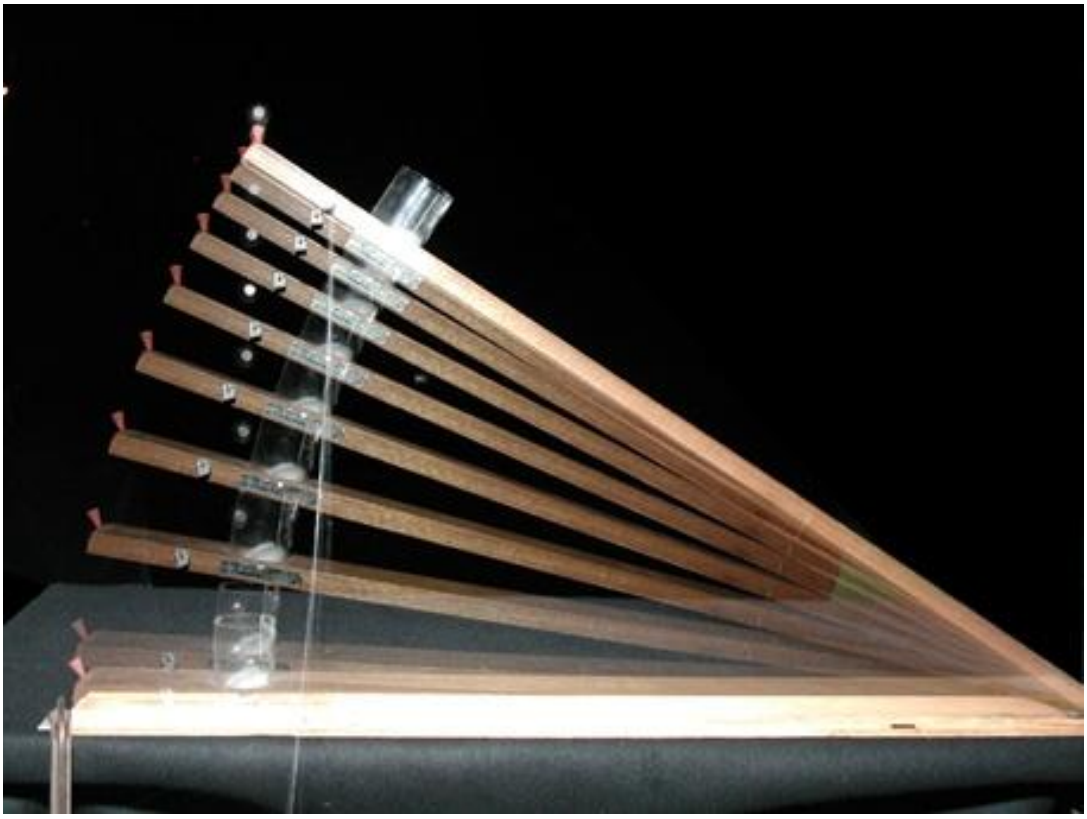
Cesta Kokrškega odreda 16
4294 Križe
tel.: 04 59 51 100; fax.: 04 59 51 110
davčna št.: 57553629
e-mail: tajnistvo@oskrize.si
www.oskrize.si

PODROČJE 1: fizika in astronomija

PADAJOČI DIMNIK



Avtor raziskovalne naloge: Aleks Erman

Mentorici: Betka Potočnik
Tatjana Stanjko

Somentor: Aljoša Erman

Križe, 2025

Kazalo vsebine

Kazalo slik

Kazalo tabel

Povzetek

Pri tradicionalni predstavitvi »hitreje od gravitacije« togo palico pritrdimo na vodoravno podlago s tečajem na enem koncu. Na prosti konec palice položimo majhno kroglico. Palico s kroglico dvignemo in spustimo tako, da se sprostita in hkrati prosto padata, dokler ne prideta do vodoravne podlage. Pod določenimi pogoji bo kroglica padla na mizo za palico in tako dokažemo, da palica pada s pospeškom, večjim od pospeška prostega pada.

Ključne besede: gravitacijski pospešek, padajoči dimnik, prosti pad

Summary

In the traditional ”faster than gravity” demonstration, a rigid stick is fixed to a horizontal table by a hinge at one end. A small ball is then placed on the stick. The stick and ball are now released at the same time and fall freely until they reach the table. Under certain conditions, the ball will reach the table after the stick, thus demonstrating that the stick fell faster than free fall.

