

Prosto padanje – nekdanj



JANEZ STRNAD

→ Galileo Galilei je ugotovil, da je prosto padanje enakomerno pospešeno gibanje. Podrobno je raziskal tudi enakomerno pospešeno gibanje kroglic pri kotaljenju po položnem klancu. Ni mogel meriti kratkih časov, zato je pospešek zmanjšal približno v razmerju višine in dolžine klanca. Ne enega ne drugega pospeška ni izmeril, pospešek prostega padanja je le zelo površno ocenil (*Galilei in pospešek*, Presek 38 (2010/2011) (1) 12–15). Kdo je torej prvi izmeril pospešek prostega padanja? Na vprašanja o tem, kdo je kaj naredil prvi, je vedno potrebno odgovarjati previdno. Zato recimo, da je bil Giovanni Battista Riccioli med prvimi. Nekateri sicer trdijo, da je bil prvi prav on. Njegovo delo je tako zanimivo, da ga je vredno spoznati nekoliko поблиže.

Riccioli se je kot jezuit po navodilu reda začel ukvarjati z astronomijo. Njegovo najpomembnejše delo *Novi Almagest* z več kot tisoč petsto stranmi velikega formata je izšlo leta 1751 (*Almagest* je bilo najpomembnejše Ptolemajevo delo). V njem si je Riccioli prizadeval prenoviti astronomijo. Opustil je Ptolemajevo sliko, da se Sonce in planeti gibljejo okoli Zemlje, in ni sprejel Kopernikove, da se Zemlja kot planet z drugimi planeti giblje okoli Sonca. Odločil se je za vmesno sliko Tycha Braheja, da se Sonce giblje okoli Zemlje, planeti pa okoli Sonca. Tako raz-





lago so sprejeli tudi jezuiti. Riccioli je navedel kar 77 razlogov proti gibanju Zemlje okoli Sonca, a tudi 49 razlogov za takšno gibanje.

Riccioli se je lotil tudi številnih fizikalnih vprašanj. Veliko dela je vložil v merjenje pospeška prostega padanja. Med pripravami je ugotovil, da je zvok, ki ga povzroči lesena kroglica, ko pade z višine dvajsetih metrov in udari na tla, veliko močnejši, kot če pade s polovične višine. Žogo, ki pade z višine treh metrov, ujamemo, ne da bi zabolelo, če pade s precej večje višine, pa zaboli. Ljudje, ki padejo z majhne višine, se ne poškodujejo, pri padcu z večje višine pa se. Lesena krogla, ki pade z velike višine v vodo, se pod gladino vode potopi veliko bolj, kot če pade z majhne višine. Žoga iz trdega usnja, ki pade z velike višine, se na trdih tleh odbije veliko bolj, kot če pade z majhne višine. Vse to ga je prepričalo, da hitrost padajočega telesa narašča z višino, s katere pade.

Leta 1640 se je v Bologni resno lotil merjenja. Pomagal mu je 18 let mlajši jezuit Francesco Maria Grimaldi, ki je pozneje odkril uklon svetlobe, in še jezuit Cassiani. Čas so merili s kratkim nitnim nihalom, katerega polovični nihaj je trajal $1/6$ sekunde. S tako hitrim nihalom je zelo težko meriti. Kaže pa, da so merilci z vajo postali dokaj spretni. Zgledovali so se po merjenjih, ki jih je leta 1634 v Ferrari opravil jezuit Niccolo Cabeo z manj kot 30 m visokega zvonika. Riccioli le ni prvi meril pospeška prostega padanja, meril pa je temeljiteje kot Cabeo.

Približne dolžine smo navedli v metrih, merske podatke pa bomo navedli v čevljih. Za stari rimski čevlj, pes ali pedis, večinoma navajajo 0,296 m. Naletimo tudi na druge vrednosti, celo na $1/3$ m. Nekaj podatkov govori za to, da je Ricciolijev čevlj meril 0,301 m. Negotovost otežkoča primerjavo.

Ricciolijevo kratko nihalo je bilo dolgo $1,15/12$ čevlja. Temu po prvem podatku ustreza 2,84 cm, po zadnjem pa 2,88 cm. Galilei je ugotovil, da je nihajni čas sorazmeren s kvadratnim korenom iz dolžine. Enačbe za nihajni čas $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ pa še niso poznali. Z njo s pospeškom prostega padanja v Bologni $9,806 \text{ m/s}^2$ dobimo za nihalo z nihajnim časom $1/3$ sekunde dolžino 2,76 cm.

