

# Nevjerojatno ubrzanje

Hrvoje Mesić

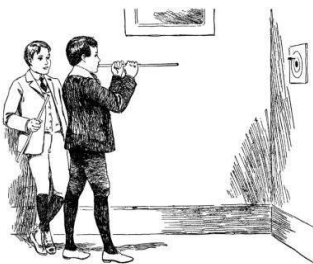
*Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu*

**Apstrakt.** Loptici za stolni tenis (ping-pong) možemo jednostavnim priborom pomoću tlaka zraka dati ubrzanje od  $10.000 \text{ m/s}^2$  odnosno  $1000\text{-g}$ , tako da postigne gotovo brzinu zvuka. Ipak loptica neće preletjeti više od 10 m. Da bismo razumjeli kako se to postiže i koja fizikalna načela stoje iza ove tvrdnje, najbolje je pokazati kroz nekoliko zanimljivih pokusa koje možda i sami ponovite ili još unaprijedite jednostavne uređaje za ubrzanje.

**Ključne riječi:** Ubrzanje, domet, kosi hitac, masa projektila, ubrzanje zrakom.

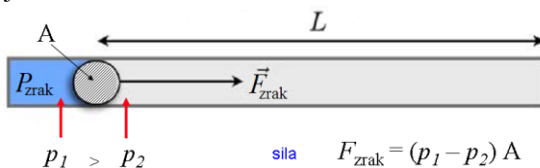
## UBRZAVANJE RAZLIKOM TLAKOVA

Jednostavan pokus izbacivanja strelice puhanjem ustima kroz cijev pokazuje da je moguće postići relativno velik domet i preciznost, ali se nameće fizikalno pitanje optimalnih parametara.



**SLIKA 1.** Izbacivanje „projektila“ puhanjem kroz cijev poznato je već tisućama godina, a i danas ga za lov koriste pojedina plemena u prašumama Amazone.

Razlika tlakova s jedne i druge strane tijela u nekoj cijevi, u koju tijelo pristaje tijesno ali uz minimalno trenje, proizvodi silu jednaku umnošku te razlike tlakova i površini poprečnog presjeka tijela.



Potiskujući tijelo duž cijevi ta sila vrši rad koji daje tijelu odgovarajuću kinetičku energiju.

$$\left. \begin{array}{l} \text{rad} \\ W = F_{\text{zrak}} L \\ W = \Delta E_{\text{kin}} \end{array} \right\} F_{\text{zrak}} L = \frac{1}{2} m v^2 - 0$$

Konačna brzina tako ubranog tijela razmjerna je stoga drugom korijenu od razlike tlakova i duljine cijevi, a obrnuto je razmjerna drugom korijenu od mase tijela.

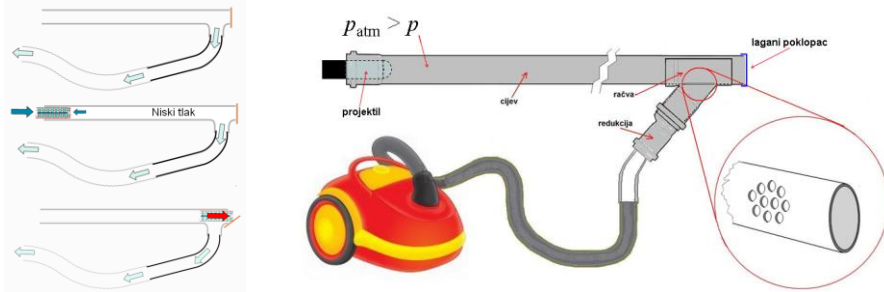
$$\text{brzina} \quad v = \sqrt{\frac{2 F_{\text{zrak}} L}{m}}$$

Želimo li postići što veću brzinu poželjno je dakle, barem teoretski da bude:

- što veća razlika tlaka
- što veća duljina cijevi i
- što manja masa projektila

## TOP NA USISAVAČ ZA PRAŠINU

Da bismo osigurali uvijek jednaku silu zgodno je za ubrzanje projektila konstruirati jednostavan "top" koji stvara razliku tlakova tako što s jedne strane djeluje atmosferski tlak zraka, a s druge strane tlak smanjimo običnim kućnim usisivačem za prašinu.



