

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE

Marko Zeman

Diplomski rad

Vakuumska radionica za škole

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Slobodan Milošević

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2016.

Ovom prigodom zahvaljujem mentoru Slobodanu Miloševiću koji mi je pružio ovu priliku te Marijanu Biščanu koji mi je puno pomogao u snalaženju oko eksperimentalnog postava i prezentiranja pokusa. Veliko hvala zaslužuje i Berti Erjavec koji me je ugostio u svome uredu i bio mi uvijek pri ruci voljan odgovoriti na sva moja pitanja.

Rad je izrađen na Institutu za fiziku u Zagrebu.

Sažetak

Nastava fizike posebna je po tome što se pri obradi nastavne jedinice može izvesti pokus koji nam približuje nastavno gradivo. No, za izvod tih pokusa potreban je određeni pribor. Nekada je pribor preskup i ne može ga nabaviti svaka škola. Jedan od ciljeva ovog diplomskog rada je napraviti nekoliko pokusa za koje nam ne treba skupi pribor. Ovi pokusi bazirani su na približavanju i uočavanju vakuuma. Pogodni su za izvođenje na nastavi fizike u osnovnoj i srednjoj školi. Daleko najskuplji dio eksperimentalnog postava je vakuumska sisaljka dok je sav ostali pribor dostupan po niskim cijenama. U ovom diplomskom radu bavio sam se zrakom, odnosno manjkom zraka. Eksperimentalni postav sastoji se od staklenke koja je spojena na vakuumsku sisaljku. U tu staklenku stavljao sam različita tijela i proučavao što se isisavanjem zraka događa u staklenci.

Vacuum workshop for schools

Abstract

Physics lectures are specific in a sense that it is possible to make an experiment which helps in the understanding of what is being taught. However, in order to do the experiments, certain laboratory equipment is needed. Sometimes, the equipment is too expensive, and not affordable for all schools. One of the goals of this diploma thesis is to conceive a few experiments for which the expensive equipment is not needed. These experiments are based on the better understanding of vacuum. They are appropriate for elementary and high school physics lectures. The most expensive part of the setup, by far, is the vacuum pump, while all the other parts can be bought by affordable prices. In this master thesis, the orientation was on the air, in specific, on the lack of air. The experimental setup is consisted of the jar connected to the vacuum pump. In this jar, I have putted in different items, and analysed what happens inside the jar while pumping out the air.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	O vakuumu i vakuumskoj tehnici.....	2
2.1	Povijest vakuumu i vakuumske tehnike.....	2
2.2	O teoriji vakuumu	4
2.3.	Vakuum u školi	8
3	O vakuumskoj radionici	9
3.1	Opis osnovnog eksperimentalnog postava.....	10
4	Izabrani vakuumski pokusi za izvođenje u nastavi fizike	14
4.1	Balon u vakuumu	14
4.2	Vjetar u vakuumu.....	20
4.3	Voda u vakuumu	25
4.4	Zvuk u vakuumu	31
4.5	Uzgon u zraku	35
4.6	Vaganje zraka	40
4.7	Vakuumske hvataljke.....	44
4.8	Slobodni pad	49
4.9	Plazmena kugla	54
5	Zaključak	59

1 Uvod

Ovim diplomskim radom želio bih ukazati na važnost atmosferskog tlaka zraka oko nas te na važnost pojma o vakuumu, tj. prostora u kojem je tlak zraka manji od atmosferskog tlaka. U osnovnoškolskom i srednjoškolskom programu obrazovanja kojeg sam pohađao, atmosferski tlak spominje se rijetko, dok se vakuum skoro i ne spominje. (Osnovnoškolski program iz fizike možete pogledati u [1] i [2]. Za srednjoškolski program pratio sam gimnazijski program [3].) Smatram da se uz odabrane pokuse ovog diplomskog rada može poboljšati nastava fizike i doprinijeti boljem razumijevanju pojmova poput atmosferskog tlaka, vakuuma, gustoće zraka, vjetra, itd. Uz pravu opremu, izvođenje pokusa izrazito je lagano i ne bi smjelo predstavljati nikakav problem čak ni samim učenicima. U nastavku diplomskog rada, saznat ćete što se događa s malo napuhanim balonom, vjetrom, vodom, zvukom, uzgonom, masom zraka, vakuum hvataljkama, s brzinama slobodnog pada različitih tijela te plazmom kada se nalaze u niskom vakuumu.

Ti pokusi i neke ideje preuzete su od Hrvatskog vakuumskeg društva (u daljnjem tekstu HVD). Hrvatsko vakuumsko društvo (HVD) je neprofitabilna udruga koja povezuje ljude i institucije s interesom za vakuumsku znanost, tehniku i primjenu [4]. Ciljevi HVD-a su unapređenje vakuumske znanosti i tehnike u svim njihovim aspektima, podrška i poticaj njihove primjene, kao i podrška i predstavljanje njegovih članova (preko devedeset fizičara, kemičara, strojara i inženjera). Svoje aktivnosti Društvo usmjerava k organiziranju stručnih i tehničkih skupova sa Slovenskim vakuumskim društvom (godišnji bilateralni susret) kao i drugih susreta na međunarodnoj razini. Hrvatsko vakuumsko društvo član je: International Union for Vacuum Science, Technique and Application (IUVSTA) i Hrvatskog inženjerskog saveza (HIS).

U sklopu aktivnosti HVD-a, pokrenut je 2013. godine projekt *Vakuum u osnovnoj i srednjoj školi* (VuOSS). Razvijajući VuOSS, pokuse su izvodili S. Milošević, B. Erjavec, M. Bišćan i Z. Kregar na vakuumskim radionicama HVD-a te na Institutu za Fiziku (IF) u sklopu Otvorenih dana. Te pokuse sam skupio na jednom mjestu, doradio ih, sve fotografirao te sistematizirao.

U suradnji HVD-a i IF-a postavljena je demonstracijska vakuumska radionica namijenjena osnovnim i srednjim školama. Namjera je razviti dostupan *Vakuumski komplet za demonstracijske pokuse* za primjenu u nastavi fizike. Cilj ovog diplomskog rada bila je

metodička razrada odabranih pokusa, a krajnja destinacija i objavljivanje metodičkog priručnika za odabrane pokuse.

2 O vakuumu i vakuumskoj tehnici

Riječ vakuum dolazi od latinske riječi *vacua* što znači prazan, praznina ili prazan prostor [5]. Tri su osnovne veličine koje vežemo uz vakuum: tlak, gustoća i srednji slobodni put. Tlak se mjeri u paskalima ($1\text{ Pa} = 1\text{ Nm}^{-2}$) i milibarima (mbar), a ponekad u torrima (Torr) ($1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$, $1\text{ mbar} = 100\text{ Pa}$, $1\text{ bar} = 750\text{ Torr}$). Gustoća se iskazuje u kilogramima po kubičnom metru (kg/m^3) ili gramima po kubičnom centimetru (g/cm^3), a srednji slobodni put u kilometrima (km) odnosno metrima (m).

Međutim, ne postoji potpuno prazan prostor u prirodi. Ne postoji idealni vakuum. Vakuum je samo djelomično prazan prostor. Primjeri vakuuma su svemirski prostor te međugalaktički prostor koji ima nekoliko atoma vodika po metru kubnom. Slično je i s Karmanovom linijom. To je zamišljena linija koja se nalazi na visini od sto kilometara iznad razine mora, a predstavlja granicu između Zemljine atmosfere i svemirskog prostranstva [6] te na toj visini tlak zraka iznosi 1 Pa. Kada dio zraka izvadimo iz nekog prostora, dobijemo vakuum. U daljnjem tekstu će se pojam vakuum odnositi na prostor u kojemu je tlak zraka manji od atmosferskog tlaka zraka. Vakuum postižemo s puno različitih sisaljki, a neke od njih su mehaničke, sorpcijske, difuzijske, krio te ionske vakuum sisaljke. Vakuum dijelimo na više vrsta prema iznosu tlaka na niski, srednji, visoki i ultra-visoki vakuum.

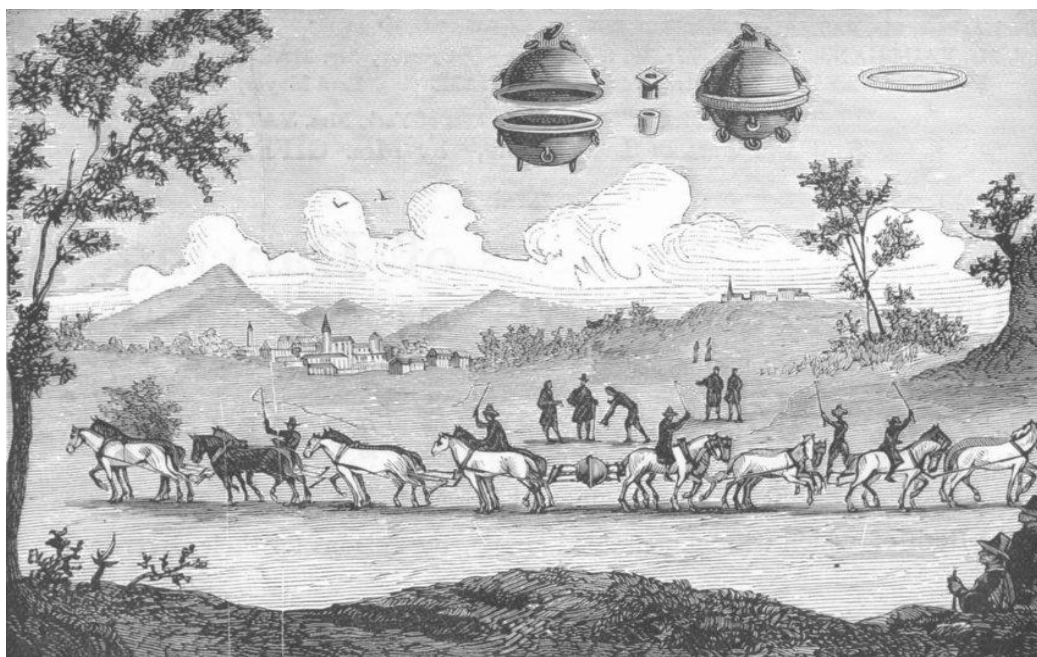
2.1 Povijest vakuuma i vakuumske tehnike

Još od vremena grčkih filozofa Demokrita i Leukipa (5.st. pr. Kr.) raspravljalo se o konceptu vakuuma i postojanju apsolutno praznog prostora. Aristotel (384. – 322. pr. Kr.) je tvrdio kako se priroda boji totalne praznine. Pretpostavio je kako bi ideja praznog prostora dala i gibanje bez otpora, gibanje beskonačnom brzinom. Njegovo mišljenje zadržalo se skoro dvije tisuće godina. Tek su u 17. stoljeću rođene vakuumska fizika i tehnologija.

Galileo Galilei (1564. – 1642.) bio je među prvima koji je izvodio vakuumske eksperimente. Pokušavao je izmjeriti silu potrebnu da napravi vakuum pomoću cilindra i klipa. Galilejev prijatelj i učenik, Evangelista Torricelli (1608. – 1647.), prvi je uspio proizvesti vakuum. Potopio je staklenu šuplju cijev punu žive, zatvorenu s jedne strane, a otvorenu s druge strane, u bazen žive. Demonstrirao je kako je stupac žive uvijek 760 mm iznad razine bazena žive, bez obzira na oblik, duljinu ili kako je nagnuta cijev. Na taj je način prvi izmjerio atmosferski tlak. Blaise Pascal (1623. – 1662.) mjerio je visinu živinim barometrom i značajno doprinio razumijevanju vakuumske fizike. Mjerna jedinica za tlak nazvana je njemu u čast:

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2.$$

U to doba, gradonačelnik grada Magdeburga, Otto von Guericke (1602. – 1686.), modificirao je vodene sisaljke, izumio manometar i prvu zračnu sisaljku, te je prema opažanjima planeta zaključio kako nema otpora u svemiru. Zaključuje da je u svemiru vakuum. 1654. izveo je pokus u kojem je iz dvije polutke isisao zrak te pokazao kako je nemoguće razdvojiti te dvije polutke s dva osmeroprega konja zbog atmosferskog tlaka oko njih (slika 2.1). Postalo je jasno da živimo na dnu ogromnog oceana zraka. Pritisak koji nastaje zbog mase atmosfere jednak je pritisku koji postiže sila od deset njutna kada djeluje na površinu veličine jedan kvadratni centimetar. Odnosno, pritisku koji nastaje zbog sile koju vrši masa od deset tona na površinu veličine jedan kvadratni metar. Taj ogroman tlak na naše tijelo ne osjećamo zato što je isti tlak i unutar našega tijela [7].



Slika 2.1. Pokus s Magdeburškim polutkama (slika preuzeta iz [8])

Mnogo tehničkih izuma, vezanih za vakuum, proizvedeno je u zadnjih sto pedeset godina kao otkriće elektrona 1897., izum cijevi s X-zrakama, izgradnja različitih ubrzivača čestica te izgradnja ogromnih strojeva. Izgradnjom ubrzivača čestica započele su nuklearna fizika i fizika elementarnih čestica. Svi izumi i sofisticirana tehnološka postignuća današnjice bila bi nezamisliva bez visokog vakuuma i njegove tehnologije. Prema tome vakuumska fizika i tehnologija utrle su put za razvoj moderne visoke tehnologije i naše industrijsko društvo. Vakuum je korišten kod velikog broja tehnologija: vakuumiranje hrane, termos boce, žarulje, mikrovalna pećnica, katodne cijevi za televizore, elektronski mikroskop, laser, termalna izolacija, automobilska industrija, prijenos informacija, medicina, hlađenje, svemirsko istraživanje i znanost, poluvodička industrija, vakuumski premazi, vakuumska dizalica, farmacija, kemija, solarna tehnologija, pneumatski transport, tiskarska industrija, drvna industrija, zaštita okoliša, metalna industrija, a ne smijemo zaboraviti da se sve visoke tehnologije temelje na vakuumskim tehnologijama. Vakuumska komora je neizostavan dio istraživačkih postrojenja jer omogućuje kontroliranje uvjeta za različite uzorke koji se ispituju putem različitih interakcija.

2.2 O teoriji vakuuma

Model idealnog plina jako je koristan u opisivanju problema u vakuumskoj fizici. Model pretpostavlja da su molekule plina kuglice zanemarivog obujma s obzirom na obujam posude u kojoj se plin nalazi. Međumolekulske sile su također zanemarive, a međusobni sudari molekula i sudari molekula sa stijenkom posude su savršeno elastični. Stanje plina opisujemo tlakom p , obujmom V i apsolutnom temperaturom T . Jednadžba stanja plina glasi:

$$\frac{pV}{T} = \text{konstanta za idealan plin (uz stalan broj atoma ili molekula)}.$$

Za n molova plina dobivamo $pV = nRT$, gdje je n količina, množina plina, a R je plinska konstanta i iznosi 8.314 J/molK.

Za realne plinove uvodimo korekcije te dobivamo novu relaciju kojom opisujemo stanje plina:

$$\left(p + \frac{an^2}{V}\right) \cdot (V - nb) = nRT.$$

Konstante a i b su empirijske konstante i za različite plinove imaju različite vrijednosti. Korekcija $\frac{an^2}{V}$ računa međumolekulske sile te povećava ukupan tlak. Korekcija nb računa obujam molekula. Ukupan obujam za gibanje molekula se tada smanji za taj obujam [9].

