Slovarček:
Sodobne slikovne metode: PET, fMRI, MEG, TMS. Frenologi so menili, da lahko razumejo delovanje možganov in njihove posebnosti z opazovanjem površine lobanje. Danes vemo, da temu ni tako. Kljub temu pa se včasih znajdemo v podobnem položaju, ko s primerjanjem strukturnih sivin (in še nekaterih barvnih odtenkov, ki jih dodamo kasneje) pri sodobnih metodah slikovne diagnostike sklepamo na delovanje možganov. Nove tehnike, predvsem pa dodatne analize in zmogljivejši aparati nam ponujajo nova razumevanja o delovanju možganov, za katere danes menimo, da so pravilnejša kot tista, ki so jih pred stoletjem ponujali frenologi.
Funkcijske metode, med katere sodijo pozitronska emisijska tomografija (PET) in slikanje s funkcijsko magnetno resonanco (fMRI), nam omogočajo »videti« povečano presnovno aktivnost oziroma povečani lokalni pretok krvi. Tako lahko spremljamo izvajanje določenih nalog v »živih« možganih. Nevrofiziološke študije z elektroencefalografijo (EEG), magnetoencefalografijo (MEG) in transkranialno magnetno stimulacijo (TMS) pa izkoriščajo za opazovanje živčne aktivnosti spremembe membranskega potenciala aktivnih nevronov.

Literatura:
Armstrong, A. C., Stokoe, W. C., Wilcox, S. E., 1995: Gesture and the nature of language. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
Dapretto, M., Davies, M. S., Pfeifer, J. H., Scott, A. A,, Sigman, M., Bookheimer, S. Y., Iacoboni, M., 2006: Understanding emotions in others: Mirror neuron dysfunction in children with autism spectrum disorders. Nature Neuroscience, 9: 28-30.
Fogassi, L., Ferrari, P. F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., Rizzolatti, G., 2005: Parietal Lobe: from Action Organization to Intention Understanding. Science, 308: 662-7.
Ramachandran, V. S., Oberman, L. M., 2006: Broken mirrors: a theory of autism. Scientific American, 5: 62-9.
Rizzolatti, G., Fadiga, L., Fogassi, L, Gallese, V., 1996a: Premotor cortex and the recognition of motor actions. Cognitive Brain Research, 3: 131-41.

Od streljanja češnjeve koščice do kameleonovega jezika[1]

Gorazd Planinšič, Andrej Likar

Pogosto slišimo, da bi moral pouk naravoslovnih predmetov pripravljati bodoče generacije tako, da bo večina (volivci) sposobna sprejemati premišljene odločitve o vprašanjih, ki zadevajo širšo družbo in so povezana z znanostjo. Če hočemo to doseči, moramo pri pouku naravoslovnih predmetov načrtno iskati priložnosti, v katerih se lahko dijaki naučijo, kako se naravoslovno znanje gradi, izboljšuje in uporablja, pa tudi, kje so meje naravoslovnega znanja. V tem članku je analizirana zabavna dejavnost, ki jo pozna večina dijakov: streljanje češnjevih koščic s prsti. Zgodba je opisana kot raziskava, pri čemer so koraki podobni tistim, ki jih tipično ubirajo znanstveniki pri svojem delu. Takšen raziskovalni pristop je uspešen tudi kot poučevalska strategija, ki spodbuja dijake, da razmišljajo kot znanstveniki (Etkina, Van Heuvelen, 2007).
V zgodovini človeka je bila sposobnost, da z lastnim telesom požene v gibanje projektil, izjemnega pomena. Človek je postopoma izboljševal tehnike in izkoriščal svojo moč

1 *Članek je izboljšana različica članka, ki sta ga avtorja v lanskem letu objavila v reviji* Physics Edcuation *(G. Planinsic, A. Likar, Phys. Education, 47 (2012: 21-27.)*

na vse bolj optimalen način. Od metanja kamnov in kopij je napredoval do uporabe prač, lokov, samostrelov, katapultov in podobnih naprav. Pri tem je bil cilj povsem praktičen: ubiti žival ali sovražnika. Nekatere od teh tehnik so se ohranile do danes - na srečo s povsem drugačnimi cilji - kot športne dejavnosti. Omenimo le olimpijske discipline: meti krogle, diska, kladiva, kopja in lokostrelstvo. Pri vsem tem pa obstaja še ena komaj opazna dejavnost s podobnim namenom, ki prav tako spremlja človeka od pradavnine: streljanje koščic. Obstajata dva glavna načina, kako izstreliti koščico z lastnim telesom: tako da jo izstrelimo iz ust, v katerih povečamo tlak, ali pa tako, da jo stisnemo med prsti. V pričujočem članku se bomo osredotočili na drugo metodo. Najprej bomo postopoma razvozlali poenostavljeno fizikalno sliko streljanja češnjevih koščic s prsti, na koncu pa še spoznali, kaj ima to skupnega z vprašanjem: »Kako kameleon izstreli svoj jezik?«