**SLIKA 2.** Jednostavan „top“ koristi usisavač za prašinu koji u cijevi, s jedne strane zatvorenoj prijanjanjem lagani poklopca, stvara tlak manji od atmosferskog.

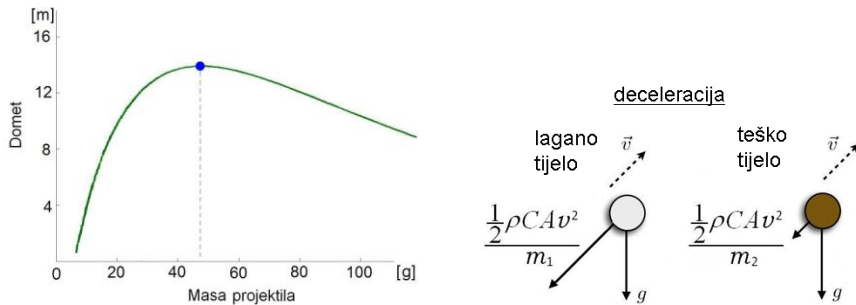
Ako usisivačem stvorimo sniženje tlaka onda će na umetnuto tijelo ("projektil") djelovati sila koja će ga ubrzavati duž cijevi, da bi na kraju tijelo odbacilo lagani poklopac i nastavilo gibanje zrakom u vidu kosog hitca.

## Dva konkurentna režima gibanja

Ovakav način ubrzanja tijela stvara konkurenciju dvaju režima koji zahtijevaju određivanje optimalne mase tijela za postizanje maksimalnog dometa. Naime u režimu ubrzanja u cijevi povoljno je da masa bude što je moguće manja jer ćemo razlikom tlakova postići maksimalnu brzinu pri izlasku iz cijevi. Međutim u režimu slobodnog gibanja kroz zrak takvo lagano tijelo male mase neće postići veliki domet jer ne može dobro svladavati relativno velik otpor zraka (slika 3.).

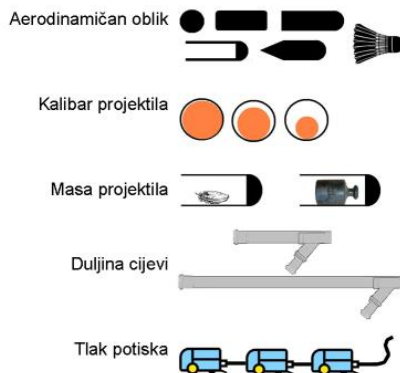
Akceleracija, tj. smanjenje brzine uslijed otpora zraka, obrnuto je razmjerna masi tijela. Zato ćemo primjerice dalje dobaciti kamen nego lopticu za stolni tenis približno iste veličine. U američkom bejzbolu, sportu gdje se zahtijeva velika brzina loptice bacanjem iz ruke, bilo je važno odrediti optimalnu masu loptice. Pošlo se od pretpostavke da je

prosječna sila kojom igrač ubrzava lopticu prije nego ona napusti njegovu ruku, prosječno slična kod svih igrača. Stoga je iskustveno određena masa  $\approx 145$  g.



**SLIKA 3.** Usporedba dvaju tijela različitih masa, a iste brzine pokazuje da je usporavanje lakšeg tijela veće i ono će imati u zraku manji domet od tijela veće mase. No nakon porasta mase preko optimalne vrijednosti domet se ponovo smanjuje jer je ubrzanje u uređaju za izbacivanje manje.

Ovaj jednostavan uređaj i gradivo iz fizike koje opisuje njegovo djelovanje mogu se ponuditi učenicima kao svojevrsan mini-projekt u dopunskoj nastavi. Također se može organizirati takmičenje u maksimalnom dometu koje zahtijeva nalaženje optimalnih parametara u izradi projektila i konstrukciji topa (slika 4.).