Kada kažemo tlak p mislimo na silu F kojom molekule plina djeluju na stjenke posude površine A u kojoj se nalaze:

$$p = \frac{F}{A} \quad \left[\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right].$$

Tlak također možemo izraziti kao visinu stupca fluida h i gustoće ρ pod stalnom akceleracijom g :

$$p = \rho gh.$$

Isto tako možemo izraziti pomoću broja molekula N , Boltzmannove konstante k i apsolutne temperature T :

$$p = \frac{NkT}{V}.$$

Vidimo da tlak ne ovisi o vrsti plina. Mjerne jedinice i faktori pretvorbe nalaze se u tablici 2.2.1.

Tablica 2.2.1. Mjerne jedinice i faktori pretvorbe tlaka

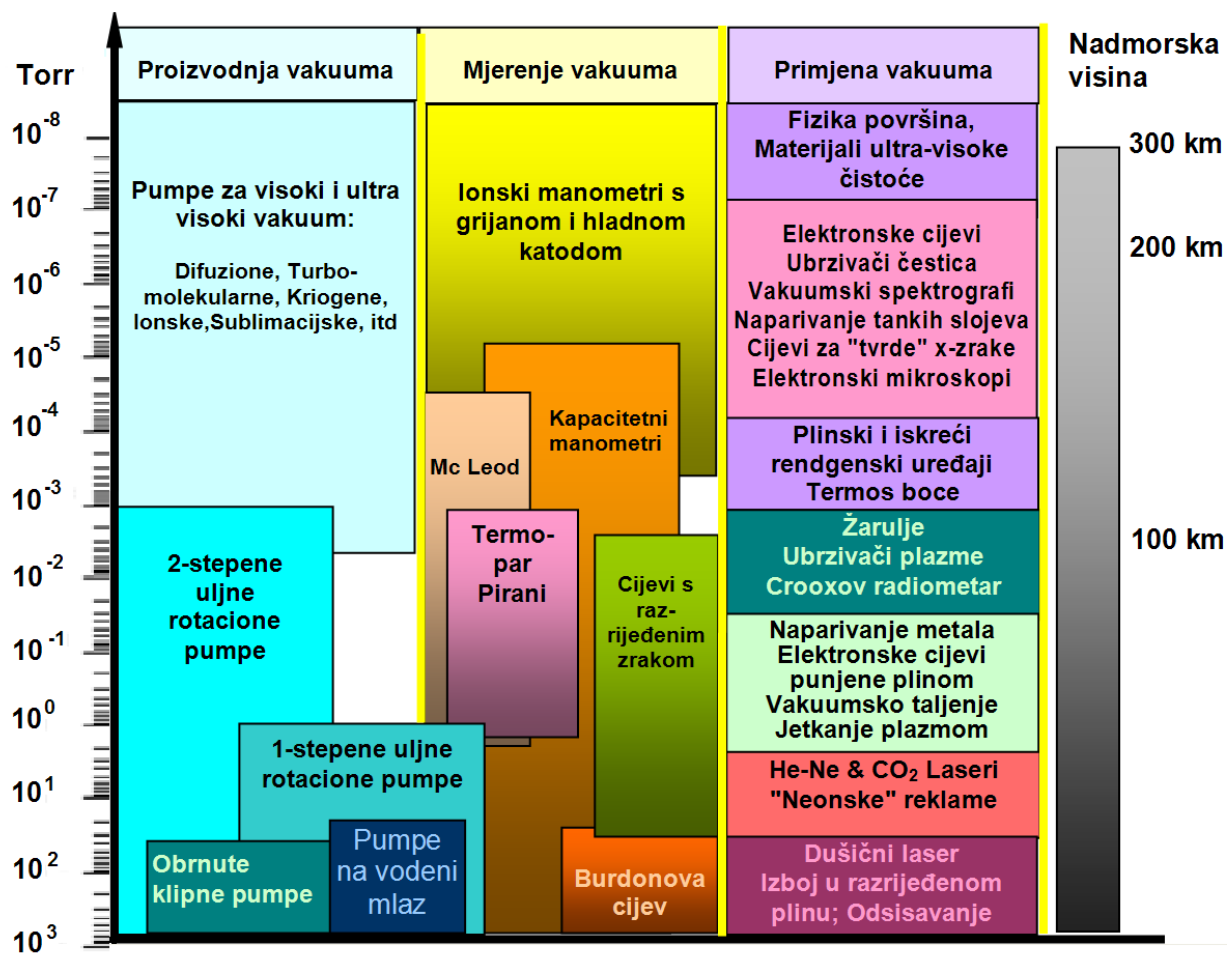
	Pa	mbar	Torr (mmHg pri 0°C)	Atmosferski tlak (atm)
Pa	1	0.01	0.0075	$9.87 \cdot 10^{-6}$
mbar	100	1	0.75	$9.87 \cdot 10^{-4}$
Torr	133	1.33	1	$1.32 \cdot 10^{-3}$
atm	101325	1013.25	760	1

Prema gustoći čestica u zadanom obujmu, klasificiramo različite stupnjeve vakuum (tablica 2.2.2). Isto tako, za različite stupnjeve vakuum trebamo različite mjerne instrumente te vakuumske sisaljke koje mogu postići takav vakuum (slika 2.2.1).

Tablica 2.2.2. Stupnjevi vakuumu, broj molekula te srednji slobodni put molekula za dane stupnjeve vakuumu (Podatci su preuzeti iz [10].)

Stupnjevi vakuuma	Vrijednost tlaka				Broj molekula za minimalne vrijednosti tlaka u 1 cm^3	Srednji slobodni put molekula za minimalne vrijednosti tlaka
	Pa		mbar			
	min	max	min	max		
Niski	10^3	10^5	1	10^3	10^{16}	10^{-4} m
Srednji	10^{-1}	10^3	10^{-3}	1	10^{13}	10^{-1} m
Visoki	10^{-5}	10^{-1}	10^{-7}	10^{-3}	10^9	1 km
Ultra visoki	10^{-10}	10^{-5}	10^{-12}	10^{-7}	10^4	10^5 km
Ekstremno visoki	$\leq 10^{-10}$		$\leq 10^{-12}$		$< 10^4$	$> 10^5\text{ km}$

Najveći tlak izmjeren je u laboratoriju u CERN-u tijekom frontalnog sudara dviju čestica te iznosi $p = 10^{30}$ bar. Procijenjeno je kako je taj tlak pet puta veći nego tlak prije eksplozije supernove. S druge strane, najniži tlak je također izmjeren u CERN-u, a iznosi $p = 10^{-17}$ bar. Kod tog tlaka nalazi se samo par stotina čestica po cm^3 . Usporedbe radi, pri atmosferskom tlaku broj čestica po cm^3 iznosi $3 \cdot 10^{19}$. Vidimo kako je između najvišeg i najnižeg tlaka 47 redova veličine. Ali i najveći vakuum, tj. najmanji tlak, dobiven u laboratoriju na Zemlji, ogroman je prema gotovo ničemu u svemiru. U međuzvjezdanom prostoru Mliječne staze ima oko $5 \cdot 10^4$ čestica po m^3 . Između galaksija nalazi se samo nekoliko čestica po m^3 . U tablici 2.2.3 vidimo gustoće nekih tvari.



Slika 2.2.1. Različite vakuumske sisaljke, mjerni instrumenti te neke primjene vakuuma (Slika je preuzeta od HVD-a.)

Tablica 2.2.3. Tablica univerzalne gustoće nekih tvari (Tablica je preuzeta od HVD-a.)

Univerzalna tablica gustoće	g/cm ³
Veliki prasak	beskonačno
Crna rupa	10 ²⁷
Neutronska zvijezda	10 ¹⁴
Bijeli patuljak	10 ⁶
Središte Sunca	158
Zlato	19,3
Željezo	7,9
Sunce (prosječna gustoća)	1,4
Voda (kod 4 °C)	1
Zrak	10 ⁻³
Vakuum u laboratoriju	10 ⁻¹⁸
Međuzvjezdani prostor	10 ⁻²⁴
Svemir (prosječna gustoća)	10 ⁻³⁰

2.3. *Vakuum u školi*

Neke nastavne jedinice u osnovnoj školi možemo dodatno obogatiti pojmom vakuuma. U 7. razredu na nastavnoj jedinici *Građa tvari* možemo razgovarati o tome što se nalazi između atoma, a možemo temu povezati i s gradivom petog razreda iz geografije *Zemlja u Svemiru* i govoriti o tome što se nalazi između planeta. Na kemiji u 7. razredu, na nastavnoj jedinici *Zrak i glavni sastojci zraka*, možemo učenike upoznati kako se tlak zraka smanjuje s visinom (slika 4.1.4.). U fizici u 7. razredu imamo više tema koje možemo obogatiti. Na nastavnoj jedinici *Tlak* možemo spomenuti vakuum, prostor u kojem je tlak niži od atmosferskog tlaka te upoznati učenike s visokim i niskim tlakom zraka, povezati to s gradivom petog razreda geografije *Vrijeme i klima*, gdje uče o vjetru, ciklonama i anticiklonama. Na nastavnoj jedinici *Gustoća* možemo upoznati učenike s ekstremnim gustoćama; vrlo malim, ali i vrlo velikim. U 8. razredu u nastavi kemije na nastavnoj jedinici *Fosilna goriva* možemo učenike upoznati s vakuumskom destilacijom. U fizici u 8. razredu na nastavnoj jedinici *Jednoliko ubrzano gibanje* možemo pokazati učenicima slobodni pad u vakuumu, ako imamo Newtonovu cijev (vidi pokus 4.8 Slobodni pad). Na nastavnoj jedinici *Zvuk* možemo pokazati kako se zvuk ne širi vakuumom (vidi pokus 4.4 Zvuk u vakuumu). Na nastavnoj jedinici *Rasprostiranje svjetlosti* možemo pokazati kako se svjetlost širi kroz vakuum, a govoriti o najvećoj brzini, brzini svjetlosti. Na nastavnoj jedinici *Električni vodiči i izolatori* možemo učenike upoznati s radom žarulje te važnosti vakuuma u žarulji. U srednjoj školi možemo obraditi sve te iste nastavne jedinice te još i neke nove. Na nastavi fizike u 1. razredu na nastavnoj jedinici *Uzgon* možemo pokazati pokus kako se sila uzgona smanjuje dok smanjujemo tlak zraka (4.5 Uzgon u zraku). U 2. razredu, na nastavnoj jedinici *Promjena agregatnih stanja*, možemo pokazati pokus s vodom u vakuumu (4.3 Voda u vakuumu). Na nastavnoj jedinici *Plinski zakoni* možemo pokazati kako se promjenom tlaka zraka mijenja i obujam zraka pri konstantnoj temperaturi i broju čestica (4.1 Balon u vakuumu). Na nastavnoj jedinici *Elektromagnetizam* možemo upoznati učenike s katodnom cijevi i principu rada te važnosti vakuuma u njoj. U 4. razredu na nastavnoj jedinici *Poluvodiči* možemo upoznati učenike s vakuumskom diodom.

To su samo neke ideje koje ukazuju na to kako bi se školski kurikulum fizike mogao upotpuniti te povezati s drugim predmetima, npr. kemijom i geografijom.

3 O vakuumskoj radionici

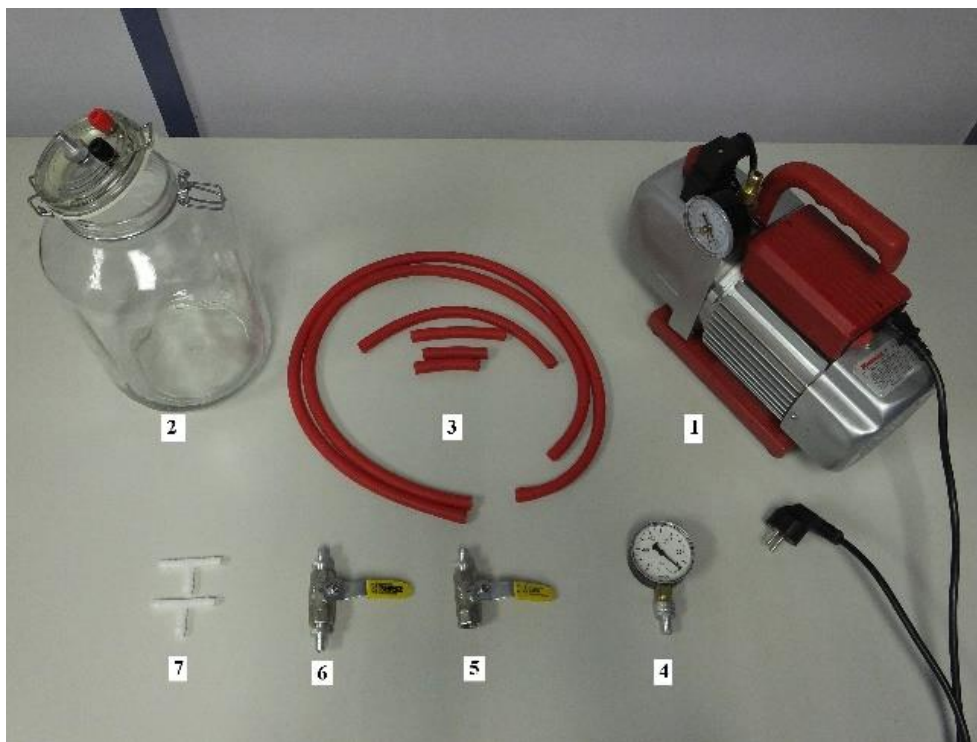
Ovo poglavlje namijenjeno je prije svega nastavnicima. U sljedećem poglavlju su detaljnije objašnjeni svi pokusi. Kod svakog pokusa nailazimo na istu strukturu:

- *Naslov*
- *Motivacija za pokus*
- *Opis pokusa.* Obuhvaća preporuku kada je najbolje izvesti pokus, kratak opis samog pokusa, sliku eksperimentalnoga postava te vezu s nastavnom jedinicom.
- *Pribor.* Obuhvaća nabrojani pribor koji nam je potreban za taj pokus.
- *Izvođenje pokusa.* Opisan je postupak izvođenja pokusa.
- *Smjernice za vođenje pokusa.* To su uglavnom pitanja koja se mogu postavljati učenicima tijekom izvođenja pokusa i smjernice kada je najbolje skicirati pokus ili zapisati pretpostavku. Pitanja nam služe za aktivno sudjelovanje učenika tijekom izvođenja pokusa. Nakon pitanja diskutirao sam što želim s tim pitanjem postići i kamo to sve skupa vodi. Pitanja i smjernice postavljene su za osnovnoškolce, dok su za srednjoškolce naznačena dodatna pitanja i smjernice.
- *Za one koji želi znati više.* Taj naslov nije u svim pokusima. Možemo zadati učenicima projekt koji oni mogu sami napraviti. To može biti plakat, referat, ili nešto treće. Bitno je da učenici uoče poveznicu s nastavnom jedinicom te pokusom koji smo izveli.