Pri štetju nihajev so si pomagali s petjem glasbenih lestvic ali z glasnim ritmičnim štetjem. Krogle

so spuščali z okna stavbe, v kateri so prebivali, in z različnih cerkvenih zvonikov v Bologni. Glavni del merjenj pa so opravili s stolpa, ki ga je v 12. stoletju začela graditi družina Asinelli in ki stoji sredi Bologne kot ena od njenih znamenitosti. Za njegovo današnjo višino navajajo 98,4 m. Po Ricciolijevem mnenju je bil stolp tako pripraven za merjenje, kot bi ga zgradili prav s tem namenom.

Iz različnih točk stolpa so spustili svinčnico in z njo izmerili višino. Pripravili so glinaste krogle z maso po 219 g in jih spuščali z različnih višin. Z večkratnim merjenjem so ugotovili, da v šest enojnih nihajih v eni sekundi, pade telo z višine 15 čevljev, v dveh sekundah z višine 60 čevljev, v treh sekundah z višine 135 čevljev, v štirih sekundah z višine 240 čevljev in nazadnje v 4,33 sekunde z višine 280 čevljev, to je z vrha stolpa. Višine, za katere je krogla padla v zaporednih sekundah $15, 60 - 15 = 45, 135 - 60 = 75$ in $240 - 135 = 105$, vse v čevljih, so v razmerju lihih števil 1:3:5:7. Prav to je napovedal Galilei. Riccioli spočetka tej napovedi ni verjel. Pričakoval je, da hitrost pri padanju v zaporednih sekundah narašča hitreje, v geometrijskem zaporedju 1:3:9:27, danes bi rekli eksponentno. (Tako bi bilo, če bi bila hitrost in pospešek sorazmerna s potjo.) Izposloval si je dovoljenje, da je prebral prepovedani Galileijev *Dialog*. Ricciolijevi naravoslovni poštenosti v prid govori dejstvo, da je dal v tem pogledu Galileiju prav, čeprav je prej v svojem delu celo ponatisnil Galileijevo obsodbo. Z Grimaldijem sta obiskala bolnega Galileijevega učenca jezuita Bonaventuro Cavallierija, ki ga je njuno obvestilo razveselilo.

Riccioli pospeška prostega padanja ni navedel. Iz dobljenih podatkov pa bi lahko izračunal $29,8$ čevlja/ s^2 . Zagotovil je, da se za določeno točko merski izidi med seboj v nobenem primeru niso razlikovali za več kot za polovico nihaja. Če za stari rimski čevlj vzamemo 0,296 cm, da to pospešek $8,82 \text{ m/s}^2$; če vzamemo 0,301 m, pa $8,97 \text{ m/s}^2$. Riccioli je nekatere korake pri merjenju opisal podrobno, nekaterih pa sploh ni opisal. Tako ostaja nepojasnjeno kako so se med merjenjem sporazumevali, kako so uskladili nihanje nihala v spodnji točki s trenutkom, ko so v zgornji točki spustili kroglo.

Riccioli je posvetil veliko skrb merjenju časa z nitnim nihalom. Kaže, da je tako ravnal, še preden je opazoval prosto padanje. Omenil je umerjeno nihalo, kar najbrž pomeni, da je umeril daljše nihalo in za krajše nihalo uporabil sorazmernost s kvadra-



SLIKA 1.

Giovanni Battista Riccioli
(1598-1671)

tnim korenem iz dolžine. Merjenj z nihali se je lotil zelo velikopotezno. Prizadeval si je narediti *sekundno nihalo*, katerega polovica nihaja bi trajala eno sekundo. Pri prvi vrsti poskusov so šteli nihaje šest ur in ugotovili, da je nihalo za $2,1 \cdot 10^{-3}$ odstopalo od sekundnega nihala. Pri tem so našteali več kot 20 000 nihajev. Nihalo je bilo treba od časa do časa pognali, ne da bi zmotili časovni potek nihanja, ker je zaradi zračnega upora nihalo dušeno.