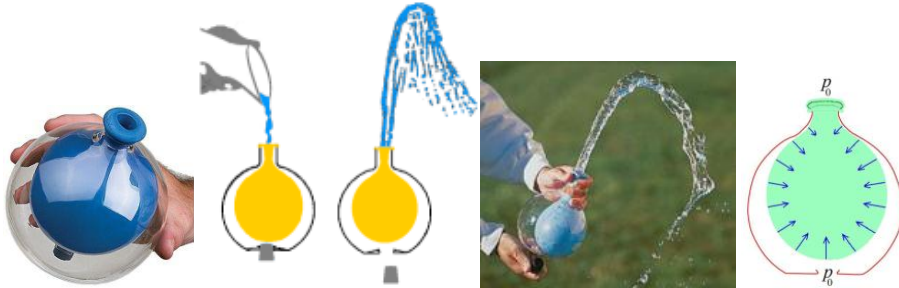
**SLIKA 4.** Učenici mogu mijenjati 1. aerodinamičan oblik projektila, 2. njegov kalibar i 3. masu. U pogledu „topa“ mogu iskušavati utjecaj 4. duljine cijevi ili 5. način spajanja više usisivača.

## UBRZAVANJE TEKUĆINE

Jedan jednostavan uređaj koji u sebi krije više mogućnosti za konceptualno objašnjavanje pojava iz hidrostatičke omogućava ubrzanje tekućine. Na prvi pogled intuitivno se nameće zaključak da se radi o ubrzanju uslijed razlike tlakova kao i u prethodnim uređajima.

Radi se o posebnoj staklenoj boci u koju je umetnut gumeni balon tako da mu je otvor prevučen preko grlića boce. Na taj je način balon stalno otvoren i može se napuhati ustima. Boca je posebna po tome što na dnu ima otvor koji se može zatvoriti čepom (slika 5.).

Boca pruža očiti primjer djelovanja tlaka zraka. Iznenadit ćete se kada balon ostane napuhan iako mu otvor kroz koji ste puhali nije zatvoren. Boca omogućava neposredno iskustvo o svojstvima tlaka zraka i potiče istraživanje i raspravu.



**SLIKA 5.** Balon se ne da napuhati ako je otvor na dnu zatvoren. Ako otvor začepimo **nakon** napuhavanja balona on ostaje napuhan. Ulijemo li vodu u balon i zatim uklonimo čep, voda u mlazu istječe.

Stavimo gumeni čep u otvor na dnu boce i pokušamo napuhati balon. To ne uspijeva jer staklo sprječava širenje zraka. Doduše zrak se u balonu i u prostoru između balona i boce neznatno sabije, upravo onoliko koliko bi se sabio pri pokušaju da napušemo praznu staklenu bocu.

Uklonimo čep iz otvora na dnu boce i ponovo pušemo u balon. Sad to uspijeva kao da boce i nema.

Držeći ustima otvor balona pod tlakom, začepimo rupu na dnu boce i zatim oslobodimo otvor balona. Otvoreni balon zadržava svoj napuhani oblik, a ispuhat će se tek kada uklonimo čep. Tlak zraka koji okružuje balon je manji od onog u balonu i zajedno s tlakom gume održava se ravnoteža, tj. nema sile koja bi ispuhala balon.

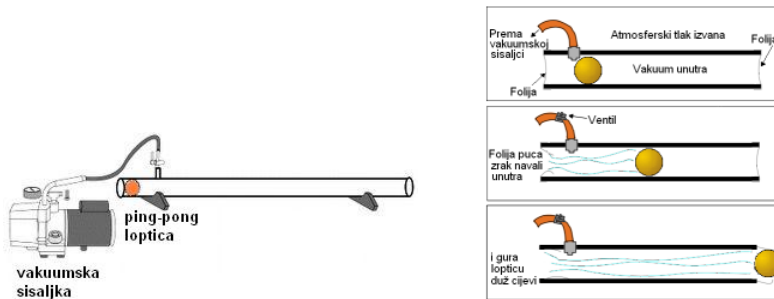
Posljednji uzbudljivi korak pokusa sastoji se u tome da napuhani balon u boci napunimo vodom. Uočite da se balon gotovo uopće ne širi od težine vode. Izvučemo čep i promatramo dojmljivu erupciju vodenog "gejzira" koji šiklja iz balona. Voda se ne istiskuje pod djelovanjem atmosferskog tlaka, jer je on jednak i na površini vode i oko balona. Vodu istiskuju elastične sile rastegnute gume balona.