Keywords: gravitational acceleration, falling chimney, free fall

Uvod

Gravitacija je ena temeljnih sil v naravi, ki vpliva na vse objekte. Že od antičnih časov so se ljudje spraševali, kako predmeti padajo. Aristotel (384–322 pr. n. št.) je padanje razložil tako, da težji predmeti padajo proti Zemlji hitreje kot lažji. Skoraj 20 stoletij kasneje je Galileo (1564–1642) eksperimentalno ovrgel dolgo sprejeto trditev Aristotela, da ima padajoči predmet določeno naravno hitrost padanja sorazmerno z njegovo težo. Galileo je ugotovil, da se hitrost nenehno povečuje, masa pa ni pomembna. Podal je razlago, da kadar ni pomembnega upora, vsi predmeti padajo z enakim pospeškom. Njegovo delo je nadaljeval Newton (1643–1727) in na osnovi njegovih opažanj in razlag vemo, da kadar lahko zanemarimo upor, vsi prosto padajoči predmeti padajo z gravitacijskim oziroma težnim pospeškom[1].

Sedaj se ponovno vprašamo, ali so izjeme?

Ugotovil sem, da obstajajo situacije, ko telesa oziroma bolj natančno deli telesa padajo s pospeškom, večjim od težnega pospeška (g), ki je na Zemlji približno 9,8 m/s^2. V raziskovalni nalogi sem predstavil nekaj takšnih primerov

Kadar opazujemo padajoče predmete, lahko hitro ugotovimo, da obstajajo primeri, kjer določeni deli telesa padajo s pospeškom, večjim od težnega pospeška. Če spustimo palico, da se vrti, bo en konec običajno pospešil s pospeškom, večjim od g, drugi konec pa s pospeškom, manjšim od g. Podobno značilnost imata padajoča palica ali deska, pritrjeni na enem koncu. Prosti konec palice lahko pospeši s pospeškom, večjim od g. To pokažemo s standardnim poskusom, ki ga imenujemo tudi padajoči dimnik. Pospešek toge palice, ki se vrti okoli enega konca, in čas, potreben, da palica pade na vodoravno mizo, se primerjata s časom in pospeškom prostega delca, prvotno nameščenega na palici. Ta poskus je zanimiv tudi zato, ker lahko vidimo primerjavo med dvema vrstama gibanja. To sta premo gibanje kroglice in vrtenje palice.

Eksperimenti

Prvi eksperiment

Potrebujemo palico in nekaj obročkov, ki jih enakomerno razporedimo po palici[2]. Najprej držimo merilno palico vodoravno in jo spustimo hkrati na obeh koncih. Ugotovim, da obročki ves čas padanja obdržijo stik z palico. Nato pa en konec palice postavimo na rob mize in držimo samo na enem koncu. Konec palice spustimo in opazujemo obročke. Ugotovim, da nekateri obročki zaostanejo za palico.

Slika 1: Poskus 1

Glede na to, da obročki padajo s težnim pospeškom, se mora palica gibati s pospeškom, ki je večji od težnega. Potem sem poskušal ugotoviti, kolikšen je ta pospešek in zakaj nekateri obročki ostanejo na deski. Razlog je v rotaciji palice in zato se različni deli palice gibljejo z različnimi pospeški.

Malo fizikalnega izračuna.

- sila teže na desko, ki deluje v središču deske: $F_g = mg$,
- navor, ki vrti to desko zaradi sile teže: $M = mgl/2$; l – dolžina deske),
- kotni pospešek: $\alpha = M/J$; J - vztrajnostni moment in je za palico, ki se vrti okoli roba $J = ml^2/3$,
- kotni pospešek za naš primer: $\alpha = 3g/2l$.

Celotna palica se giblje z enakim kotnim pospeškom, različen je pa pospešek v navpični smeri.

- radialni pospešek: $a_r = r\alpha$; r je oddaljenost od osi.

Na ta način lahko izračunamo pospešek skrajnega konca deske: $a_r = 3g/2$. Vidimo, da je ta pospešek res večji od težnega pospeška. Sedaj pa poskušamo še ugotoviti, kateri deli deske padajo s pospeškom, večjim od težnega pospeška:

$a_r > g$

$3rg/2l > g \rightarrow r > 2l/3$

Torej računsko dobimo, da vsi deli deske, ki so od osi oddaljeni več kot 2/3 deske padajo s pospeškom večjim od g. Vsi izračuni veljajo v prvem trenutku, ko desko spustimo. To sem potem preveril še eksperimentalno tako, da sem označil 2/3 deske in preveril, kateri kovanci se odlepijo od deske. S poskusom sem tudi potrdil fizikalni model.