Između mnoštva pokusa koji su pogodni za izvođenje u sklopu vakuumске radionice, zadržali smo se na njih nekoliko. Svi se izvode frontalno. Nastavnik demonstracijski izvodi pokus pred učenicima. Opisuje pojedine dijelove eksperimentalnog postava i govori što će dalje napraviti te ih traži predviđanja rezultata pokusa. Pokusi su bitni u nastavi fizike zato što omogućavaju stjecanje direktnog iskustva o fizikalnim pojavama. Upotpunjuju nastavu i čine ju zanimljivijom. Približavaju sami karakter fizike koja ja eksperimentalna znanost. Pokusi motiviraju učenike te omogućavaju testiranje učeničkih predviđanja, a time i korigiranje njihovog zaključivanja. Prema ulozi, pokuse dijelimo na opservacijske, istraživačke i aplikacijske. Opservacijski pokus služi nam za opažanje, upoznavanje te za skupljanje informacija o novoj pojavi. Tražimo pravilnosti i pokušavamo objasniti pojavu. Izvodi se na početku nastavne jedinice odnosno za otvaranje problema i kao temelj za uvođenje novog koncepta. Istraživački pokus služi nam za testiranje hipoteza te za

istraživanje međuovisnosti varijabli koje utječu na promatranu pojavu. Izvodi se u fazi konstrukcije modela nakon što su učenici stvorili neke hipoteze. Aplikacijski pokus služi nam za primjenu znanja pri rješavanju novih problema. Izvodi se kada učenici dobro barataju novim konceptima. Osnovni eksperimentalni postav za sve vježbe je isti, no kod nekih vježbi imamo još i dodatni pribor. Na slici 3.1.1. vidimo pribor osnovnog eksperimentalnog postava odabranih pokusa. Na slici 3.1.2. vidimo kako trebamo spojiti osnovni eksperimentalni postav.

3.1 Opis osnovnog eksperimentalnog postava



Slika 3.1.1. Pribor osnovnog eksperimentalnog postava: 1. vakuumska sisaljka, 2. staklenka, 3. gumene cijevi, 4. manometar, 5. ventil za puštanje zraka u staklenku, 6. ventil za zatvaranje vakuumske sisaljke te 7. dva plastična bijela T-komada

Pribor koji smo koristili: rotacijska vakuumska sisaljka kapaciteta $120 \text{ m}^3/\text{h}$ kakva se koristi npr. kod servisa hladnjaka (cijena oko 2700 kuna) najveće brzine sisanja 125 L/min ; staklenka od pet litara koja se koristi za spremanje zimnice (mogu se naći staklenke različitih oblika i volumena); gumene cijevi vanjskog promjera trinaest milimetara, debljina stjenki dva milimetra, koje se inače koriste za pretakanje vina; ventili su kuglasti plinski ventili, unutarnjeg promjera deset milimetara, za koje su u radionici Instituta za fiziku

napravljeni posebni aluminijski nastavci kako bi se na njih mogle nataknuti gumene cijevi. Manometri su također nabavljeni u istim trgovinama kao i ventili. Plastične bijele spojnice su vanjskih promjera deset milimetara. Na staklenom poklopcu napravljene su rupe promjera osam milimetara pomoću svrdla za bušenje stakla. Za provođenje električnih kontakata korištene su klasične „boksne“ i brtvila vanjskog promjera šest milimetara. Vakuumski spoj izveden je ili lijepljenjem plastičnih spojnica ili od izrađenih nastavaka i gumenih brtvila izrađenih u radionici.



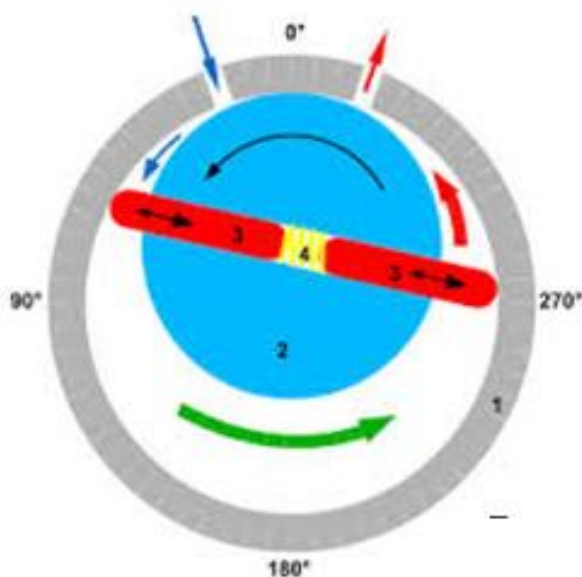
Slika 3.1.2. Spojeni osnovni eksperimentalni postav

Osnovni eksperimentalni postav spojimo kao na slici 3.1.2. Potrebno je pažljivo spajati cijevi na vakuumsku sisaljku i staklenku kako se kontakti ne bi uništili. Za rad vakuumske sisaljke nije dobro da se ona više puta u kratkom vremenu uključuje i isključuje, pa nam ventil prema vakuumskoj sisaljci služi za njezino zatvaranje bez isključenja, odnosno kako nam ne bi više isisavala zrak iz staklenke. Dodatni ventil nam služi za puštanje zraka natrag u staklenku.

Napomena: *Ta dva ventila ne smiju biti otvorena nikada u isto vrijeme kada je vakuumska sisaljka uključena.*

Prije uključivanja vakuumske sisaljke obavezno treba provjeriti jesu li oba ventila zatvorena. Ako nisu, potrebno ih je zatvoriti. Manometar nam pokazuje koliki je tlak zraka u staklenki. Na vanjskoj strani poklopca staklenke imamo još dva vodiča na koje spojimo adapter za ventilator kod vježbe 4.3.2 *Vjetar u vakuumu*. Na unutarnjoj strani poklopca imamo vodiče na koje spojimo ventilator. Za vježbu 4.3.8 *Slobodni pad* imamo Newtonovu cijev umjesto staklenke, dok za vježbu 4.3.9 *Plazmena kugla* imamo plazmenu kuglu umjesto staklenke.

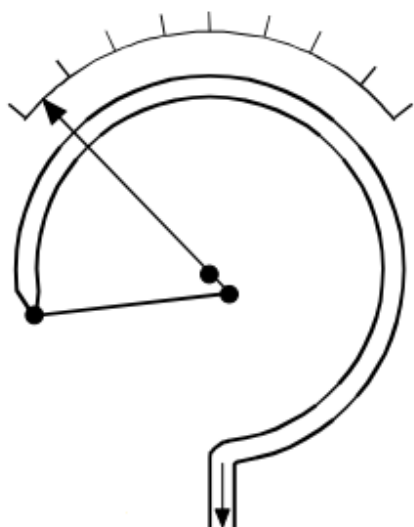
Vakuumska sisaljka s rotirajućim lopaticama je sisaljka koju koristimo u ovim pokusima za postizanje vakuuma. Sastoji se od kućišta u kojemu se nalaze stator, rotor i lopatice s oprugom (slika 3.1.3). Rotor s lopaticama dijeli radnu komoru na dva dijela različitog obujma. Kako se rotor okreće tako plin ulazi u komoru sve dok ga druga lopatica ne zatvori. Tada je zatvoreni plin komprimiran sve dok se ne otvori ventil. Kada se ventil otvori, plin izađe van, a malo ulja uđe u komoru i tako sve podmazuje. Ulje se nalazi oko statora u kućištu i ima više funkcija: podmazuje sve dijelove koji se gibaju, ispunjava prostor oko statora te regulira temperaturu radne komore.



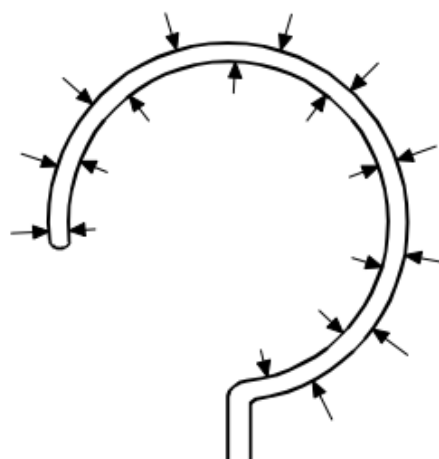
Slika 3.1.3. Dijelovi rotacijske vakuumske sisaljke koji se nalaze u kućištu: 1 stator, 2 rotor, 3 lopatice i 4 opruga

U pokusima sam koristio i manometar s Bourdonovom cijevi. Bourdonova cijev (slika 3.1.4.) je zakrivljena šuplja cijev sa zatvorenim jednim krajem. Drugi kraj je otvoren i spojen je s dijelom u kojemu mjerimo tlak. Razlika tlakova između okoline cijevi i

unutrašnjosti cijevi izaziva silu koja djeluje na stjenke cijevi (slika 3.1.5.). Stjenka se tada savija ovisno o razlici tlakova. Savijanje transformiramo polugom do kazaljke (slika 3.1.6.). Takav način mjerenja tlaka je robustan i služi za mjerenje tlaka većeg od atmosferskog pa do srednjeg vakuuma, otprilike do 10 milibara. Točnost nije velika pa zato nije pogodan za precizna mjerenja.

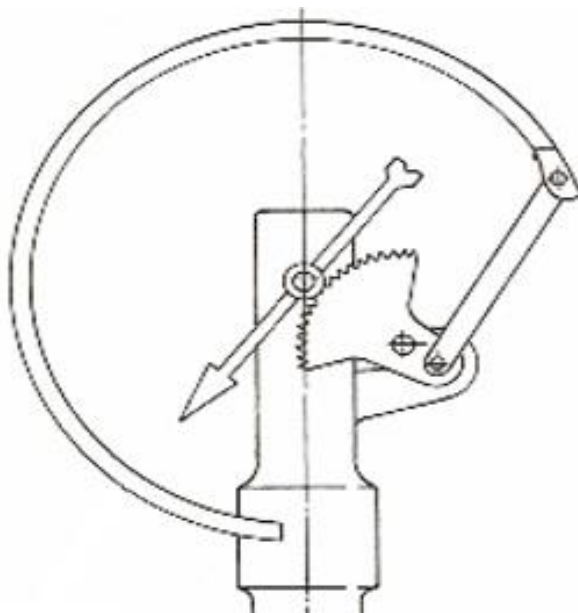


Slika 3.1.4. Princip Bourdonove cijevi



Slika 3.1.5. Sila na Bourdonovu cijev

Slike su preuzete iz [11].



Slika 3.1.6. Prikaz poluge u Bourdonovoj cijevi (Slika je preuzeta od HVD-a.)

4 Izabrani vakuumski pokusi za izvođenje u nastavi fizike

4.1 Balon u vakuumu

MOTIVACIJA ZA POKUS:

Kojim pokusom bismo pokazali da zrak tlači tijela koja okružuje ili ispunjava? Što bi se dogodilo ako zrak ne bi tlačio tijela koja okružuje? Možemo li napuhati balon, a da ga pritom ne odvežemo? Saslušamo prijedloge i predložimo ovaj način ako ga se nitko od učenika ne sjeti.

OPIS POKUSA:

Ovaj opservacijski pokus pogodan je za obradu nastavne jedinice *Atmosferski tlak* što pripada u izborni sadržaj nakon obrađene teme *Tlak* u nastavi fizike u sedmom razredu osnovne škole. U srednjim školama atmosferski je tlak obavezna tema u prvom razredu. Pokus izvodimo na početku sata za uvođenje nove pojave, atmosferski tlak. Pokus je također pogodan za demonstraciju izotermne promjene stanja plina, što je u programu drugog razreda srednjih škola. No tada je taj pokus aplikacijski i izvodi se kada učenici dosta dobro barataju Boyle-Mariotteovim zakonom kako bi mogli primijeniti naučeno.

„Živimo na dnu zračnog oceana“, rekao je Torricelli u 17. stoljeću. Zrak, koji nas okružuje, tlači sva tijela. Taj učinak ne opažamo sve dok ne maknemo zrak oko nas. Pokusom pokazujemo kako zrak tlači sva tijela koja okružuje.



Slika 4.1.1. Eksperimentalni postav za vježbu balon u vakuumu



Slika 4.1.2. Balon u staklenci prije vakuumiranja



Slika 4.1.3. Balon u staklenci nakon vakuumiranja

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, staklenka, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada i balon (mogu se još koristiti: gumena rukavica za pranje suđa, paket vakuumiranog kikirikija, pjena za brijanje, sljezovi kolačići...).

IZVOĐENJE POKUSA:

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.1.1., možemo staviti malo napuhani balon u staklenku (slika 4.1.2) te je zatvoriti. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz staklenke pa se tlak zraka smanjuje u njoj. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u staklenci. Tlak zraka u napuhanom balonu malo je veći od tlaka zraka oko njega zbog dodatnog tlaka od stjenki balona. Tlak zraka u staklenci se smanjuje što znači da se i tlak zraka u balonu smanjuje. Na račun smanjenja tlaka zraka u balonu, zraku u balonu se poveća obujam. Pritom je temperatura zraka stalna. To nam kaže Boyle-Mariotteov zakon. Umnožak tlaka i obujma zraka je konstantan unutar balona pod pretpostavkom stalne temperature. Za dvadesetak sekundi balon ispuni sav prazan prostor staklenke (slika 4.1.3) pa možemo zatvoriti ventil

prema sisaljci. Tlak u staklenci je sada jako malen i iznosi četrdesetak milibara. Toliko iznosi tlak na visini od dvadesetak kilometara na kojoj lete nadzvučni zrakoplovi (slika 4.1.4). Sada možemo pustiti zrak natrag u staklenku. Polako otvorimo drugi ventil. Vraćanjem zraka u staklenku povećava se tlak zraka u staklenci pa i tlak zraka u balonu. Pritom se balonu smanjuje obujam sve do početne vrijednosti kako nam govori Boyle-Mariotteov zakon. Isti, ali spektakularniji, efekt postiže se s pjenastim tvarima, kao što su pjena za brijanje i sljezovi kolačići, ali i gumenom rukavicom za pranje suđa. Pokus se može ponoviti više puta. Prilikom korištenja pjenastih tvari staklenka se uprlja nakon brzog upuštanja zraka u staklenku. Preporuča se počistiti staklenku prije novog izvođenja pokusa. Naravno, samo ako imate dovoljno vremena. Na ovaj je način taj pokus interesantniji i učenicima će duže ostati u sjećanju. Ne zaboravite na kraju isključiti vakuumsku sisaljku.

Napomena: *Oprez! Ako je loša kvaliteta balona, veća je vjerojatnost da balon pukne tijekom pokusa.*

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke:

1. Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju.

U staklenci se nalaze balon i zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci, ali i u balonu. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi.

2. Što mislite da će se dogoditi s balonom u staklenci kada uključimo sisaljku?

Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku.

3. Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključenja sisaljke.

Vidljivo je da se obujam balona povećao i da se tlak u staklenci smanjio, što se očitava na manometru. Nakon što se balonu prestane povećavati obujam, možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Obraćamo pozornost na kazaljku manometra. Potvrdili smo pretpostavku o opadanju tlaka u staklenci i balonu te povećanju obujma balona. Pokazali smo da zrak tlači

tijela koja okružuje. Usput smo napuhnuli balon, a da ga pritom nismo odvezali, što je rješenje problema sa samog početka.