## NEVJEROJATNO UBRZANJE

U nastojanju da se postigne što je moguće veća brzina tijela ubrzanog razlikom tlakova poslužit će konstrukcija topa za ubrzanje loptice za stolni tenis (ping-pong). Promjer loptice je 40 mm, a masa 2,7 g. Tako mala masa daje se ubrzati atmosferskim tlakom u cijevi duljine oko 3 m. Princip je slijedeći: cijev u koju loptica tijesno pristaje s minimalnim trenjem o stjenke ima priključak za vakuumsku sisaljku (slika 6.).

Nakon umetanja loptice cijev se s obje strane zatvori tankom ali čvrstom folijom. Uključivanjem vakuumske sisaljke iz cijevi se isiše zrak. Zatim se opna od folije probije ostrim predmetom i zrak navalni u vakuumirani prostor gurajući pred sobom lopticu. Ona na drugom kraju cijevi probije drugu opnu i izleti brzinom nešto manjom od 300 m/s [2].

## Nevjerojatno ubrzanje



**SLIKA 6.** Iz cijevi zatvorene folijom na oba kraja isišemo zrak. Probijanje folije na kraju bliže loptici zrak navali u prazan prostor i gura pred sobom lopticu koja izleti velikom brzinom.

Iz podataka o atmosferskom tlaku i promjeru loptice dobije se sila od 125 N. Djelujući na malu masu loptice od 2,7 grama postiže se nevjerojatno ubrzanje od  $46.300 \text{ m/s}^2$ . U cijevi duljine od 2,5 do 3 metra loptica bi s tolikim ubrzanjem trebala postići brzinu veću od zvuka.

$$F_{\text{zrak}} = p_{\text{atm}} \cdot A$$

$$F_{\text{zrak}} = 10^5 \text{ Pa} \cdot 12,5 \text{ cm}^2$$

sila  $F_{\text{zrak}} = 125 \text{ N}$

$$a = \frac{F_{\text{zrak}}}{m} = \frac{125 \text{ N}}{2,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}$$

nevjerojatno ubrzanje

$$a = 46.300 \text{ m/s}^2 \text{ ili } 4.700 \text{ g}$$

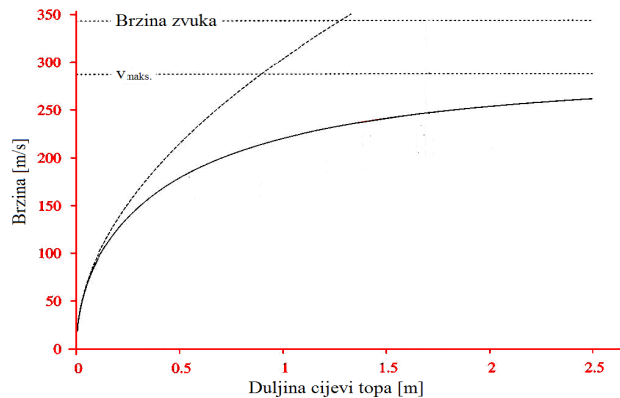
$$v = \sqrt{2aL}$$

brzina  $v = 430 \text{ m/s} = 1550 \text{ km/h}$

Međutim iz nekog se razloga tako velika brzina u praktičnom pokusu ne može postići. Očito je da u obzir nisu uzeti svi utjecaji [1]. Naime, u cijevi se ne ubrzava samo loptica nego i masa zraka koji lopticu gura, a u cijev stane skoro 4 litre zraka. To je masa od oko 4,5 grama. Osim toga zbog nedovoljnog brtvljenja dio zraka prolazi pored loptice, zatim vakuum u cijevi je relativno grub pa loptica ispred sebe gura određeni dio zraka. Sve to uzrokuje da se ovakvim uređajem loptica ne može ubrzati više od oko 270 m/s. No i to je brzina koja može loptici dati veliku količinu gibanja (slika 7.).



**SLIKA 7.** Loptica za stolni tenis može se ubrzati gotovo do brzine zvuka. S tolikom brzinom ona poput metka probija praznu limenku.