Tehnika izstreljevanja češnjevih koščic s prsti je zelo preprosta: daj svežo češnjo v usta, pojej vse razen koščice, izpljuni koščico na dlan in jo primi s kazalcem in palcem. Stiskaj koščico med prstoma kar se da močno in med tem počasi pomikaj mesto pritiska proti zadnjemu koncu koščice - in koščica bo odletela z veliko hitrostjo. Velika hitrost, s katero odfrči koščica, lahko zabava in navduši, v radovednem človeku pa zagotovo spodbudi željo po razumevanju tega pojava.

Opazovanja in meritve

Osnovni podatki o češnjevi koščici, ki je sodelovala v naših poskusih, so zbrani na sliki 1.

Gibanje koščice smo snemali s hitro kamero Casio Exilim, ki je že bila predstavljena v *Proteusu* (Gogala, 2009). Videoposnetke smo snemali pri nastavitvi 600 sličic v sekundi in času osvetlitve (*shutter time*) 1/4000 sekunde. Čas osvetlitve smo izbrali potem, ko smo približno določili hitrost koščice, 10 metrov na sekundo. Pri omenjenem času osvetlitve je tako razmazanost slike zaradi gibanja koščice približno 3 milimetre, kar je sprejemljivo glede na velikost koščice. Kratek čas osvetlitev zahteva močan vir svetlobe. V našem primeru smo uporabili 1000-vatni reflektor, povsem primerna pa je tudi Sončeva svetloba.

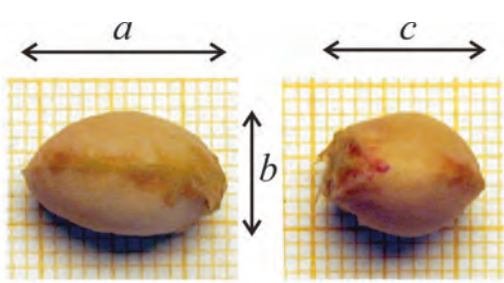
Hitrost koščice lahko določimo z merjenjem lege koščice na posameznih slikah videoposnetka, saj vemo, da so posnete v enakih časovnih intervalih (slika 2).

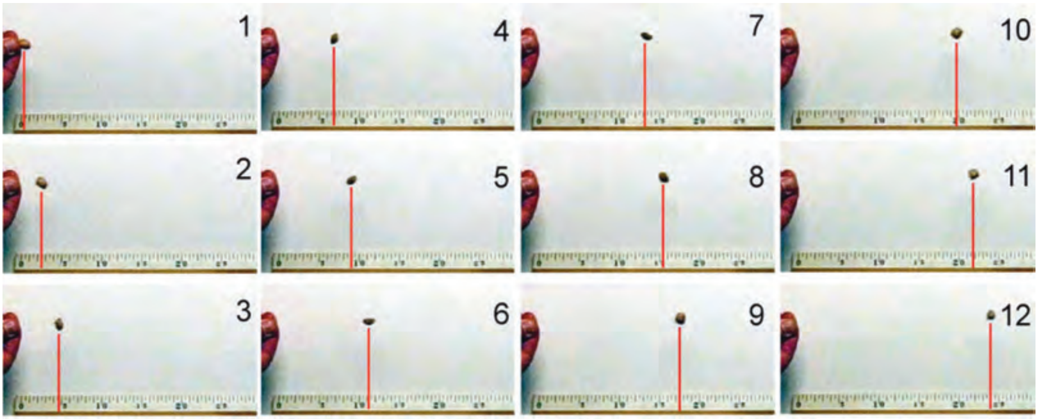
Določanje lege koščice iz slik bo bolj natančno, če se potrudimo, da leti koščica čim bolj v ravnini, ki je pravokotna na pogled kamere, in če je kamera čim bolj oddalje-

Slika 1: Osnovni podatki o češnjevi koščici, ki smo jo uporabili v naših poskusih. Fotografiji kažeta pogled na koščico iz dveh pravokotnih smeri. Koščica je na milimetrskem papirju.