4. Što mislite zašto se povećava obujam balona nakon uključenja sisaljke?

Zbog povećanja obujma mnogi će reći da se tlak u balonu povećao, jer iz iskustva znaju da pri napuhavanju balona upuhuju zrak te povećavaju tlak i obujam u balonu. Nije uopće jasno da se zapravo tlak zraka u balonu smanjio, a balon je povećao svoj obujam. Treba od učenika tražiti da obrazlože kako se tlak može povećati – ako nema zagrijavanja i dodavanja zraka u balon.

Tlak zraka u balonu malo je veći od tlaka zraka okoline balona. Tlak na balon nastaje zbog sile kojom djeluju čestice zraka koje se nalaze sa svih strana balona. Te čestice zraka lupaju u balon i zbog tog djelovanja nastaje tlak. Kada upalimo sisaljku i maknemo dio čestica, one manje lupaju u balon. Vanjska sila na balon se smanjila, a sila unutar balona je ostala ista pa se balon može proširiti. Balonu se poveća obujam. Kada se balonu poveća obujam, a broj čestica zraka ostane isti u njemu, to znači da čestice zraka imaju više mjesta za gibanje pa se rjeđe sudaraju i tlak se smanji. Temperatura zraka u balonu se ne mijenja.

Za srednju školu: Kojim zakonom možemo opisati ovakvo ponašanje balona?

Boyle-Mariotteov zakon opisuje ovakvo ponašanje balona.

5. Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku?

Tlak zraka u staklenci raste na početnu vrijednost. Vidimo na manometru pomicanje kazaljke te opet možemo očitati konačnu vrijednost tlaka. Balon će se smanjiti na početni obujam, a temperatura zraka u balonu ostaje ista.

6. Zašto?

Kada pustimo zrak natrag u staklenku, tlak zraka u staklenci se povećava. Poveća se i vanjska sila na balon. U staklenci se nalazi sve veći broj čestica koje djeluju silom na balon. Nakon što se izjednače vanjska i unutarnja sila balona, balon poprima početni oblik.

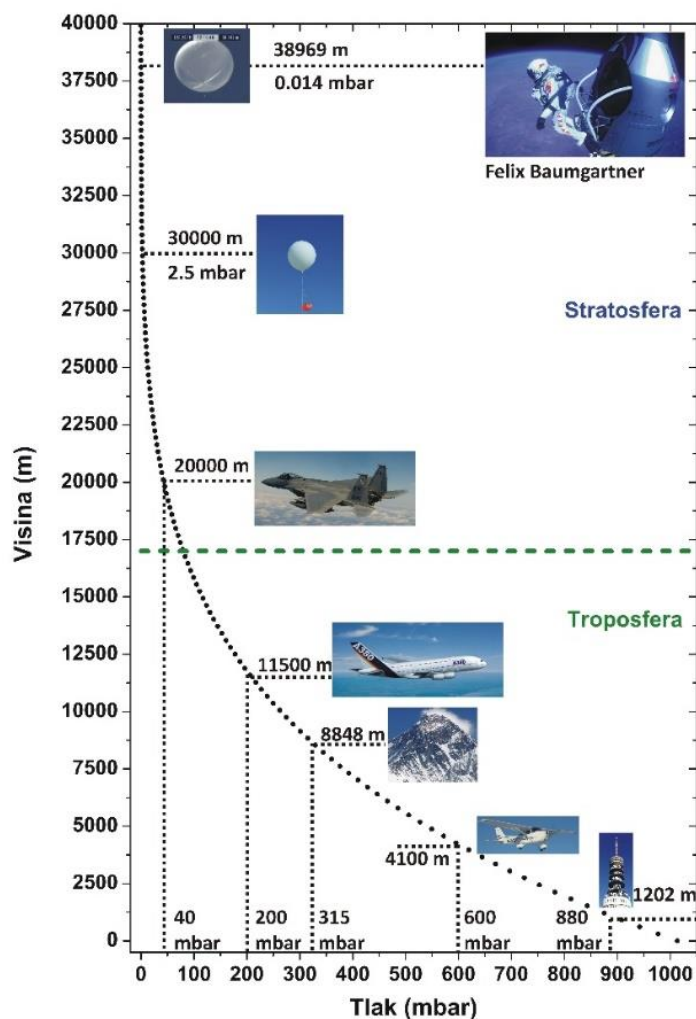
Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

ZA ONE UČENIKE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE:

Aplikacijski pokus

Felix Baumgartner je 14. listopada 2012. izveo skok iz balona s ruba svemira. Prilikom leta u stratosferu veličina balona se značajno povećavala. Možete zadati učenicima da na internetu potraže fizikalne podatke pomoću kojih mogu matematički objasniti promjenu veličine balona tijekom leta te neka prezentiraju rezultate istraživanja. Svakako bi bilo dobro pokazati snimku leta. Također se baloni puno upotrebljavaju u meteorološke svrhe za slanje sonde u atmosferu. Pa se može zadati neki projekt i na tu temu. Projekt mogu raditi učenici pojedinačno ili grupno.

Kako je balon išao sve više, tako je tlak zraka oko balona bio sve manji (slika 4.1.4). To znači da se i u balonu tlak zraka smanjivao dok se je obujam balona povećavao. S visinom dolazi do značajnog smanjivanja temperature pa se ne može proces objašnjavati s izotermnom promjenom stanja plina, već s općom jednačbom stanja plina $pV = nRT$.



Slika 4.1.4. Graf opadanja tlaka zraka s visinom (Slika je preuzeta od HVD-a.).

4.2 Vjetar u vakuumu

MOTIVACIJA ZA POKUS:

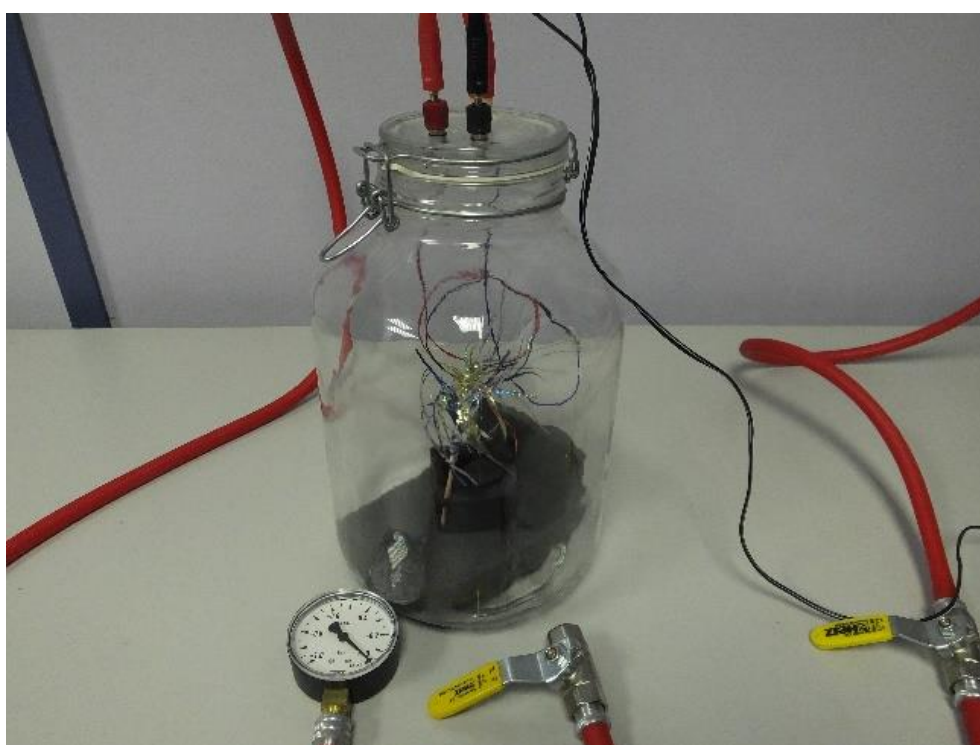
Može li zastava vijoriti na Mjesecu? Puše li vjetar u svemiru? Zašto na Zemlji puše vjetar i vijori zastava, a na drugim nebeskim tijelima nije tako? Kojim pokusom bismo mogli isprobati hoće li zastava vijoriti ili vjetar puhati, a da pritom ne putujemo na Mjesec? Saslušamo prijedloge i predložimo ovaj način ako ga se nitko od učenika ne sjeti.

OPIS POKUSA:

Ovakva pitanja zainteresirala su široku publiku, a odgovor zadire u samu prirodu vakuuma. Ako u nekom prostoru nema čestica, tada ne može postojati ni gibanje tih čestica u obliku vjetra. Ovim aplikacijskim pokusom se možemo nadovezati na nastavnu jedinicu *Tlak* jer vjetar nastaje zbog razlike tlaka zraka. Pokus izvodimo kada učenici dobro barataju konceptom tlak kako bi mogli primijeniti naučeno. Nastavna jedinica *Tlak* obrađuje se u sedmom razredu osnovne škole te u prvom razredu srednje škole. Pokusom možemo povezati znanje o vjetru koje smo prikupili na satu geografije u petom razredu osnovne škole na nastavnoj jedinici *Vrijeme i klima*.



Slika 4.2.1. Eksperimentalni postav za vježbu vjetar u vakuumu



Slika 4.2.2. Palmica (pokazivač vjetra) i ventilator u staklenci

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, staklenka, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada, spužva za amortizaciju vibracija, ventilator s adapterom i palmica koja je ujedno i pokazivač vjetra.

IZVOĐENJE POKUSA:

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.2.1. možemo staviti ventilator i palmicu u staklenku te spojiti ventilator i adapter na vodiče (slika 4.2.2). Vidimo kako se ventilator i palmica (pokazivač vjetra) vrte. Sada možemo zatvoriti staklenku. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz staklenke pa se tlak zraka smanjuje u njoj. U staklenci ostaje sve manje čestica zraka. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u staklenci. Gibanjem čestica zraka palmica se vrti. Maknemo li čestice zraka, palmica se više neće vrtjeti. Kada nemamo čestice zraka u staklenci, nemamo ni čestice koje bi putovale od ventilatora do palmice (pokazivača vjetra). Vjetar je usmjerenom gibanje čestica zraka pa kad nemamo više čestice zraka, nemamo ni vjetar. Kada se palmica prestane vrtjeti i potpuno se umiri, možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Tlak zraka u staklenci je sada petnaestak milibara. Toliko iznosi tlak na visini od oko dvadeset i tri kilometra (slika 4.1.4.). Sada možemo pustiti zrak natrag u staklenku. Polako otvorimo drugi ventil. Vraćanjem zraka u staklenku povećava se tlak zraka u staklenci. Palmica se opet vrti zbog ulaska čestica zraka. Sada imamo čestice zraka pa imamo i vjetar. Pokus se može ponoviti više puta. Ne zaboravite na kraju isključiti vakuumsku sisaljku.

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke (ventilator je upaljen):

1. Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju.

U staklenci se nalaze ventilator, palmica (pokazivač vjetra), spužvica i zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci. Ventilator je upaljen i palmica leprša. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi.

2. Što mislite da će se dogoditi s palmicom u staklenci kada uključimo sisaljku?

Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku.

3. Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključenja sisaljke.

Nakon nekog vremena palmica se potpuno umiri dok se ventilator i dalje vrti. Možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Smanjenje tlaka zraka uočavamo na manometru. Potvrdili smo pretpostavku o opadanju tlaka u staklenci i prestanku lepršanja palmice. Pokazali smo da nema strujanja vjetra kada nemamo dovoljno čestica koje bi se gibale. Time smo odgovorili na problem sa samog početka.

4. Što mislite zašto palmica prestane lepršati nakon uključenja sisaljke?

Da bi palmica lepršala, trebamo imati dovoljno čestica zraka kako bi mogao nastati vjetar. Palmica leprša zbog vjetra. Uključivanjem sisaljke mičemo čestice zraka iz staklenke i u jednom trenu nemamo dovoljno čestica koje bi se gibale pa vjetar prestaje.

5. Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku?

Tlak zraka u staklenci raste na početnu vrijednost. Vidimo na manometru pomicanje kazaljke te opet možemo očitati konačnu vrijednost tlaka. Palmica će lepršati kao i prije zbog vjetra.

6. Zašto?

Kada pustimo zrak natrag u staklenku, tlak zraka u staklenci se povećava. Ulaze čestice zraka i nastaje vjetar. Zbog vjetra palmica leprša.

Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

ZA ONE UČENIKE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE:

Učenicima se može zadati projekt da pronađu fizikalne podatke o atmosferi Mjeseca ili o atmosferama planeta Sunčevog sustava, odnosno o tlaku zraka na površini tih nebeskih tijela (Tablica 4.2.). Projekt se može raditi pojedinačno ili grupno. Učenici neka prezentiraju rezultate istraživanja.

Tablica 4.2. Atmosferski tlak na površinama nebeskih tijela

Podatci za tablicu preuzeti su s pojedinih internetskih stranica Wikipedije [12-22] te stranica NASA-e [23-33].

Nebeska tijela	Atmosferski tlak (Pa)	Atmosferski tlak (bar)
Venera	9200000	92
Saturn	50000 – 200000	0.5 – 2
Zemlja	101325	1.01325
Jupiter	20000	0.2
Uran	10000	0.1
Neptun	10000	0.1
Mars	600	$6 \cdot 10^{-3}$
Sunce	86.8	$8.68 \cdot 10^{-4}$
Pluton	0.65 – 2.4	$65 - 240 \cdot 10^{-7}$
Merkur	$10 \cdot 10^{-10}$	$10 \cdot 10^{-15}$
Mjesec	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-15}$

4.3 Voda u vakuumu

MOTIVACIJA ZA POKUS:

Zašto je problem skuhati čaj visoko na planinama? Zašto se ne kuha jednako kao i u razini mora? U čemu je razlika? Zašto ekspres lonac kuha brže nego običan lonac? Koja je fizika iza svega toga?

OPIS POKUSA:

Ovaj opservacijski pokus pogodan je pri obradi nastavne jedinice *Promjena agregatnih stanja* za raspravu o faznim prijelazima vode u sklopu termodinamike u drugom razredu srednje škole. Promatramo što se događa s vrelištem vode pri smanjenju tlaka zraka. Ovim pokusom pokazujemo da možemo ohladiti vodu samim smanjenjem tlaka. Ako stavimo jako malo vode (petnaestak ml) moguće ju je i zalediti. Pokus je pogodan i za raspravu o unutarnjoj energiji vode te o kinetičkoj energiji molekula vode.



Slika 4.3.1. Eksperimentalni postav za vježbu voda u vakuumu



Slika 4.3.2. Erlenmeyerova tikvica s destiliranom vodom i termometrom na spužvici u staklenci



Slika 4.3.3. Čaša s destiliranom vodom i termometrom na spužvici u staklenci

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, staklenka, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada, čaša, Erlenmeyerova tikvica, digitalni termometar, destilirana voda i spužvica.

