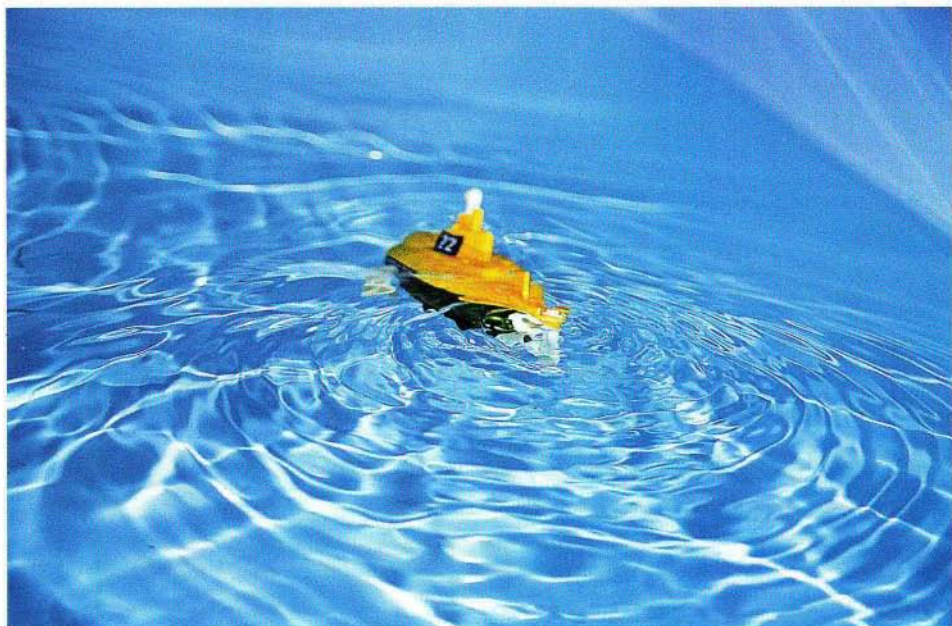






Podmornica iz trgovine z igračami.



Ker so bili ob pripravi te številke Preseka ribniki zamrznjeni, smo podmornico splovili kar v kopalni kadi. Poskus je nekoliko motila kratka plovna pot.

## PODMORNICA NA VZMET – KAKO DELUJE V VESOLJU IN NA ZEMLJI

V mojem spominu igra pomembno vlogo pločevinasta podmornica, ki so jo starejši otroci spuščali po majhnem ribniku blizu otroškega igrišča v mariborskem mestnem parku. Poganjal jo je, kakor večino plovil, majhen vijak. Kaj je bilo v podmornici, je bila tedaj zame še skrivnost. Videla sem le srečne lastnike, ki so vijaček nekaj časa vrteli v eno smer, nato pa potopili podmornico v vodo. Podmornica je odbrzela po svoji poti, mi, nevedni gledalci, pa smo stegovali svoje vratove, da bi jo bolje videli. V naslednjem hipu sem se znašla v vodi. Zabave je bilo zame konec.

Januarja 1993 je vesoljsko plovilo Endeavor vzletelo s Floride z bogatim tovorom potrebščin za komunikacijske satelite in mnoge znanstvene poskuse. Na krovu pa so peljali tudi poln zaboj otroških igrač, namenjenih za pouk fizike iz vesolja<sup>1</sup>. Ena izmed igrač je bila tudi podmornica, podobna tisti iz mariborskega ribnika. Nekateri med vami tako podmornico poznate, morda se celo skriva v vaši škatli z igračami. Poskusila sem jo poiskati v ljubljanskih trgovinah, vendar o njej še niso slišali. Na prednovoletnem izletu preko meje pa sem jo odkrila v trgovini z otroškimi igračami. Na odmaknjeni polici je samevala košara polna podmornic, ki so čakale na poletje. Podmornica iz trgovina z igračami je zelo podobna tisti vesoljski. Z njo sem naredila nekaj poskusov, s katerimi bo lažje razumeti, kaj se je dogajalo v vesolju.