Ob tem je Riccioli podvomil v sončno uro, s katero je izmeril šest ur. Zato so pri naslednjem merjenju leta 1642 šteli nihaje med zaporednima prehodoma Sonca čez krajevni poldnevnik. Odstopanje od sekundnega nihala je nanoslo $1,5 \cdot 10^{-2}$. Pri poskusu je sodelovalo devet jezuitov. Pri naslednjem poskusu so šteli nihaje med zaporednima prehodoma zvezde čez krajevni poldnevnik. (Zvezdni dan je za 3,9 minut krajši od Sončevega.) Nihalo z dolžino 3,35 čevlja je od sekundnega nihala odstopalo za $6,9 \cdot 10^{-3}$. Poskusi, pri katerih so prešteli več kot 86 000 nihajev, so bili tako naporni, da so sodelavci odnehali. Poleg Grimaldija je odtlej pri merjenju sodeloval le še en pomočnik.

Leta 1645 so uporabili krajše nihalo z dolžino 3,23 čevlja. Izbrali so tudi krajši interval med prehodom dveh različnih zvezd čez krajevni poldnevnik. Tako je bilo treba prešteti le nekaj več kot 3 000 nihajev. Merili pa so trikrat. To kaže, da so se zavedali napak pri merjenju. Nihalo je za $0,9 \cdot 10^{-3}$ odstopalo od sekundnega nihala. Za omenjeni nihali dobimo dolžino 0,992 m ali 1,01 metra in 0,956 m ali 0,972 m, medtem ko da enačba 0,993 m. Riccioli je menil, da nihalo ni popolna naprava za merjenje časa, a je veliko zanesljivejša kot druge. Pri vseh merjenjih je naštel preveč nihajev. Odstopanja niso naraščala z višino, kakor bi pričakovali, če bi šlo za vpliv zrač-

nega upora. Zelo verjetno se je v merjenja prikradla sistematična napaka in je natančnost merjenj precenil.

1	2	3	4	5	6
6	1	36	15	15	1
12	2	144	60	45	3
18	3	324	135	75	5
24	4	576	240	105	7
26	$4\frac{1}{3}$	676	280	40	$8\frac{1}{6}$

Ricciolijeva preglednica za enega od treh nizov merjenj vsebuje (1) število polovičnih nihajev nihala, (2) ustrezeni čas v sekundah, (3) kvadrat števila nihajev, (4) višino, za katero so padle krogle, (5) pot krogel v zaporednih sekundah, (6) razmerje poti. Današnjemu fiziku se zdijo s kratkim nihalom dobljeni podatki kar preveč urejeni. Preglednici za druga dva niza sta samo malo manj urejeni.



SLIKA 2.

Stolp Asinelli v Bologni po risbi iz *Novega Almagesta* (levo) in na razglednici (desno). Razdalje med točkami H, β, K, L, M, N ustrezajo razdaljam med točkami O, C, Q, R, S, T, iz katerih so spuščali glinaste krogle. Če si mislimo vrvico in na njej

v točkah N, M, L, K, β in N pritrjene drobne uteži, bi uteži zadevale tla v enakih časovnih razmikih, ko bi vrvico spustili. Tak poskus še danes včasih pokažejo v šoli.

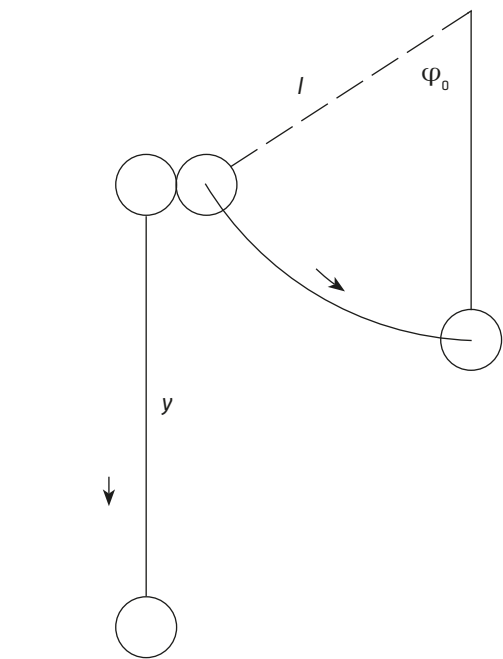
Riccioli je spoznal, da telesa padajo s konstantnim pospeškom, pospešek pa se nekoliko spreminja z velikostjo in s težo teles. Težje telo z večjo ali enako gostoto pada nekoliko hitreje. Od enako velikih teles gostejše pada hitreje. Primerjal je padanje krogel z maso 70 g iz svinca in lesa. Medtem ko je prva padla