IZVOĐENJE POKUSA:

Napomena: *Oprez! Za rad vakuumske sisaljke ovaj pokus nije naročito dobar zato što vodena para ulazi u sisaljku, zagađuje ulje i teško se uklanja iz ulja, pa nakon pokusa sisaljka teže može postići potrebnu razinu vakuuma (potreban je višesatan rad sisaljke „u prazno“ uz ozračivanje).*

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.3.1., možemo staviti Erlenmeyerovu tikvicu s destiliranom vodom i termometrom u staklenku na spužvicu (slika 4.3.2.) te je zatvoriti. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo. Na početku očitamo temperaturu destilirane vode na termometru.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz staklenke pa se tlak zraka smanjuje u njoj. U staklenki ostaje sve manje čestica zraka. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u staklenci. Sve manji broj čestica djeluje ukupno manjom silom na površinu vode u čaši. U vodi su otopljeni razni plinovi koji počinju izlaziti iz vode kada imaju dovoljnu energiju za to. Pojave se mjehurići koji isparavaju. Taj proces je dosta sličan vrenju pa se mnogi zbune i kažu kako je to vrenje. Imamo jasnu definiciju što je vrenje:

Vrenje je oblik brzog isparavanja koje se događa kada tekućinu zagrijemo do vrelišta. Vrelište je temperatura kod koje je tlak između čestica tekućine jednak atmosferskom tlaku, odnosno temperatura kod koje tvar prelazi iz tekućeg agregatnog stanja u plinovito. [34]

Pritom čestice veće kinetičke energije prije izađu iz vode te odnose sa sobom dio ukupne unutarnje energije vode u čaši. Na taj način se smanjuje količina unutarnje energije vode. Temperatura vode u čaši se smanjuje. Tu energiju, koju čestice odnose sa sobom, zovemo latentna toplina isparavanja. Nakon nekog vremena voda se umiri. Možemo vidjeti na manometru kako je tlak pao na desetak milibara. Iznos tlaka odgovara tlaku zraka na visini oko dvadeset i pet kilometara (slika 4.1.4.). Temperatura pada cijelo vrijeme i može pasti i do minus osam Celzijevih stupnjeva. Ovisno o količini destilirane vode, proces hlađenja varira. Što je više vode, duže će se hladiti. U nekom trenu cijela će se voda zamrznuti. Tada možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Polako otvorimo drugi ventil. Vraćanjem zraka u staklenku povećava se tlak zraka u staklenci. Možemo izvaditi čašu s vodom te osjetiti kako se voda ohladila. A sada možemo uzeti čašu s puno više vode (slika 4.3.3), zagrijati je do osamdesetak Celzijevih stupnjeva te takvu zagrijanu staviti u staklenku.

Vidimo kako voda vrije na nekih šezdeset Celzijevih stupnjeva umjesto na sto stupnjeva. Pokus se može ponoviti više puta. Ne zaboravite isključiti vakuumsku sisaljku na kraju.

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke:

1. Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju.

U staklenci se nalazi čaša s destiliranom vodom, digitalni termometar, spužvica i zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci. Možemo zapisati početnu temperaturu i obujam vode. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi.

2. Što mislite da će se dogoditi s vodom u čaši kada uključimo sisaljku?

Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku.

3. Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključivanja sisaljke.

Iz vode izlaze mjehurići. Dio tih mjehurića su molekule vode koje isparavaju, a dio su otopljeni plinovi koji se nalaze u vodi. To su argon, metan, etilen, etan, ugljični monoksid, ugljični dioksid, klor, vodik, helij, dušik, amonijak, kisik i sumporni dioksid prema podacima iz [35]. Nakon nekog vremena voda se umiri. Svi otopljeni plinovi izašli su iz vode, a molekule vode, koje su puno manje još izlaze. Temperatura vode opada i do minus osam Celzijevih stupnjeva. Daljnjim smanjenjem tlaka voda se sva pretvori u led. Možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Smanjenje tlaka zraka uočavamo na manometru. Potvrdili smo pretpostavku o opadanju tlaka u staklenci i smanjenju temperature vode. Ako prvo zagrijemo destiliranu vodu na nekih osamdesetak Celzijevih stupnjeva, ona će ubrzo nakon snižavanja tlaka početi vreti prema podacima sa slike 4.3.4. na nekih šezdeset Celzijevih stupnjeva.

4. Što mislite zašto se voda hladi i na kraju zaledi nakon uključivanja sisaljke?

Zato što je tlak zraka u staklenci puno manji nego u početnom trenutku pa molekule vode trebaju puno manje energije kako bi napustile vodu i otišle u zrak. Molekule vode imaju dovoljno energije da napuste vodu pri tako malom tlaku. Sa svakim izlaskom, molekule iz

vode odvede energiju pa se ukupna energija vode smanjuje. Ukupna energija vode povezana je s kinetičkom energijom svih čestica. Kako prvo izlaze iz vode čestice veće kinetičke energije, ukupna kinetička energija vode se smanjuje. Ukupna kinetička energija vode direktno je povezana s temperaturom vode pa se voda hladi, $E_k = \frac{3}{2}kT$.

5. Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku?

Povećati će se tlak u staklenki. Ako otvorimo ventil kada voda vrije, voda će prestati vreti. Ako ventil otvorimo kada se voda već umirila, molekule vode prestat će izlaziti iz vode i temperatura vode će polako početi rasti zato što je zrak oko nje na većoj temperaturi.

6. Zašto?

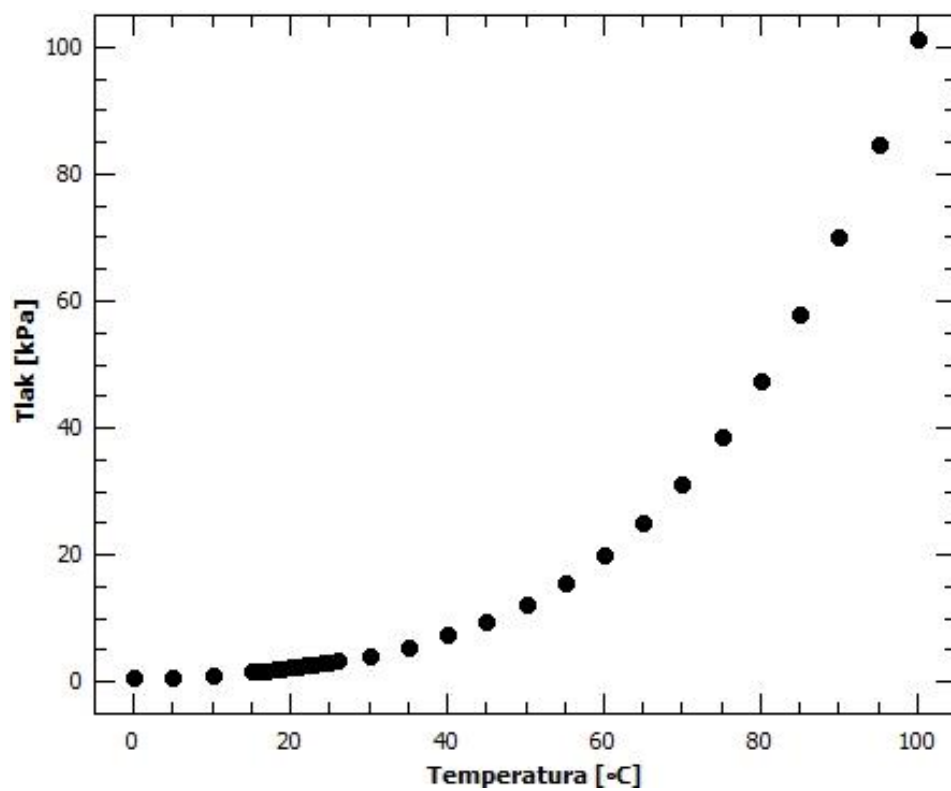
Povećanjem tlaka česticama treba više energije da izađu iz vode pa sada više nemaju dovoljnu energiju.

Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

Visoko na planinama niži je tlak zraka jer tlak opada s visinom (slika 4.1.4.). Kada je niži tlak zraka voda vrije na nižoj temperaturi nego inače. Da bi mogli skuhati čaj potrebna je visoka temperatura vode koju na planinama ne možemo postići jer voda prije vrije i pretvori se u vodenu paru. Kod ekspres lonca vrijedi obrnuti slučaj. Tamo poklopcem zatvorimo lonac i ne dopuštamo vodenoj pari da izlazi iz lonca. Zagrijavanjem povećavamo tlak u loncu i time se vrelište vode povećava. Tako možemo vodu zagrijati na veću temperaturu a da pritom ne vrije. Kuhanjem u vodi više temperature jelo se prije skuha.

ZA ONE UČENIKE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE:

Može se zadati učenicima projekt o fizikalnoj pozadini vrenja vode na planinama ili na kojem principu kuha ekspres lonac. Kod vježbe *Balon u vakuumu* upoznali smo se s opadanjem tlaka zraka s porastom visine. Možemo pogledati sliku 4.1.4. kako bismo vidjeli koliki je tlak zraka na različitim visinama. Na slici 4.3.4. vidimo kolika je temperatura vrenja vode za određeni tlak zraka.



Slika 4.3.4. Graf ovisnosti temperature vrenja vode o tlaku zraka od 0°C do 100°C . Podaci za tablicu preuzeti su iz [36].

4.4 Zvuk u vakuumu

MOTIVACIJA ZA POKUS:

Kako to da se astronauti mogu vidjeti na Mjesecu, a ne mogu razgovarati jedan pored drugoga? Zašto zvuk ne putuje kroz svemir, a svjetlost putuje?

OPIS POKUSA:

Ovaj aplikacijski pokus je pogodan za sistematiziranje znanja o valovima. Izvodimo ga kada učenici dosta dobro barataju tim konceptima kako bi mogli primijeniti naučeno. Nadovezuje se na gradivo osmog razreda osnovne škole te trećeg razreda srednje škole na nastavne jedinice *Valovi*, *Zvuk* i *Svjetlost*. Ovim pokusom vidimo razliku između mehaničkih longitudinalnih i elektromagnetskih transverzalnih valova. Lako se uočava kako je za širenje zvuka, koji je mehanički longitudinalni val, potrebno sredstvo kroz koje će se širiti. Isto tako uočavamo kako za širenje svjetlosti, koja je elektromagnetski transverzalni val, nije potrebno sredstvo. Koristimo zvuk i svijetlo alarmnog uređaja za uočavanje tih efekata.



Slika 4.4.1. Eksperimentalni postav za vježbu zvuk u vakuumu



Slika 4.4.2. Alarmni uređaj u staklenci

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, staklenka, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada, spužva za amortizaciju vibracija te alarmni uređaj s daljinskim upravljačem.

IZVOĐENJE POKUSA:

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.4.1., možemo staviti alarmni uređaj u staklenku (slika 4.4.2.). Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo. Alarmni uređaj se pali pritiskom na tipku na daljinskom upravljaču. Pritom se upali zelena lampica na uređaju. Zelena lampica se ugasi za desetak sekundi. Sada je alarmni uređaj spreman. Alarmni uređaj je elektronički senzor koji mjeri infracrvenu svjetlost koja zrači iz objekata u vidnom polju uređaja. Ako se količina infracrvene svjetlosti koja zrači do senzora promijeni, aktivira se alarmni uređaj. Zato ga možemo aktivirati pokretom ruke iznad crvenog dijela. Kada se alarmni uređaj aktivira, upali se crvena lampica (slika 4.4.2.). Alarm je jako glasan pa trebamo pripaziti. Sada možemo zatvoriti staklenku. Intenzitet zvuka se smanjio, ali se još uvijek dobro čuje.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz staklenke pa se tlak zraka smanjuje u njoj. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u staklenci. Zvuk se sve slabije i slabije čuje. U jednom trenutku više ne čujemo zvuk pa možemo zaključiti da je ostalo jako malo zraka u staklenci. Ta količina zraka nije dovoljna za prenošenje zvuka. Aktivirani alarm traje svega četrdesetak sekundi tako da je ovaj pokus potrebno brzo izvoditi. Kada se ugasi crvena lampica, to znači da se alarm ugasio. Možemo pokušati upaliti alarmni uređaj pokretom ruke, ali alarmni uređaj ne reagira. Staklo staklenke ne propušta infracrvenu svjetlost koju detektira senzor pa na taj način ne možemo aktivirati alarmni uređaj. Možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Tlak zraka u staklenci iznosi osamdesetak milibara što odgovara tlaku na sedamnaestak kilometara visine (slika 4.1.4.). Sada možemo pustiti zrak natrag u staklenku. Polako otvorimo drugi ventil. Vraćanjem zraka u staklenku povećava se tlak zraka u staklenci. Alarmni uređaj se ponovno aktivira zbog ulaska zraka. Možemo otvoriti staklenku kako bismo čuli alarm. Sada ga deaktiviramo pritiskom tipke na daljinskom upravljaču. Primijetimo da smo crveno svijetlo vidjeli cijelo vrijeme, za što nam nije bio potreban zrak u staklenci, dok zvuk alarma nismo čuli kada nije bilo zraka u staklenci. Isto tako možemo pokazati kako alarmni uređaj možemo aktivirati i deaktivirati daljinskim upravljačem koji šalje signal. Signal je elektromagnetski transverzalni val. Pokus se može ponoviti više puta. Ne zaboravite na kraju isključiti vakuumsku sisaljku.

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke:

1. Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju.

U staklenci se nalaze alarmni uređaj, spužva i zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi.

2. Što mislite da će se dogoditi sa zvukom alarmnog uređaja kada uključimo sisaljku?

Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku i alarmni uređaj.

3. *Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključenja sisaljke.*

Zvuk se čuje sve slabije dok se u jednom trenu više ne čuje. Možemo zatvoriti ventil prema sisaljci.

4. *Što mislite zašto se zvuk čuje sve slabije nakon uključenja sisaljke?*

Zvuk je mehanički longitudinalni val koji treba sredstvo kroz koje bi se širio. Kada maknemo zrak iz staklenke, zvuk se ne može širiti. Zbog toga ga ne čujemo.

5. *Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku?*

Povećati će se tlak u staklenci. Opet ćemo čuti zvuk.

6. *Zašto?*

Sada imamo zrak u staklenci kroz koji se zvuk može širiti.

Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

4.5 Uzgon u zraku

MOTIVACIJA ZA POKUS:

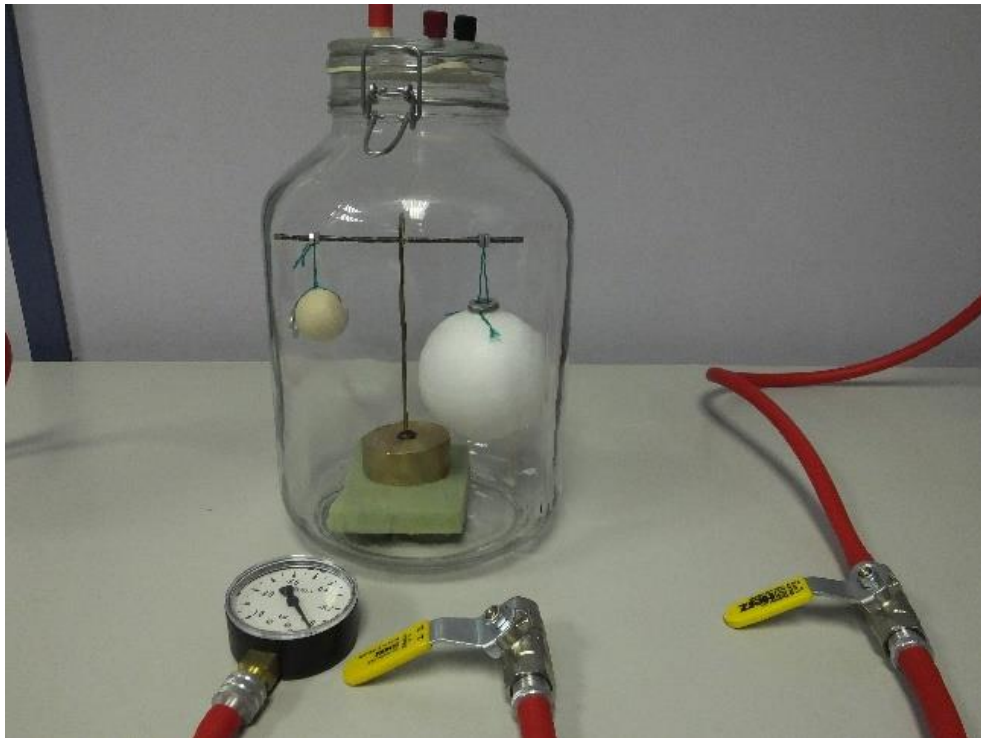
Iz iskustva znamo da smo lakši u vodi zbog uzgona. Postoji li uzgon u zraku?