Za tiste, ki take igrače še nikoli niso videli, jo opišimo. Podmornica ima obliko pomanjšane podmornice (slika na II. strani ovitka), na vrhu ima celo majhne periskope. Le razmerje med njeno dolžino in širino ni najbolj pravo. Sliki na III. strani ovitka prikazujeta notranjost in sestavne dele igrače. Podmornica je na spodnji strani obtežena (a), na zgornji strani ima plastičen mehur, napolnjen z zrakom (b). Na zadnji strani podmornice je vijak (c), ki je preko zobniškega sistema (d) povezan s spiralno vzmetjo (e). Spiralno vzmet navijemo z gumbom na spodnji strani podmornice. Z roko med navijanjem preprečimo vrtenje vijaka. Podmornico potopimo in počakamo, da se napolni z vodo. Nad vodo ostane samo vrhnji del podmornice. Previdno spustimo vijak, ki se začne vrteti, odriva vodo in podmornica se premika. Ko se vzmet odvijje, se vijak ustavi, malo kasneje pa se ustavi tudi podmornica.

V vesoljskem laboratoriju seveda niso potapljali podmornice v vodo. Navili so spiralno vzmet in podmornico spustili po prostoru laboratorija. Vijak se je vrtel, odrival je zrak, podmornica se je počasi premikala skozi

<sup>1</sup> [http://www.observe.ivv.nasa.gov/nasa/exhibits/toys\\_space/toyframe.html](http://www.observe.ivv.nasa.gov/nasa/exhibits/toys_space/toyframe.html)

zrak. Zgodilo pa se je še nekaj. Medtem ko se je gonilni vijak hitro vrtel v eno smer, se je preostali trup podmornice počasi vrtel v nasprotno smer. Česa takega na Zemlji pri podmornicah nikoli ne opazimo. Zakaj ne?

Medtem ko se je vzmet v trupu podmornice odvijala, je na enem koncu delovala z navorom na vijak podmornice, na nasprotni strani pa z nasprotno enakim navorom na trup plovila. Na celotno podmornico ni bilo nobenega drugega (zunanjega) navora, če zanemarimo majhen navor upora zraka.

Kadar se telesa lahko vrtijo okoli osi, okoli katere deluje navor, je kotni pospešek premosorazmeren velikosti navora. Sorazmernostni koeficient imenujemo vztrajnostni moment telesa in je odvisen od mase ter njene porazdelitve po telesu. Tako ima npr. votel valj, kjer je vsa njegova masa zgoščena v plašču, dvakrat večji vztrajnostni moment kot poln valj z enakimi dimenzijami in enako maso. Matematično zapišemo to zvezo v obliki

$$M = J \alpha,$$

kjer je  $M$  navor,  $J$  vztrajnostni moment in  $\alpha$  kotni pospešek, ki nam pove, za koliko radianov na sekundo se vsako sekundo poveča kotna hitrost vrtečega se telesa. Pri podmornici sta si navora na vijak in trup podmornice nasprotno enaka, vendar povzročata zaradi različnih vztrajnostnih momentov vijaka in podmornice različne kotne pospeške obeh:

$$J_{\text{vijak}} \alpha_{\text{vijak}} = -J_{\text{trup}} \alpha_{\text{trup}},$$

