za tak odgovor kandidat izgubi točko.
  - c) Nekateri zapišejo rezultat s preveč zanesljivimi mesti. Tudi zaradi te napake se kandidatom odbije točka.

- d) Kandidati morajo rezultat podati v eksplicitni obliki. Pri letošnji maturi je bila glede tega problematična naloga 1.6, kjer so mnogi kandidati podali odgovor v obliki  $\sqrt{t} = \sqrt{8 \text{ min}}$ , namesto da bi čas izračunali in podali v minutah ali sekundah.
- e) V sklopu napačnih zapisov je treba opozoriti tudi na težave pri uporabi ustreznih simbolov in zapisa relativne in absolutne napake (1.2, 1.5).
7. Pogosta napaka je tudi, da kandidati spregledajo, da se naloga nadaljuje na naslednji strani, in je zato ne rešijo do konca (3.8).

### 3.3 Laboratorijske vaje

Razporeditev točk, ki so jih kandidati dobili pri internem delu izpita, je podobna kot pretekla leta. Povprečna ocena se že nekaj let dviguje, pri čemer pa korelacija med interno in eksterno oceno ne sledi temu trendu.



**Slika 3.3.1:** Razporeditev kandidatov po točkah pri internem delu izpita. Upoštevani so kandidati referenčne skupine.

## 4 Mnenje zunanjih ocenjevalcev o nalogah in vprašanjih v izpitnih polah

Zunanji ocenjevalci so sestavo izpitnih pol v veliki večini ocenili kot primerno ali zelo primerno, navodila za ocenjevanje pa kot jasna ali zelo jasna.

V opisnih komentarjih so nekateri navedli, da bi bilo bolje, če bi bili v enačbah dosledno vstavljeni ustrezni podatki in bili navedeni tudi vmesni rezultati. Izraženo je bilo tudi mnenje, da bi bilo dobro zapisati tudi alternativne poti reševanja in natančnejša navodila pri točkovanju kvalitativnih vprašanjih.

## 5 Ugovori na oceno in način izračuna izpitne ocene

Od 1334 kandidatov, ki so v spomladanskem roku pristopili k izpitu splošne mature iz fizike, jih je 70 zaprosilo za vpogled v ocenjevanje svojega izdelka. Na postopek izračuna ocene se ni pritožil nihče, 15 kandidatov pa se je pritožilo na oceno. Njihove izpitne pole je še enkrat pregledal izvedenec, ki je preveril, ali so njihovi izdelki ocenjeni v skladu z navodili za ocenjevanje. Pri 11 kandidatih je spremenil število doseženih točk, kar je pri osmih kandidatih pomenilo spremembo ocene izpita iz fizike. Število ugovorov na oceno je podobno številu ugovorov iz prejšnjih let.

## 6 Za zaključek

Za tiste, ki želijo še več informacij o izvedbi in rezultatih mature, je vsako leto na spletni strani RIC objavljeno tudi obširnejše poročilo DPK SM za fiziko. To poleg vsebinske analize, ki je podana v pričujočem prispevku, vključuje še več statističnih analiz maturitetnega izpita.

# Tabele za samoevalvacijo – orodje za pomoč pri vodenju in ocenjevanju eksperimentalnega dela

dr. Sergej Faletič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

## Izveček

Eksperimentalno delo je ključni element znanosti. V šoli pa je pogosto postavljeno v ozadje. Tipično šolsko laboratorijsko delo je namenjeno uporabi ali preverjanju že usvojenega znanja. Tako delo razvija spretnosti ravnanja z opremo in analize meritev, zanemarja pa kompetence, povezane s samostojnim raziskovalnim delom, kot so načrtovanje poskusov, postavljanje in preizkušanje hipotez. Da bi razvijalo tovrstne kompetence, bi moralo eksperimentalno delo nastopati v vlogi gonilnika novih odkritij, kot se to dogaja v znanosti. Tako delo pa je nujno bolj odprtega tipa, kar pomeni, da ga je težje voditi in tudi vrednotiti. V tem članku predstavljamo tabele za samoevalvacijo, ki so se izkazale za učinkovito orodje pri obeh nalogah: vodenju in vrednotenju eksperimentalnega dela odprtega tipa.

**Ključne besede:** eksperimentalno delo, projektno delo, vodenje, vrednotenje, formativno preverjanje, povratna informacija.

## Self-assessment Rubrics – A Tool Facilitating the Management and Assessment of Experimental Work

### Abstract

While experimental work plays a key role in science, in school, it is often placed in the background. Typical laboratory work is used to verify or apply the previously acquired knowledge. Such work helps develop equipment handling and data analysis skills, but it neglects competences related to autonomous research work, such as planning experiments and generating and testing hypotheses. In order to develop these competences, experimental work would have to be used as the foundation of new discoveries, as it is in science. Such experimental work would have to be more open-ended, which means it would be more challenging to manage and assess. The article introduces self-assessment rubrics that proved to be an efficient tool for managing and assessing open-ended experimental work.

**Keywords:** experimental work, project work, management, assessment, formative assessment, feedback

### Eksperimentalno delo, mogoče najpomembnejši del poučevanja fizike

Z uvedbo splošne šolske obveznosti je znanje celotnega sveta in vseh preteklih časov postalo dostopno široki javnosti, načelno vsem. Za večino je bil najpomembnejši in pogosto edini vir tega znanja učitelj. V 21. stoletju ni več tako. Poplava informacij in dezinformacij s svetovnega spleta je omogočila, da za dostop do informacij učitelj ni več nujno potreben. Njegova vloga je potemtakem naučiti učence (v smislu tistega, ki se uči, pa naj je to osnovnošolec, dijak, študent ali kdorkoli), kako priti od informacij do »znanja«. Še posebej pomemben korak pri tem

je, kako vrednotiti informacije. V luči prebujanja gibanj, ki ne zaupajo znanosti, je bolj kot znanstvena dejstva pomembna zmožnost razumnega kritičnega mišljenja. Če nekdo trdi, da znanost samo sledi nekim avtoritetam, velikim znanstvenikom, kaj bo odgovoril povprečni učenec? Če pomisli, od kod mu znanstveno znanje, in se spomni v glavnem učiteljev in knjig, potem se res zdi, da znanstveno znanje temelji na avtoriteti. Če pa se spomni poskusov, preizkušanja hipotez, njihovega zavračanja in nazadnje sklepanja na podlagi podatkov, potem tako trditev zlahka zavrne. Zato menim, da je dandanašnji epistemologija znanosti izrednega pomena pri poučevanju znanstvenih vsebin. Epistemologija pa se ukvarja z vpra-

šanjem, kako vemo, kar vemo, oz. s kakšnim postopkom, koraki, načinom razmišljanja smo prišli do našega znanja? V današnjem času srečujemo veliko ljudi, ki ne zapajo avtoritetam. Težko pa je človeka prepričati, naj ne zaupa lastnim izkušnjam, kar fiziki zelo dobro vemo, ko se lotimo drugega Newtonovega zakona (kjer ima veliko učencev aristotelsko predstavo) ali kvantne mehanike. In prav v takih primerih lahko učencem pomaga dobro razvita epistemologija znanosti. Kajti če so nas ustrezni postopki, koraki, razmisleki, ki smo jih sprejeli kot epistemologijo znanosti, tj. način, kako v znanosti prihajamo do ugotovitev, pripeljali do nekega zaključka, moramo ta zaključek sprejeti, tudi če se nam ne zdi intuitiven.

Vsa znanost izvira iz opazovanj, poskusov, hipotez in preverjanj. Če je naš cilj razviti epistemološka znanja, potem postane eksperimentalno delo najpomembnejši del pouka. Povprečni učenec bo pozabil specifične zakonitosti, če jih ne bo uporabljal, ampak védenja o tem, kako je do ugotovitev prišel, ne bo pozabil, če ga bo lahko vsak dan uporabil za vrednotenje nasprotujočih si informacij s spleta ali iz drugih virov.

## Zahtevnost vodenja in vrednotenja eksperimentalnega dela

Eksperimentalno delo ne bo imelo zelenega učinka, če bodo učenci izvajali poskuse, ki jih bom za lažje izražanje imenoval *dokazovalni*. To so poskusi, ki so zasnovani, da prikažejo veljavnost neke zakonitosti. Preverjanje v znanosti ne poteka tako, pač pa ravno obratno. Trudimo se ovreči predlagano razlago. Če bi želel dokazati, da je smer hitrosti nekega gibajočega se telesa enaka smeri vsote sil na to telo, kar v splošnem ni res, je dovolj, da izvedem poskus, kjer na mirujoče telo začnem delovati z neko silo, in dokaz je tu. Nasprotno, da zares preverim to hipotezo, moram pomisliti na primere, ko ta predlagana zveza mogoče ne bo veljala. Npr. ko telo na začetku ne miruje in začnem nanj delovati z neko silo v nasprotni smeri hitrosti. V tem primeru, seveda, zveza ne velja, zato iščemo novo zvezo, ki bo veljala v obeh primerih. In tako dalje. Če nam pri vsem trudu ne uspe ovreči neke predlagane zveze, potem jo začasno sprejmemo, dokler je kateri kasnejši poskus morebiti ne ovrže. To je pomembno, ker če je učenec pravilno razumel epistemologijo znanosti,

torej kako v znanosti prihajamo do spoznanj in ugotovitev, potem mora takoj postati pozoren, ko kje prebere, da so s poskusom *dokazovali* veljavnost neke hipoteze.

V šoli srečujemo tudi poskuse, katerih navodila so tako natančna, da so podobna kuharskemu receptu. Tako delo od učenca redko zahteva kaj drugega kot sledenje navodilom. Učenec zato pri njem težko razvija kompetence, povezane z raziskovanjem. Take poskuse bom za lažje izražanje imenoval *poskusi po receptu*.

Da ga ločim od zgoraj navedenih dokazovalnih poskusov in poskusov po receptu, bom projektno delo in druge oblike eksperimentalnih nalog, ki omogočajo tvorbo hipotez, njihovo preverjanje in vrednotenje, imenoval z eno besedno zvezo *eksperimentalno delo*. Tako delo pa je nujno vsaj deloma odprtega tipa. Pojavi se torej vprašanje, kako učinkovito usmerjati delo, ki nima začrtane poti, in kako vrednotiti delo, ki nima predpisanega cilja? Učitelj ne more biti ves čas pri vseh skupinah, in dokler se ukvarja z eno, se mogoče drugi delo zatakne in mora počakati. S tem izgublja dragoceni čas. Na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani izvajamo predmet Projektno delo [1], pri katerem študenti v skupinah rešujejo probleme odprtega tipa, na koncu pa o svojem delu oddajo poročilo v obliki spletne strani. Pri tem predmetu že več let uporabljamo *tabele za samoevalvacijo* (angl. *rubrics*). Te so namenjene predvsem temu, da študentom omogočajo sprotno samoevalvacijo lastnega dela, in so se izkazale kot učinkovit pripomoček za usmerjanje/vodenje študentov pri delu. Drugod jih na različne načine uporabljajo tudi v srednjih šolah, kjer na podoben način s samoevalvacijo pomagajo usmerjati delo dijakov. Lahko pa se uporabljajo tudi za kakovostno vrednotenje dela študentov/dijakov in posredovanje uporabnih povratnih informacij, o čemer bomo spregovorili takoj, ko opišemo, kaj tabele so in kako jih uporabljamo.

## Tabele za samoevalvacijo

V tabelah za samoevalvacijo [2, 3] so zapisane zmožnosti, ki jih želimo pri učencih razvijati, ter opisi, kaj pričakujemo, da je učenec sposoben narediti, če je posamezna zmožnost ustrezno razvita. Vsaka posamezna tabela za samoevalvacijo vsebuje več vrstic. Primer vrstice v tabeli je v tabeli 1.

**Tabela 1:** Primer vrstice v tabelah za samoevalvacijo.

	Zmožnost	0 – manjka, ni	1 – ni ustrezno	2 – potrebno izboljšati	3 – ustrezno
D4	Sposobni so zbrati podatke/meritve in jih predstaviti na smiseln način.	Podatkov ni ali pa so nerazumljivi.	Nekateri pomembni podatki manjkajo. Podatki niso predstavljeni s tabelami in grafi ali pa so le-ti nepravilno/pomanjkljivo označeni.	Vsi pomembni podatki so zbrani, toda predstavljeni so tako, da jih je težko razumeti. Nekatero oznake na tabelah in grafih so nesmiselne ali nerazumljive. Glavne ugotovitve niso izpostavljene.	Vsi pomembni podatki so zbrani, urejeni in jasno predstavljeni. Tabele in grafi so pravilno označeni ter predstavljeni v logičnem zaporedju. Glavne ugotovitve so jasno izpostavljene.



Vrstica tabele je sestavljena tako: na levi, običajno v prvem stolpcu, je opis zmožnosti, na katero se vrstica nanaša. Naslednji štirje stolpci predstavljajo štiri stopnje doseganja te zmožnosti. V celici v ustreznih stolpcih so opisi tega, kar naj bi učenec prikazal, da lahko sklepamo, da dosega dotično stopnjo. Recimo temu kriterij. Večinoma so navedene aktivnosti, ki naj bi jih učenec izvedel med dejavnostjo ali naj bi bile razvidne iz izdelka (poročila).

Stopnja z oznako »manjka« predstavlja stanje, ko zmožnost ni prikazana. To pomeni, da pri delu ali v izdelku ni zaslediti, da bi učenec to zmožnost kjerkoli uporabil. Aktivnosti, povezanih s to zmožnostjo, učenec ni izvedel, iz česar lahko sklepamo, da ne ve, da bi moral te aktivnosti izvesti.

Stopnja z oznako »ni ustrezno« predstavlja stanje, ko iz aktivnosti/izdelka izhaja, da učenec nima ustrezno razvite opisane zmožnosti. Aktivnosti, povezane s to zmožnostjo, je učenec izvajal, a na nepravilen način. Iz tega lahko sklepamo, da učenec ve, da bi moral narediti nekaj, povezano z opisano zmožnostjo, ne pa tudi, kaj točno bi moral narediti. V primeru vrstice v tabeli 1 ve, da mora zbrati podatke in jih predstaviti, ne pa tudi, katere podatke bi moral zbrati in kateri bi bili ustrezni načini za predstavitev teh podatkov. Zbere npr. podatke, ki so zunaj področja, ki je zanimivo za poskus, zbere podatke, ki za poskus niso pomembni, podatke predstavi npr. s tabelo namesto z grafom ipd.

Stopnja z oznako »potrebno izboljšati« pomeni, da je pri delu/v izdelku prikazano, da učenec še razvija opisano zmožnost. Aktivnosti, povezane s to zmožnostjo, je učenec izvajal, a so v izvedbi pomanjkljivosti. Iz dela/izdelka lahko sklepamo, da učenec ve, kaj je treba storiti v zvezi z opisano zmožnostjo, ne pa tudi natančno, kako to pravilno narediti. V primeru vrstice v tabeli 1 ve, katere podatke zbrati in na kakšen način jih prikazati, ne zna pa tega ustrezno narediti: npr. zbere podatke premalo na gosto, jih prikaže brez eksperimentalnih nedoločenosti/negotovosti meritve, ne označi osi na grafih. (V tabelah je izraz »eksperimentalna nedoločenost« uporabljen kot sinonim za »negotovost meritve«, načrtno pa se tabele v angleščini in slovenščini izogibajo izrazu »napaka« z namenom poudariti, da nedoločenosti/negotovosti niso posledica *napak* izvajalca ali merilnika, pač pa inherentna lastnost vsake meritve s končno natančnostjo v realnem svetu.)

Stopnja z oznako »ustrezno« predstavlja stanje, ko je iz aktivnosti/izdelka razvidno, da ima učenec opisano zmožnost ustrezno razvito. To pomeni, da ve, da je treba izvesti opisane aktivnosti, kaj točno je treba narediti in tudi kako to narediti. To ne pomeni, da ni prostora za izboljšave. Stopnja predstavlja le stanje, ko smo kot učitelji s prikazano zmožnostjo zadovoljni in se nam nadaljnje razvijanje te zmožnosti ne zdi nujno.

Najpomembnejši je zadnji stolpec, v katerem so zapisani kriteriji za oceno »ustrezno«. Ti vodijo učence pri delu.

Zapisani so konkretno v smislu tega, kaj je treba narediti, vendar splošno v smislu, da niso vezani na posamezno nalogo. Stolpca »ni ustrezno« in »potrebno izboljšave« vsebujeta pokazatelje na podlagi katerih lahko sklepamo, da je bila opisana stopnja dosežena. Vsebujeta tudi opise konkretnih pomanjkljivosti, ki jih opazimo pri učencih, ki dosežejo opisano stopnjo. Pokazatelji so spet zapisani kolikor je mogoče konkretno, a hkrati dovolj splošno, da niso vezani na posamezno nalogo. Ta stolpca sta namenjena temu, da učencem posredujeta informacije, kaj bi utegnili biti narobe in kaj morajo še popraviti. Zato je pomembno, da vsebujeta dovolj informacij za vodenje učencev. V primeru v tabeli 1 npr. tabela v stolpcu »potrebno izboljšati« učence opozori na pravilno in skladno označevanje tabel in grafov. V izrazu »nerazumljive« sta skriti tudi možnosti, da so oznake premajhne, grafi skopirani v ločljivosti, kjer so črke tako motne, da se jih ne da prebrati, ali zapisane v angleškem jeziku. Opisi v stolpcu »ni ustrezno« v tabeli 1 učence opozorijo na to, da mogoče podatkov niso predstavili z grafom ali s tabelo, da mogoče ti ne vsebujejo oznak količin, enot. Stolpec »ustrezno« v tabeli 1 opozori učence še na to, da je treba grafe in tabele predstaviti v logičnem zaporedju in izpostaviti ugotovitve, ki se nanašajo na grafe. Čeprav preostali stolpci ne vsebujejo opisa, da to ni narejeno, je očitno, da je pomanjkanje tega lahko razlog, da učenec ni dobil ocene »ustrezno«.