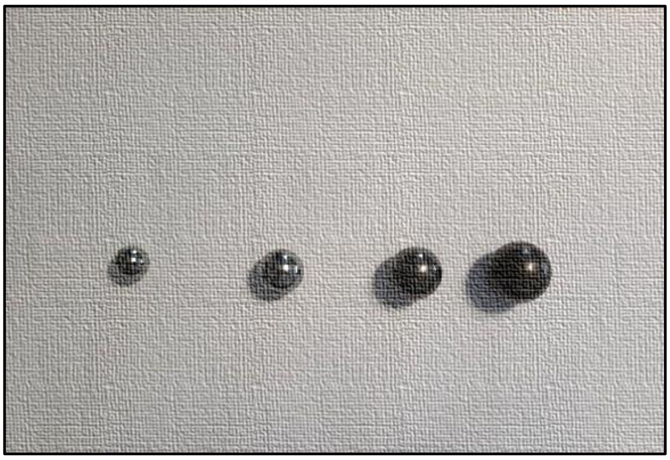
Drugi eksperiment

Najbolj tipičen je eksperiment za primere »hitreje od gravitacije«[3,4]. Pri tem eksperimentu palica, ki je pritrjena na eni strani, pade hitreje kot prosti predmet, ki leži na njej. Kako je to mogoče? Poglejmo si podrobneje. Eksperiment se začne s palico, ki je na enem koncu pritrjena na mizo ali drugo trdno podlago. Na prosti konec palice postavimo majhno kroglico. Nato istočasno spustimo palico in kroglico ter opazujemo, kaj se zgodi.

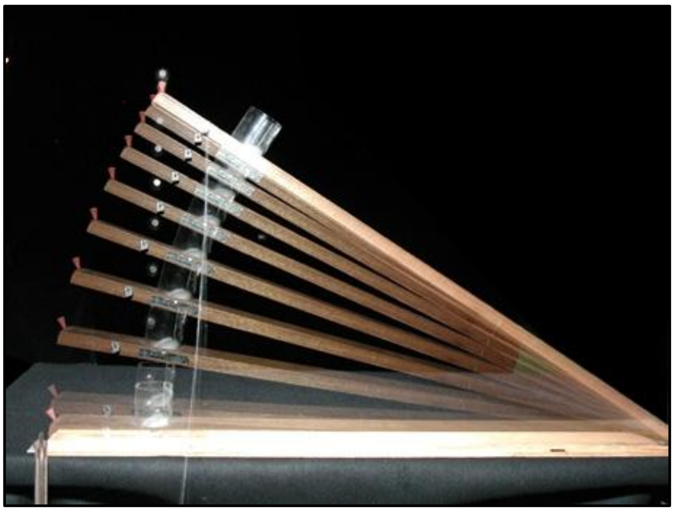
Slika 2: Poskus imenovan padajoči dimnik

Slika 3: Demonstracija padca pri poskusu

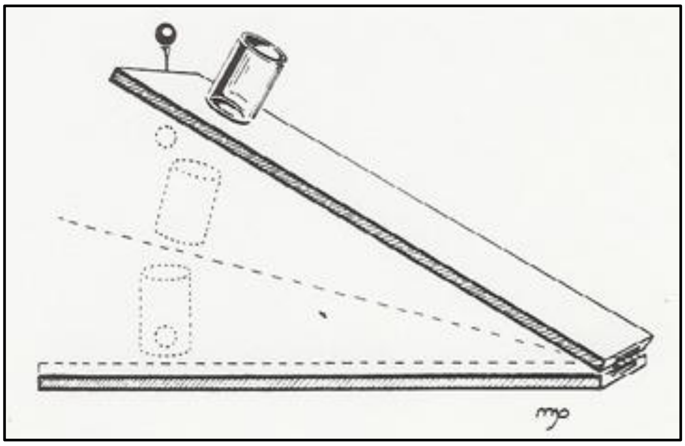
Presenetljivo je, da palica pade hitreje kot kroglica, kar pomeni, da kroglica med padanjem celo zaostane za palico. To je nepričakovano, saj bi pričakovali, da bosta oba predmeta padala enako hitro, kot nas uči prosti pad. Poskus sem izvedel z različno velikimi kroglicami, ki so imele premer od 12 mm do 22 mm in sem vedno dobil enak rezultat.



Slika 4: Kroglice, s katerimi sem izvajal poskus



Slika 5: Prikaz padca nagnjene palice in kroglice[4]