za 280 čevljev, je druga padla za 240 čevljev. Navedel je podatke za 21 takih dvojic. Razliko je pripisal zračnemu upor in zagotovil, da je treba upoštevati tudi gostoto zraka. Nasprotoval je Galilejevi trditvi, da telesa z enako težo padajo enako, a pripomnil, da je Galilei morda opazoval padanje enako velikih teles z različno gostoto, pri katerih so razlike majhne. Ovirgel je Galilejevo trditev, da pade 33 kg težka železna krogla z višine 44 m v 5 s, saj je glinasta krogla z večje višine 83 m padla v 4,33 s.

Riccioli je opazil, da nihajni čas z naraščajočo amplitudo narašča. Pri merjenju pospeška s kratkimi nihali so bile amplitude dokaj velike, kar je utegnilo poslabšati natančnost pri merjenju. Medtem je Galilei še mislil, da nihajni čas ni odvisen od amplitude. V opisane poskuse so Riccioli in njegovi sodelavci vložili ogromno truda. Današnji fizik njihovo ravnanje težko razume. Vsekakor ti poskusi tudi opozarjajo, kako pomemben je bil razvoj merilne tehnike. Merjenje časa so izrazito izboljšali po letu 1656, ko je Christiaan Huygens patentiral uro na nihalo.



SLIKA 3.

Duhovnik in redovnik Marin Mersenne (1588–1648), znan po tem, da je širil naravoslovna spoznanja, je tudi raziskoval prosto padanje in nihanje nitnih nihali. Pri poskusu je telo na

vrvici spustil istočasno kot telo, ki je prosto padalo. Želel je doseči, da bi telo na vrvici navpično oviro zadelo sočasno kot padajoče telo tla in bi oba poka zaslišal hkrati. Ni navedel nedvoumnega rezultata. Mislil je, da nihajni čas ni odvisen od amplitude. Če ne bi upoštevali zračnega upora, bi dobili za razmerje med višino pada in dolžino nihala $y/l = \frac{1}{2}E^2 (\sin^2 \frac{1}{2}\varphi_0)$ z amplitudo φ_0 in polnim eliptičnim integralom prve vrste $E(\sin^2 \frac{1}{2}\varphi_0)$. Če bi vzeli, da nihajni čas ne bi bil odvisen od amplitude, bi za $\varphi_0 \rightarrow 0$ dobili $y/l = \frac{1}{8}\pi^2 = 1,2337$.

Riccioli in Grimaldi sta za *Novi Almagest* narisala zelo podroben zemljevid Luninega površja. Njun način poimenovanja je v rabi še danes. Veliko tvorb na Luninem površju nosi njuna imena.

Riccioli je mislil, da bi se izstrelki, ki bi jih izstrelili proti severu, odklonili proti vzhodu, če bi se Zemlja vrtila. Po tem, da tedaj odklona niso zaznali, je sklepal, da se Zemlja ne vrti. Danes vemo, da se izstrelki na vrteči se Zemlji odklonijo. To je *Coriolisov pojav*, ki je pomemben tudi za vreme. Ime ima po Gaspardu de Coriolisu, ki je leta 1835 raziskoval zakon gibanja v vrtečem se koordinatnem sistemu. Odkloni se tudi izstrellek, izstreljen proti vzhodu. Riccioli je zmotno mislil, da se v tem primeru izstrellek ne bi odklonil.

× × ×

↓↓↓

REŠITEV BARVNI SUDOKU S STRANI 6

4	2	6	8	3	1	5	7
3	1	5	7	6	4	8	2
7	8	3	5	2	6	4	1
1	4	2	6	7	5	3	8
5	3	7	4	1	8	2	6
2	6	8	1	5	3	7	4
6	7	4	3	8	2	1	5
8	5	1	2	4	7	6	3

× × ×