Masa sveže češnje (brez peclja): 6,65 g.
Masa koščice: m = 0,60 g.

Dimenzije koščice:
a = 14 mm,
b = 9 mm,
c = 11 mm (pravokotno na a in b).





Slika 2: *Izstrelitev koščice: zaporedje 12 slik videoposnetka s hitro kamero. Časovni interval med zaporednima slikama je 1/600 sekunde. Merilo na ravnilu je v centimetrih (najmanjši razmik med črtama je 5 milimetrov).*

na od te ravnine (primerno velikost izreza dosežemo z uporabo zooma). Da lahko določimo razdalje v centimetrih, smo v kader postavili ravnilo. Iz posnetkov ugotovimo, da leti koščica prvih 18 milisekund (interval, ki je prikazan na sliki 2) skoraj s stalno hitrostjo 13 metrov na sekundo, kar je 47 kilometrov na uro. Pri več ponovitvah smo dobili podoben rezultat. Iz zgornjih podatkov lahko tudi izračunamo, da je zaradi gravitacijskega privlaka v zgornjem primeru koščica padla le približno 2 milimetra, kar pomeni, da lahko privzamemo, da se je v času opazovanja gibala kar po premici. Zanimiva je tudi primerjava hitrosti koščice in kopja. Hitrost, ki jo doseže kopje pri metu na olimpijskih igrah, je približno 100 kilometrov na uro, kar je le dvakrat več kot hitrost koščice, ki jo izstreli netrenirani fizik v srednjih letih.

Če pozorno pogledate fotografije na sliki 2, boste opazili, da se koščica med letom tudi vrti. Podrobna analiza slik pokaže, da naredi koščica en obrat v času prvih desetih sličic, iz česar lahko izračunamo, da se vrti s frekvenco približno 60 hertzev.

Privzetki in preprosta razlaga

Poskusimo na podlagi slik najprej oceniti pospešek ob izstrelitvi koščice. Pri tem bomo privzeli, da je bil pospešek ves čas enak, dokler ni koščica dosegla največje hitrosti. Ker smo že določili končno hitrost, je dovolj, če ocenimo še razdaljo, na kateri koščica doseže to hitrost iz mirovanja. Smiselno se zdi, da za oceno te poti vzamemo kar dolžino koščice (s = 14 milimetrov), saj smo pri streljanju vedno usmerili s konico naprej. Iz teh podatkov izračunamo

$$a_k = \frac{v_k^{\,2}}{2s} = 6000\ \mathrm{m/s^2}\ \text{ali približno } 600\ g.$$

Ker poznamo tudi maso koščice, lahko ocenimo silo, s katero smo delovali na koščico med pospeševanjem. Drugi Newtonov zakon nam pove, da je bila sila približno 4 newtone.