OPIS POKUSA:

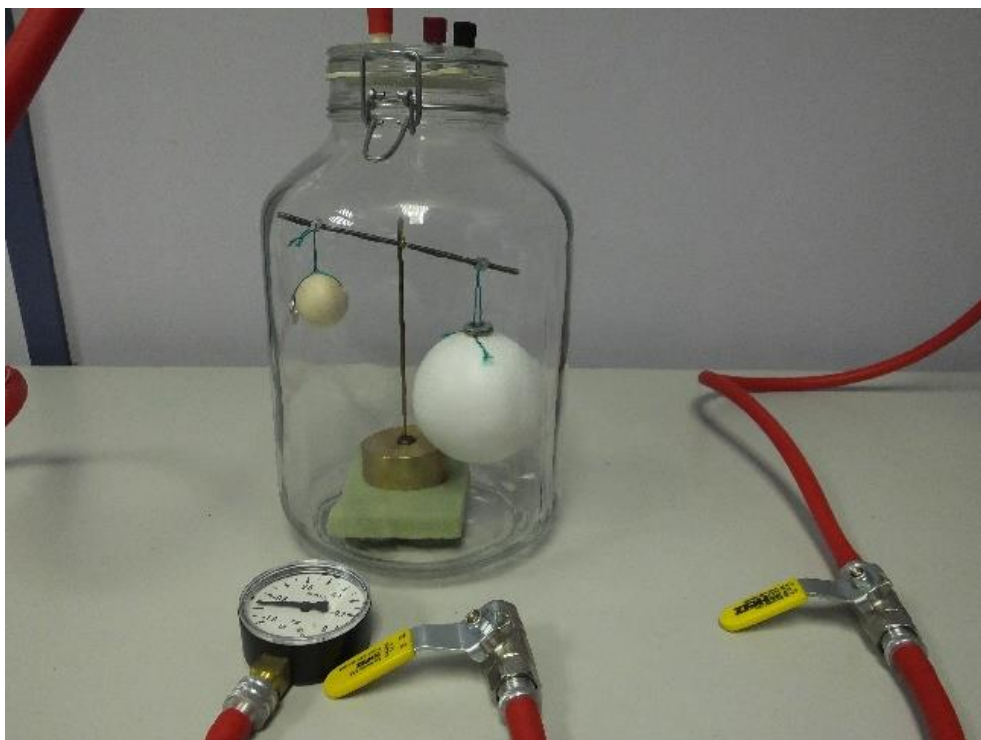
Uzgon u vodi otkriven je u antičko vrijeme, ali postojanje sile uzgona u zraku nije potpuno vidljivo na prvi pogled. Tek s prvim balonima na topli zrak imamo jasno očitovanje sile uzgona u zraku. U vakuumu, sile uzgona nema. Ovaj opservacijski pokus pokazuje djelovanje sile uzgona u zraku i pogodan je za obradu nastavne jedinice *Uzgon* u prvom razredu srednje škole. Izvodimo ga na početku nastavne jedinice za uvodni problem.



Slika 4.5.1. Eksperimentalni postav za vježbu uzgon u zraku



Slika 4.5.2. Kugle različitih obujama na vagi u staklenci u zraku



Slika 4.5.3. Kugle različitih obujmova na vagi u staklenci u vakuumu

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, staklenka, manometar, dva ventila, šest crvenih cijevi, dva bijela plastična T-komada, vaga s polugom, spužvica i dvije kuglice različitih obujmova s podloščima.

IZVOĐENJE POKUSA:

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.5.1., možemo staviti kugle različitih obujama s podloščima u staklenku te ih uravnotežiti na vagi (slika 4.5.2.). Kugle se nalaze otprilike na jednakoj udaljenosti od središta vage. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo. Možemo zatvoriti staklenku. Ravnotežni položaj kugli lakše ćemo naći ako uravnotežimo prvo kugle izvan staklenke. Kada sve naštimamo, stavimo prvo stalak u staklenku, a zatim i šipku na kojoj vise kugle. Pritom pazimo da nam se kugle ne pomaknu sa svojih položaja.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz staklenke pa se tlak zraka smanjuje u njoj. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u staklenci. Sila uzgona na kugle se smanjuje. Sila uzgona ovisi o gustoći fluida u kojem se kugla nalazi te o obujmu kugle, $F_u = \rho_f V_k g$. Prema tome, veća sila uzgona djeluje na kuglu većeg obujma. Kako isisavamo zrak, tako će sila uzgona biti sve manja te će kugla većeg obujma prevagnuti (slika 4.5.3.). Možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Tlak zraka u staklenci iznosi dvjestotinjak milibara što odgovara tlaku na jedanaestak kilometara visine gdje lete putnički zrakoplovi (slika 4.1.4.). Sada možemo pustiti zrak natrag u staklenku. Polako otvorimo drugi ventil. Vraćanjem zraka u staklenku povećava se tlak zraka u staklenci. Raste i sila uzgona natrag na početnu vrijednost. Ne zaboravite na kraju isključiti vakuumsku sisaljku.

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke:

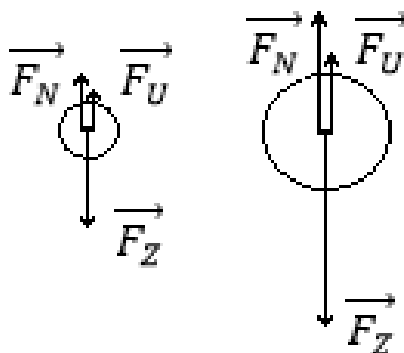
1. Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju. Skicirajte dijagram sila za svaku kuglicu. Pripazite na iznose vektora.

U staklenci se nalaze dvije kugle različitih obujmova, vaga, spužvica i zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi. Učenici skiciraju dijagram sila na kuglice.

2. Koje sile djeluju na kuglice? Kolika je ukupna sila za svaku kuglicu?

Na svaku kuglicu djeluje sila Zemlje $\vec{F}_Z$ vertikalno prema dolje te sila niti $\vec{F}_N$ i sila uzgona $\vec{F}_U$ vertikalno prema gore. Kuglice miruju što znači da je ukupna sila na kuglice nula.



Slika 4.5.4. Dijagram sila prije paljenja sisaljke

3. Što mislite da će se dogoditi s kuglicama kada uključimo sisaljku?

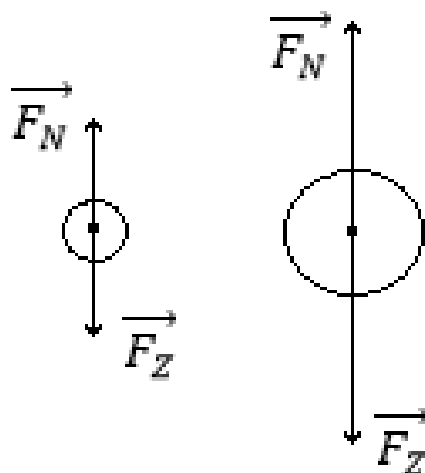
Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku.

4. Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključenja sisaljke.

Kuglica većeg obujma je prevagnula.

5. Što mislite zašto je veća kuglica prevagnula nakon uključenja sisaljke? Skicirajte dijagram sila za svaku kuglicu.

Kada imamo zrak, vektorski zbroj sile uzgona i sile niti jednak je sili Zemlje na kuglicu. Sila uzgona veća je na kuglicu većeg obujma. Kada maknemo zrak iz staklenke, maknemo i silu uzgona. Kako je na veću kuglicu djelovala veća sila uzgona prema gore, sada je sila Zemlje na kuglicu veća nego sila niti. Ta razlika između sila prije i poslije paljenja vakuumske sisaljke veća je za kuglicu većeg obujma pa zato ona prevagne. Ukupna sila za svaku kuglicu je nula, jer kuglice miruju.



Slika 4.5.5. Dijagram sila nakon što smo upalili sisaljku

6. Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku?

Kada otvorimo ventil, zrak će ući natrag u staklenku pa će kuglice opet biti u ravnoteži.

7. Zašto?

Zato što sada imamo zrak u staklenci kao na početku pa će sila uzgona djelovati na kuglice i uravnotežiti ih.

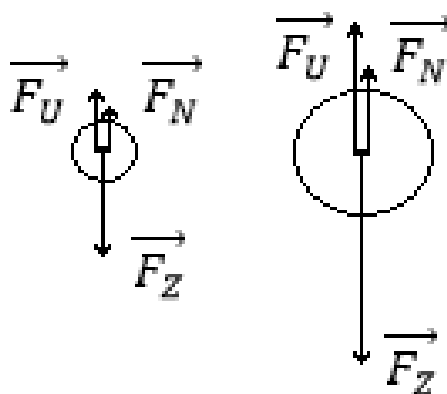
Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

Što bi se dogodilo s ravnotežom kuglica ako bismo staklenku ispunili vodom?

Prevagnuti će kuglica manjeg obujma.

Zašto? Skicirajte dijagram sila na kuglice.

Zato što će u vodi na kuglicu većeg obujma djelovati još veća sila uzgona prema gore pa će ta kuglica imati ukupnu silu prema gore. Opet će na veću kuglicu djelovati veća sila uzgona.



Slika 4.5.6. Dijagram sila u vodi

4.6 Vaganje zraka

MOTIVACIJA ZA POKUS:

Kako bismo mogli izračunati gustoću zraka? Koje fizikalne veličine bismo morali mjeriti da bismo izračunali gustoću zraka?

OPIS POKUSA:

Do renesanse se smatralo da zrak nema težinu. Ovim istraživačkim pokusom možemo izmjeriti masu zraka te izračunati njegovu težinu. Poznavanjem obujma staklenke možemo izračunati gustoću zraka tako da upotrijebimo podatak o masi zraka koju očitavamo na vagi. Pokus je pogodan za provedbu kod nastavne jedinice *Gustoća* u sedmom razredu osnovne škole. Kada računamo gustoće različitih tijela, možemo računati i gustoću zraka. Također, *Gustoća* je nastavna jedinica u prvom razredu srednje škole.



Slika 4.6.1. Eksperimentalni postav za vježbu vaganje zraka



Slika 4.6.2. Staklenka na digitalnoj vagi

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, staklenka, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada i digitalna vaga (osjetljivosti jedan gram).

IZVOĐENJE POKUSA:

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.6.1., možemo upaliti digitalnu vagu te staviti zatvorenu staklenku na nju (slika 4.6.2.). Vaga će pokazivati masu staklenke i zraka u njoj oko 1642 g. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo. Koliku masu će vaga pokazivati ovisi i o napetosti cijevi koja je spojena na staklenku.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz staklenke pa se tlak zraka smanjuje u njoj. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u staklenci. Na vagi uočavamo da se masa zraka smanjuje. Kada postignemo vrijednost tlaka zraka desetak milibara u staklenci, vaga će pokazivati vrijednost oko 1636 g za posudu obujma $V = 5 \text{ dm}^3$. Iznos tlaka odgovara tlaku zraka na visini oko dvadeset i pet kilometara (slika 4.1.4.). Sada možemo izračunati gustoću zraka. Uporabimo podatak o razlici mase između pune i prazne staklenke, obujmu zraka u staklenci te izračunamo gustoću zraka.

Izračunali smo gustoća zraka i ona iznosi $\rho = \frac{m}{V} = \frac{6g}{5000cm^3} = 1.2 \frac{kg}{m^3}$, $\rho = (1.20 \pm 0.01) \frac{kg}{m^3}$. Rezultat je sasvim u redu $r = 100\% \cdot \frac{0.0041}{1.2} = 0.34$ jer smo mjerili kod sobne temperature zraka od 20 °C što vidimo u tablici 4.6.1.. Zatvorimo ventil prema pumpi te polako otvorimo drugi ventil koji pušta zrak natrag u staklenku. Vraćanjem zraka u staklenku povećava se tlak zraka u staklenci. Na vagi se povećava vrijednost mase jer čestice zraka ulaze natrag u staklenku pa imamo sve veću masu. Kada se tlak zraka u staklenci vrati na početni atmosferski tlak zraka, vaga pokazuje istu vrijednost kao na početku. Ne zaboravite na kraju isključiti vakuumsku sisaljku.

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke:

1. *Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju. Zapišite početnu vrijednost mase.*

U staklenci se nalazi samo zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci te da zabilježe početnu vrijednost mase koju očitaju na digitalnoj vagi. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi te da očitaju početnu vrijednost mase.

2. *Što mislite da će se dogoditi s masom staklenke kada uključimo sisaljku?*

Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku.

3. *Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključivanja sisaljke. Očitajte iznose tlaka i mase i zapišite ih.*

Bitno je da učenici uoče da se masa staklenke smanjuje te da zapišu vrijednosti mase kod različitih tlakova kako bi mogli izračunati gustoću zraka.

4. *Što mislite zašto se masa staklenke smanjuje nakon uključivanja sisaljke?*

Zato što staklenka i zrak imaju neku masu. Ako zrak maknemo, onda će masa unutar staklenke biti manja.

5. Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku?

Kada otvorimo ventil, zrak će ući natrag u staklenku i masa će se vratiti na početnu vrijednost.

6. Zašto?

Zato što sada imamo zrak u staklenci kao na početku, a zrak ima masu.

Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

Vidjeli smo kako zrak ima masu pa sada možemo ponoviti pokus te izmjeriti njegovu gustoću pri različitim tlakovima. Postepeno isisavamo zrak kako bismo stigli zapisati vrijednosti tlaka i mase te izračunati gustoću zraka pri tom tlaku te komentirati rezultate. Za različite tlakove, zrak ima različitu gustoću. U tablici 4.6.1. vidimo kako temperatura zraka također utječe na gustoću zraka. Pri stalnom tlaku zraka, gustoća zraka se mijenja ako mijenjamo i temperaturu zraka.

Tablica 4.6.1. Gustoća zraka u ovisnosti o temperaturi kod atmosferskog tlaka. Podaci su preuzeti s internetske stranice Wikipedije [37].