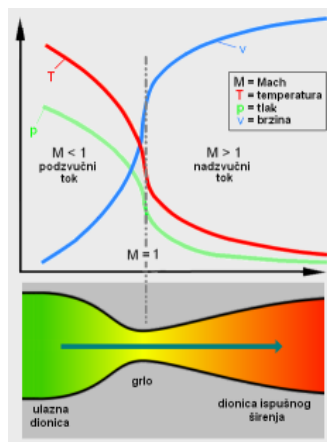


**SLIKA 8.** Fizičari Eric Ayars i Louis Buchholtz [1] su izračunali krivulju porasta brzine ping-pong loptice u ovisnosti o duljini cijevi. Pokazuje se da se brzina, neovisno o duljini cijevi, asimptotski približava jednoj maksimalnoj vrijednosti od oko 280 m/s.

## MOŽE LI IPAK BRŽE OD ZVUKA ?

Prije 128 godina, švedanin Gustaf de Laval izumio je 1888. g posebnu mlaznicu koja omogućava strujanje plina brže od zvuka. Ta se mlaznica od tada koristi na izlazu raketnih motora.

U principu radi se o suženju u koje se pod velikim tlakom utiskuje plin. Prije suženja režim je podzvučni s brzinama ispod 1 mah. U suženju dolazi do naglog pada tlaka i temperature, a toplinska energija protoka pretvara se u kinetičku i uzrokuje porast brzine. Uslijed toga plin u izlaznom dijelu mlaznice postiže nadzvučne brzine (slika 9).



**SLIKA 9.** De Lavalova mlaznica omogućava povećanje brzine plina iznad brzine zvuka, na račun pada tlaka i temperature kao svojevrsnog adijabatskog procesa.

Koristeći tu mlaznicu može se konstruirati top za ubrzanje ping-pong loptice tako da ona postigne nadzvučnu brzinu. Na cijev topa ugradi se De Lavalova mlaznica i zatvori

folijom (slika 10.). Na mlaznicu se učvrsti spremnik za komprimirani zrak. Kada tlak u spremniku naraste toliko da folija pukne **komprimirani** zrak počne ulaziti u cijev topa brzinom većom od brzine zvuka i gura pred sobom lopticu [3].

S takvom brzinom loptica je u stanju probiti i deblje materijale kao što je primjerice višeslojni reket za stolni tenis (slika 11.).



**SLIKA 10.** Top s dodanom De Lavalovom mlaznicom i komorom za komprimirani zrak.



**SLIKA 11.** Dramatičan učinak, ping-pong loptica probija reket.

## ZAKLJUČAK

Prihvatajući tvrdnju da se nikome ništa ne može objasniti niti ga poučiti ako ga to barem malo ne zanima, nastojimo osmisliti nastavu prožetu pitanjima. Ta klica interesa osnova je poučavanja fizike u školi. Zato su opisani uređaji i pokusi koji se njima mogu izvesti namijenjeni prvenstveno kao motivacijski sadržaji. Učenici kroz jednostavan matematički formalizam i zanimljive pokuse mogu usvojiti važne pojmove mehanike.

## LITERATURA

1. Eric Ayars, Louis Buchholtz. (2004.), "Analysis of the Vacuum Cannon", *Am. J. Phys.* **72**, 961 .
2. R. W Peterson, B. N. Pulford, K. R. Stein, (2005.) "The Ping-Pong Cannon: A Closer Look," *The Physics Teacher* **43**, 22-25.
3. Mark French, Craig Zehrung, Jim Stratton, (2013.) "A Supersonic Ping Pong Gun" (pdf), Department of Mechanical Engineering Technology, Purdue University

### Incredible Acceleration

**Abstract:** Using simple equipment to direct air pressure, a table tennis (ping pong) ball can be accelerated to  $10,000\text{m/sec}^2$ , i.e.  $1000\times g$ , so it almost reaches the speed of sound. Still, the ball will not fly for more than 10m. In order to understand how this is achieved and what principles of physics are behind this claim, it is best to demonstrate it through a few interesting experiments which you may repeat yourself or even improve the simple devices used for acceleration.