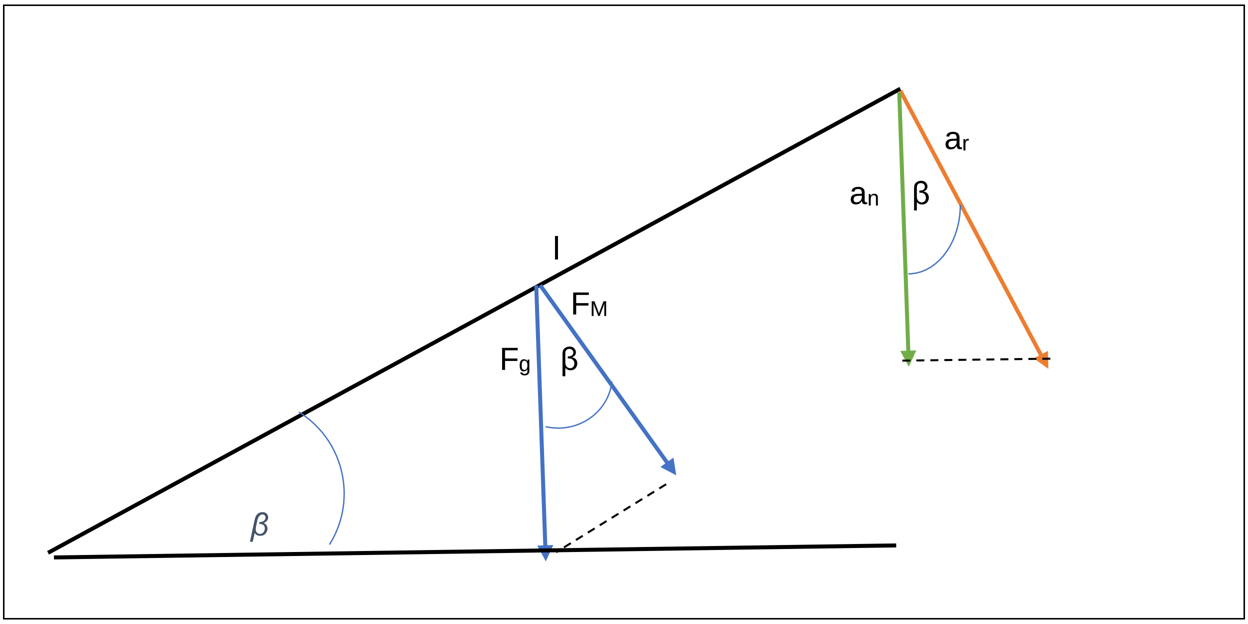


Slika 6: Shematični prikaz padanja deske in krogle[5]

Zakaj palica pade hitreje?

Da bi razumeli ta pojav, moramo upoštevati dejstvo, da se palica ne premika le naravnost navzdol, ampak tudi rotira okoli točke pritrditve. Medtem ko prosti predmet (kroglica) pada izključno zaradi gravitacije, ima palica poleg gravitacijskega vpliva tudi dodatno pospeševanje zaradi vrtenja.

Če si predstavljamo gibanje palice, lahko vidimo, da njen prosti konec potuje večjo razdaljo kot njen težiščni del. Posledično se prosti konec palice pospeši bolj kot bi, če bi palica le prosto padala. To povzroči, da konec palice pade hitreje kot kroglica, ki je bila nanjo položena.



Slika 7: Skica poskusa 2

Malo fizikalnega izračuna (glej sliko 7):

- sila teže na desko, ki deluje v središču deske: $F_g = mg$,
- navor, ki vrti to desko zaradi sile teže: $M = mgl\cos\beta/2$; l – dolžina deske, β – naklon deske,
- kotni pospešek: $\alpha = M/J$; J - vztrajnostni moment in je za palico, ki se vrti okoli roba $J = ml^2/3$,
- kotni pospešek za naš primer: $\alpha = 3g\cos\beta/2l$.

Celotna deska se giblje z enakim kotnim pospeškom, različen je pa pospešek v navpični smeri.

- radialni pospešek: $a_r = r\alpha$; r je oddaljenost od osi.

Na ta način lahko izračunamo pospešek skrajnega konca deske: $a_r = 3g\cos\beta/2$. Ta pospešek ima smer, ki je pravokotna na desko, nas pa zanima komponenta tega pospeška v navpični smeri, ki je sedaj: $a_n = 3g\cos^2\beta/2$. Vidimo, da je ta pospešek sedaj odvisen tudi od naklona palice.

Kritični kot

Poskušal sem izračunati, kolikšen je lahko nagib palice, da po konec palice padal s pospeškom, ki je večji od težnega pospeška.

$a_n > g$

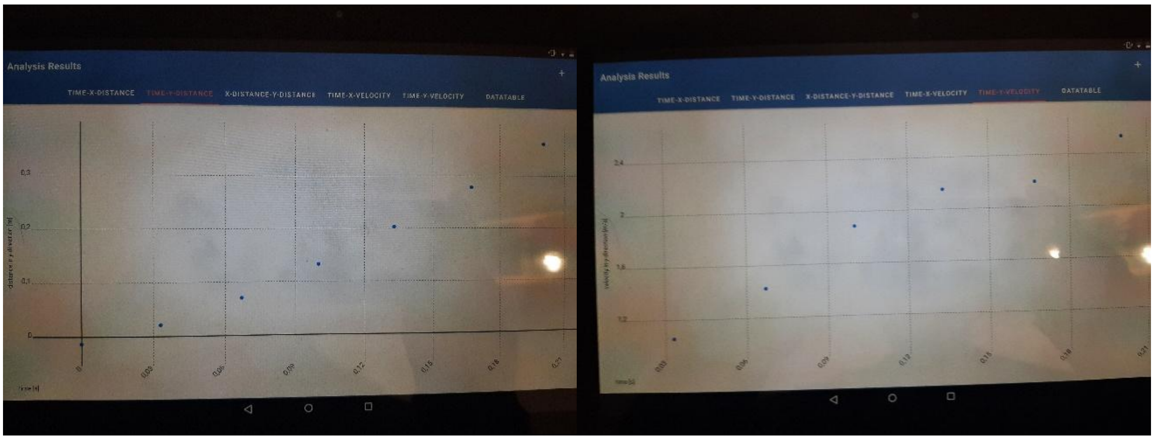
$3g\cos^2\beta/2 > g \rightarrow \cos^2\beta > 2/3$