## Vrste poskusov

Tabele za samoevalvacijo, ki jih uporabljamo, so bile razvite na Univerzi Rutgers v ZDA [3], tabelo za samoevalvacijo poročila v obliki spletne strani pa smo razvili dodatno. Originalne tabele so na Univerzi Rutgers najprej razvili za potrebe načina poučevanja, imenovanega ISLE [4] (angl. *Investigative Science Learning Environment* – »učno okolje, ki posnema znanstveno raziskovanje«), kasneje pa so posplošili idejo tudi na druge aktivnosti. Osnova učnega pristopa ISLE je posnemanje načina razmišljanja, kot ga pri svojem delu uporabljajo znanstveniki, sklada pa se tudi s tem, kar danes vemo o naravnem delovanju možganov pri učenju [5]. V okviru ISLE poskuse ločimo na tri vrste: opazovalne, testne in aplikativne. Opazovalni poskusi so namenjeni generiranju hipotez, razlag. Običajno se uporabijo pri uvajanju nove snovi, saj je njihov namen, da učenci prepoznajo značilne vzorce ali zveze med količinami in (kjer je mogoče) predlagajo razlage za opažene pojave. V naslednjem koraku predlagajo testne poskuse, katerih namen je ovreči predlagane razlage. Pri tem je pomembno, da napovejo izide poskusov na podlagi predlaganih razlag, še preden se poskusi izvedejo. Če katere od razlag ne uspemo zavreči, se stopnja zaupanja v to razlago utemeljeno poveča in jo sprejmemo kot trenutno najboljšo razlago. Pogosto je to tista, ki velja za »pravilno«. Pozorni pa bodimo, da v znanosti »pravilna razlaga« pomeni »tista, ki še ni bila ovržena, kljub večkratnemu testiranju«. Aplikativni poskusi so namenjeni uporabi že usvojenega

znanja za reševanje praktičnih problemov. Tipične naloge aplikativnega tipa so izmeriti neko količino na več načinov.

Poskus, na katerega je vezano eksperimentalno delo, je lahko kateregakoli od teh tipov. Tipični, dokazovalni poskusi, katerih namen je pokazati nekaj, kar smo že teoretično obravnavali, in poskusi po receptu ne spadajo v nobeno od teh skupin in niso primerni za eksperimentalno delo, ki naj razvija zmožnosti učencev za raziskovalno delo in njihov vtis o izvoru znanstvenega znanja (epistemologiji znanosti).

Dobro zasnovan opazovalni poskus naj bi obravnaval novo snov, saj naj bi učenci šele predlagali različne razlage za opaženi pojav. Ta ima pomembno vlogo pri pouku. Včasih pa ga je težko izvesti kot eksperimentalno delo, bodisi zaradi neuskkljenosti terminov laboratorijskih vaj s snovjo ali pa zaradi pomanjkanja opreme za več inačič istega poskusa.

Dobro zasnovan testni poskus ima namen ločiti med različnimi predlaganimi razlagami za nek pojav. Te razlage lahko ponudi tudi učitelj. Lahko so razlage, ki so jih znanstveniki predlagali v preteklosti, ali pa razlage, ki so jih predlagali drugi razredi za isti pojav. Paziti moramo tudi na to, kako zastavimo vprašanje. Poudarimo, da je namen testnega poskusa razlikovanje med hipotezami ali preverjanje hipoteze z namenom, da jo ovržemo. Izrednega pomena je tudi, da učenci najprej na podlagi hipotez in predlaganega poskusa podajo napovedi izida poskusa. To so izjave, kakšen izid pričakujemo, če drži prva hipoteza, kakšnega, če drži druga itd. Šele to omogoča učencem, da jasno primerjajo izid z napovedmi in na podlagi primerjave ovrednotijo posamezno hipotezo. Tako učenci ob uporabi že usvojenega znanja vadijo tudi hipotetično-deduktivno razmišljanje.

Naloge aplikativnega tipa je najenostavneje pripraviti, saj se izvajajo, ko učenci že imajo ustrezno znanje. Pri teh nalogah je ključno, da se primerjajo rezultati dveh neodvisnih postopkov. Če je le mogoče, želimo, da sta oba postopka eksperimentalna. Izogniti se želimo primerjavi z vrednostjo iz literature, saj lahko da napačen vtis o tem, kako v znanosti pridemo do znanja. Učenec lahko dobi vtis, da je merjenje nepotrebno, ker je količina že izmerjena, in/ali da obstaja vedno nekje avtoriteta, ki ima pravi odgovor.

Na Univerzi Rutgers so za vsak tip poskusa razvili svojo tabelo, posebej pa še splošnejše tabele za analizo podatkov in predstavitev rezultatov. Mi smo prevedli štiri od teh tabel: po eno za vsako od vrst poskusov ter tabelo za analizo podatkov. Za podajanje rezultatov smo razvili novo tabelo na podlagi tiste z Univerze Rutgers, saj imajo naša poročila nekaj posebnosti, ki smo jih želeli vključiti. Naše tabele so prosto dostopne na povezavi [2].

## Uporaba tabel na primeru

Izmed treh vrst poskusov sem izbral aplikativnega, ki je v šoli, po mojih izkušnjah, najpogostejši. Učitelji v Sloveniji, ZDA in Belgiji, ki uporabljajo tabele neposredno pri laboratorijskem delu v šoli, so ugotovili, da se je pri posamezni vaji najbolje osredotočiti le na nekaj vrstic. To ne pomeni, da učenci ostalih vrstic ne vidijo, le da jih pri konkretni nalogi ne vrednotimo. V primeru obsežnejšega odprtega projekta pa se hkrati uporabljajo in vrednotijo vse tabele.

V našem primeru se bomo torej osredotočili le na nekaj vrstic, da prikažemo način uporabe tabel tako za vodenje kot tudi za vrednotenje eksperimentalnega dela.

**Tabela 2:** Dve izmed vrstic v tabeli za zmožnost zasnovati in izvesti aplikativni poskus.

	Zmožnost	0 – manjka, ni	1 – ni ustrezno	2 – potrebno izboljšati	3 – ustrezno
C6	Sposobni so izbrati primeren matematični model za reševanje naloge.	Matematični model manjka ali pa zapisane enačbe nimajo zveze z nalogo.	Izbrani matematični model je napačen ali pomanjkljiv (npr. neujemanje enot) do te mere, da so rešitve neuporabne/napačne.	Izbrani matematični model je pravilen in popoln. Celoten matematični postopek je opisan, vendar je v računu napaka. Enote se ujemajo. Ne razmišljajo o smiselnosti končnega rezultata.	Izbrani matematični model je pravilen in popoln. Vse količine so izračunane pravilno s pravilnimi enotami. Celoten matematični postopek je brez napak in jasno predstavljen. Razmišljajo o smiselnosti končnega rezultata.
C2	Sposobni so zasnovati primeren poskus (meritev) in načrtovati izvedbo, s katero bo mogoče rešiti zastavljeno nalogo.	Poskus ni primeren za reševanje zastavljene naloge.	Poskus je primeren za rešitev naloge, toda narava izvedbe poskusa je takšna, da bodo izidi/podatki najverjetneje neuporabni za reševanje naloge.	Poskus je primeren za rešitev naloge, toda narava izvedbe poskusa je takšna, da izidi/podatki morda ne bodo vodili do uporabne rešitve naloge.	Poskus je primeren za rešitev naloge. Načrtovana izvedba bo z veliko gotovostjo dala izide/podatke, na podlagi katerih bo mogoče uspešno rešiti nalogo.

Predstavljajmo si, da smo učencem dali nalogo določiti hitrost valovanja na vrvi. Poleg besedila naloge imajo na voljo vse tabele, ki so na povezavi [2]. V njih so vrstice, ki se nanašajo na vsako fazo poskusa. Od zasnove prek meritve in analize do predstavitve rezultatov. Ustavimo se pri dveh pomembnih vrsticah, ki sta prikazani v tabeli 2.

Vrstici v tabeli 2 spomnita učenca na dvoje: treba je zasnovati poskus, ki bo zanesljivo dal rezultat, in treba je poiskati matematični model, ki opisuje dogajanje pri tem poskusu. Matematični model bo omogočil izračun pričakovane vrednosti in opozoril učence na to, katere količine je treba meriti, da se lahko naredi izračun. Tako, na primer, morajo učenci pomisliti, kako bodo merili silo in dolžinsko gostoto vrvi, če želijo izračunati hitrost valovanja na vrvi. Denimo, da učenci zasnujejo poskus, kjer merijo čas preleta motnje. Stolpec »potrebno izboljšati« v vrstici C2 v tabeli 2 opozori na to, da je treba poskrbeti, da bodo rezultati uporabni. Če je vrv tako napeta, da je dolžina motnje primerljiva z dolžino vrvi, bo težko natančno določiti čas preleta. Mogoče v takem primeru, če sile ne moremo spreminjati, merjenje časa preleta pač ni dober način za rešitev naloge. Spomni jih še na zanesljivost merjenja: kako bodo prožili in ustavili štoparico? Bodo mogoče raje posneli filmček? S koliko slikami na sekundo?

Denimo, da je po vseh teh razmislekih učencem uspelo narediti poskus s preletom motnje. Ustrezen matematičen model je  $c = (F/(m/l))^{1/2}$ , kjer je  $F$  napenjalna sila,  $(m/l)$  dolžinska gostota vrvi in  $c$  hitrost valovanja.

Ko učenec odda poročilo, dobi povratno informacijo v obliki ocen v vrsticah. Iz njih lahko sklepa, kaj je treba izboljšati. Če učenec dobi v vrstici C6 (tabela 2) oceno »ni ustrezno«, si pomaga tako, da najprej pogleda v ustrezen stolpec. V njem so zapisane pogoste pomanjkljivosti. Mogoče je izbral napačen model. Mogoče pa je tudi, da ni dosegel kriterija za oceno »potrebno izboljšati« ali »ustrezno«. Zato mora pogledati tudi ta dva stolpca. V »potrebno izboljšati« npr. piše, da je celoten matematični postopek opisan. Če ni, očitno ne dosega tega kriterija. Torej je to tudi možni razlog, zakaj je dobil oceno »ni ustrezno«.

Kako si lahko s tem pomaga? Možnosti je več. Lahko je pozornejši pri naslednji nalogi. Tako delajo npr. na Univerzi Rutgers. Vsako nalogo izvedejo študentje enkrat, ampak pri vsaki naslednji nalogi se njihove ocene v tabelah v splošnem izboljšujejo [6]. Lahko pa učitelj da učencu možnost, da poročilo popravi enkrat ali večkrat in ga ponovno odda [1, 7]. Tako se nekaj nauči že pri isti nalogi. To je priporočljivo, če je nalog v letu malo.

Naslednja pomembna vrstica je prikazana v tabeli 3.

Vrstica C5 (tabela 3) opozori učenca na to, da je treba rezultat preveriti z neodvisno metodo. Stolpec »ustrezno« da še dodatna navodila, da je treba upoštevati merske nedoločenosti, ki jih je potemtakem treba tudi oceniti na smiseln način. Tudi za to obstaja vrstica v tabelah, za katero pa ni nujno, da jo uporabimo pri tem poskusu. Neodvisni način je pogosto nov, drugačen poskus. V našem primeru bi lahko uporabili stoječe valovanje. Ker je to drugi aplikativni poskus, si lahko tudi pri njem pomagamo s tabelami. Torej učenca vrstica C6 (tabela 2) spomni, da je treba tudi pri tem poskusu najti ustrezen matematični model, ki je v tem primeru  $c = 2v_n L/n$ , kjer je  $L$  dolžina vrvi,  $v_n$  frekvenca vzbujanja v  $n$ -tem nihajnem načinu in  $c$  hitrost valovanja. Neodvisni način je lahko tudi izračun iz modela, kjer merske nedoločenosti izvirajo iz merskih nedoločenosti nastopajočih količin: sile in dolžinske gostote. V tem primeru je treba biti pozoren tudi na to, da je model zelo verjetno narejen ob nekih predpostavkah, npr. približek majhnih odmikov, približek idealno elastične vrvi itd. Te predpostavke lahko vplivajo na veljavnost modela in jih je treba preveriti in upoštevati pri primerjavi rezultata z rezultatom meritve. Tudi za to obstaja vrstica v tabelah, ki se ji tokrat ne bomo posvetili. Vrstica C5 (tabela 3) učenca opozori še, da je treba razpravljati o ujemanju/neujemanju obeh rezultatov in o morebitnih razlogih za razlike.

Denimo, da se zgodi, da je učenec spremenil napenjalno silo vrvi med prvim in drugim poskusom. To bi se pri ocenjevanju poznalo v vrstici C2 za drugi poskus. Ta poskus je imel namen izmeriti hitrost valovanja, ki naj bi se predvidoma ujemala s tisto pri prvem poskusu. Če pri poskusu ni poskrbljeno, da so relevantni parametri

**Tabela 3:** Vrstica iz tabele za aplikativni poskus.

	Zmožnost	0 – manjka, ni	1 – ni ustrezno	2 – potrebno izboljšati	3 – ustrezno
C5	Sposobni so zasnovati nov, neodvisen poskus, s katerim ovrednotijo rezultate prvega poskusa.	Ne zasnujejo neodvisnega poskusa, s katerim bi lahko ovrednotili rezultate, ali pa je »novi« poskus le ponovitev/izvedba prvega.	Zasnujejo nov neodvisni poskus, s katerim poskušajo ovrednotiti rezultate, vendar ni razprave o razlikah med rezultati ali pa je ta zelo skopa.	Zasnujejo nov neodvisni poskus, s katerim ovrednotijo rezultate. Smiselno primerjajo rezultate dveh poskusov, tako da upoštevajo merske nedoločenosti. Razprava o možnih vzrokih za razlike med dobljenima rezultatoma manjka ali pa je pomanjkljiva.	Zasnujejo nov neodvisni poskus, s katerim ovrednotijo rezultate. Smiselno primerjajo rezultate dveh poskusov, tako da upoštevajo merske nedoločenosti. Razpravljajo o možnih vzrokih za razlike med dobljenima rezultatoma.

enaki, poskus ni ustrezen in bi v vrstici C2 dobil oceno »ni ustrežno«.

Pri različnih aplikativnih poskusih pridejo do izraza različne zmožnosti. Zato učitelji, ki uporabljajo tabele, običajno izberejo le nekatere vrstice pri posameznem poskusu. Tiste, ki opisujejo zmožnosti, ki so za tisti poskus najpomembnejše ali pridejo najbolj do izraza.

## Ocenjevanje s tabelami

Tabele za samoevalvacijo so, kot ime pove, prvenstveno namenjene samoevalvaciji. Lahko tudi evalvaciji s strani učitelja, niso pa namenjene ocenjevanju. Kljub temu se mi zdi pošteno omeniti, da se lahko uporabljajo tudi za ocenjevanje, če bi tako želeli. V tem primeru so običajno potrebne prilagoditve, ki so predvsem posledica tega, da vse zmožnosti običajno niso enako pomembne, zato jih želimo različno obtežiti. To lahko naredimo preprosto tako, da končne vrednosti množimo z izbranimi utežmi. Nazadnje je treba to narediti tako, da končna ocena ustreza dejanskim prikazanim zmožnostim učenca. To je iterativen proces, ki bo sčasoma konvergiralo k ustreznemu pretvarjanju nivojev v oceno. Poudarjam pa, da so tabele namenjene predvsem kakovostni povratni informaciji učencu s čim manjšo časovno zahtevnostjo za učitelja, ne ocenjevanju.

## Izkušnje s tabelami

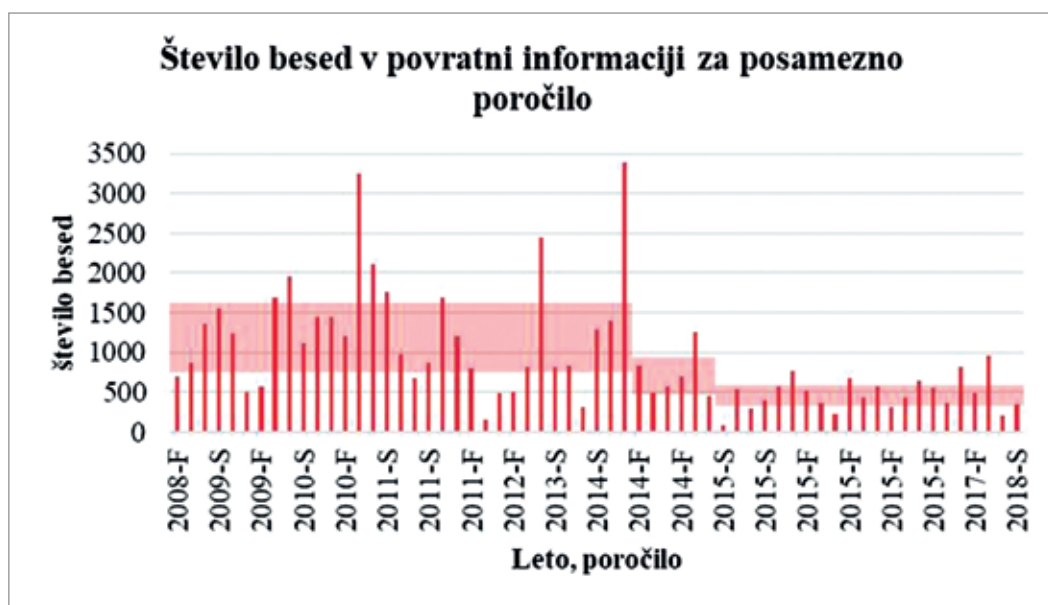
Na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani pri predmetu Projektno delo [1] uporabljamo tabe-

le za samoevalvacijo od leta 2015. Takrat smo obsežno povratno informacijo na poročilo študentov, ki je bila v obliki komentarjev, zamenjali skoraj samo z ocenami v tabelah. Od takrat se je število besed v naši povratni informaciji zmanjšalo približno na tretjino (slika 1); na šestino, če bi gledali samo komentarje na prvo oddajo poročila. Toliko manj časa tudi vzame pisanje te povratne informacije. V ta čas, seveda, ni všteti čas za branje poročila, ki je določen s hitrostjo branja učitelja. Kljub krajšemu času za zapis povratne informacije se je kakovost sprejetih poročil povečala. To smo ugotovili tako, da smo po tabelah ocenili poročila, ki so bila sprejeta pred uvedbo tabel, in ugotovili, da večini ne dosegajo trenutnega standarda za sprejetje.