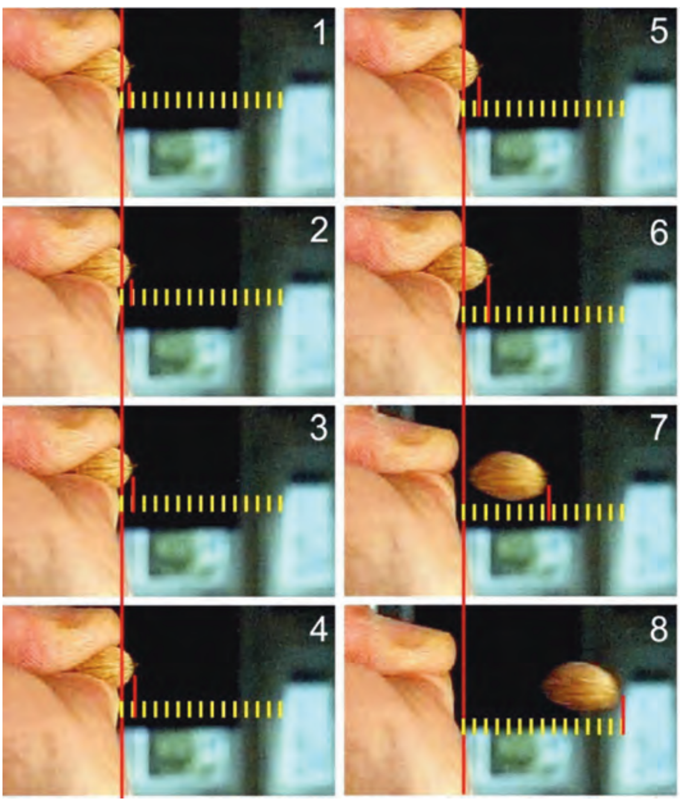
Preverjanje rezultatov

Postojmo za hip in razmislimo o smiselnosti rezultatov, ki smo jih izračunali doslej. V primerjavi s težnim pospeškom g = 9,81 m/s^2 se zdi izračunani pospešek 600 g sicer ogromen, toda iz vsakdanjega življenja nimamo kaj dosti izkušenj s pospeškom, zato težko sodimo, ali je izračunana vrednost smiselna ali ne. Nekoliko več izkušenj imam s silami, ki jih navadno primerjamo s težo znanih teles. Sila 4 newtone ustreza približno teži 0,4 kilograma predmeta. Kdor je streljal češnjeve koščice s prsti, se bo zagotovo strinjal, da je sila, s katero stisnemo koščico, mnogo večja od izračunane sile 4 newtonov. Znatno razhajanje med izračunano silo in silo, ki smo jo ocenili na drug način (v tem primeru na podlagi izkušenj), kaže na to, da koščice ne pospešuje neposredno sila naših prstov in da je mehanizem izstreljevanja češnjeve koščice očitno bolj zapleten, kot smo sprva mislili.

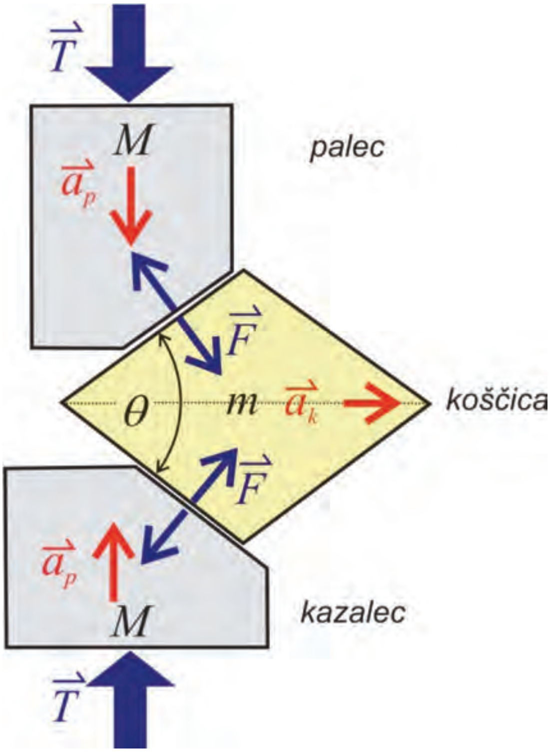
Dodatni poskusi

Če hočemo izboljšati razumevanje izstreljevanja koščice, potrebujemo več meritev. Zopet uporabimo hitro kamero, toda tokrat se še bolj osredotočimo na samo izstrelitev koščice. Slika 3 kaže bližnje posnetke nove izstrelitve z isto koščico v osmih zaporednih trenutkih. Iz časovnega spreminjanja lege lahko izračunamo časovno spreminjanje hitrosti in pospeška.

Analiza meritev pokaže, da je bil največji pospešek dosežen takrat, ko so prsti zdrsnili po zadnji polovici koščice (nekje med šesto in sedmo sličico). To pomeni, da je razdalja, na kateri koščica pospeši do končne hitrosti, približno polovica njene dolžine in ne celotna dolžina, kot smo prvotno ocenili. Iz posnetkov dobimo tudi idejo, kako izboljšati naš model, s katerim pojasnimo mehanizem izstreljevanja koščice. V izboljšanem modelu moramo upoštevati obliko koščice in vlogo prstov pri pospeševanju, toda tako, da izboljšani model ne bo bolj zapleten, kot je to nujno potrebno. Zato bomo naredili nekaj privzetkov. Privzeli bomo, da ima koščica obliko dvojnega klina, tako da ima presek koščice obliko romba (glej sliko 4). Privzeli bomo tudi, da imata kazalec in palec enaki