zato se tudi po enakem času različno vrtita v nasprotnih smereh. Trup podmornice, ki je večji in ima precej večjo maso kot vijak, se vrti mnogo počasneje kot lahek vijak. Zelo površno lahko njune frekvence ocenimo. Naj vijak tehta približno 2 g in ima premer 2 cm. Če privzamemo, da je njegova oblika podobna ploščatemu valju ( $J_{\text{valj}} = 1/2 mr^2$ ), je njegov vztrajnostni moment enak približno 5 g cm<sup>2</sup>. Trup podmornice tehta približno 100 g, večina njegove mase pa se skriva v uteži na dnu podmornice. Utež je od osi podmornice odmaknjena približno 2 cm. Vztrajnostni moment trupa bo približno 400 g cm<sup>2</sup> in je osemdestkrat večji od vztrajnostnega momenta vijaka. Zato pričakujemo 80-krat manjši kotni pospešek podmornice in tudi 80-krat manjšo kotno hitrost na koncu, ko se vijak odvrtil. Kolikšni naj bi bili frekvenci vrtenja vijaka in podmornice? Pri običajnem spuščanju podmornice obrnemo gumb za napenjanje spiralne vzmeti 3-krat. Zobniški prenos poskrbijo, da se zavrti vijak med odvijanjem vzmeti 90-krat. Ko je podmornica navita, sprostimo vijak in približno izmerimo čas vrtenja vijaka na zraku. Ta je zelo kratek – meri le

eno sekundo. Povprečna frekvenca vijaka je 90 obratov na sekundo, trup podmornice pa bo za en obrat v nasprotni smeri potreboval približno eno sekundo več. Na žalost je poskus na internetu predstavljen le z besedami in z zelo preprosto razlago. Resnejših podatkov o uporabljeni igrači pa ni in zato ne moremo narediti resne primerjave z našimi ocenami.

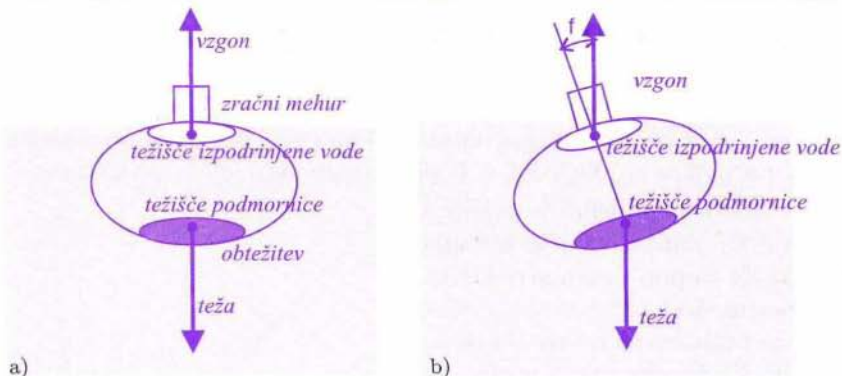
Zakaj takega dogajanja iz izkušenj na Zemlji ne poznamo? Na Zemlji ima podmornica težo. V vodi čuti podmornica tudi vzgon predvsem zaradi vode, ki jo izpodrine zračni mehur. Na Zemlji delujeta na podmornico še dve sili, ki ju v vesolju ni bilo, in povzročata navor. Obe sta posledica zemeljske privlačnosti. Na sliki 1 sta označeni obe sili in njuni prijemališči. Dokler sta teža in vzgon na isti premici (slika 1a), stoji podmornica navpično. Če jo nekoliko sunemo prečno na dolgo os, bo zanihala. Navor dvojice sil – teže in vzgona – namreč vrača ladjo v njeno običajno ravnovesno lego, ko je težišče podmornice natanko pod težiščem izpodrinjene vode. Vidimo torej, da je za podmornico vsota vseh zunanjih navorov enaka nič le v ravnovesni legi, drugače pa ne<sup>2</sup>. Ko se vijak začne vrteti, se trup podmornice začne vrteti v nasprotni smeri, podobno kot v vesoljskem laboratoriju. Vendar bolj kot se zavrti, večji je navor teže in vzgona, ki deluje v nasprotni smeri. Kmalu se vzpostavi ravnovesje, ko je pri nagibu podmornice  $\phi$  navor dovolj velik, da ustavi vrtenje podmornice. Podmornica pluje naprej, njen trup pa je nekoliko nagnjen. Ko se vzmet odvijata, se navor zmanjšuje in z njim tudi nagib. Ali matematično:

$$M_{\text{vzmet}} = mgd \sin \phi,$$

kjer je  $M$  navor zvite vzmeti,  $mg$  teža podmornice,  $d$  razdalja med prijemališčema teže in vzgona ter  $\phi$  kot, za katerega se podmornica nagne (slika 1b). Na spodnji sliki na II. strani ovitka je fotografirana podmornica, ki pluje z vrtečim se vijakom. Periskopi so nagnjeni za nekaj  $10^\circ$ .