Tabele sta preizkusila kolega Jože Pernar na Gimnaziji Krško [8] in Peter Šlajpah na Gimnaziji Želimlje [9]. Dijakom so dali tabele in se o njih pogovorili. Odziv dijakov je bil večinoma pozitiven, predvsem so kot pozitivne izpostavili jasne in znane kriterije za doseganje zelenega rezultata. Tudi učitelji, ki svoje izkušnje delijo na medmrežju, svetujejo, da se o tabelah z učenci pogovorimo, jih pojasnimo in včasih celo skupaj z njimi kaj spremenimo, kajti zgodi se, da kriteriji niso jasno zapisani.

## Zaključek

Tabele za samoevalvacijo so učinkovito orodje za vodenje in vrednotenje nalog odprtega tipa, kot so projektne naloge, laboratorijske vaje, eseji, odprta vprašanja, nastopi. Tu smo se posvetili le nekaj vrsticam na primeru



**Slika 1:** Slika prikazuje število besed v vseh povratnih informacijah za vsako poročilo. Zasenčeni del predstavlja področje, za katero velja, da je 50 % vseh povratnih informacij imelo število besed znotraj tega področja. Šest poročil med 2014-F in 2015-S spada v prehodno obdobje, ko smo študentom dali le nekatere od vrstic. Kljub temu da je bilo vrstic manj, je bilo besed v povratni informaciji več, saj tabele niso zajele vseh vidikov poročila in so zato bili potrebni dodatni komentarji.

eksperimentalnega dela, ki je v šoli pogosto. Če se odločimo za bolj odprto in obsežnejše projektno delo, lahko uporabimo vse tabele, saj tako delo običajno zajema vsaj opazovalni in testni poskus, poleg stroge analize podatkov in jasnega in popolnega poročila.

Na medmrežju je veliko različnih tabel za samoevalvacijo za veliko različnih namenov [10]. Nekatere so oseb-

ne tabele, ki so jih ustvarili učitelji, nekatere, npr. tiste z Univerze Rutgers, pa so raziskovalno podprte, validirane. Zato smo se tudi odločili zanje, saj smo tako dobili izhodišče, za katero vemo, da je empirično temeljito preverjeno. Vsak učitelj pa lahko tabele prilagodi svojim potrebam: kaj doda in kaj odvzame. Tabele so iterativno orodje, ki se z vsako uporabo izboljšuje.

## Literatura

- [1] Planinšič, G. (2007). Project laboratory for first-year students, *European Journal of Physics*, 28 (3)
- [2] UL FMF, Projektno delo, začetna stran, <http://projlab.fmf.uni-lj.si/> [dostop 17. 3. 2018]
- [3] Univerza Rutgers, tabele za samoocenjevanje, <https://sites.google.com/site/scientificabilities/rubrics> [dostop 1. 12. 2017]
- [4] Etkina, E., Van Heuvelen, A., White-Brahmia, S., Brookes, D. T., Gentile, M., Murthy, S., Rosengrant, D. in Warren, A. (2006). Scientific abilities and their assessment, *Physical Review Special Topics, Physics Education Research*, 2, 020103-1 – 020103-15.
- [5] Zull, J. E. (2002). *The art of changing the brain*, Stylus Pub., LLC.
- [6] Etkina, E., Karelina, A., Ruibal-Villasenor, M. (2008). How long does it take? A study of student acquisition of scientific abilities, *Physical Review Special Topics, Physics Education Research*, 4, 020108.
- [7] Faletič, S., Etkina, E., Planinšič, G. (2016). Self-assessment rubrics as a tool to help students and teaching assistants = Tabele za samoocenjevanje kot orodje v pomoč študentom in asistentom. V: Aškerc Veniger, K. (ur.), idr. *Izboljševanje kakovosti poučevanja in učenja v visokošolskem izobraževanju: od teorije k praksi, od prakse k teoriji* = Improving the quality of teaching and learning in higher education: from theory to practice, from practice to theory. Ljubljana: Center RS za mobilnost in evropske programe izobraževanja in usposabljanja. Str. 224–231.
- [8] <http://sss.fmf.uni-lj.si/index.php?mode=4&id=287> [dostop 11. 4. 2019]
- [9] <http://sss.fmf.uni-lj.si/index.php?mode=4&id=299> [dostop 11. 4. 2019]
- [10] Množica tabel je npr. na povezavi <https://www.uwstout.edu/academics/online-distance-education/online-professional-development/educational-resources-rubrics/creating-and-using-rubrics-assessment> [dostop 3. 4. 2019]

# Vetrovnik – raziskovalno delo

mag. Jože Pernar  
Gimnazija Krško

## Povzetek

Skupina dijakov na tehniški gimnaziji se je odločila uresničiti svojo idejo o izdelavi vetrovnika. Od ideje do učnega pripomočka ni minilo veliko časa, pridobljenega pa je bilo veliko znanja. Pričujoči prispevek predstavlja nekaj primerov vaj in predvsem raziskovalnih idej, ki so spremljale izdelavo naprave ali pa so bile posledica raziskovalnega učenja. Zagotovo ne gre za klasične vaje. Poglobljeno delo z vetrovnikom nudi marsikatero možnost učenja na zelo avtentičen način, ki se na trenutke približa tudi znanstvenim metodam. Tako se v prispevku bralec sreča z osnovnimi principi učinka zračnega upora na različnih telesih pa tudi s projektnimi deli izdelave izvernih modelov. Krajši opisi so povezani s spletnimi vsebinami, ki omogočajo poglobljen vpogled v eksperimentalno-raziskovalno delo.

**Ključne besede:** vetrovnik, upor, sile, raziskovalno delo, eksperimentalne vaje, tehniška gimnazija

## Wind Tunnel – Research Work

### Abstract

A group of technical gymnasium students decided to realise their idea of creating a wind tunnel. The path from the idea to making this learning tool did not take much time, but the students gained a great deal of knowledge. The article introduces a few exercises and research ideas that were part of the creation of the wind tunnel and a result of the learning through research. These exercises are definitely not of a traditional type – a more in-depth work with the wind tunnel opened up many new learning opportunities in a very authentic way that comes close, in certain aspects, to scientific methods. The article thus describes the basic principles of air resistance on various bodies, from project works to original models. Shorter descriptions refer to online contents for more insight into experimental and research work.

**Keywords:** wind tunnel, air resistance, forces, research work, experimental exercises, technical gymnasium



Slika 1: Vetrovnik.

### Uvod

Delati v okolju, kjer dijake vsebine zanimajo, je danes lahko velik privilegij. Avtomobilizem in letalstvo zanimata večino dijakov tehniških usmeritev. Prav tehniška gimnazija je lahko priložnost za inženirske metode v fiziki. Zelo tesne in konkretne korelacije fizike in tehnike lahko pri dijakih sprožijo način razmišljanja, ki združuje

je klasično eksperimentalno delo pri fiziki in na področju strojništva, ki si ga izberejo kot izbirni predmet.

Ob raziskovalnem delu in različnih poskusih so nastajale eksperimentalne vaje, ki se zdaj izvajajo pri rednih vajah pa tudi pri pripravah na maturo.



Slika 2: Delovni listi eksperimentalnih vaj so objavljeni na: [lab-vetrovnik.si](http://lab-vetrovnik.si) [14].

Povezave na vaje omogočajo izvedbo ali zgolj poglobljen vpogled v obliko in način izvedbe vaj. V nadaljevanju so v skladu z razvojem naprave in omenjenim gradivom

predstavljene izbrane eksperimentalno-raziskovalne aktivnosti. Od osnovnega določanja karakteristik pogonskega sklopa, didaktičnega pristopa načina merjenja, klasičnih merjenj tipičnih oblik teles prek kvalitativnega opazovanja zračnih tokovnic, upora na modelih vozil, vzgona na letalska krila do primerov projektne dela tako v razredu kot v mednarodnem okolju.

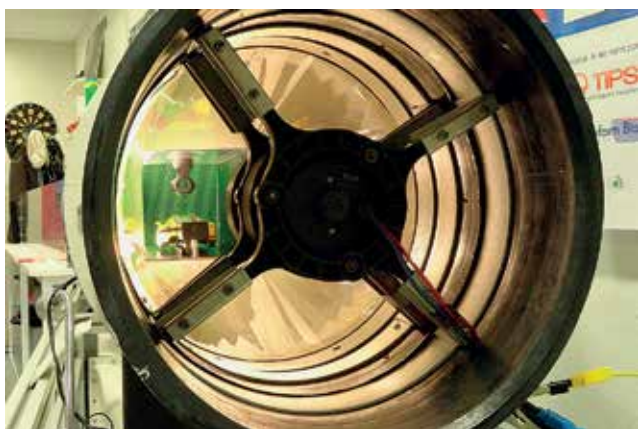
### Osnovna merjenja pogona

Prva fizikalna merjenja spadajo bolj v čas izgradnje [1] primarnega dela vetrovnika. Določanje pogojev ter izbira primerne pogona (slika 3) je bila ena ključnih nalog za uspešno delovanje naprave. Med nekaj pogonskimi sklopi se je bilo treba odločiti za najprimernejšega [2]. Upoštevati je bilo treba več kriterijev. Od teh so odvisna tudi nekatera merjenja, ki so pogoj za razumevanje in izračune v današnjih eksperimentalnih vajah.

Diagram 1 prikazuje razmerje hitrosti zraka skozi merilno komoro v odvisnosti od napetosti pogona in posledične sile na model.



Slika 3: Dimenzioniranje pogona.



Slika 4: Pogonski sklop, anemometer ter satovje v ozadju.

Diagram odvisnosti  $U(v)$  [V(m/s)] deluje dokaj stabilno. Karakteristika se je nekoliko spremenila z izbiro daljšega satovja, dodatnega pogona in cirkularnega toka (zaprti sistem).

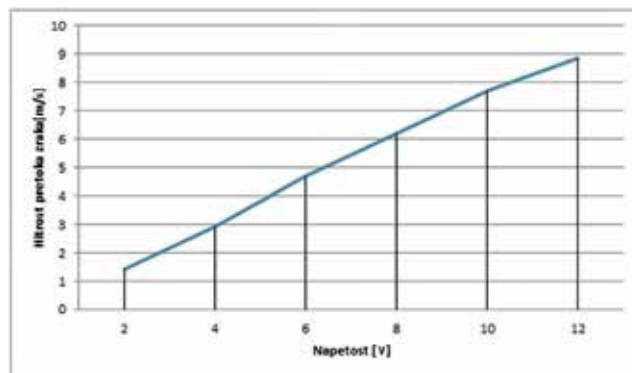
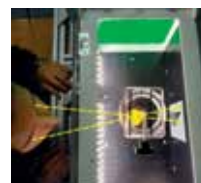


Diagram 1: Odvisnost hitrosti vetrovnika od gonilne napetost pogona ( $U(v)$ ).

Hitrost zraka je bila merjena z elektronskim anemometrom (slika 4) in Pitot-Prandtlovo cevjo. Primerjalna merjenja so bila opravljena tudi z nitnim nihalom (slika 5). Pri slednjem se je pojavila zelo avtentična situacija paralaktične napake [3] (slika 6). Iz te »težave« se je razvila eksperimentalna vaja, pri kateri dijaki zelo neposredno uvidijo, kako pride do velike merske napake ob napačnem odčitku vrednosti.



Slika 5: Merjenje hitrosti zraka z nihalom.



Slika 6: Napaka pri merjenju kota.



Slika 7: Pravilna lega odčitavanja kota odmika nihala.

Ti osnovni podatki in količine omogočajo izračune mase in prostorninskega pretoka, vpeljavo kontinuitetne enačbe oziroma uporabo Bernoullijeve enačbe. Pri tem odigra pomembno vlogo možnost spreminjanja moči pogona. Ta omogoča tudi izredno majhne pretoke pri nizkih hitrostih. V projektu »Vetrnica 2017« [4] se je ta lastnost vetrovnika pokazala kot odlična karakteristika. Timsko raziskovanje in izdelava vetrnic sta se pri najnižjih pogojih »vetra« sprevrgla v pravo raziskovalno tekmovanje.



Slika 8: Klasična radialna vetrnica.



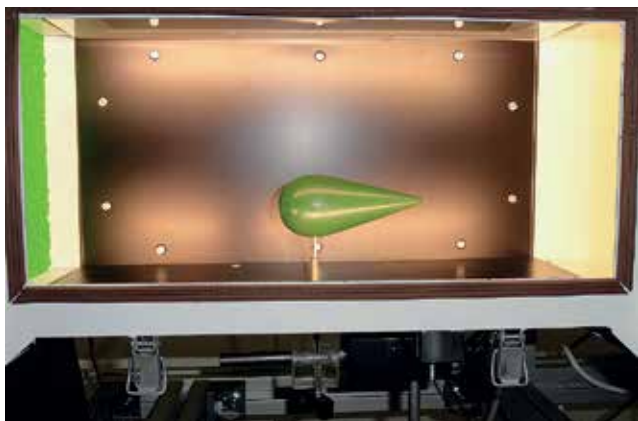
Slika 9: Vetrnica z aksialno osjo gibanja.

Že zelo majhni detajli in spremembe pri obliki papirnatih vetrnic so se v merilni komori izkazali kot občutni dejavniki za večjo učinkovitost izkoristka zračnega toka v vetrovniku.

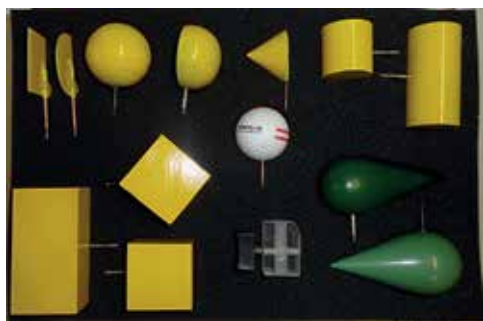
### Fizikalni modeli z enakim presekom

Sila upora na določene oblike teles je tipična naloga iz nabora aktivnosti v vetrovnikih. Izdelava različnih modelov (slika 11) je predstavljala poseben rokodelski izziv. Merjenja pa so pokazala zelo dobre rezultate [3]. Dijaki lahko opravljajo standardno nalogo, v kateri ugotovljajo razliko v koeficientih zračnega upora.

$$F_u = 1/2 C_u \rho S v^2$$



Slika 10: Telo z najmanjšim uporom.



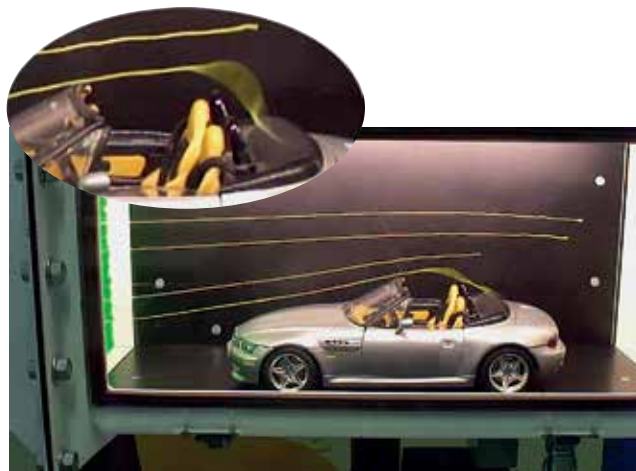
Slika 11: Modeli osnovnih oblik.

Izhodišče vseh teles – modelov je enako preseku  $S$ . Takšno izhodišče omogoča izvedbo ter vse izračune tudi za nižje letnike in programe srednjega poklicnega izobraževanja. Naloga zahteva predhodno napoved, razumevanje in interpretacijo izmerkov ter kasnejšo primerjavo rezultatov. Primerjava rezultatov se izvede med skupinami izvajalcev vaje ter z referenčnimi podatki koeficientov v literaturi.

### Laminarni tok – video analiza

Ena najpopularnejših meritev v vetrovnikih je opazovanje zračnih tokovnic. V resnici ne gre za neposredno fizikalno merjenje, temveč za vizualno opazovanje dimnih, megličnih ali celo mehurčnih tokovnic, ki obteka-

jo model (slika 12). Video raziskava poleg kvalitativne analize omogoča tudi kvantitativne rezultate [5]. Predvsem zaradi zdravstvenih razlogov pri delu ni bil uporabljen nobeden od naštetih medijev. Vredno je opozoriti na novejša podatke kemijske analize nekaterih snovi, iz katerih se proizvaja megla ali dim. Svilene niti kljub svoji masi ponudijo zanimive rezultate in dobro pokažejo podrobnosti turbulentnih tokov.



Slika 12: Detajl vrtničastih tokov svilenih niti na modelu kabrioleta.

Z enako metodo je mogoče zelo uspešno opazovati tudi pojave zračnih tokovnic pri različnih nagibih modela letalskega krila.

### Upor na modelih vozil

Sloviti Enzo Ferrari je rekel: »Aerodinamika je za ljudi, ki ne znajo in ne zmorejo razviti motornega vozila.« A od takrat je minilo dovolj časa, da je danes vsakemu srednješolcu jasno, kako pomembna je oblika, da ima vozilo čim manjšo silo zračnega upora in s tem doseže tem manjšo porabo goriva. Ponovno eno od merjenj (upora na modelnih vozilih), ki naj bi bilo tipično za vetrovnike v industriji. Avtentičnost modelov v merilu 1 : 18 je dosežena z izbiro modelov iz zbirke kovinskih replik Bura-go. Testiranja od starodobnikov (diagram 2) do športnih vozil (diagram 3) in povsem vsakdanjih, komercialnih vozil dajo rezultate [6], ki so primerljivi s podatki industrijskih raziskovalnih ustanov.



Slika 13: Merilnik sile.