Slika 3: *Bližnji posnetek izstrelitve koščice: zaporedje 8 videoslik s hitro kamero. Časovni interval med zaporednima slikama je 1/600 sekunde. Rumene črtice na slikah so 2 milimetra narazen.*



Slika 4: Izboljšani model mehanizma izstreljevanja koščice (velikosti posameznih delov niso prikazane v pravilnem razmerju). Vektorji pospeška so prikazani z rdečo, vektorji sil pa z modro bravo. Narisane so le kontaktne sile na posamezni del modela (teža ni pomembna v tem primeru): F – sila, s katero prst deluje na koščico oziroma koščica na prst (po 3. Newtonovem zakonu sta sili nasprotni in po velikosti enaki), T – sila mišic na prst.

masi in nanju delujeta enaki sili mišic ter da se gibljeta le v smeri pravokotno na smer gibanje koščice. Zanemarili bomo silo trenja in vpliv teže. Slika 4 kaže skico modela in sile, ki delujejo med sestavnimi deli modela.

Analiza modela

V našem modelu je oblika koščice določena s kotom θ, ki ga lahko izračunamo iz enačbe

$$\tan\frac{\theta}{2} = \frac{b}{a} \quad .$$

Za našo koščico dobimo

$\theta \approx 65$ °.

Iz skice modela je razvidno, kako je premik koščice povezan s premikom prstov. Če se vsak prst premakne za x drug proti drugemu v navpični smeri, se pri tem koščica, ki drsi ob prstih, premakne za

$$x \cot(\theta/2)$$

v vodoravni smeri. Razmerje premikov koščice in prstov je enako razmerju hitrosti in tudi razmerju pospeškov obeh teles (privzeli smo, da sta prsta enaka in se torej gibljeta na enak način). Zvezo med pospeškom koščice in pospeškom prstov lahko torej zapišemo takole:

$$a_k = a_p \cot(\theta/2) \quad .$$

V našem primeru izračunamo

$$a_k \approx 1{,}6\, a_p \, .$$

Gibanje prstov in koščice pod vplivom sil opišemo z drugim Newtonovim zakonom. Tako dobimo še dve enačbi (ker smo privzeli, da sta prsta enaka in koščica simetrična, opišemo gibanje obeh prstov z isto enačbo). Dobili smo sistem treh enačb s tremi neznankami: a_k , a_p in F (sila posameznega prsta na koščico). Sistem lahko rešimo (glej dodatek) in izrazimo pospešek koščice takole:

$$a_k = \frac{2T\tan(\theta/2)}{m + 2M\tan^2(\theta/2)} \, ,$$

kjer je T sila mišic in M masa prsta. Masa dela prsta, ki sodeluje pri pospeševanju koščice, je približno 15 gramov, kar je polovica mase celotnega prsta. Maso celotnega prsta smo ocenili tako, da smo izmerili prostor-

nino prsta ter privzeli, da je njegova gostota enaka gostoti vode.
V našem primeru je masa koščice (0,60 g) mnogo manjša od mase prstov, zato jo v imenovalcu zgornjega izraza zanemarimo in dobimo:

$$a_k \approx \frac{T}{M}\cot(\theta/2)\,.$$

Izraz pove, da je pospešek koščice v prvem približku določen s silo mišic, maso prstov in obliko koščice, ni pa odvisen od mase koščice. Ker smo privzeli, da je masa koščice mnogo manjša od mase prstov, je ta rezultat smiseln. V našem poenostavljenem modelu sile mišic pospešujejo prsta, koščica pa le zdrsne ob prstih in se zanemarljivo upira pospeševanju.