Poskusimo še na Zemlji simulirati vesoljske razmere. Obeh zunanjih sil – teže in vzgona – ne moremo odpraviti, lahko pa zmanjšamo njun vpliv. Velikost navora dvojice sil je odvisna od njune medsebojne razdalje  $d$ . Če premaknemo težišče podmornice proti težišču izpodrinjene vode, se bo navor dvojice sil zmanjšal. Da bo doseženi učinek res dovolj velik, naredimo novo podmornico. Vijak si sposodimo iz podmornice ali pa ga naredimo iz plutovinastega zamaška, v katerega zatakne aluminijaste lopatice (npr. iz pločevinke). Pritrdimo ga na povkrovček škatlice za šumeče tablete s koščkom trše žice, ki naj ima na notranji strani zanko.

<sup>2</sup> Obstaja še ena lega, kjer je vsota zunanjih navorov enaka nič, in sicer, ko stoji podmornica na glavi. Ta lega je labilna in že najmanjša motnja podmornico prevrne v lego, kjer je težišče podmornice pod težiščem izpodrinjene vode.



Slika 1.

Skozi škatlico napeljimo elastiko in jo na nasprotni strani pritrdimo s pomočjo vžigalice, da se ne bo odvijala. Naši novi podmornici navijemo vijak, jo potopimo pod vodo in počakamo, da se z vodo napolni. Vijak pridržimo, da se ne odvrti. Plastika, iz katere je narejena škatlice, je nekoliko lažja od vode, zato škatlica, tudi če je napolnjena z vodo, plava. Ko vijak spustimo, se zavrti, odriva vodo in škatlica se po vodi premika naprej. Pri tem se vrtil v nasprotni smeri kot vijak, podobno kot podmornica v vesolju. Zakaj tako drugače od igrčke? Težišče izpodrinjene vode je pri igrčki približno v središču zračnega mehurja, težišče podmornice pa v sredini uteži na njenem dnu. Razdalja med obema znaša nekaj centimetrov. Tudi vztrajnostni moment podmornice je mnogo večji od vztrajnostnega momenta vijaka in tudi podmornica, v kateri bi obe težišči sovpadali, bi se vrtela počasi. Masa plastične škatlice je enakomerno porazdeljena po obodu, zato je njeno težišče nekje v sredini škatlice; ker je vsa narejena iz enakega materiala in je približno simetrična, je tudi težišče izpodrinjene vode na istem mestu. Plastična škatlica ima poleg tega vztrajnostni moment le nekajkrat večji od vztrajnostnega momenta vijaka, zato je frekvenca vrtenja škatlice le nekajkrat manjša od frekvence vrtenja vijaka. Ker težišči podmornice in izpodrinjene vode sovpadata, tudi navora, ki bi vrtenje preprečil, ni. Ko se elastika odvije, vrtenje zamre. Navorov okolja na škatlico namreč ne moremo preprečiti. Vrteči se vijak odriva vodo (ali v vesoljskem laboratoriju zrak), navor upora vode pa zavira vrtenje.

Za konec pa še naloga za vas: Naredite podmornico iz škatlice za šumeče tablete. Postopoma jo na dveh različnih mestih obtežite (npr. s plastelinom) in razbremenite (npr. s koščki stiropora) tako, da se navor zopet pojavi. Ugotovite, kdaj se škatlica ne suče več! Ugotovite, kako se spreminja zasuk škatlice medtem, ko se vijak odvija! Pa še sami dodajte kakšno ugotovitev.