Tako lahko izračunamo, da mora biti začetni kot padanja manjši od približno 35°, da bo palica padala hitreje kot kroglica in bo kroglica zaostala. Pri tem eksperimentu je torej ključen začetni kot padanja palice.

Meritve

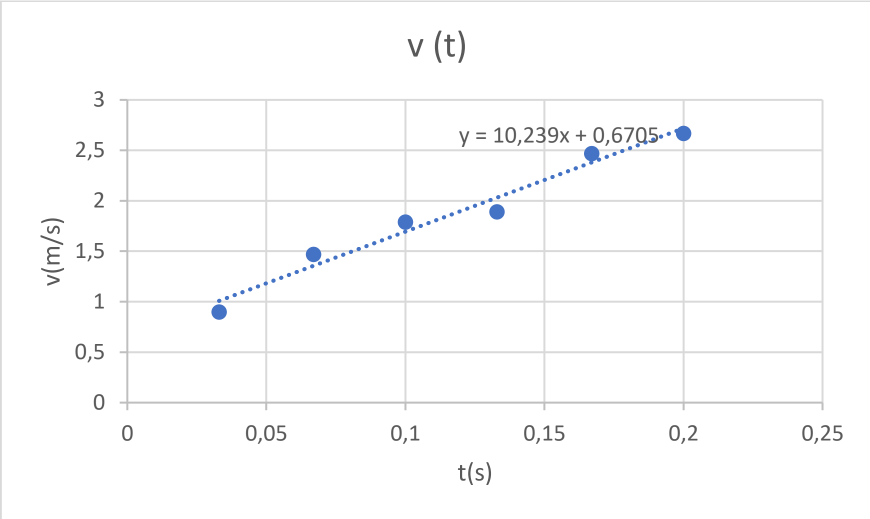
Z meritvami sem preveril ali držijo fizikalne razlage. Za analizo gibanja sem uporabil aplikacijo VidAnalysis. S pomočjo te aplikacije sem določil lego kroglice ali deske ob določenem času. Z več zaporednimi odčitki lege aplikacija tudi izračuna hitrost.

Slika 8: Merjenje z aplikacijo VidAnalysis

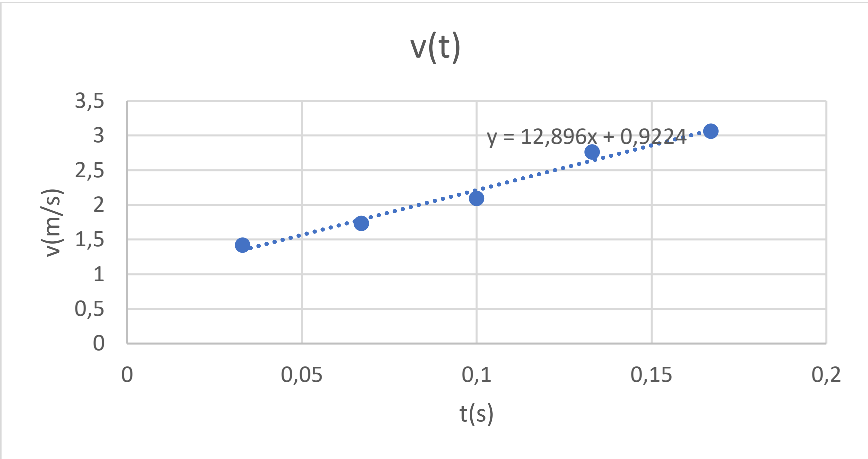


Slika 9: Grafa poti in hitrosti v odvisnosti od časa v aplikaciji VidAnalysis

Podatke za hitrost sem vnesel v excelove tabele in s pomočjo trendne črte na grafih odvisnosti hitrosti od časa odčital pospešek gibanja. Meritve sem opravil pri treh začetnih kotih. Najprej sem pri kotu 23^0 določil pospešek kroglice in deske.