Temperatura zraka (°C)	Gustoća zraka (kg/m ³)	Temperatura zraka (°C)	Gustoća zraka (kg/m ³)
0	1.2920	20	1.2041
5	1.2690	25	1.1839
10	1.2466	30	1.1644
15	1.2250	35	1.1455

4.7 Vakuumske hvataljke

MOTIVACIJA ZA POKUS:

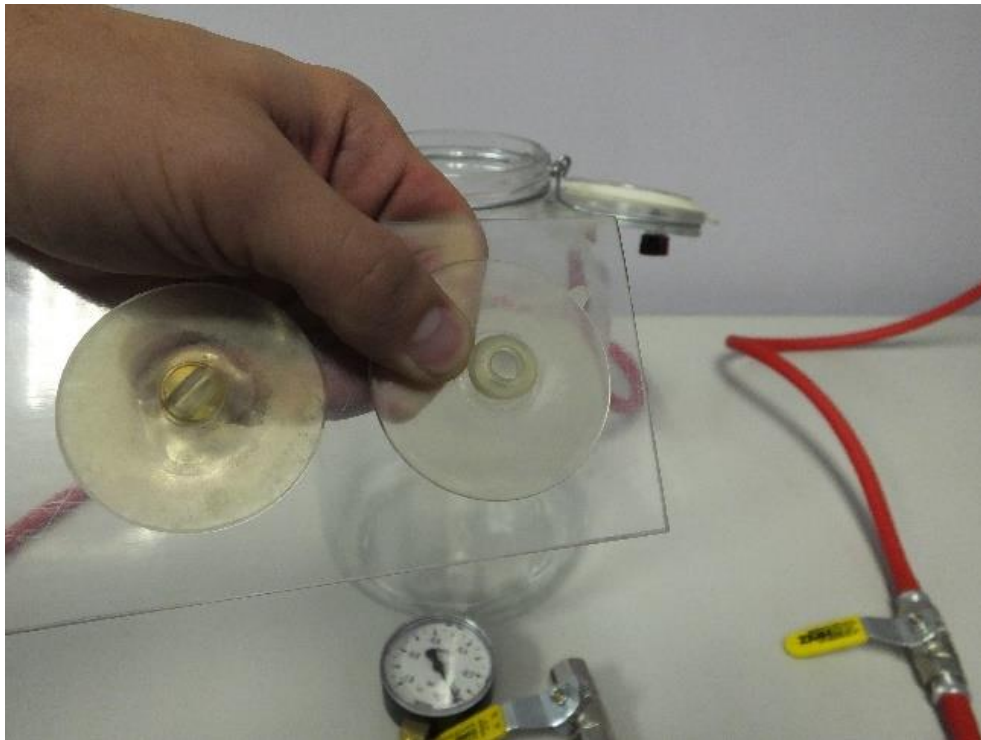
Kojom silom trebamo djelovati da bi se vakuumska hvataljka odlijepila? Možemo li objesiti samo ručnik ili i kaput na tu hvataljku?

OPIS POKUSA:

Ovaj istraživački pokus je pogodan za sistematiziranje znanja o odnosu tlaka, sile i površine. U srednjoj školi obrađuje se u prvom razredu. Možemo izračunati kod kojeg tlaka će se hvataljka sama odlijepiti, odnosno kolikom silom trebamo djelovati kako bismo je odlijepili pri atmosferskom tlaku. Često u svakodnevnom životu susrećemo hvataljke koje koriste vakuum. Takve hvataljke najčešće koristimo u kuhinji i kupaonici kao vješalice. Iskustvo nam govori da takve hvataljke mogu izdržati veliku silu kada prionu na glatku površinu. Ovaj interesantan pokus objašnjava princip rada ove jednostavne naprave.



Slika 4.7.1. Eksperimentalni postav za vježbu vakuumske hvataljke



Slika 4.7.2. Čvrsto pritisnute hvataljke o pločicu



Slika 4.7.3. Hvataljke u staklenci

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, staklenka, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada, vakuumske hvataljke (možemo staviti nekoliko vakuum hvataljki različitih veličina *ljepljivih* površina) i ravna plastična pločica.

IZVOĐENJE POKUSA:

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.7.1., možemo vakuumske hvataljke čvrsto pritisnuti o plastičnu pločicu (slika 4.7.2.) i staviti u staklenku (slika 4.7.3.) te je zatvoriti. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz staklenke pa se tlak zraka smanjuje u njoj. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u staklenci. Kada smo čvrsto pritisnuli hvataljku o pločicu, mi smo zapravo istisnuli zrak između pločice i hvataljke. Zbog toga je tlak ispod hvataljke niži od tlaka iznad hvataljke. Zbog razlike tlakova javlja se sila koja pritišće hvataljku o pločicu. Jedan način da odlijepimo hvataljku jest da djelujemo silom na nju. Sila koja je potrebna kako bismo odlijepili hvataljku jednaka je umnošku razlike atmosferskog tlaka i tlaka ispod hvataljke te površini hvataljke koja je u dodiru s pločicom. Drugi način da odlijepimo hvataljku možemo pokazati kada je stavimo u staklenku i smanjimo tlak u staklenci. Kada se izjednače tlakovi s jedne i druge strane hvataljke, ona će se odlijepiti od pločice. Razlog zašto taj isti pokus ne možemo raditi komadom papira umjesto hvataljke krije se baš u hvataljci. Ona je napravljena od takvog elastičnog materijala koji se malo deformira prilikom pritiska o pločicu. Rastegne se. Zbog svojih elastičnih svojstava taj materijal se želi skupiti u svoj početni oblik, ali mu vanjski tlak zraka to ne dozvoljava. Pritišće ga ponovo o pločicu. Kada bismo uzeli komad papira koji nema takvo svojstvo, on se ne bi rastegnuo, ne bi se počeo skupljati u početni oblik i ne bi ga tada tlak zraka opet zalijepio natrag o pločicu. Kada se tlak zraka dovoljno smanji, hvataljka će se odlijepiti i past će na dno staklenke. Možemo zatvoriti ventil prema sisaljci i očitati vrijednost tlaka zraka u staklenci na manometru kod koje se to dogodilo. Tlak u staklenci iznosio je tristotinjak milibara kada je pala manja hvataljka. Toliko iznosi tlak na vrhu Himalaja (slika 4.1.4.). Tlak u staklenci je iznosio osamdesetak milibara kada je pala veća hvataljka. Toliko iznosi tlak na sedamnaestak kilometara visine (slika 4.1.4.). Manometar nam pokazuje koliki je bio tlak zraka između hvataljke i pločice. Na temelju te vrijednosti možemo izračunati kolikom silom je hvataljka prijanjala o pločicu, $F = p \cdot A$. Prva hvataljka ima polumjer $r = (1.50 \pm 0.05) \cdot 10^{-2}$ m, dok druga hvataljka ima polumjer $r = (2.00 \pm 0.05) \cdot 10^{-2}$ m. Dakle, za prvu hvataljku računamo razliku tlaka i iznosi 713 hPa pa je tada sila $F = 7.13 \cdot 10^4 \cdot 7 \cdot 10^{-4} = 50.4$ N. $F = (50 \pm 4)$ N, $r = 8$ %. Za drugu

hvataljku računamo razliku tlakova koja iznosi 933 hPa. Sila je $F = 9.33 \cdot 10^4 \cdot 12.6 \cdot 10^{-4} = 117.2 \text{ N}$. $F = (117 \pm 9) \text{ N}$, $r = 8 \%$. Sada možemo pustiti zrak natrag u staklenku. Polako otvorimo drugi ventil. Pokus se može ponoviti više puta. Ne zaboravite na kraju isključiti vakuumsku sisaljku.

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke:

1. Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju. Izmjerite potrebne podatke te izračunajte površinu svake hvataljke.

U staklenci se nalaze dvije vakuumske hvataljke, plastična pločica i zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi. Prije paljenja sisaljke trebaju izmjeriti promjer hvataljki te izračunati površinu hvataljki.

2. Zašto se hvataljka drži za pločicu?

Trebamo raspraviti s učenicima kako funkcionira hvataljka, zašto je zalijepljena odnosno kako dugo će biti zalijepljena.

3. Što mislite da će se dogoditi s hvataljkama kada uključimo sisaljku?

Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku.

4. Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključenja sisaljke. Zapišite kod kojeg tlaka pada koja hvataljka. Izračunajte silu potrebnu da se hvataljka odlijepi.

Bitno je da učenici uoče da se tlak smanjuje i da se hvataljke odljepljuju pri različitim tlakovima. Bilježimo kod kojeg tlaka se hvataljke odljepljuju kako bismo mogli izračunati kojom silom trebamo djelovati da bismo ih odlijepili.

5. Što mislite zašto se hvataljke odljepljuju pri različitim tlakovima nakon uključenja sisaljke?

Tlak ispod hvataljke je niži od tlaka iznad hvataljke. Zbog razlike tlakova javlja se sila koja pritišće hvataljku o pločicu. Tlak u staklenci se smanjuje pa na hvataljke djeluje sve slabija sila. Hvataljke se polako odljepljuju. Zbog različitih površina hvataljki, one se odljepljuju pri različitim tlakovima.

6. Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku?

Zrak će ući natrag u staklenku i moguće je da se hvataljke zalijepe za dno staklenke. Nešto naročito bitno ne dešava se prilikom upuštanja zraka. Ako želimo ponoviti pokus moramo ručno hvataljke zalijepiti na pločicu.

Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

4.8 Slobodni pad

MOTIVACIJA ZA POKUS:

Iskustvo nam govori da sva tijela ne padaju jednakom brzinom. Kako bismo mogli pokazati da sva tijela padaju jednakom brzinom? Samo ako ih stavimo u vakuum, prostor u kojemu nema zraka. Otpor zraka je zanemariv.

OPIS POKUSA:

Uobičajeno je mišljenje da teža tijela padaju brže od lakših tijela. Takvo vjerovanje bilo je uvriježeno od Aristotela pa sve do pojave Galilea te je i danas vrlo rašireno mišljenje učenika. Opservacijski pokus, kojim se takvo razmišljanje može efikasno otkloniti, jest uporaba vakuumirane cijevi, tzv. Newtonove cijevi (slika 4.8.1.), u kojoj je otpor zraka uklonjen. Pokus je pogodan na nastavnoj jedinici *Promjena brzine i akceleracija* u osmom razredu te nastavnoj jedinici *Jednoliko ubrzano gibanje* u prvom razredu srednje škole.



Slika 4.8.1. Newtonova cijev duljine dva metra, vanjskog promjera četiri centimetara izrađena od pleksiglasa



Slika 4.8.2. Eksperimentalni postav za vježbu slobodni pad



Slika 4.8.3. Papirić u Newtonovoj cijevi



Slika 4.8.4. Gumena kuglica u Newtonovoj cijevi

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, Newtonova cijev, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada, papirić i gumena kuglica.

IZVOĐENJE POKUSA:

Prvo stavimo papirić u Newtonovu cijev (slika 4.8.3.) te ju zatvorimo. Naglo okrenemo Newtonovu cijev tako da papirić slobodno pada. Uočimo da pada prilično sporo. Možemo tražiti nekoliko učenika da zapornim satom mjere vrijeme potrebno da papirić padne na dno cijevi. Za usporedbu uzmemo gumenu kuglicu, stavimo je u cijev (slika 4.8.4.) te naglo okrenemo. Također tražimo učenike da mjere vrijeme koje je potrebno kuglici da padne na dno. Vidimo kako kuglica pada puno brže. Možemo papirić staviti natrag u cijev i imati oba predmeta unutra. Opet okrenemo naglo cijev i vidimo kako papirić pada sporije od gumene kuglice. Sada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.8.2.. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo.

Napomena *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena. Također moramo pripaziti s koje strane se nalazi papirić kako ga sisaljka ne bi usisala.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema njoj. Sisaljka isisava zrak iz Newtonove cijevi pa se tlak zraka smanjuje u njoj. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u

Newtonovoj cijevi. Kada postignemo tlak zraka od desetak milibara, možemo zatvoriti ventil prema vakuumskoj sisaljci. Iznos tlaka odgovara tlaku zraka na visini oko dvadeset i pet kilometara (slika 4.1.4.). Sada imamo u cijevi vakuum pa ponovimo pokus. Opažamo da papiriću i kuglici treba otprilike jednako vrijeme da padnu na dno cijevi kada su u vakuumu. Zaključujemo da tijela padaju podjednakim brzinama kada se nalaze u vakuumu.

Možemo napraviti još jedan pokus. Ubacimo lopticu u cijev i cijev vakuumiramo. Lopticu dovedemo na stranu gdje je ventil kojeg naglo otvorimo i dobivamo vakuumski top. Zrak koji brzo ulazi u cijev, brzo izbacuje lopticu prema drugom kraju cijevi.

SMJERNICE ZA VOĐENJE POKUSA:

Prije uključivanja sisaljke:

1. Što se sve nalazi u staklenci? Skicirajte početnu situaciju.

U cijevi se nalaze papirić, gumena kuglica i zrak.

Bitno je da učenici ne zaborave kako je na početku zrak u staklenci. Tražimo od učenika da skiciraju početnu situaciju u kojoj su navedeni svi bitni elementi te nacrtaju dijagram sila za gumenu kuglicu i papirić.

2. Što mislite da će se dogoditi s predmetima kada uključimo sisaljku te okrenemo cijev?

Tražimo od učenika da zapišu pretpostavku što će se dogoditi. Zatim čitaju te pretpostavke. Vjerojatno će biti različitih pretpostavki pa puštamo raspravu. Za svaku pretpostavku tražimo obrazloženje. Nakon toga uključujemo sisaljku.

3. Opišite i skicirajte što ste opazili nakon uključenja sisaljke te okretanja cijevi.

Bitno je da učenici uoče da su oba predmeta pala u isto vrijeme. Predmeti padaju jednakom brzinom.

4. Što mislite zašto oba predmeta padaju jednakom brzinom nakon uključenja sisaljke?

Zato što sada nemamo više zraka u cijevi koji bi usporavao padanje papirića i kuglice. Kada nemamo zrak, nemamo ni otpor zraka.

5. Što mislite da će se dogoditi kada otvorimo ventil i pustimo zrak natrag u staklenku? Hoće li se predmeti gibati istim ili različitim brzinama?

Kada otvorimo ventil, zrak će ući natrag u staklenku. Bitno je da učenici uoče kako sada imamo zrak u cijevi i da ćemo imati i otpor zraka pa predmeti neće padati jednakom brzinom.

Pokus ponovimo više puta i diskutiramo ako je nešto ostalo nejasno.

Koji je predmet teži?

Teža je gumena kuglica.

Koja tijela padaju brže u vakuumu? Lakša ili teža?

Sva tijela u vakuumu padaju jednakom brzinom. Težina ne utječe na brzinu padanja.

4.9 Plazmena kugla

MOTIVACIJA ZA POKUS:

Što su munje? Što je plamen? Što je polarna svjetlost? Odgovor na sve je plazma.