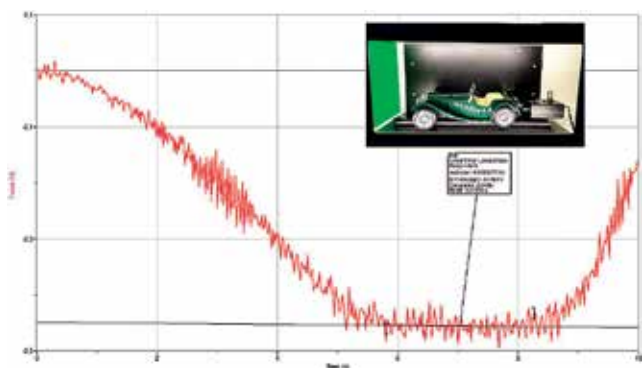


Diagram 2: Starodobnik.

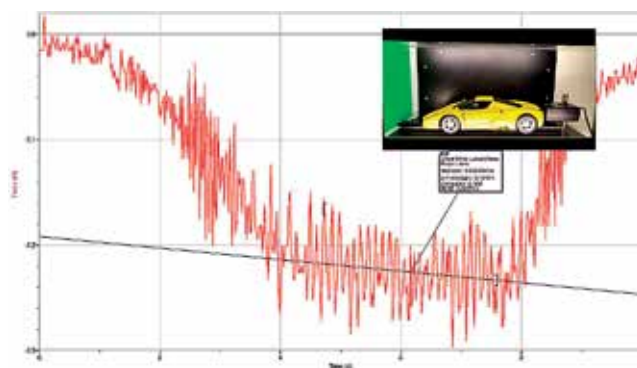



Diagram 3: Športni model Ferrari.

**TABELA REZULTATOV**

Tabela prikazuje rezultate sil na različnih vozilih najmanjšega opora in največjega opora na najnižjega.

Prilokovano sta najmanjši upor do katnik tipa formule. Največji upor pa meridel starodobnika Jaguar SS 100 iz leta 1937.



MODEL	SILA UPORA $F_u$
Formula Indy	143,20 mN
Ferrari	191,80 mN
Porsche Cayman R	221,80 mN
AMG - C Class	262,80 mN
Porsche 911 GT3 (1989)	263,20 mN
Volkswagen Beetle	303,50 mN
Jeep (1934)	344,80 mN
Ford Barchetta	376,80 mN
Ford 500	437,50 mN
Jaguar SS 100 (1937)	448,40 mN

Pri izračunu koeficienta upora zraka se pojavi problem preseka teles. Natančna določitev tega je dokaj zahtevno opravilo, ki žal presega srednješolsko znanje in predvsem razpoložljivo tehnologijo.

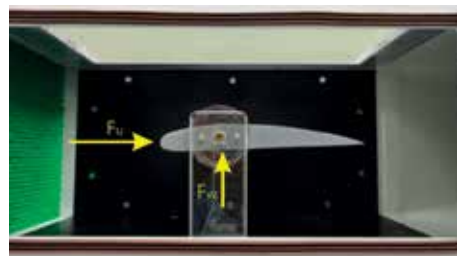
Generacija maturantov tehniške gimnazije 2015/16 je bila postavljena pred izziv: »Kako izmeriti presek vozila?« Večina idej je temeljila na projekciji vozila na zaslonu. Uporaba geometrijske optike se je izkazala kot zelo uporabna fizikalna vsebina. Računalniško zaznavanje sence na zaslonu je bila nova korelacija s tehnologijo IKT.

### Zakaj letalo leti? Tlak na krilu. Upor in vzgon.

Dinamika tekočin je za srednješolsko fiziko dokaj trd oreh. Obtekanje zraka ob letalskem krilu pa je na svetovnem spletu in celo v izbrani strokovni literaturi razloženo na osnovi različnih teorij. Žal v nekaterih primerih tudi zmotno. Večino dvomov lahko dijak pojasni s testiranjem različnih letalskih profilov krila in z meritvami v vetrovniku.

Poizkusi s tokovnicami omogočajo zelo neposredno spoznanje pomena nagiba in lege krila (slika 15). Vizualno opazovanje lahko nadgradimo z merilnikom sil [7]. Meritev vodoravne in navpične komponente sil (slika 14)

omogoči kvantitativne podatke [8], s katerimi sta omogočena izris diagramov (4) in izračun pomembnih fizikalnih količin (vzgon, upor, koeficient oblike ...).



Slika 14: Sili na letalsko krilo.

**3. Rezultati:**

**3.1. Krilo Clark Y**

**3.1.1. Nagib krila 0°**


U (m)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)
3	0,01	0,062
6	0,311	-0,048
9	0,715	-0,187
12	1,205	-0,288

**3.1.2. Nagib krila 10°**

U (m)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)
3	0,123	-0,012
6	0,554	-0,119
9	1,346	-0,268
12	2,188	-0,459

**3.1.3. Nagib krila -10°**

U (m)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)
3	0,01	0,000
6	0,01	-0,06
9	0,01	-0,181
12	0,08	-0,315



Slika 15: Lege krila.



Diagram 4:  $F_{vzg}$  in  $F_u$  pri različnih pogojih.

Vrtinčasti tokovi in celo povratne smeri gibanja zraka so nekaj izjemnega. Pri tem gre za neposredno doživljanje poizkusa, ki se bistveno razlikuje od še tako dobre računalniške simulacije. S posebej izdelanim modelom in odprtini – kanali (slika 17) na različnih mestih površine krila lahko dijak neposredno izmeri tlak na različnih točkah obtekanja zraka [9]. Tako izmerjene različne vrednosti tlaka (slika 16) razjasnijo vse dvome o vzroku za pojav vzgonske sile.



Slika 16: Merjenje tlaka na krilu.



Slika 17: Kanali na krilu.

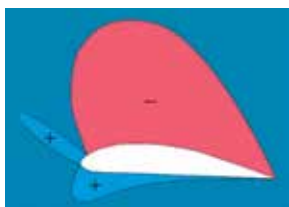


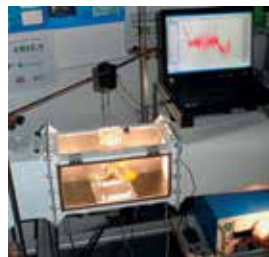
Diagram 5: Polje tlaka.

Izmerjeni rezultati nam omogočajo izris diagrama (5) polja tlaka. Ta nam ponazori območja in vrednosti, ki jih povprečni srednješolec težko razume zgolj teoretično.

### Dinamična meritev – dron v vetrovniku

Predstavitve in delavnice uporabe vetrovnika so segle tudi v tujino. Povabilo k sodelovanju je prispelo v sklopu mednarodnega projekta Drone Team Erasmus+ [10], katerega nosilka je bila AIJU – Technological Institute for children's products & leisure SPAIN.

Za skupino dijakov so bile dinamične meritve delujočega drona v vetrovniku (slika 18) pomembna izkušnja [11]. Opravljene so bile številne koristne meritve in prekušene številne prototipne ideje za pritrjevanje modela, način merjenja, zaznavanje in interpretacijo odločilnih podatkov, varovanje tako merjenca kot merilne komore ter zelo inovativni načini zajemanja podatkov.



Slika 18: Delujoči dron



Slika 19: Vpliv vodoravnega toka v merilni komori.

Zanimiv je bil odziv dijakov pri meritvi, ki je popolnoma presenetila. K omenjenemu projektu smo skušali pristopiti znanstveno, s postavitvijo hipoteze o vplivu zračne mase na silo vzgona plovila (slika 19).

Pri različnih hitrostih se je izkazalo, da bočni veter oziroma relativno gibanje plovila v vodoravni smeri povzroča povečanje sile vzgona (tabela 1). S povečevanjem hitrosti zraka se je večala vodoravna sila  $F_v$ . Prav tako pa se je večala tudi navpična sila  $F_p$ . Spremembe so bile nepričakovano velike. Hipoteza je bila ovržena.

Tabela 1: Prikaz ene od serije merenj, v kateri so razvidne spremembe vpliva hitrosti na dvizžno silo – vzgon ( $F_v$ ).

	Vir (V)	Hitrost (m/s)	$F_p$ (N)	$F_v$ (N)	$\Delta F$ (N)	Sprememba (%)
1	4	2,92	-0,1436	-0,1782	0,0346	80
2	6	4,69	-0,1261	-0,1683	0,0422	75
3	8	6,18	-0,1093	-0,2091	0,0998	52
4	10	7,7	-0,1420	-0,2074	0,0658	68
5	12	8,85	-0,1149	-0,1655	0,0506	69
6	13	9,9	-0,1308	-0,2298	0,0990	57

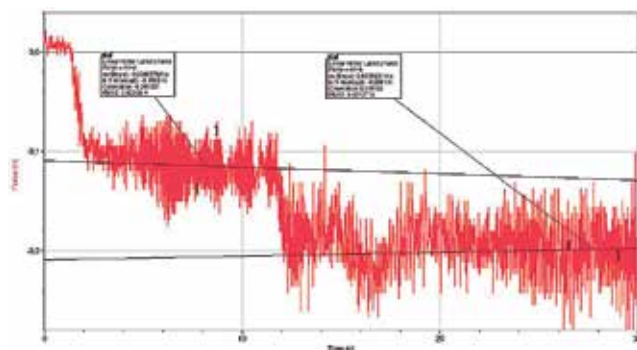
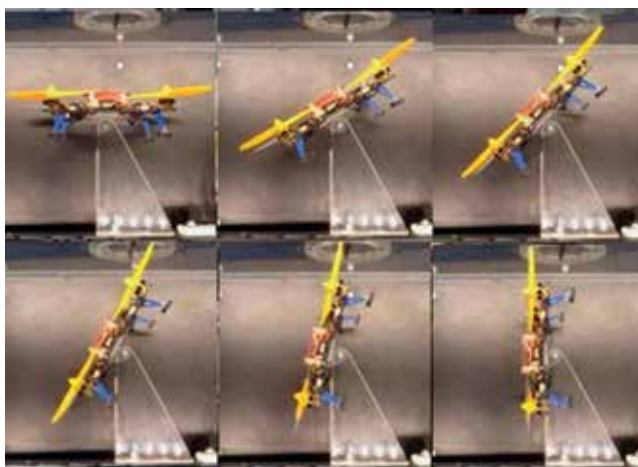


Diagram 6: Diagram spremembe sile vzgona  $F_v$ .

Prvih 11 sekund na diagramu 6 deluje plovilo s polno močjo in brez vpliva vodoravne hitrosti zraka. Vetrovnik v tem času ne deluje. Po 11 sekundah tok zraka vetrovnika poveča navpično komponento in s tem znatno spremeni silo vzgona plovila.

Znano je, da imajo različne oblike dronov različne vrednosti zračnega upora. Modeli oblike X imajo sorazmerno velik upor. Merjenja pri različnih nagibih in legah simulirajo situacije letenja in tudi skrajne situacije manevrov (slika 20).



Slika 20: Različne lege plovila.

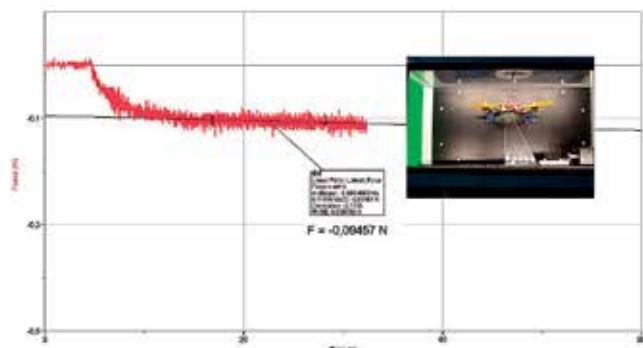


Diagram 7: Najmanjša sila upora  $F_u = 0,09457$  N.

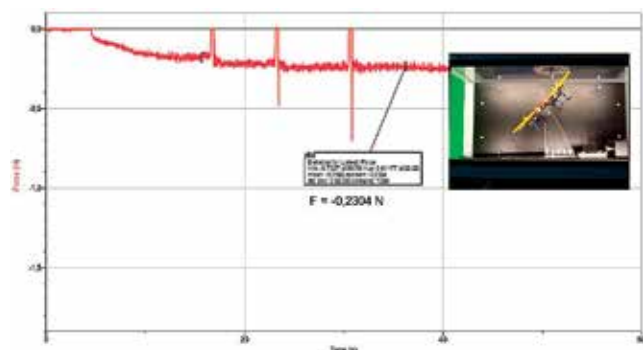


Diagram 8:  $F_u = 0,2304$  N.

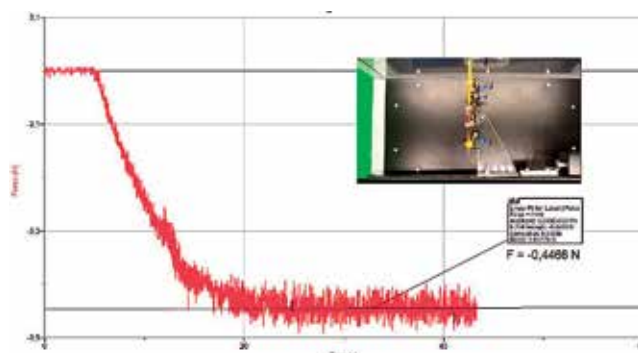


Diagram 9: Največja sila upora  $F_u = 0,4466$  N.

Diagrami 7, 8 in 9 prikazujejo sile upora zraka na različne nagibe drona.

### Projekt »Avto – model«

Interno projektno delo v razredu ni ravno udomačena metoda dela v naših šolah. Običajno se s tem načinom dela povezuje delo z drugimi deležniki. Najbolj so danes izpostavljeni mednarodni projekti, ki so že kar po pravilu tudi financirani (EU).

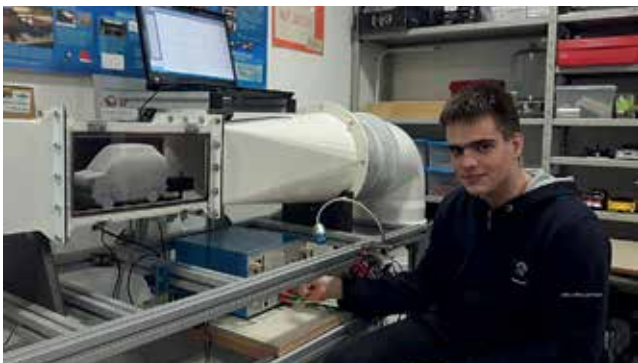
Med oktobrom 2018 in marcem 2019 je 41 dijakov srednjega strokovnega izobraževanja (strojni tehnik) izvedlo eksperimentalno-raziskovalno delo izdelave modela vozila [12]. Vsak dijak je prejel kvader iz stirodura (slika 21).



Slika 21: Kvadri stirodura.



Slika 22: Rezanje z vročo žico.



**Slika 23:** Testiranje v merilni komori.

Pričelo se je z idejno skico in čez nekaj mesecev končalo s končno meritvijo v vetrovniku (slika 23). Da bi bili pogoji za izračun in primerjavo koeficientov upora zraka enaki, so morali pri načrtovanju, oblikovanju in izdelavi obdržati osnovni presek modela. Torej niso smeli odstopati po treh določenih merah (dolžina, višina, širina).

Praktično in ročno delo (slika 22) predstavlja dijakom izziv. Če pri tem sežemo še do nivoja raziskav, smo ujeli veter v polna jadra. Tudi manj priljubljena izdelava tehnične dokumentacije dobi pomen, ko gre za avtentičen izdelek in je avtorsko delo. Vsaka ideja in vsak model sta imela nekaj specifičnega. Široka paleta vrednotenja je omogočila veliko prostora za eksperimentiranje. Če dokumentacija ni najbolje uspela, je obstajala možnost, da se skupna ocena izboljša s testiranjem. Vsak posameznik je lahko našel svoje močno področje in se izkazal. Testiranjem in preskušanjem je sledila serijska meritev, ki je bila izvedena pod enakimi pogoji in z vsemi udeleženci. Dobilni smo najboljše v posameznih ocenah, a najpomembnejše je dejstvo, da so bili vsi uspešni.

Vetrovnik je omogočil čudovit interni projekt, ki je trajal nekaj mesecev in se končal z veliko merjenji in dobrimi ocenami, naj je šlo za osebna mnenja ali za zapis v redovalnici.



**Slika 24:** Modeli.

## Kompetence

Katere nove sposobnosti pridobijo dijaki s tovrstnim delom na vetrovniku? Vse cilje, ki so tako doseženi, je mogoče doseči tudi drugače. Verjetno tudi s klasičnim ponavljanjem, s kredo in tablo. Zagotovo pa je velika razlika v pristopu in počutju. Na trenutke so lahko učitelji nekoliko manj suvereni, zato pa so dijaki bolj ustvarjalni in bolj razpoloženi. Temeljni cilj raziskovalno-eksperimentalnega dela je usposobiti dijaka za reševanje problemov, ki se pojavljajo pri obravnavi fizikalnih in tehničnih izzivov. Pri tem je ključnega pomena spoznavanje novih tehnologij in IKT. Ena glavnih nalog je pravilna interpretacija dobljenih podatkov in predstavitev rezultatov.

Načrtno raziskovanje ali učenje z načrtom je pogosta oblika dela v naravoslovju. V našem primeru je nismo iskali, temveč nas je samo delo pripeljalo do opredeljevanja, snovanja, načrtovanja, vrednotenja in ponovnega preoblikovanja. Zelo jasno so se kazali in v delu odražali cikli vračanja skozi spiralno rast napredka. Ključne kognitivne naloge pri reševanju realnih problemov so zahtevale generiranje idej, pripravo prototipnih rešitev in modelov prek načrtovanja pa vse do preskušanja. Pridobljene veščine pa tudi kognitivne spremembe (nov pristop k reševanju problemov) so dobra popotnica za nadaljnji študij in pozneje za službo [1].