Slika 10: Graf odvisnosti hitrosti od časa za kroglico



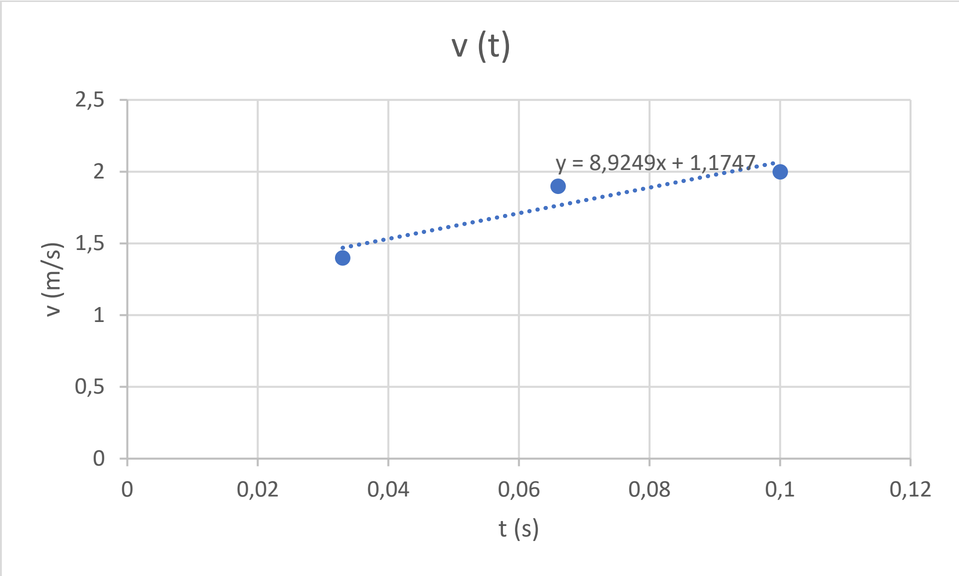
Slika 11: Graf odvisnost hitrosti od časa za desko

Pospešek je naklon premice na grafu odvisnosti hitrosti od časa. Na osnovi tega sem pri prvi meritvi, ko je kot 23^0, dobil naslednje rezultate:

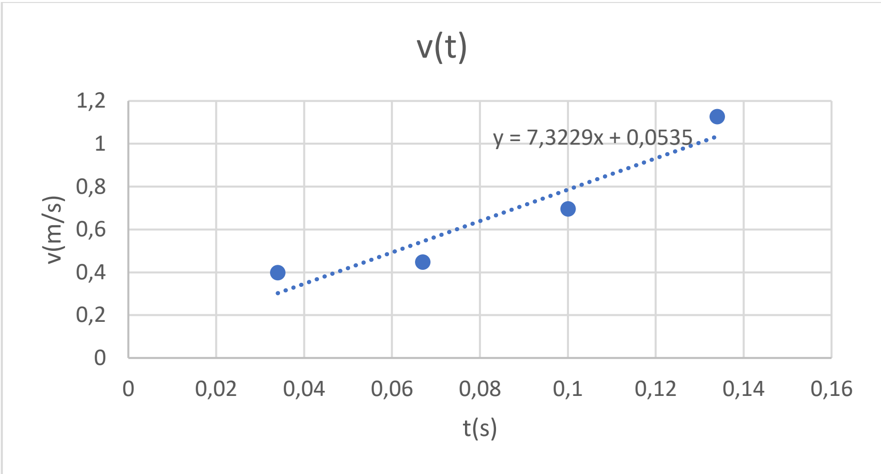
- kroglice a = (10,2 ± 0,7) m/s^2
- deska   a = (12,9 ± 0,9) m/s^2

Iz rezultatov je vidno, da kroglica v okviru natančnosti pada s težnim pospeškom, deska pa s pospeškom, ki je večji od težnega. Pospešek deske se s časom povečuje, ker je kot manjši, zato je rezultat napačen, a ker spremembe kota niso prevelike še vedno dobimo rezultat v okviru izračunane vrednosti.

Nato sem naredil meritve še pri naklonu deske 40^0 in 50º. Pri obeh naklonih sem določil pospešek deske.



Slika 12: Graf odvisnosti hitrosti od časa za desko (kot 40⁰)



Slika 13: Graf odvisnosti hitrosto od časa (kot 50⁰)

Pri kotu 40º sem dobil pospešek deske, 8,9 m/s^2, kar je manjše kot težni pospešek. Pri kotu 50º pa sem dobil pospešek deske, 7,3 m/s^2, kar je tudi manj od težnega pospeška. Tukaj sem upošteval samo vrednosti v začetku padanja, ko se kot še ni veliko spremenil. Kljub temu so rezultati malo večji od izračunane vrednosti.

Kot (º)	Izmerjeni a (m/s^2)	Izračunani a (m/s^2)
23	12,9	12,7
40	9,2	8,8
50	7,3	6,2

Tabela 1: Rezultati meritev

Rezultati se res skladajo s fizikalno napovedmi in videnimi poskusi. V prvem primeru deska prehiti kroglico, v drugih dveh pa ne pa ne, saj je kot večji od mejnega kota. Ugotovil sem tudi, da je pri večjih naklonih pospešek manjši.