Testiranje modela z dodatnimi merjenji

Model bomo sprejeli, če se napovedi, ki jih izračunamo na podlagi modela, ujemajo z meritvami. S podatki, ki smo jih zbrali doslej, lahko na podlagi modela ocenimo silo, s katero mišice delujejo na prsta. Če vzamemo za pospešek koščice vrednost, ki smo jo ocenili na začetku članka (6000 m/s^2), dobimo za silo mišic (T) oceno 60 newtonov. Kako lahko na preprost način izmerimo silo mišic, ki deluje na kazalec in palec, ko ju stiskamo skupaj? Običajni silomer je očitno neuporaben za ta namen. Potrebovali bi ploščat merilnik sile, ki bi ga stisnili s prstoma. Toda za grobo oceno lahko tak merilnik nadomestimo s tanko plastično cevko. V našem poskusu smo uporabili plastično cevko z zunanjim premerom 6 milimetrov in notranjim premerom 3 milimetra. Takšna cevka je primerno trda, da jo lahko sploščimo le, če jo stisnemo kar se da močno (slika 5). Seveda je to odvisno tudi od osebe, ki stiska, toda v našem primeru nas zanima le red velikosti, za kar zadostuje opisana merilna metoda. Cevko smo nato položili na tehtnico, jo stisnili tako, da smo dosegli enako deformacijo in odčitali maso, ki jo je kazala tehtnica (slika 5). Težo te mase smo vzeli za oceno iskane sile T. Po več merjenjih smo dobili povprečje 50 newtonov. Ker se napoved, ki smo jo naredili na podlagi modela, dobro ujema z izmerjeno vrednostjo, je naše zaupanje v veljavnost modela večje.

Omejitve modela

Pomembno je, da se zavedamo, da smo pri oblikovanju modela naredili različne privzetke in da je njegova uporabnost pri opisu poskusa in napovedovanju zato močno omejena. Naštejmo glavne lastnosti poskusa, ki

Slika 5: *Merjenje sile mišic s stiskanjem cevke. Najprej stisnemo cevko med prsti tako, kot da bi izstreljevali koščico (levo). Nato položimo cevko na tehtnico in pritisnemo s prstom tako, da dosežemo enako deformacijo cevke kot prej (desno).*

jih model ne upošteva: med koščico in prsti je prisotno trenje, prsta se med seboj razlikujeta po obliki in masi in se ne gibljeta po isti premici. Realna koščica ni simetrična in njena površina ni ravna, temveč zakrivljena.

Uporaba pridobljenega znanja

V zgodbi o streljanju koščice lahko vidimo ponazoritev tipičnih korakov, ki jih ubirajo znanstveniki pri svojem delu. Toda ob tem primeru ste se gotovo vprašali: »Pa kaj potem, če vem, kako odfrči koščica, ko jo stisnem? Kje lahko to znanje sploh uporabim?« Z naslednjim primerom bomo pokazali, da je potencialna uporabnost vsakega znanja mnogo večja, kot se morda zdi na prvi pogled.

Kameleon lahko ujame plen, ki je oddaljen od njega celo za eno in pol njegove dolžine. Jezik iztegne v desetinki sekunde, pospešek jezika pa pri tem doseže vrednost 500 m/s^2 (Mueller, Krenenbarg, 2004). V preteklosti so zoologi predlagali več hipotez, s katerimi bi razložili proženje kameleonovega jezika, na primer erekcija jezika kot posledica povečanja krvnega tlaka ali napihovanje jezika z zrakom iz pljuč. Leta 1933 je Zoond predstavil razlago, ki je trenutno sprejeta kot veljavna (Zoond, 1933), toda razprava o vlogi posameznih delov kameleonovega jezika se še nadaljuje (Mueller, Krenenbarg, 2004). Poglejmo Zoondovo razlago.

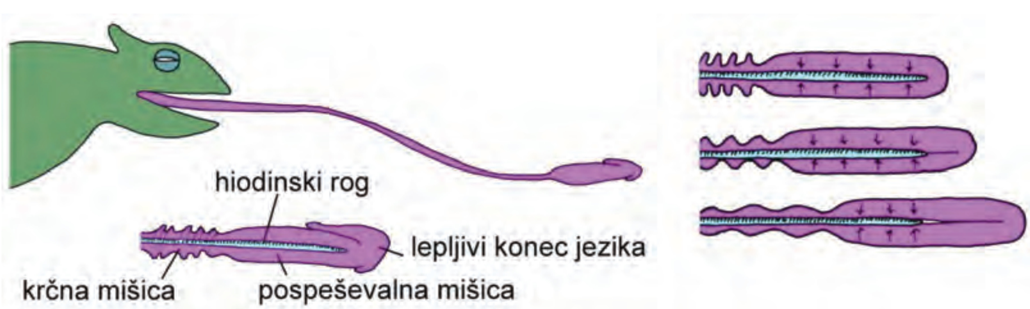
Kameleon ima votel jezik. Ta je navlečen na dolgo koničasto hrustančno tvorbo (imenovano hiodinski rog), ki izrašča iz obraznih kosti. Jezik je zgrajen iz treh osnovnih delov: iz lepljivega konca jezika, krčnih mišic in pospeševalnih mišic. Pospeševalne mišice imajo valjasto obliko in se krčijo v radialni smeri, tako da pri tem stisnejo hiodinski rog. Ker je ta koničaste oblike, deluje pri močnem krčenju pospeševalnih mišic na mišično konico jezika sila, ki jo pospeši v smeri hiodinskega roga (slika 6). Konica jezika tako zdrsne s hiodinskega roga z velikim pospeškom in odleti proti plenu.