## Prihodnost dela z vetrovnikom

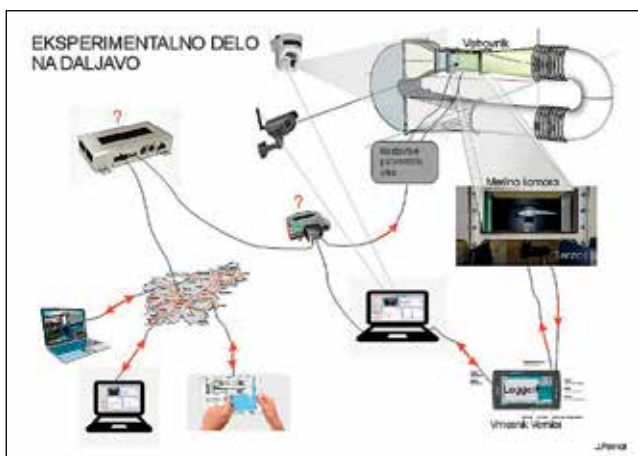
Kljub vse pogostejšim virtualnim pristopom (simulacije in animacije) ima tovrstno bazično raziskovalno in eksperimentalno delo svetlo prihodnost. Kronološki pregled aktivnosti kaže jasen trend povečevanja aktivnih ur. Vsako leto ga uporablja več dijakov in število obratovalnih ur narašča. Dijaki so napravo sprejeli in jo radi uporabljajo, naj gre za redne eksperimentalne vaje, raziskovalno delo pri pripravah na maturo ali za različne aktivnosti zunaj rednega pouka. Ideja za prihodnost je

usmerjena v razvoj, ki bi omogočil širšo uporabo vetrovnika. Za tako imenovani eksperiment na daljavo (angl. *remote experiment*) bo verjetno potrebnih več sredstev, znanja in časa.

Ne gre zgolj za idejo. Izdelan je koncept (slika 25), ki bi omogočil uporabo opreme tudi drugim šolarjem po Sloveniji. V naših šolah verjetno ni veliko tovrstne opreme. Temeljni cilj tega dela pa je nedvomno popularizacija

Tabela 2: Ocenjevalni list.

Aktivnost/ Dijak	Idejna risba ali skica	Izdelava načrta	Obdelava izdelka	Testiranja	Merjenje	Rezultat merjenja koeficienta upora	Dokumen- tacija	Video »bonus«	Skupna ocena
Dijak 1									
Dijak 2									



Slika 25: Eksperimentalno delo na daljavo.

znanosti – fizike in tehnike. Tudi pričujoči prispevek je namenjen temu.

## Zaključek

Izkušnje kažejo, da tovrstne naloge in raziskovalni način dela dijakom programa tehniških usmeritev omogočajo višjo raven uporabnega znanja. Naj bo to izdelava doku-

mentacije, ki jo pripravljajo za nek konkreten izdelek in po svoji zamisli, ali pa praktično delo na izdelku, ki ga spreminjajo – izboljšujejo po lastnih željah. Sklop določenih nalog in opravil vsakemu posamezniku ponuja možnost, da se »izkaže« na področju, ki ga obvlada.

Ob tovrstnem delu lahko doživimo tudi očitek, da se ne držimo učnega načrta ali celo da to ni resno delo, saj se »igramo« z avtomobilčki. Skoraj po pravilu ti isti izpostavljajo motivacijo in problem odgovornosti do učenja. Le učiteljeva spretnost in znanje iskanja srednje poti med tako imenovano igro in učenjem sta trdno zagotovilo za uspešno in zanimivo učenje.

Izkušnje kažejo, da se s tovrstnim delom klasični model ponavljanja enakih vsebin in metod dela počasi, a vztrajno pomika v ozadje. Z vsako učno enoto in navidezno zaključeno vsebino se pri tej obliki dela odpirajo nove ideje in vsebine. Učenje se evolutivno razvija glede na trenutne potrebe, želje in ideje.

Ob načrtovanju in izgradnji vetrovnika [13] in kasneje ob raziskovalnem delu [14] sta kontinuirano nastajali tudi spletni strani, ki omenjene aktivnosti prikazeta še nazorneje in v nekaterih primerih tudi ponazorita z živo sliko.

## Viri

- [1] Prispevek na 4. konferenci učiteljev naravoslovnih predmetov – NAK 2017, 26. in 27. oktobra 2017, Laško. <https://www.zrss.si/nak2017/gradiva/Fizika-4-raziskovalni-vetrovnik-Pernar.pdf>
- [2] [http://lab-vetrovnik.si/merjenja\\_pogon.html](http://lab-vetrovnik.si/merjenja_pogon.html)
- [3] [http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/fizikalni\\_modeli.html](http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/fizikalni_modeli.html)
- [4] <http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/vetrnica2017.html>
- [5] [http://www2.arnes.si/~sssknm4/vetrovnik/tokovnice\\_okno.html](http://www2.arnes.si/~sssknm4/vetrovnik/tokovnice_okno.html)
- [6] [http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/upor\\_vozila.html](http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/upor_vozila.html)
- [7] <https://www.vernier.com/>
- [8] [http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/sile\\_krilo.html](http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/sile_krilo.html)
- [9] [http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/tlacno\\_krilo.html](http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/tlacno_krilo.html)
- [10] Projekt »Drone Team«: <http://www.droneteamproject.eu/>
- [11] <http://www2.arnes.si/~sssknm4/vetrovnik2/jango/theme/dron.html>
- [12] Projekt »Avto-model«: [http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/avto\\_model.html](http://www2.arnes.si/~sssknm6/vetrovnik1/jango/theme/avto_model.html)
- [13] <http://www2.arnes.si/~sssknm4/vetrovnik/index.html> (22. 3. 2018).
- [14] <http://lab-vetrovnik.si/> (28. 3. 2019).

# Preprosta demonstracija fosforescence pri fluorescentni sijalki

dr. Aleš Mohorič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Institut Jožef Stefan

---

## Izvleček

Pomembno je, da pri pouku fizike pokažemo, da se fizika tiče svetá okoli nas, in da dijaki z učenjem fizike spoznava-jo tudi sodobne naprave, najboljše ob poskusih. Izšel je članek, ki opisuje preprost testni poskus, s katerim izmerimo fosforescenco fluorescentne sijalke [1]. Prispevek temelji na članku [2], ki učitelju ponudi učni načrt, s katerim vodi dijaka po korakih skozi delovanje fluorescentne sijalke in razjasni razliko med fluorescenco in fosforescenco. Koraki vključujejo ključno znanje in kompetence raziskovalnega procesa, kot so načrtovanje poskusa, snovanje predpostavk in testiranje hipoteze. Tu bom povzel vsebino in opisal razmeroma preprost poskus z doma dosegljivo opremo, ki ga lahko vključimo v pouk nekje po obravnavi izmeničnih tokov in svetlobnih spektrov, npr. ko obravnavamo spektre različnih svetil. Tema je zanimiva tudi za obravnavo atomskih energijskih stanj. Pri poskusu dijaki spoznajo osnovo delovanja fluorescentne sijalke, ki se poleg sijalk LED uporablja za razsvetljevanje večjih prostorov.

**Ključne besede:** fluorescenca, fosforescenca, fluorescentna sijalka, vrtenje kamere

## A Simple Demonstration of Phosphorescence on a Fluorescent Bulb

### Abstract

Two of the important purposes of physics classes is to convey that physics is part of the world around us and to teach students about the modern devices, which is best accomplished through experiments. An article was published which describes a simple experiment of measuring the phosphorescence of a fluorescent bulb [1]. This paper is based on the article [2] that provides teachers with a lesson plan to guide students step-by-step in learning about the functioning of a fluorescent bulb and explaining the difference between fluorescence and phosphorescence. The steps include key knowledge and competences of the research process, such as experiment planning, formulation of suppositions and hypothesis testing. The paper summarizes this content and describes a relatively simple experiment using home equipment that can be included in class after students have learned about alternating current and light spectrum, e.g. when learning about the spectra of various light sources. This topic is also interesting when learning about energy levels of an atom. During the experiment, students learn the basics of fluorescent bulbs that are used, along with LED light bulbs, to illuminate larger spaces.

**Keywords:** fluorescence, phosphorescence, fluorescent bulb, camera rotation

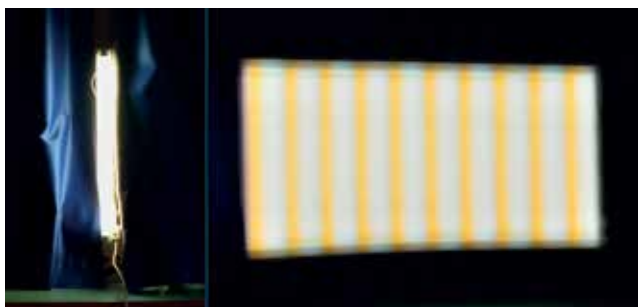
---

Fluorescentna sijalka deluje tako, da pretvori ultravijolično svetlobo električno stimulirane živosrebrne pare v vidno svetlobo [3]. Para je pod nizkim tlakom v stekleni cevi, ki ima na notranji strani stene plast fluorescenčne snovi. Hitri elektroni s trki vzbujajo atome živega srebra. Fluorescenčna plast pretvori živosrebrni emisijski spekter, v katerem je najmočnejša ultravijolična spektralna črta, v širši spekter vidne svetlobe, primernejši za osvetljevanje in oči. Spekter je odvisen od vrste snovi, iz katere je narejena plast [4]. Fluorescentne sijalke v Evropi napaja izmenični tok s frekvenco 50 Hz. Električna

moč je sorazmerna kvadratu toka in zato je frekvenca, s katero niha moč, dvakrat večja, 100 Hz (spomnimo:  $\sin^2 x \propto \sin 2x$ ). Električna moč je v kratkem delu amplitude, ko tok niha skozi nič, relativno majhna in slabše sijalke zato moteče utripajo. Obstajata dve rešitvi – lahko elektronsko povečamo frekvenco toka ali pa v pretvorni plasti uporabimo snov, ki oddaja svetlobo z zamikom – s fosforescenco [5, 6]. Utripanje sijalk lahko opazujemo na posnetkih hitrih kamer [2, 5]. Kamero lahko pri pouku uporabimo na različne načine, predvsem v mehaniki in optiki, na voljo pa so razni načini slikanja, od hitrih vide-

oposnetkov [2, 5, 6, 7] prek hitrih zaporednih osvetlitev, večkratnih osvetlitev do stroboskopskih posnetkov [8, 9, 10, 11, 12]. Kamero med poskusom redko premikamo. Nekaj primerov vseeno lahko naštejemo: preiskave načela ekvivalentnosti s prosto padajočo kamero [13] in fotografiranje z vrtečo kamero, s katerim razločimo gibanje [14]. Zanimiv primer je slikanje večkratnega udara strele [15]. Vrtenje kamere razkrije časovni potek strele, v katerem lahko prepoznamo več zaporednih udarov.

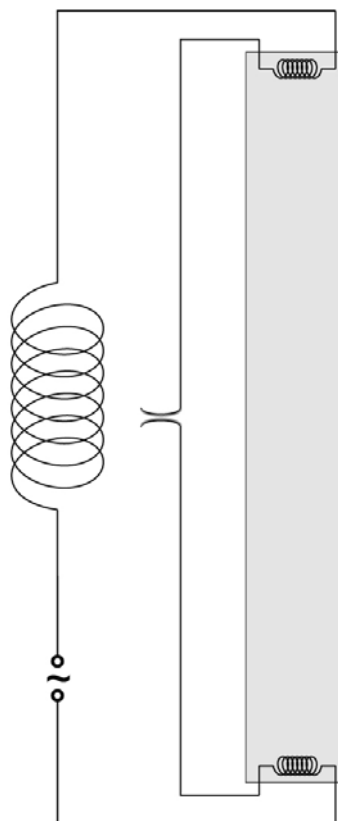
Tu je predstavljen poskus, s katerim raziskujem fosforescenco s fotografsko kamero, pri kateri imamo možnost nastaviti čas osvetlitve. Sam sem uporabil čas osvetlitve 0,1 s. Sijalko sem postavil navpično, kot kaže slika 1 levo, in kamero zavrtel v vodoravni ravnini (okoli navpične osi) ter naredil fotografijo s podaljšano osvetlitvijo. Boljši rezultati nastanejo, če je kamera postavljena na stabilni, prosto vrtljivi podlagi. Sprožitev kamere ob pravem trenutku zahteva nekaj vaje, lahko pa naredite sprožilni mehanizem (elektronsko to ne bi smelo biti prezahtevno), da sproži kamero v trenutku, ko je sijalka v kadru. Nekoliko pomaga tudi, če se s kamero odmaknemo dlje stran od sijalke, saj je potem zorni kot okoli sijalke večji. S tem seveda zmanjšamo ločljivost posnetka. V nekaj poskusih mi je uspelo narediti fotografijo na sliki 1 (desno). Če je slika nad- ali podosvetljena, lahko prilagodite zaslonko in občutljivost slikovnega tipala. Fotografijo, ki nastane med vrtenjem kamere, enostavno opišemo z osnovno geometrijsko optiko. Lega sijalke v kadru se spreminja skoraj sorazmerno s časom, če kamero vrtimo enakomerno, in slikovni elementi na fotografiji si v vodoravni smeri sledijo v času od začetka osvetljevanja. Če je okolica dovolj temna v primerjavi s sijalko, bo na fotografiji vidna zgolj sled, ki jo na tipalu pusti sijalka. Z absciso fotografije torej lahko povežemo čas, v katerem je osvetlitev nastala. Seveda to pomeni, da mora biti razsežnost sijalke v smeri premikanja kadra majhna. Tako posneta fotografija jasno kaže utripanje sijalke. Vze-



**Slika 1:** Statična fotografija pokonci postavljene fluorescentne sijalke, uporabljene pri poskusu (levo). Desno je fotografija, ki nastane med vrtenjem kamere v desno. Na fotografiji nastane niz svetlejših in temnejših prog, ki ustrezajo maksimumu in minimumu električne moči. Čas osvetlitve je bil 0,1 s in na sliki lahko naštejemo deset temnejših, rumenkastih prog, kar ustreza frekvenci utripanja sijalke 100 Hz ter frekvenci električnega toka 50 Hz.

ti moramo seveda starejšo sijalko, ki utripa s frekvenco 100 Hz. Jasno se vidijo svetlejše, bele proge, ki ustrezajo polni moči delovanja sijalke, in temnejše, rumenkaste, ki ustrezajo šibki moči in so posledica fosforescence plasti. Plast sveti rumeno zato, ker je svetloba živosrebrne pare modrikasta, plast pa ji mora primešati rumenkasto, da nastane bela svetloba. Torej je tako narejeno nalašč. Enakomerno utripanje služi tudi umeritvi časovne skale – en utrip se zgodi v stotinki sekunde.

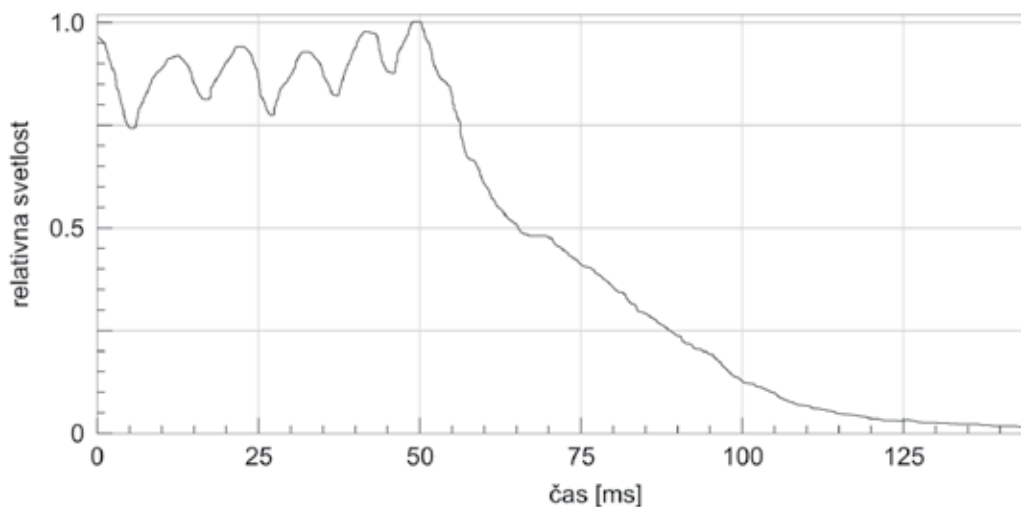
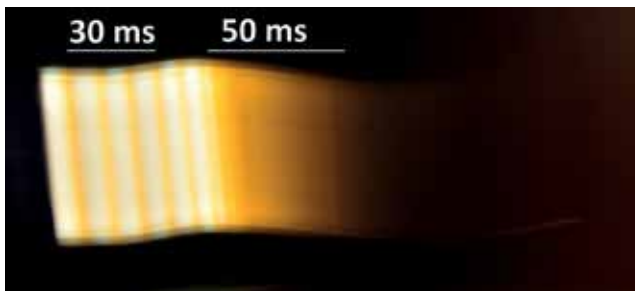
Ob obravnavi električnega napajanja sijalke je treba omeniti tudi električno vezje, v katero je sijalka priključena, in ga kaže slika 2 [16]. Od vira izmenične napetosti teče veja skozi tuljavo (v tej vlogi jo imenujemo tudi dušilka) in od nje se razcepita dve vzporedni veji. Ena, očitna, gre skozi element električnega vezja, ki ga žargonsko imenujemo »štarter« in je pravzaprav avtomatično stikalo z bimetalnim stikom, druga pa gre skozi sijalko. Ta veja na prvi pogled ni očitna in ustreza neskončnemu upor, ko je v cevi sijalke plin, in kratkemu stiku, ko je v cevi sijalke plazma. Veji se združita na drugem polu vira napetosti. Ko sijalko priključimo, plin v cevi ni ioniziran in upor sijalke je tako velik, da skozi njo ne teče električni tok. Tok teče skozi žarilne nitke v cevi, iz katerih izhajajo termični elektroni, ki kasneje nosijo tok skozi plazmo. Priključka stikala sta približno vzporedni upogibni bimetalni žički, ki sta v ugasnjem stanju ločeni. Ko stikalo priključimo na izmenično napetost, nastane v okolici žičk plazma. Tok skozi stikalo greje priključka, ki se zato približujeta. Ko se stakneta, plazma izgine in



**Slika 2:** Shema vezave fluorescentne sijalke: elementi so vir izmenične napetosti, tuljava (dušilka), žarilni nitki, stikalo, cev sijalke, v kateri se zadržuje plazma.