Primeri iz resničnega življenja

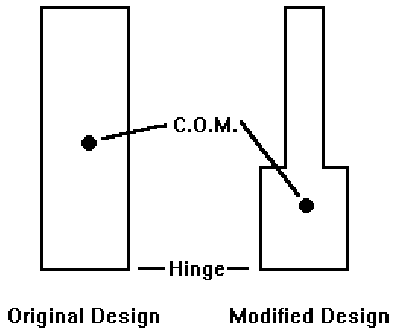
Podoben učinek se pojavi pri rušenju visokih dimnikov ali stolpov. Ko se dimnik začne nagibati, njegov zgornji del poskuša pasti hitreje kot spodnji del. Vendar pa material dimnika pogosto ne zdrži takšnega gibanja in se zato dimnik zlomi še preden pade na tla. Zaradi tega so ta eksperiment poimenovali padajoči dimnik.

Slika 14: Fotografija padajočega dimnika[6]

Ta princip lahko opazimo tudi pri padcu drevesa. Ko se drevo podre, njegov vrh potuje hitreje kot osnova, zaradi česar lahko vrh udari ob tla prej, kot bi pričakovali.

Spremenjeni eksperimenti

Obstajajo različne metode za prilagajanje eksperimenta. Na primer, če na konec palice pritrdimo dodatno maso, lahko upočasnimo njeno gibanje, saj bo težišče premaknjeno. Nasprotno, če težo dodamo bližje pritrjeni točki, bo palica padla še hitreje.
Podoben eksperiment se lahko izvede tudi s spremembo oblike palice. Če uporabimo palico, ki je na enem koncu širša, se težišče premakne bližje pritrjeni točki, kar še poveča hitrost padanja prostega konca palice.

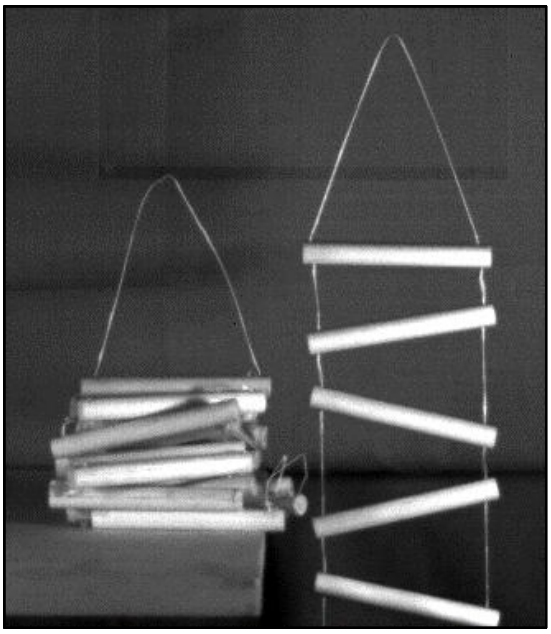


Slika 15: Način spremembe lege težišča[7]

Tretji eksperiment

Tega eksperimente nisem sam izvedel, našel pa sem njegov opis[8].

Leta 2011 je skupina fizikov z Univerze Cornell raziskovala nenavaden pojav pri padanju posebej oblikovane verige. Ugotovili so, da lahko veriga, ko zadene oviro (npr. mizo), pade hitreje, kot bi v prostem padu. To je v nasprotju s pričakovanji, saj bi pričakovali, da bi se veriga ob udarcu upočasnila ali ustavila.