Mehanizem je podoben kot pri streljanju češnjevih koščic, le da sta v tem primeru vlogi koščice in prstov zamenjani. Hidonski rog (prej koščica) ostane na mestu, mišice, ki ga stiskajo (prej prsti), pa odletijo z velikim pospeškom. Potem ko lepljiva konica doseže plen, krčne mišice vrnejo jezik v prvotni položaj in začne se pojedina.

Zaključek

V članku smo poskušali slediti tipičnim korakom, kot jih ubirajo znanstveniki pri raziskovanju. Na podlagi opazovanj in privzetkov smo oblikovali prvi preprosti mo-

Slika 6: Skica kameleona z iztegnjenim jezikom (zgoraj levo), zgradba kameleonovega jezika (spodaj levo) in gibanje konice kameleonovega jezika med proženjem v treh zaporednih trenutkih (desno).



del. Ker se napovedi, narejene na podlagi tega modela, niso ujemale z meritvami, smo predlagali izboljšani teoretični model. Za reševanje modela smo uporabili matematična orodja in preizkusili veljavnost modela z neodvisno meritvijo. Preverili smo konsistentnost modela in se ob tem zavedli njegovih omejitev. Na koncu smo pokazali, da je lahko tako pridobljeno znanje uporabno v povsem drugačnem primeru, ki pa ga lahko opišemo na analogen način. Dijaki in študenti morajo imeti priložnosti, da doživijo vsakega od teh korakov in spoznajo, kakšno vlogo imajo pri nastajanju naravoslovnega znanja. Pomembno je tudi, da ob tem spoznajo, da znanost ne daje dokončnih, absolutnih odgovorov, temveč približke, ki pa z napredovanjem znanosti postajajo vse bolj točni.

Literatura:

Etkina, E., Van Heuvelen, A., 2007: Investigative Science Learning Environment - A Science Process Approach to Learning Physics. V: Redish, E. F., Cooney, P., (urednika): Research Based Reform of University Physics, AAPT (2007), dostopno na http://per-central.org/per_reviews/media/volume1/ISLE-2007.pdf.

Gogala, M., Proteus 2009: Casio Exilim Pro EX F1, nevsakdanja fotokamera, zanimiva za naravoslovce. Proteus, 71(9-10): 443-448.

Mueller, U. K., Krenenbarg, S., 2004: Power at the tip of the tongue. Science, 304: 217-219.

Zoond, A., 1933: The mechanism of projection of the chameleon's tongue. J. Exp. Biol. 10: 174–185. Dostopno na: http://jeb.biologists.org/content/10/2/174.full.pdf.

Dodatek

Matematična obravnava modela za opis izstrelitve koščice.

Zapišemo drugi Newtonov zakon za koščico in za en prst:

$$T - F\cos(\theta/2) = M \cdot a_p$$

$$2F\sin(\theta/2) = m \cdot a_k$$

Geometrija problema določa zvezo med pospeškoma:

$$a_k = \frac{a_p}{\tan(\theta/2)}.$$

Tako imamo tri enačbe in tri neznanke. Sistem je preprost, ker so enačbe linearne. Rešitev sistema zapišemo v obliki:

$$a_k = \frac{2T\tan(\theta/2)}{m + 2M\tan^2(\theta/2)},$$

$$a_k = \frac{2T\tan^2(\theta/2)}{m + 2M\tan^2(\theta/2)},$$

$$F = \frac{mT}{\cos(\theta/2)(m + 2M\tan^2(\theta/2))}.$$

Če upoštevamo,

da je $m < M$,

lahko izraz za pospešek koščice zapišemo v naslednjem približku:

$$a_k \approx \frac{T}{M\tan(\theta/2)}.$$