OPIS POKUSA:

Plazma se može smatrati četvrtim agregatnim stanjem, nakon krutina, tekućina i plinova. „Plazma je najrasprostranjeniji oblik vidljive materije u svemiru koji se sastoji od nezavisno gibajućih, električki nabijenih sastavnica atoma, elektrona i iona. Gibajući se, te nabijene čestice proizvode električna i magnetska polja koja u povratu utječu na ponašanje plazme. Upravo su tehnološke primjene plazme jedan od osnovnih pokretača istraživanja i opravdanja za nova ulaganja. Proizvodi koje je omogućila tehnologija na bazi plazme preplavili su našu svakodnevnicu. Svi mikroelektronički elementi, izvori svjetlosti, veliki plazma zaslони, solarne ćelije, lopatice turbo motora, biokompatibilni ljudski umetci, razni tekstilni proizvodi, ili se temelje na plazmi ili se ona koristi u njihovoj proizvodnji. Danas nezaobilazni tehnološki postupci kao što je zavarivanje, eliminacija otpadnih tvari, sterilizacija medicinske opreme i umetaka, pročišćavanje zraka, i još mnogi drugi, koriste neku vrst plazme. Fuzija, jedno od mogućih energetske rješenja za budućnost čovječanstva, temelji se na tehnološkom dostignuću stvaranja i kontrole vrlo guste i vruće plazme kakva postoji samo u zvijezdama.

Plazma je izuzetno širok pojam: ima plazmi koje možemo dotaknuti da nam se ništa ne dogodi (plazmena igla), koje nas mogu spržiti (plamen ili munje), ili u kojima se sve tvari razgrađuju na osnovne elemente (plazmene mlaznice za spaljivanje otpada), ili pak plazmi u kojima se jezgre atoma spajaju (tokamak), plazmi u čijem laganom sjaju možemo uživati (polarna svjetlost), uz čiju pomoć možemo noću čitati (fluorescentne cijevi, štedne žarulje), lakše voziti gradom (visokotlačne natrijeve žarulje) ili koja nas može oslijepiti ako gledamo direktno u nju (Sunce)“ [38].

Ovaj opservacijski pokus je pogodan za demonstraciju plazme kada se govori o agregacijskim stanjima u prvom razredu srednje škole. Možemo samo spomenuti plazmu kao četvrto agregacijsko stanje jer još uvijek većina udžbenika ne spominje plazmu.



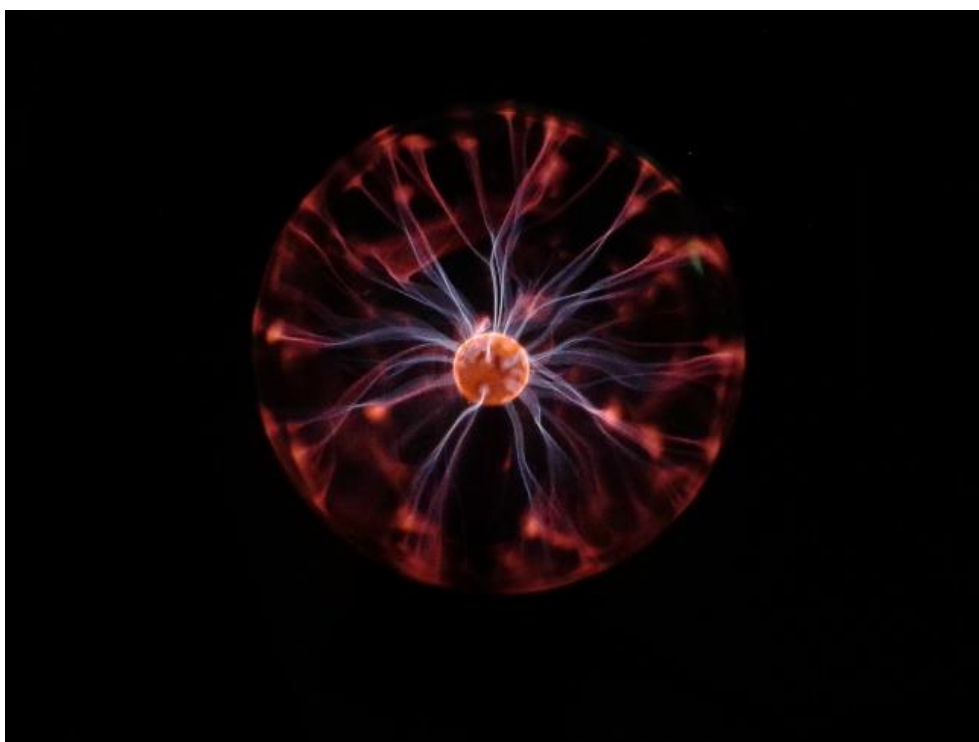
Slika 4.9.1. Eksperimentalni postav za vježbu plazmena kugla



Slika 4.9.2. Plazma kod tlaka od četrdesetak milibara punjena zrakom



Slika 4.9.3. Plazma kod tlaka od dvadesetak mbar punjena zrakom



Slika 4.9.4. Plazmene kugla punjena argonom i neonom pod tlakom od tridesetak milibara

PRIBOR: Vakuumska sisaljka, dvije plazmene kugle, napajanje za plazmenu kuglu, manometar, dva ventila, šest cijevi, dva bijela plastična T-komada i stalak.

IZVOĐENJE POKUSA:

Imamo dvije plazmene kugle. Jednu plazmenu kuglu smo modificirali i spojili na vakuumsku sisaljku te smo s tom plazmenom kuglom radili pokus (slike 4.9.2. i 4.9.3.). Modifikacija podrazumijeva rezanje zataljene staklene cjevčice kojom je u procesu proizvodnje plazmene kugle bila vezana za vakuum sustav. Na oslobođenu cjevčicu nalijepljena je gumena cijev. Drugu plazmenu kuglu smo ostavili originalnu, neprobušenu i nju smo samo upalili i vidjeli kako svijetli (slika 4.9.4.). Cilj pokusa nam je bio pronaći pri kojem tlaku radi ova originalna, neprobušena plazmena kugla te vidjeti kako izgleda plazma pri različitim tlakovima zraka unutar plazmene kugle.

Kada spojimo eksperimentalni postav kao na slici 4.9.1., možemo upaliti plazmenu kuglu te što više zatamniti učionicu. Spojeni eksperimentalni postav postavimo tako da ga svi učenici vide te ga opišemo.

Napomena: *Prije uključivanja sisaljke trebamo provjeriti jesu li oba ventila zatvorena.*

Uključimo sisaljku i otvorimo ventil prema plazmenoj kugli. Sisaljka isisava zrak iz plazmene kugle pa se tlak zraka smanjuje u njoj. Na manometru vidimo koliki je iznos tlaka zraka u plazmenoj kugli. U početku uopće ne vidimo plazmu. Kada smanjimo tlak zraka ispod četrdesetak milibara vidimo plazmu kao na slici 4.9.2.. Kada tlak zraka smanjimo ispod dvadesetak milibara, vidimo drugačiji oblik plazme (slika 4.9.3.). Ovisno o tlaku zraka u plazmenoj kugli, dobivamo različite plazme. Kako tlak zraka pada, sve je manji broj čestica zraka pa plazma ima više prostora u plazmenoj kugli. Plazma postaje sve šira. U početku, kada je kugla puna zraka, plazma je toliko tanka da je ne vidimo. No, isisavanjem zraka, dobivamo sve širu plazmu. Kada smo smanjili tlak ispod dvadesetak milibara možemo zatvoriti ventil prema sisaljci. Sada možemo pustiti zrak natrag u plazmenu kuglu. Polako otvorimo drugi ventil. Vraćanjem zraka u plazmenu kuglu povećava se tlak zraka u plazmenoj kugli te se smanjuje širina i debljina plazme. Pokus se može ponoviti više puta. Ne zaboravite na kraju isključiti vakuumsku sisaljku.

Kako radi plazmena kugla? Plazmena kugla sastoji se od staklenog balona koji je standardno napunjen sa oko 40 milibara plina argona. U sredinu staklenog balona uvedena je žica na koju se dovodi visoki napon. Visoki izmjenični napon stvara se pomoću jednostavnog elektroničkog sklopa. Na primjer, jedna od izvedbi može biti da se ulazni stalni napon od 12 V (DC) dovede na sklop multivibratora gdje se pretvara u izmjenični signal od oko 25 kHz. Takav signal dovodi se na primar Teslinog transformatora. Na sekundaru se

dobiva kvazisinusni signal amplitude oko 2.5 kV. Treba napomenuti da visoki napon frekvencije iznad 2 kHz nije opasan za ljude. Na vrhu žice, koja je od vakuuma odvojena staklom, stvara se električno polje. U tom električnom polju ubrzavaju se elektroni, kojih u početku uvijek ima u razrijeđenom plinu, stvarajući proboje, iskru odnosno strimer. Nastali strimeri šire se prema rubu kugle koja predstavlja drugu elektrodu. Struje koje teku takvim izbojem su reda veličine nekoliko miliampera.

Opisani izvor visokog napona iskorišten je za stvaranje atmosferskih plazma mlazeva [39].

5 Zaključak

Ovi izabrani pokusi mogu doprinijeti kvaliteti u izvođenju nastave fizike u osnovnim i srednjim školama. Zajednička je tema svih odabranih pokusa osvještavanje učenika i profesora koliko zapravo veliku važnost ima atmosferski tlak oko nas kojeg svi uzimamo zdravo za gotovo bez ikakvog razmišljanja o njegovom postojanju i djelovanju na nas. O atmosferskom tlaku počinjemo razmišljati tek onda kada ga smanjimo. Tako dobijemo vakuum. Vakuum je prostor u kojemu je tlak zraka manji od atmosferskog tlaka zraka. U ovom diplomskom radu smanjivao sam tlak zraka vakuumskom sisaljkom te pritom promatrao što se događa s različitim tijelima u staklenci. U staklenci sam imao niski vakuum. Balon se napuhnuo, vjetar se prestao širiti, voda se zamrznula, zvuk se nije čuo, uzgon je nestao, masa zraka se smanjila, hvataljke su se odlijepile, sva tijela su padala jednakom brzinom, a plazma je postala deblja i šira. Ovim jednostavnim pokusima mogu se razbiti neke miskoncepcije učenika i postići njihovo bolje razumijevanje raznih fizikalnih pojava. Vakuum je pojam koji svakako zaslužuje pažnju u osnovnom obrazovnom procesu svakog čovjeka

U toku izrade ovog diplomskog rada sudjelovao sam u izvođenju Vakuumske radionice koja je bila postavljena 16. i 17. travnja 2015. godine u sklopu Otvorenih dana na Institutu za fiziku. Prvi dan je radionica bila pripremljena za djecu vrtićkog uzrasta, a drugi dan za osnovnoškolce i srednjoškolce. Radionica je bila uspješna i djeca su bila zadovoljna time što su radili i vidjeli što sam zaključio po njihovim osmjesima i znatiželjnim pitanjima. Najzanimljiviji pokus bio im je Balon u vakuumu. Na radionici je taj pokus bio pripremljen s ručnom vakuumskom sisaljkom. Trebali su vrtjeti ručku kako bi isisavali zrak iz staklenke. Umjesto balona koristili smo i vakumirani kikiriki. Kada smo ga stavili u staklenku i vakumirali, promijenio mu se oblik pakiranja i teško ga je bilo izvaditi iz staklenke. Nastavnici koji su ih pratili su nas pohvalili kako smo sve odlično pripremili i izveli te su najavili da se vraćaju na sljedeće otvorene dane.

Literatura

- [1] Hrvatski nacionalni obrazovni standard za 7. razred osnovne škole, 28. kolovoza 2006.
- [2] Hrvatski nacionalni obrazovni standard za 8. razred osnovne škole, 28. kolovoza 2006.
- [3] Nastavni plan za gimnazije,
http://dokumenti.ncvvo.hr/Nastavni_plan/gimnazije/obvezni/fizika.pdf, 20.7.2015.
- [4] Internetska stranica HVD, <http://cro-vacuum.hr/>, 7.2.2016.
- [5] Podaci o vakuumu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum>, 20.7.2015.
- [6] Podaci za Karmanovu liniju,
https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_line, 29.10.2015.
- [7] Niels Marquardt, Introduction to the Principles of Vacuum Physics, Institute for Accelerator Physics and Synchrotron Radiation
- [8] Slika Magdeburških polutki,
<http://www.antiquaprintgallery.com/ekmps/shops/richben90/images/germany-the-magdeburg-hemispheres-antique-print-1894-105603-p.jpg>, 2.10.2015.
- [9] Sears and Zemansky's, University Physics, 12th Edition, Pearson Education, 2008.
- [10] Pfeiffer Vacuum, The Vacuum Technology Book Volume II, Know-how Book, April 2013.
- [11] Chr. Edelmann, Pressure Measurement – Total Pressures, Otto von Guericke University
- [12] Podaci o Suncu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Sun>, 20.7.2015.
- [13] Podaci o Mjesecu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Moon>, 20.7.2015.
- [14] Podaci o Merkuru, <https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury>, 20.7.2015.
- [15] Podaci o Veneri, <https://en.wikipedia.org/wiki/Venus>, 20.7.2015.
- [16] Podaci o Zemlji, <https://en.wikipedia.org/wiki/Earth>, 20.7.2015.
- [17] Podaci o Marsu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Mars>, 20.7.2015.
- [18] Podaci o Jupiteru, <https://en.wikipedia.org/wiki/Jupiter>, 20.7.2015.

- [19] Podaci o Saturnu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Saturn>, 20.7.2015.
- [20] Podaci o Uranu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Uranus>, 20.7.2015.
- [21] Podaci o Neptunu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Neptune>, 20.7.2015.
- [22] Podaci o Plutonu, <https://en.wikipedia.org/wiki/Pluto>, 20.7.2015.
- [23] Podaci NASA-e o Suncu, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>, 20.7.2015.
- [24] Podaci NASA-e o Merkuru, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>, 20.7.2015.
- [25] Podaci NASA-e o Veneri, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>, 20.7.2015.
- [26] Podaci NASA-e o Zemlji, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>, 20.7.2015.
- [27] Podaci NASA-e o Mjesecu, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>, 20.7.2015.
- [28] Podaci NASA-e o Marsu, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>, 20.7.2015.
- [29] Podaci NASA-e o Jupiteru, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/jupiterfact.html>, 20.7.2015.
- [30] Podaci NASA-e o Saturnu, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/saturnfact.html>, 20.7.2015.
- [31] Podaci NASA-e o Neptunu, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/neptunefact.html>, 20.7.2015.
- [32] Podaci NASA-e o Uranu, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/uranusfact.html>, 20.7.2015.
- [33] Podaci NASA-e o Plutonu, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/plutofact.html>, 20.7.2015.
- [34] Podaci o vrelištu, https://en.wikipedia.org/wiki/Boiling_point, 7.2.2016.

- [35] Podaci otopljenih plinova u vodi, http://www.engineeringtoolbox.com/gases-solubility-water-d_1148.html, 6.11.2015.
- [36] Podaci o tlaku vrenja vode, https://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water, 20.7.2015.
- [37] Podaci o gustoći zraka, https://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air, 20.7.2015.
- [38] S. Milošević, Plazma- osnovni oblik materije u svemiru, 2007., http://eskola.hfd.hr/proc_za_vas/proc-21/proc21.htm, 5.11.2015.
- [39] Zaplotnik, R., Kregar, Z., Biščan, M., Vesel, A., Cvelbar, U., Mozetič, M., and Milošević, S., Multiple vs. single harmonics AC-driven atmospheric plasma jet. (2014.) *EPL*, 106 25001.