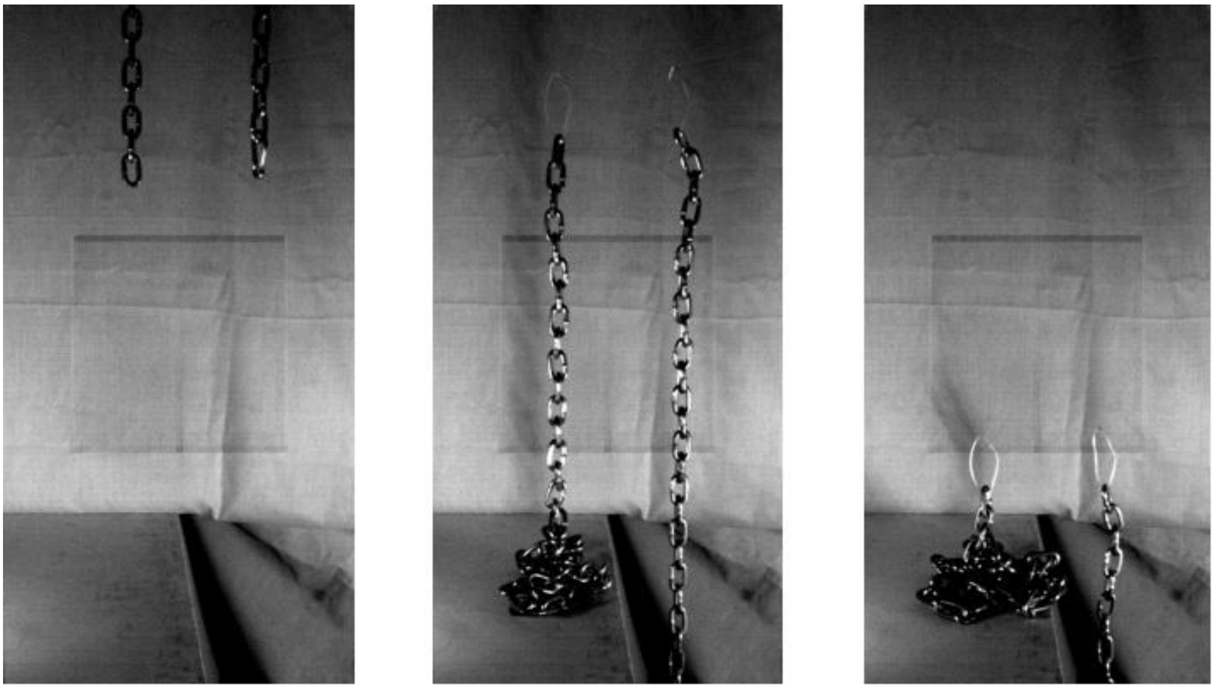


Slika 16: Padanje posebne verige[8]

Raziskovalci so najprej predvidevali, da zadnji člen verige, ko zadene podlago, ne vpliva na preostali del verige, a to potem ne razloži, zakaj veriga, ki zadane ob mizo, pada hitreje. Zato so pojav razložili na drug način, v katerem so predpostavili, da se v določenih primerih ta člen ne ustavi, temveč potegne preostanek verige navzdol, kar povzroči dodatno pospeševanje.

Za ponazoritev so uporabili analogijo s palico, ki pada pod kotom. Ko en konec palice udari ob tla, se drugi konec pospeši. Podobno se zgodi z verigo, če je zadnji člen še vedno povezan s preostalo verigo, lahko udarec povzroči dodatno silo, ki pospeši padanje.

Eksperiment so izvedli z dvema vrstama verig in ju posneli s pomočjo kamer. Ena veriga je padla prosto, druga pa je zadela mizo. Rezultati so pokazali, da je druga veriga dejansko padla hitreje. Pri običajni členkasti verigi pa ni prišlo do dodatnega pospeševanja.



Open link metal chains fall together

Slika 17: Padanje običajne členaste verige[8]

Ta študija poudarja, kako lahko tudi pri vsakdanjih pojavih, kot je padanje verige, odkrijemo nove in nepričakovane fizikalne zakonitosti. Raziskava je lep primer, kako znanost ne raziskuje le oddaljenih galaksij in osnovnih delcev, temveč tudi pojave, ki se dogajajo v našem vsakdanjem življenju in s tem nenehno širi naše razumevanje sveta.

Zaključek

Kot sem omenil že v uvodu, je Aristotelovo teorijo ovrgel že Galileo. Njegova teorija ima pa tudi omejitve in sicer velja v primerih, ko se telesa med padanjem ne vrtijo, kar sem ugotovil s preprostima eksperimentoma.

Eksperiment »hitreje od gravitacije« nam pokaže, da gravitacija ni edini dejavnik, ki vpliva na gibanje predmetov. Vrtenje in razporeditev mase igrata ključno vlogo pri določanju hitrosti padanja. Ta pojav je fascinanten primer, kako lahko fizikalni zakoni ustvarijo nepričakovane rezultate tudi pri pojavih, ki se nam zdijo preprosti in že zdavnaj raziskani kot so primeri pri katerem telesa prosto padajo, a se njihovo gibanje razlikuje od običajnega prostega pada.

Literatura

[1] Strnad J.1996 Razvoj fizike, Ljubljana, DZS

[2] https://interactivetextbooks.tudelft.nl/showthephysics/demos/demo11/demo11.html

[3]Young W.M. 1984. Faster than gravity! American Journal of Physics 52, 1142-1143

[4] https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/falling-faster-g

[5]http://www.physics.ucla.edu/demoweb/demomanual/mechanics/gravitational_acceleration/falling_chimney.gif

[6]http://kirkmcd.princeton.edu/examples/chimney.pdf

[7]Hey J.D. et al. 2004 Falling faster than in free fall? European Journal of Physics 25, 63-71

[8] http://www.geocities.com/prof_lunazzi/f128/fig11_76.jpg