žički se začeta ohlajati, bimetal pa se vrača v prvotno obliko. Ko se tokokrog razklesne, se na priključkih tuljave inducira dovolj visoka napetost, da v cevi sijalke ustvari plazmo – pospeši elektrone z žarilne nitke tako, da s trki lahko ionizirajo plin v cevi. Med priključkoma sijalke takrat skoraj nastane kratki stik in tuljava s svojim indukcijskim uporom omeji tok, ki teče iz vira. Tok niha s frekvenco 50 Hz, kar je dovolj hitro, da vzdržuje plazmo v cevi. Napetost na stikalu je zanemarljivo majhna in v njem med delovanjem sijalke ni plazme.

Fosforescenco sicer opazimo že na fotografiji na sliki 1 desno, lahko pa tudi analiziramo relaksacijski čas – torej koliko časa po vzbujanju snov še oddaja svetlobo. To lahko naredimo tako, da med posnetkom sijalko ugasnemo. To je nekoliko zapletenejše in terja nekaj poskusov ter spretnosti. Uskladiti moramo vrtenje kamere, sprožitev posnetka in izklop sijalke. Sam sem potreboval okoli 20 poskusov, da mi je uspel posnetek, ki ga kaže slika 3. Sijalka ugasne nekje na polovici intervala osvetlitve. Po zavitem robu posnetka je očitno, da je os kamere med vrtenjem opletala. Na sliki jasno razločimo na začetku (levi del slike) šest utripov in z njimi si lahko pomagamo



**Slika 3:** Fotografija fluorescentne sijalke, narejena s podaljšano osvetlitvijo z vrtečo kamero v času izklopa sijalke (zgoraj). Po začetnem utripajočem delu na levi strani fotografije se jasno vidi pojemajoča svetloba fosforescence. Prečno čez sliko s primernim programom odčitamo svetlost svetlobnih elementov in jih nanesimo kot funkcijo lege, ki ponazarja čas. Časovno skalo določimo iz razdalje med dvema minimumoma pri utripanju, ki ustrežata stotinki sekunde. Graf spodaj kaže v prvem delu utripanje svetlobne moči in kasnejše eksponentno pojevanje svetlobnega toka zaradi fosforescence.

pri določitvi časovne skale. Ko sijalka ugasne, se svetlost lise na fotografiji proti desni (kasnejši časi) eksponentno manjša zaradi fosforescence. S primernim programom za obdelavo slik (sam sem uporabil ImageJ [17]) lahko odčitamo svetlost posameznih slikovnih elementov in privzamemo, da kar ustrezajo svetlobnemu toku. Ordinati izmerkov ustreza svetlost slikovnega elementa, abscisi pa lega od levega roba slike, kar interpretiramo kot čas, ob katerem smo določili svetlost sijalke. Izmerkom svetlosti kot funkcije časa lahko prilagodimo eksponentno krivuljo in določimo karakteristični čas, ki je v našem primeru 50 ms. Tega lahko s srednješolci določimo tudi tako, da z grafa odčitamo, kdaj se vrednost zmanjša na tretjino ( $\sim 1/e$ ) začetne. Izmerjeni rezultat se dobro ujema s podatki iz literature [5].

Predlagani poskus v enem zamahu demonstrira utripanje električne moči, barve svetlobe in fosforescenco. Poskus ima pomanjkljivost, saj ne loči med fosforescenco in relaksacijo plazme, ter se lahko uporabi kot testni poskus opazovalnega poskusa, ki ga je zasnoval Planinšič [2].

Poskus nudi še nekaj dodatnih izzivov, ki jih v prispevku ne obravnavam, kot sta določanje hitrosti vrtenja kamere in določanje časovne ločljivosti eksperimenta z znano ločljivostjo kamere in razsežnostjo sijalke. Analizirali bi lahko tudi vklop sijalke in primerjali različne sijalke.



## Literatura

- [1] Aleš Mohorič (2018). Simple demonstration of phosphorescence in a fluorescent lamp by camera panning, *Phys. Teach.* 56, 260–261 (April 2018).
- [2] Gorazd Planinšič (2016). Fluorescence and phosphorescence: Easier to investigate than to spell, *Phys. Teach.* 54, 442–443 (October 2016).
- [3] Nicholas R. Guilbert (1996). Shedding some light on fluorescent bulbs, *Phys. Teach.* 34, 20–22 (January 1996).
- [4] Yaakov Kraftmakher (2010). Experiments with Fluorescent Lamps, *Phys. Teach.* 48, 461–464 (October 2010).
- [5] Michael Vollmer in Klaus-Peter Möllmann (2015). Flickering lamps, *Eur. J. Phys.* 36, 035027+20 (May 2015).
- [6] Pasquale Onorato, Luigi Gratton, Massimiliano Malgieri in Stefano Oss (2010). The photoluminescence of a fluorescent lamp: didactic experiments on the exponential decay, *Phys. Educ.* 52, 015011+8 (January 2017).
- [7] André Heck in Peter Uylings (2010). In a Hurry to Work with High-Speed Video at School?, *Phys. Teach.* 48, 176–181 (March 2010).
- [8] Robert J. Beichner (1996). The impact of video motion analysis on kinematics graph interpretation skills, *Am. J. Phys.* 64, 1272–1277 (October 1996).
- [9] Juraj Slabeycius, Daniel Polčín (2014). SCHOOL PHYSICAL EXPERIMENT Promoted by Digital Photographic Camera and Computer, *Eur. Int. J. Sci. Techn.* 3, 115–125 (October 2014).
- [10] Thomas B. Greenslade Jr. (1990). Photography in the classroom, *Phys. Teach.* 28, 148–154 (March 1990).
- [11] G. W. Dorling (1966). Stroboscopic photography, *Phys. Educ.* 1(4), 236–240 (November 1966).
- [12] Douglas Brown in Anne J. Cox (2009). Innovative Uses of Video Analysis, *Phys. Teach.* 47, 145–150 (March 2009).
- [13] Valery Mayer in Ekaterina Varaksina (2016). A simple demonstration when studying the equivalence principle, *Am. J. Phys.* 84, 382–383 (June 2016).
- [14] N. E. Heath (1971). Camera panning in stroboscope photography, *Phys. Educ.* 6(4), 225–226 (July 1971).
- [15] John G. Albright (1937). A Lightning Flash and Its Component Strokes, *J. App. Phys.* 8, 313–318 (May 1937).
- [16] Predavanja pri predmetu „Kako stvari delujejo?“, Gorazd Planinšič, in osebna korespondenca.
- [17] ImageJ je prosto dostopen na <https://imagej.nih.gov/ij/>.

# Moč vetra na klopotcu v Hermancih pri Ljutomeru

Mag. Karel Šmigoc

Šmarje pri Jelšah

V *Guinnessovi knjigi rekordov 2019* je zapisano:

Največji klopotec na svetu ima premer vetrnic 20,58 metra. Postavil ga je Stanko Habjanič (Slovenija) v Hermancih, Miklavž pri Ormožu. Izmerili so ga 15. avgusta 2014. [1]

**Slika 1:** Največji klopotec na svetu v Hermancih pri Ljutomeru. (Foto: Karel Šmigoc)

## Izvleček

Z uporabo osnovnih fizikalnih zakonov in preproste matematike smo pokazali, da lahko vetrnica izkoristi največ 59 % kinetične energije vetra, ki vpade nanjo, in da velika razdejanja nastanejo zaradi odvisnosti moči vetra od tretje potence hitrosti.

**Ključne besede:** največji klopotec, veter, vetrnica, moč, raziskovalna naloga

## Wind Turbine Power in Hermanci, Ljutomer

### Abstract

Using simple physics and very elementary mathematics, we showed that the blades of the wind turbine can convert 59 % of the kinetic energy of the air moving through it into useful power and that the destructive power of the wind varies with the cube of the wind speed.

**Keywords:** the largest wind turbine, wind, wind turbine, power, research paper

### Uvod

V severovzhodni Sloveniji, posebno v Halozah, Prlekiji in Slovenskih goricah, se klopotec omenja v pisnih vi-



**Slika 2:** Klopotec v šmarskih goricah, ob katerem se vsako leto zberejo sosedje. (Foto: Karel Šmigoc)

rih že ob koncu 18. stoletja. [2] Postavljanje klopotca se vsako leto začne po 15. avgustu. Za vinogradnike je ta dan poseben praznik. Sosedje se zberejo, se povesejo in za trenutek pozabijo na vsakdanje težave (slika 2). V preteklosti so bili klopotci namenjeni odganjanju ptic v vinogradih, v novejšem času pa ptice ne povzročajo več zaznavne škode, ker jih je zaradi raznih škropiv vedno manj. Zato tudi klopotci tonejo v pozabo. Le redki vinogradniki, kot na primer v Hermancih, oživljajo stare običaje in tako ohranjajo kulturno dediščino.

### Moč vetra

Veter nastane zaradi razlik v zračnem tlaku. Zaradi mnogih vplivov okolice na zrak, ki povzročijo hitre spremembe hitrosti in smeri vetra ter turbulentno gibanje zraka, je to gibanje težko opisati z osnovnimi fizikalnimi zakoni. Zato si v takih primerih pomagamo z modeli,

ki so dosti enostavnejši od realnega dogajanja, a dajo za specifične obravnavane situacije še vedno dovolj dobre teoretične napovedi. V našem modelu predpostavimo, da se zračni delci gibljejo v vodoravni tokovni cevi z enako hitrostjo pravokotno na prečni presek cevi. Pri taki poenostavitvi lahko povemo pretok mase zraka  $\Delta m$  v časovni enoti  $\Delta t$  skozi presek  $S$  tokovne cevi  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ . Zapisani količnik imenujemo masni tok, ki ga zaznamujemo s  $\Phi_m$ ,  $\Phi_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}$ . Maso zraka zapišemo s produktom gostote zraka  $\rho$  in prostornine  $\Delta V$ , prostornino pa izrazimo s produktom preseka cevi  $S$  in poti  $\Delta s$ , ki jo napravi masa  $\Delta m$  v časovni enoti  $\Delta t$ :  $\Delta s = v\Delta t$ ,  $\Delta m = \rho S v \Delta t$  in zapišemo masni tok  $\Phi_m = \rho S v$ . Masa zraka  $\Delta m$ , ki se giblje v tokovni cevi s hitrostjo  $v$ , ima kinetično energijo  $\frac{1}{2}\Delta m v^2$ , pri upoštevanju pretoka energije v enoti časa  $\Delta t$  je moč  $P_v = \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta t} v^2 = \frac{1}{2} \Phi_m v^2$ . Ker je masni tok  $\Phi_m = \rho S v$ , je moč vetra:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3. \quad (1)$$

Ovisnost moči vetra od tretje potence njegove hitrosti nam pojasni njegovo izredno rušilno moč.

## Moč vetra na vetrnici

Pri računanju moči vetra na vetrnici upoštevamo tri hitrosti, tj. hitrost pred vetrnico  $v$ , na vetrnici  $v_1$ , ko veter opravlja delo, in hitrost  $v_2$  za vetrnico, ter jih po velikosti zapišemo:  $v > v_1 > v_2$ . Pojasnimo, kako so vse tri omenjene hitrosti povezane z močjo vetra na vetrnici. V kratkem časovnem intervalu  $\Delta t$  pride na vetrnico masa zraka  $\Delta m$ , ki deluje na vetrnico s silo  $F$ . Z nasprotno enako silo deluje vetrnica na veter, zato se mu spremeni gibalna količina  $\Delta G$ :  $\Delta G = \Delta m (v_2 - v)$ . Količnik spremembe gibalne količine  $\Delta G$  in časovnega intervala  $\Delta t$  je enak sili  $-F = \frac{\Delta m}{\Delta t} (v_2 - v)$  oziroma  $F = \Phi_m (v - v_2)$ , s katero vetrnica zaustavlja masni tok pri hitrosti  $v_1$  in preseku  $S$ . Ker je v tem primeru masni tok  $\Phi_m = \rho S v_1$ , pri čemer je  $\rho$  gostota zraka in  $S$  ploskev, ki jo vetrnica opisuje med vrtenjem, je sila vetra na vetrnico  $F = \rho S v_1 (v - v_2)$ . [3]

Pri enakomernem gibanju zapišemo moč kot produkt sile in hitrosti, če se sila med gibanjem ne spreminja. Moč vetra na vetrnici označimo s  $P_1$  in zapišemo  $P_1 = F v_1$ :

$$P_1 = \rho S v_1^2 (v - v_2). \quad (2)$$

Zaradi negativnega dela vetrnice na masni tok zraka se spremeni tudi kinetična energija:  $-A = \frac{1}{2} \Delta m (v_2^2 - v^2)$  ali  $A = \frac{1}{2} \Delta m (v^2 - v_2^2)$ .

Ker je opravljeno delo v časovni enoti  $\Delta t$  moč, sledi:

$$P_2 = \frac{A}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta t} (v^2 - v_2^2).$$

Ponovno upoštevamo, da je  $\frac{\Delta m}{\Delta t}$  masni tok, ki je tudi v tem primeru  $\rho S v_1$ , je moč  $P_2$ :

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho S v_1 (v^2 - v_2^2). \quad (3)$$

Moč vetra na vetrnici smo zapisali z izrazoma (2) in (3), v katerih nastopa hitrost  $v_1$ , ki je ne poznamo in je tudi ne moremo izmeriti. Če izenačimo  $P_1 = P_2$ , dobimo enačbo, iz katere izračunamo  $v_1$ :  $v_1 = \frac{v + v_2}{2}$ . Dobljeno vrednost za hitrost  $v_1$  vstavimo v izraz  $P_1$  ali  $P_2$  in dobimo moč vetra  $P_k$  na vetrnici, izraženo s hitrostjo vetra pred in za vetrnico:

$$P_k = \frac{\rho S}{4} (v + v_2)^2 (v - v_2). \quad (4)$$

Izraz (4) je primeren za računanje moči masnega toka na vetrnici, če je zračni tok iz vetrovnika, kjer lahko merimo obe hitrosti vetra pred in za vetrnico. Pri klopotcu, posebno v Hermancih, je mogoče meriti le hitrost pred vetrnico, to je hitrost, ki jo ima veter v določenem trenutku. Hitrost vetra po prehodu skozi vetrnico je odvisna od hitrosti vetra pred vetrnico. Največjo moč dobimo, če določimo najugodnejše razmerje med hitrostjo  $v$  in  $v_2$ . To dosežemo, če ugotovimo največjo vrednost izraza (4). Produkt  $(v + v_2)^2 (v - v_2)$  označimo s  $H$ , poiščemo odvod  $\frac{dH}{dv_2}$  in iz dobljene enačbe pri pogoju  $\frac{dH}{dv_2} = 0$  izračunamo  $v_2 = \frac{v}{3}$ . Po vstavljanju te vrednosti v izraz (4) je moč  $P_k$  odvisna samo od hitrosti vetra pred vetrnico:

$$P_k = \frac{8}{27} \rho S v^3. \quad (5)$$

Iz razmerja  $P_k$  in  $P_v$  dobimo izkoristek vetra  $\eta$  na vetrnici:  $\eta = \frac{P_k}{P_v} = \frac{16}{27}$ , kar je 59 %. Ta največji izkoristek je zapisal nemški inženir Albert Betz leta 1920 in je znan kot Betzova limita. [4]

Računska ocena teoretično največje mogoče moči klopotca na sliki 1 pri hitrosti vetra  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ : če upoštevamo, da je gostota zraka  $\rho = 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ , ploskev  $S$  krog, ki ga opisuje vetrnica med vrtenjem,  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ ,  $D = 20$  m in hitrost vetra  $v = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , je moč  $P_k$  približno 120 kW.

## Pripis in zaključek

Fizikalni pouk lahko popestrimo tudi z eksperimentalnim delom v naravi. Zato so posebno ugodne razmere na podeželju, kjer lahko po želji izbiramo ustrezen prostor za poskus. Čeprav takšen način dela zahteva več priprave in časa, je pridobljeno znanje bolj doživeto in trajnejše. Poglejmo to na primeru merjenja moči vetra v naravi. V tem primeru je učilo klopotec. Os, na kateri so pritrjena kladivca, zamenjamo z vretenom, na katerem je pritrjena vrstica z utežjo. Ob vetrovnem vremenu izberemo primeren prostor v naravi, kjer lahko postavimo klopotec na višjo lego, merimo čas, v katerem se dvigne utež pri vrtenju vetrnice na določeno višino, in iz potencialne energije in izmerjenega časa izračunamo moč vetra na vetrnici klopotca. Oglejmo si še merjenje moči vetra v šolskih prostorih ali celo v učilnici (slika 4). Učenci OŠ Šmarje pri Jelšah so v šolskem letu 2001/02 izdelali raziskovalno nalogo *Od klopotca do vetrne elektrarne*, v kateri so uporabili vetrovnik kot izvor vetra. [5]



**Slika 3:** Model vetrne elektrarne z raziskovalno nalogo. (Foto: Karel Šmigoc)

Klopotec so postavili pred vetrovnik in z vetromerom – anemometrom merili hitrost zraka pred klopotcem in za njim. Iz spremembe kinetične energije masnega toka zraka so za moč vetra na vetrovnici dobili rezultate, kot jih napoveduje izraz (4).



**Slika 4:** Merjenje hitrosti vetra iz vetrovnika v šolskem prostoru. (Foto: Karel Šmigoc)

Ob vpisu klopotca v Hermancih v Guinnessovo knjigo rekordov je raziskovalna naloga postala ponovno zanimiva. Znanje in izkušnje, ki smo si jih pridobili v raziskovalni nalogi, sem poglobil in nekatere predpostavke iz naloge utemeljil z ustreznimi fizikalnimi zakoni. Pravilnost obrazca (5) sem preveril tako, da sem klopotec postavil pred vetrovnik in meril hitrost vetra samo pred vetrnico. V okviru natančnosti merjenja je bila vrednost za moč, dobljena po obrazcu (5), približno enaka vrednosti, ki smo jo dobili, ko smo merili obe hitrosti in izračunali moč po obrazcu (4).

Uporaba izraza (5) za izračun moči vetra na vetrnici v Hermancih je skromen prispevek k prepoznavnosti Guinnessovega rekorderja in tudi Slovenije v svetu.

## Viri

- [1] *GUINNESS world records 2019* [slovenska izdaja] (2018). Tržič: Učila International.
- [2] Jože Krivec. (1942). *Dom med goricami*. Ljubljana: Ljudska tiskarna.
- [3] Rudolf Kladnik. (1996). *Pot k maturi*. Ljubljana: DZS.
- [4] Petar Kulišič. (1991). *Novi izvori energije*. Zagreb: Školska knjiga Zagreb.
- [5] T. Grobelšek, J. Mužerlin (raziskovalna naloga, mentor K. Šmigoc). (2002). *Od klopotca do vetrne elektrarne*. Osnovna šola Šmarje pri Jelšah.

# Energija IV: Električna, električno delo in električna energija

dr. Mojca Čepič

Univerza v Ljubljani, Pedagoška fakulteta, Oddelek za fiziko in tehniko

S tem prispevkom zaključujem serijo člankov o energiji in komunikaciji v povezavi z njo. Ker pa področje, ki ga imenujemo »elektrika in magnetizem«, vsebuje še nekaj komunikacijskih zanimivosti, se nameravam na kratko posvetiti tudi njim.

Začnimo z besedo »elektrika«. V predavateljske namene pogosto pokukam v Strnadov učbenik Fizika 1 in 2, ki sem ga uporabljala med lastnim študijem in je izšel leta 1978 [1]. Fizika 2 se prične z naslovom ELEKTRIKA in na nekaj več kot 150 straneh pokriva štiri področja: tok, napetost in upor; električno polje; magnetno polje; električno nihanje in elektromagnetno valovanje. Razen v naslovu se beseda »elektrika« ne pojavi nikjer več. Ni je niti na seznamu gesel. Enako je tudi v kasnejših izdajah. Na novo vpeljani pojmi, kot so električni tok, električni naboj, električni krog itd., so fiziku dobro znani in si pod njihovimi imeni natanko predstavljajo, kaj pomenijo. Razlage besede »elektrika« pa ne najdemo. Podobno velja tudi za osnovnošolske in srednješolske učbenike. Beseda »elektrika« se kot pogovorni sinonim za električni tok v smislu »teče elektrika« pojavi v uvodih v poglavje, na nekaj mestih je pogovorno uporabljena tudi kasneje ob obravnavi tokov, kjer lahko najdemo zapis »teče elektrika« namesto »teče električni tok«. Iz analogij z vodnimi tokovi je ohlapno omenjeno, da lahko besedo »elektrika« obravnavamo kot sinonim za »električni naboj«, saj električni tok v fiziki pomeni pretakanje naboja [3–5].

V vsakdanjem življenju je elektrika sinonim za nekaj, kar poganja električne naprave najrazličnejših vrst in/ali nas lahko »strese«. Pogovorno pravimo tudi, da za ta nekaj, torej »elektriko«, plačujemo. Nisem prepričana, da je električni naboj, kot ga razumemo fiziki, mogoče kar enačiti z laičnim razumevanjem »elektrike« kot neke snovi, ki je v hišo pritekla po žicah podobno kot plin po plinski napeljavi, električni aparati so jo porabili in zanjo smo plačali, čeprav tako pojmovanje ponujajo učbeniki [3–5]. Bolj se mi zdi smiselno, da pri pouku fizike pojma »elektrika« sploh ne uporabljamo, da omenimo, kako je uporabljan v vsakdanji govorici in da ga v strokovnem jeziku ni.

Kot fiziki želimo imeti jasne predstave, kaj posamezna poimenovanja pomenijo. Naštejmo najprej fizikalne pojme, ki jih poznamo, o njihovem pomenu pa ne bomo razpravljali, če to ne bo potrebno. Torej: električni naboj  $e$ , električni tok  $I$ , gostota električnega toka  $j$ , električna napetost  $U$ , električni upor oz. električna upornost  $R$ , električno polje oziroma njegova jakost  $E$  in gostota  $D$ , električni dipol  $p_e$  pa še kaj bi lahko našli. K tej zgodbi sodijo tudi jakost  $H$  in gostota  $B$  magnetnega polja pa magnetni pretok  $\phi_m$  in induktivnost  $L$  ... Vektorskih znakov na simbolne oznake količin načrtno nisem pisala. Kaj je vsem tem pojmom oziroma fizikalnim veličinam skupnega? Morda to, da je vsaka od njih povezana s premikajočimi se in/ali z mirujočimi električnimi naboji? Bi morda v fiziki lahko besedo »elektrika« kot nadpomenu uporabljali v tem smislu? Glede na pogostost besede v vsakdanjem besednjaku je verjetno nima smisla popolnoma izključiti iz fizikalnega besednjaka, a kot kaže predhodna analiza, pomen besede v fizikalnem besednjaku ni jasno opredeljen.

V sukanju po področju naletimo še na množico različnih poimenovanj enakih pojmov, naletimo na predpise, ki določajo, kako smemo govoriti o fizikalnih količinah ali, kot je zapovedano in mi še vedno ne gre z jezika, veličinah [2]. Pogosto naletimo na poimenovanja, ki povzročajo težave vpeljavi konsistentne slike dogajanj v električnih krogih in obravnavi energije. Poleg tega se poimenovanja močno razlikujejo od stroke do stroke – npr. elektrotehnik se bo smejal poimenovanju »električni naboj«, zanj obstaja »elektrina«. A tudi fiziki si med seboj nismo enotni, kako poimenovati različne pojme. Naj navedem nekaj poimenovanj, ki jih najdemo v učbenikih. V spodnji tabeli se ne opredeljujem glede uzakonjene ali kake druge pravilnosti, le navajam poimenovanja.

(a)	vir električnega toka/ napetosti	izvir električnega toka
(b)	sestavina električnega vezja (e. v.)	element električnega vezja
(c)	napetost na sestavini e. v.	padec napetosti na ...
(d)	upornik	upor
(e)	upor	upornost
(f)	upornost	specifična upornost
(g)	pretvornik električnega dela v druge oblike energije	porabnik (električne energije)
(h)	električno delo	električna energija

Na levi sem uporabila besednjak, za katerega se spominjam, da sta ga uporabljala prof. Ferbar in prof. Hribar pri predavanjih iz Didaktike fizike. Nekatere izraze sem v težnji po jasnem izražanju in po pogovorih z učitelji predlagala tudi sama. Pa se lotimo dogovorov po vrsti.

Še najmanj se mi zdi problematična mešana raba (a) virov oziroma izvirov električnega toka/napetosti. Osebnost mi je bližji »vir«, ker se mi zdi, da »izvir« bolj poudarja napačno predstavu, da v viru nastajajo električni naboji.

Prof. Ferbar je vztrajal (b), da so žarnica, stikalo, elektromotorček in podobno SESTAVINE električnega vezja in ne ELEMENTI. Potrebo po izključevanju besede »element« je prof. Ferbar utemeljeval z zmedo, ki v glavi mlajšega učenca nastaja, ko se pri različnih predmetih (kemija in fizika) seznanja z novo, a isto besedo, ima pa ta beseda pri vsakem predmetu drug pomen. Mi, izkušeni stari kozli, natanko vemo, kaj imamo v mislih, ko govorimo o elementih vezja, učencem, ki se s temi poimenovanji srečujejo prvič, pa pomaga, če so jim besede pomensko že znane, npr. električni krog sestoji iz naslednjih sestavin ... Delim njegovo mnenje.

Napetost (c) je razlika potencialov med dvema točkama v vezju. Na srednji šoli in kasneje točki, med katerima merimo napetost, pogosto navajamo eksplicitno, kadar pa merimo napetost na sestavini vezja, pa uporabimo enostaven predlog »na«. Napetost na sestavini vezja je lahko pozitivna ali negativna, predznak pa je odvisen od tega, kako smo priključili voltmeter, ali merimo napetost vira ali napetost na drugih sestavinah vezja, za meritev napetosti na sestavini pa je pomembna še smer toka skozi. Samo v zelo enostavnih enozančnih električnih krogih je vir lahko vedno pozitiven, napetost na sestavinah pa vedno negativna. Če je vezje le malo bolj zapleteno, vse napetosti na sestavinah niso nujno »padci napetosti«. Zato menim, da se je treba elektrotehniškemu izrazu »padec napetosti« popolnoma izogniti, saj učenci ob vpeljavi električnih tokov pozitivna in negativna števila ter pravila za računanje z njimi že poznajo. Seveda pa je smiselno ozaveščati, da je potencial točke za sestavino glede na neko izbrano točko v vezju vedno nižji od potenciala glede na isto točko pred sestavino vezja, če »za« in »pred« razumemo v smeri električnega toka skozi to sestavino. Veliko enostavnih eksperimentalnih vaj je na voljo za raziskovanje potencialnih razlik in za utrjevanje konceptov, povezanih z njimi.

Naslednja triada izrazov (d)–(f) je po nepotrebnem uzakonjena [2] bolj zapleteno, kot bi bilo potrebno. Prof. Hribar je poudarjal naslednjo zvezo: UPORNIK (predmet) iz snovi z UPORNOSTJO (lastnost snovi) ... ima UPOR (lastnost predmeta) ... Formalno pravilno je treba poved zapisati takole: UPOR (predmet) iz snovi s SPECIFIČNO UPORNOSTJO (lastnost snovi) ... ima UPORNOST (lastnost predmeta) ... Osebnost mi prva poved zveni enostavneje, lepše in natančneje. Kako so nastala poimenovanja in kdo je pri teh poimenovanjih sodeloval, ne vem. V starejši verziji od [2] je uradno obstajala celo samo »elektrina«, zato je verjetno imela glavno besedo elektrotehnika, vpeljani pa so bili izrazi, ki so v uporabi tam. Slišala pa sem, da so močno želeli poenotiti poimenovanja – upornost, kapacitivnost in induktivnost kot lastnosti predmetov: upora, kondenzatorja in tuljave. Ali je to potrebno ali ne, ne vem, a verjetno glede tega ni

mogoče kaj preveč storiti in moramo uporabljati zapis (d)–(f) v desnem stolpcu, tudi če nas bolita roka in uho.

Posvetimo se še zadnjima (g) in (h). Običajno za sestavine električnih vezij, kot so žarnice, upori (uporniki) in podobno, uporabljamo generično ime »porabniki«. Kaj porabniki porabljajo, da so si zaslužili takšno ime? Električno, vendar, oziroma »bolj strokovno« – električno energijo. Toda kaj je vendar »električna energija«? Energija je lastnost predmetov. Če predmeta ne moremo opredeliti, potem obravnavamo gostoto energije kot energijo na prostorsko enoto – v Bernoullijevi enačbi nastopa gostota kinetične in potencialne energije, prazenemu prostoru, v katerem je električno ali magnetno polje, pa lahko pripišemo gostoto električne in magnetne energije. A električna energija določenega dela prostora, v katerem je električno polje, ni ista »električna energija«, kot jo »porablja porabnik«.

Sestavina vezja prejme namreč električno delo, PRETVORI ga v notranjo energijo (npr. grelec), v svetlobo (npr. LED), v kinetično energijo (npr. mešalnik) ali kombinacijo teh energij (npr. sušilec za lase). Energijsko enačbo iz [6, 7, 8] razširimo še z eno vrsto prenosa energije – z električnim delom  $A_{el}$ .

$$A_{meh} + Q + A_{el} = \Delta W. \quad (1)$$

V enačbi (1) je na levi prek različnih mehanizmov, torej mehanskega dela  $A_{meh}$ , toplote  $Q$  in električnega dela  $A_{el}$  prenesena energija iz različnih predmetov oziroma okolice na predmet na desni, ki se mu je zato spremenila celotna energija za  $\Delta W$ . Predmet (npr. sušilnik za lase) zato težko imenujemo porabnik, saj ničesar ne porablja, še posebej ne energije, temveč je struktura električne naprave takšna, da pretvarja prejeta električno delo v neko drugo obliko energije in potem to energijo prek različnih mehanizmov prenaša naprej v okolico, ko npr. ogreva prostor, kuha kosilo, mesi testo ali stepa smetano.

V tej luči zato predlagam naslednje – pri poučevanju fizike uporabljajmo zgolj in samo pojem »električno delo«, tudi pri obravnavi primerov iz vsakdanjega življenja. Namesto »porabnik električne energije« je morda bolje vpeljati pojem »pretvornik električnega dela«. Pretvornikom in porabnikom se s pazljivo govorico in z dejanskim poimenovanjem sestavin vezij lahko tudi popolnoma izognemo. Zakaj bi moral biti problem abstrakten – kolikšen tok teče skozi porabnik ... če je lahko vprašanje zastavljeno konkretno – kolikšen tok teče skozi likalnik?

[1] Strnad, J. (1978). *Fizika, 2. del: Električna, Optika*. Ljubljana: DZS.

[2] [http://www.mirs.gov.si/fileadmin/um.gov.si/pageuploads/Dokpdf/Dogodki/Razno/Merske\\_enote\\_predstavitev.pdf](http://www.mirs.gov.si/fileadmin/um.gov.si/pageuploads/Dokpdf/Dogodki/Razno/Merske_enote_predstavitev.pdf)

[3] Kuščer, I., Moljk, A. (1991). *Fizika, 3. del: Električna, Atomika*. Ljubljana: DZS.

[4] Kuščer, I., Moljk, A., Kranjc, T., Peternelj, J., Rosina, M., Strnad, J. (2002). *Fizika za srednje šole, III. del*. Ljubljana: DZS.

[5] Hribar, M., Kocijančič, S., Likar, A. in drugi (1997). *Električna, svetloba in snov, Fizika za 3. in 4. letnik srednjih šol*. Ljubljana: Modrijan.

[6] Čepič, M. (2017). Energija in delo, *Fizika v šoli* 22(1), str. 55–59.

[7] Čepič, M. (2017). Energijski zakon in primeri iz vsakdanjega življenja, *Fizika v šoli* 22(2), str. 54–59.

[8] Čepič, M. (2018). Energija III: Toplota, delo in notranja energija. *Fizika v šoli* 23(1), str. 53–60.

# Drugi tvit: Učenje »na pamet«<sup>1</sup>

Peter Prelog

Zadnje leto pred odhodom v penzijo (še v prejšnjem tisočletju) sem ob začetku šolskega leta spoznaval nove prvošolce, pogovarjali smo se o tem, kaj so se pri fiziki učili v osnovni šoli in ob tem so prihajali k tabli in računali lahke naloge. Ko sem ob zapisu  $12,3 \cdot 7 =$  (ali nekaj podobnega) na tabli povabil naslednjega novinca naj dokonča račun, sem doživel presenečenje: tega ne more storiti, ker je doma pozabil računalno! Nič hudega, sem rekel, saj gre tudi »na pamet«: sedem krat tri je ...? Skorajda prezirljivo me je zavrnil: »na pamet« pa mi nismo računali, imeli smo računalno! In bil je zares »karakter« – vztrajal je in ni hotel (morda ni znal?) računati »na pamet«!

Že takrat je izraz »učenje na pamet« pomenil v šolski in javni družbi čevkavih nastopačev nekaj zastarelega, nazadnjaškega, to je bilo »že preseženo«, tako se učijo samo učenci zelo nazadnjaških učiteljev. Tudi v sedanji družbi boste zanesljivo pridobili na ugledu, če kot šolnik poudarjate svoja prizadevanja in zasluge v »borbi proti temu zlu«! Slovenci smo res genialni: mislimo, da bomo dobili moderno šolo tako, da samo nekaj ukinemo (poštevanko, rokopis)! Je pa res tak negativistični postopek najcenejši med modernizacijami – pa še znebimo se zoprnega razmišljanja o tem, kaj bi bilo treba storiti!

V Delu 14. 9. 2018 je na 13. strani članek Simone Drevnšek o šoli na Finskem, kjer so marsikaj ukinili. Članek ima zanimiv zaključek: »... dolgoletni učitelj matematike, ki je kmalu po uvedbi novega sistema zapustil prosveto prepričan, da manjkajočega znanja (učenci) pozneje ne morejo nadoknaditi. Učenci se namreč morajo naučiti brati, pisati in računati. Vse več je primerov, da matematičnih operacij brez kalkulatorja in pametnega telefona ne znajo izvesti.« (Le kaj bi napravil moderni brodolomec na samotnem otoku, ko bi se baterije njegove umetne »pameti« izpraznile: še zapitka v bifeju ne bi znal izračunati!).

Zdaj pa se mi je posvetilo: moj nadebudnež iz prvega odstavka res ni znal množiti brez računalno, naši učitelji so odstranili poštevanko iz šole že več desetletij pred Finci (smo pa res napredni!) – samo (vsem?) srednješolskim profesorjem so to pozabili povedati! (to bi bilo pri nas možno!). In jaz sem že takrat zaostajal za časom in se ni-

sem zavedal imenitnosti dogodka: pred mano je bil prvi »mali maturant« brezpoštevanske osnovne šole!

Ne morem razumeti, kako se lahko celo nekateri učitelji hvalijo, da »ne učijo ničesar na pamet«, da »ne tlačijo v spomin učencem dejstev in podatkov« – ko pa prav to počnemo učitelji že od nekdaj in bodo to počeli tudi naši nasledniki! Tudi najnaprednejši in najmodernejši učni tečaj ob računalnikih, se začne s tlačenjem osnovnih navodil v spomin učencem; »če hočeš to, ... pritisni to ... nikar ne pritisni tega ... razmišljaj tako in ... ne razmišljaj drugače!« S časom se spreminja le vsebina teh nasvetov, »vsiljevanih« navodil. Zadeva pa bo še bolj neprijetna, kot sedaj, saj zaradi hitrega razvoja šole ne bodo več dajale takih navodil za celo življenje, ampak samo za krajši čas – potem se bodo razmere tako spremenile, da bodo vsi (učitelji in učenci) hočeš nočeš zopet postali udeleženci naslednjega učnega tečaja, ti se bodo ponavljali do upokojitve. Ta »šola za odrasle« verjetno ne bo v sklopu splošno izobraževalne šole, ampak pri podjetjih, ustanovah, ... pri katerih bodo »učenci« zaposleni, vsebina »navodil« bo zelo premišljena in racionalna in verjetno posredovana prek manjših ali večjih učnih naprav z računalniki. Toda – dragi »napredniki« in »naprednice«, še vedno si jih bo treba zapomniti, dober del vsebin bodo celo poskušali »učencem« vriniti v podzavest (pri športu je za to potreben »training«!)! Vsi bodo vse znali »na pamet«, pa se še zavedali ne bodo tega! Imenitna bo ta šola bodočnosti – ali ne? Seveda bo zahtevna za učitelje, saj se bodo morali vsake novotarije najprej sami naučiti.

Dejansko nam sedaj izraz »bom odgovoril kar na pamet« pove, da bomo neko nalogo reševali brez tuje pomoči, računalno, priročnikov, ... uporabljali bomo samo lastne možgane in podatke in znanje, ki so v njih, rezultat nam bo zanesljivo povedal, koliko je tega! Pri tem smo najbolj izpostavljeni zaradi možnih napak, izraz pa pogosto pomeni tudi »izračunal bom približno, le ocenil bom!«

Tudi v najnaprednejši šoli, se je – tudi danes – treba nekaterih znanj naučiti tudi »na pamet«, ko npr. šofer pred avtom zagleda pešca, ne bo pogledal v navodilo, kako ustaviti avto, to mora »znati na pamet«! Če učitelj fizike posiljuje osnovnošolce z modrostjo, v čem je v vesolju razlika med temno snovjo in temno energijo, je to za-

<sup>1</sup> Mnenja bralcev ne recenziramo in ne lektoriramo.



pravljanje časa, če pa po končanem šolanju ne bodo (»na pamet« seveda!) vedeli kaj je meter, kilogram, sekunda, ... je za to kriva nemarnost in nesposobnost šole (in učitelja fizike!). Le kakšno je bilo šolanje npr. (nemškega?) pisca navodil za uporabo sobnega kolesa, ki je v (nepotrebnem) »znanstvenem« delu navodila napisal, da »en kilodžul označuje energijo, ki je potrebna, da se 1 kilogram v 1 sekundi dvigne za 1 meter visoko«!



1 Kilojoule bezeichnet die Energie, die man braucht, um 1 kg in 1 Sekunde 1 Meter hoch zu bewegen. Bei man-

Pisec navodil je gotovo šolan človek, ki so mu vsi učitelji fizike v osnovni in srednji šoli dajali pozitivne ocene, čeprav ga niso bili sposobni navaditi niti na uporabo priročnika, saj bi se morali zavedati, da »na pamet« nič ne zna, saj ga tega niso naučili! Isto seveda velja za slovenskega prevajalca besedila (ki se zaradi takih vsebinskih nepomembnosti sploh ni sekiral!) in njegove učitelje. Čvekanje o modernih metodah pouka je eno, končni rezultat večletnega pouka (= nič!) – pa drugo dejstvo, ki bi mislečim moralo vendar nekaj povedati! (Se je pa – enako »izobražen« in sokriv - urednik sicer razkošnih navodil pozabil zavarovati in napisati, da »mnenja piscev navodil ne recenziramo in ne lektoriramo«).

Ko sem sam začel hoditi v šolo, je še bilo učenje »na pamet« (z večkratnim prebiranjem besedila, po možnosti na glas – dokler si vsebine ne zapomnim in jo lahko povem brez branja) čisto običajna, od šolnikov in javnosti priznana učna metoda. Seveda ne prav za vse učne predmete in vsebine, toda ne samo kot npr. priprava za recitacijo Povodnega moža ali za naštevande držav v južni Ameriki, tudi (seveda!) za učenje poštevande in Pitarogovega izreka. Za »naučiti se na pamet« so nekateri učenci bolj, drugi manj nadarjeni, nedvomno pa je to lahko izjemna sposobnost in nadarjenost, ki si jo lahko le želimo, ne pa tako kot sedaj, ko si v šoli (in v javnosti!) nekateri skušajo pridobiti pozornost in priznanje tako, da se norčujejo iz tistih, »ki se učijo na pamet«! Toliko cenjeno učenje tujih jezikov je vendar eno samo učenje tujih besed in stavkov – na pamet! Opazujte na koncertu vrhunskega klavirista, ko odigra cel koncert »na pamet«, to so vendar stotine in tisoči raznih not (in ne samo to!), ali boste trdili, da je butast? Da si je vse note prav zapomnil in jih tudi prav odigral vam lahko potrdi vsak poslušalec – s posluhom seveda, da ne omenjam drugih klaviristov in glasbenih strokovnjakov, ki ga poslušajo, za vsak zgrešen udarec po tipkah bi vedeli! Pa dirigent orkestra, ki klavirista spremlja, ta obvlada »na pamet« ne samo klaviristove note ampak tudi note vseh drugih instrumentov v orkestru! Potem je on menda – po tem splošnem, zelo »strokovnem« mnenju – totalni bedak?!

Spominjam se gledališkega igralca Dolinarja, ki je hodil po šolah in nam pripovedoval (!) literarna dela, ni jih

prebiral, govoril jih je na pamet! Pri gledaliških igralcih to ni nekaj posebnega (včasih so si pri predstavah pomagali tudi s šepetalcem), sposobnost zapomniti si dosti besedila pač spada k njihovemu poklicu. Čustveno ali miselno vsebino pesmi ali proznega besedila lahko poslušalcem posreduješ bolj doživeto, če jo govoriš na pamet in je ne bereš!

Spomnim se tudi sošolke v paralelki, o kateri so govorili (dijaški senzacionalizem!), da zna »na pamet« vsa števila na prvi strani logaritamskih tablic. Kaj ji to nuca, so govorili zavistneži, ko pa jih ne zna uporabiti! Danes o fantu, ki zna povedati prvih sto, dvesto, ... decimalnih števil  $\pi$ , pišejo časopisi z občudovanjem, iz te dijakinje so se norčevali! Dober spomin je za šolarja kvečjemu prednost, tudi najbolj »pametni« učitelji so včasih po vprašanju učencu najbolj zadovoljni šele z odgovorom, ki se popolnoma ujema s tem, kar so povedali pri razlagi (ocena: odlično), zakaj bi potem nadarjeni mnemotehnik ne uporabil svojih sposobnosti na najenostavnejši način?! Le kaj naj odgovori učenec na zahtevo, naj primerja npr. gospodarske tokove v Čilu in Argentini – kot da po spominu vsaj približno oddrda besedilo o tem, ki ga je nekje prebral ali slišal! Velik del osnovnošolskih odličnjakov so le otroci, obdarjeni z dobrim spominom, kljub temu smo jim seveda vsi hvaležni za uspešno učenje. Na žalost se pa nekaterim potem postavi svet na glavo, ko pridejo v srednjo šolo in ne morejo razumeti, zakaj je sedaj drugače, saj niso nič manj delovni in prizadevni kot prej.

Če bi si učenec zapomnil pravilni odgovor, čeprav ni razumel njegovega smisla in ga ne bi znal uporabiti, bi večina učiteljev (tudi danes?) to pozitivno ocenila tudi v srednji šoli – »se je vsaj potrudil ...«, ni za oceno odlično, za zadostno, dobro, pa je to dovolj«! To je popolnoma v skladu z veljavno učno doktrino »pozitivnega pristopa«, itd, itd, ..., prav pri matematiki, fiziki, ... pa s tem le nismo preveč zadovoljni, želimo še razumevanje in sposobnost uporabe novega znanja – zato nerganje o pretiranem učenju na pamet. Vendar pa se mi zdi, da je po večletnem (očitno uspešnem!) prizadevanju proti temu bavbavu danes ta strah nepotreben in povzroča v šoli več škode kot koristi!

Prekomerno kopičenje dejstev (imen, zgodovine, ...) v učni snovi, pretiravanje že v številu učnih predmetov in v obsegu učnih vsebin v učnih načrtih, ki naj bi sililo učenca k učenju »na pamet« – **to pa je nekaj drugega** in je vprašanje, koliko so za to krivi učitelji, saj je ob neobvladljivo obsežni učni snovi tudi njim samim onemogočen uspešen pouk. Med najbolj zahtevnimi nalogami učitelja je gotovo to, da zna iz napihnjene učnega načrta (pa ga ni on napihnil!!) izbrati tiste vsebine, ki bodo za učenca najbolj koristne – kot zaloga znanja (ali kot zaloga za maturo uporabnega znanja?).

**Kaj storiti**, učence vzpodbujati ali karati ob učenju »na pamet«?

Vsakogar, ki se je **nekaj naučil**, na pamet ali drugače, je treba pohvaliti! Tudi tisti, ki »znajo samo na pamet« učitelju omogočijo pogovor o učni snovi, saj jo učenec »zna«, čeprav je morda ne razume, z učenjem (čeprav le na pamet) je prispeval svoj delež k možnosti izmenjave mnenja, pogovora z učiteljem o učni snovi – torej je opravil koristno delo! Učitelj se pa naj potruži in ga poskusi navaditi na drugačno, bolj smiselno učenje, ob katerem bo morda snov lahko lažje razumel! Toda za vsakega je zelo koristen tečaj mnemotehnike, tudi sprav-

ljati podatke v spomin, učiti se »učenja na pamet« je koristno delo!

Za konec: dragi mladi starši! Nikar svojim otročkom ne pokvarite veselja ob učenju »na pamet« besedila kratke pesmice za prvi nastop pred sošolci – ne zmerjajte »butaste« učiteljice, ki je prišla na to »zastarelo idejo«. Skozi igro otrokom – ob svojem vsakdanjem delu - pomagajte pri učenju besedila in se potem iskreno veselite čudeža: doživete »recitacije« tistih nekaj besed!!

## Dodatek

Zadnje čase sem (brezposelni penzionist) iskal možnosti za poenostavljeno šolsko razlago posebne teorije relativnosti, o tem sem poročal tudi ob dveh občnih zborih DMFA. Ali bi današnji srednješolci znali (in hoteli!) odgovoriti na vprašanje:

Pero in Vladka primerjata svoji uri, ki na začetku kažeta enako: 0 – 0! Nato Vladka skoči v raketni avto in oddivja z veliko hitrostjo. Ob hitrem gibanju razmikajoči se uri ne tečeta enako, zato čez nekaj časa Pero ugotovi: »... **odmikam se od Vladke, zato njena ura zaostaja za mojo!**«

Gibajoča se Vladka pa misli drugače: »... ker se hitro **odmikam od Pera – Perova ura zaostaja za mojo**, saj sta najina inercialna sistema enakovredna!«

Katera ura kaže manj, zaostaja? Ali pa zaostajata obe hkrati – prva kaže manj kot druga takrat, ko druga kaže manj kot prva?

Morda je tako skopo besedilo nekoliko prezahtevno? Poskusimo odgovor olajšati z nekaj številkami.

Pero in Vladka primerjata svoji uri, ki na začetku kažeta enako: 0 – 0! Nato Vladka skoči v raketni avto in oddivja z veliko hitrostjo. Ob hitrem gibanju razmikajoči se uri ne tečeta enako, zato čez nekaj časa Pero ugotovi: »**odmikam se od Vladke, njena ura zaostaja za mojo!**« To mu potrdi tudi njegov sodelavec ob cesti, njegova in Perova ura sta sinhronizirani in SEDAJ kažeta enako, 200, Vladka SEDAJ pravkar vozi mimo tega sodelavca in oba na njeni uri vidita 100, na sodelavčevi pa 200!

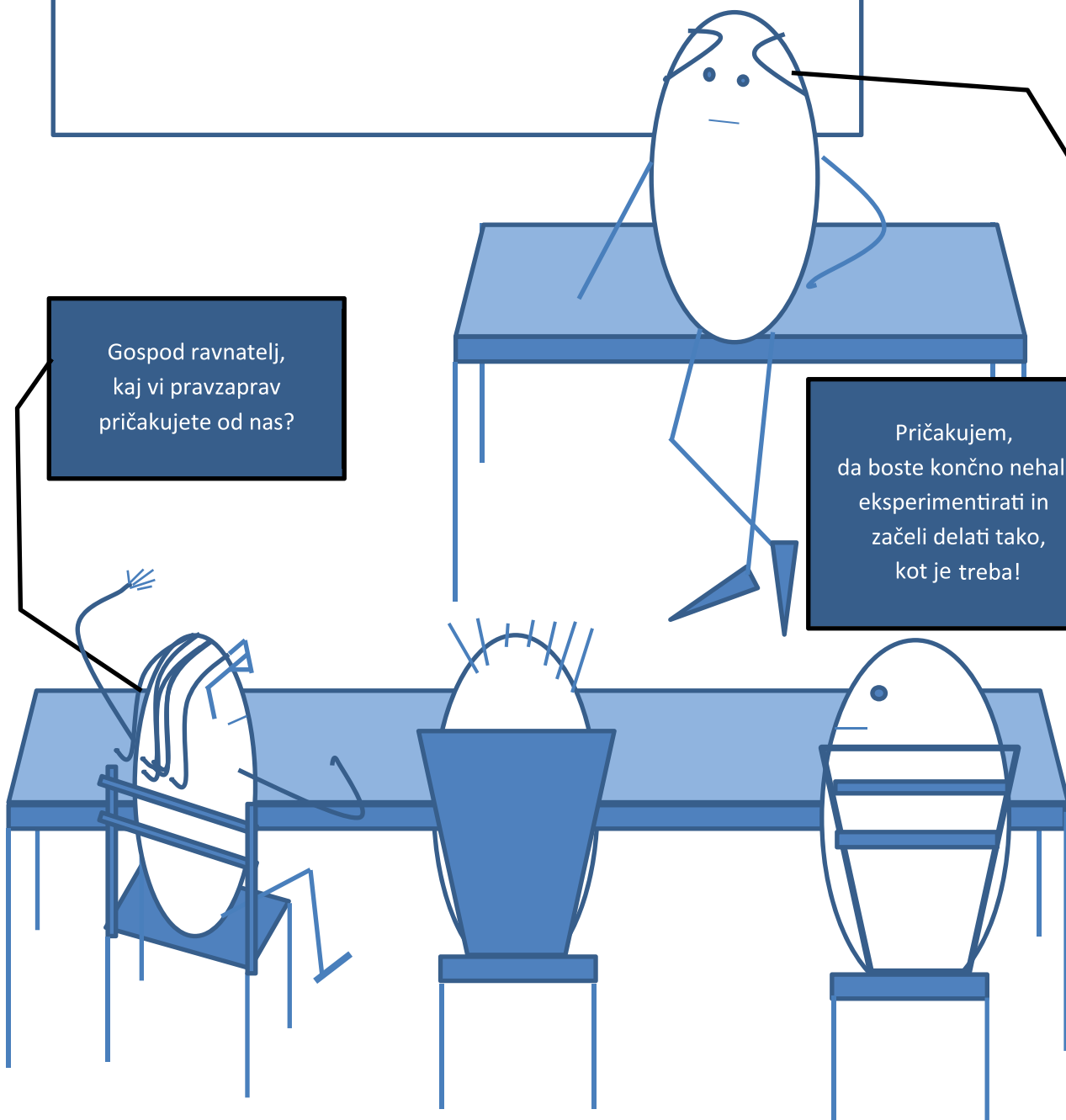
Gibajoča se Vladka pa trmoglavi: »SEDAJ moja ura res kaže 100, ker se pa hitro **odmikam od Pera – Perova ura zaostaja za mojo!**« In potem si tudi Vladka izmisli »sodelavca« na kolesu, ki ga – bojda – na vrvi privezanega vleče za seboj, zato imata enako hitrost in njuni uri kažeta vedno enako, SEDAJ 100, »kolesar« in Pero pa – ko SEDAJ »kolesar« vozi mimo Pera - na svojih urah vidita 100 in ...! (koliko vidita na Perovi uri?)

Torej se Pero in Vladka strinjata, da Vladkina ura SEDAJ kaže 100, toda koliko SEDAJ kaže Perova ura, katera med njima kaže manj, zaostaja? Ali pa zaostajata obe hkrati – prva kaže manj kot druga takrat, ko druga kaže manj kot prva?

Konferenca

Gospod ravnatelj,  
kaj vi pravzaprav  
pričakujete od nas?

Pričakujem,  
da boste končno nehali  
eksperimentirati in  
začeli delati tako,  
kot je treba!



MiSti, april 2019

## Formativno spremljanje v podporo učenju

### Priročnik za učitelje in druge strokovne sodelavce

Priročnik obsega 7 zvezkov, zbranih v mapi,  
cena 12,40 €

- Zakaj formativno spremljati
- Nameni učenja in kriteriji uspešnosti
- Dokazi
- Povratna informacija
- Vprašanja v podporo učenju
- Samovrednotenje, vrstniško vrednotenje
- Formativno spremljanje v vrtcu



### Priročniki po predmetih in področjih

#### Formativno spremljanje kot podpora učencem s POSEBNIMI POTREBAMI

#### Formativno spremljanje na RAZREDNI STOPNJI

#### Formativno spremljanje pri MATEMATIKI

#### Formativno spremljanje pri ZGODOVINI



**Napovedujemo: Formativno spremljanje pri DELU SVETOVALNIH DELAVCEV**

izid  
2019

#### Naročanje:

- po pošti (Zavod RS za šolstvo, Poljanska c. 28, 1000 Ljubljana)
- po faksu (01/3005-199)
- po elektronski pošti (zalozba@zrss.si)
- na spletni strani (<http://www.zrss.si>)

