

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **18** (1990/1991)

Številka 2

Strani 80-85

Janez Strnad:

FOUCAULTOVO NIHALO

Ključne besede: fizika, Jean Bernard Leon Foucault, biografije.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/18/1032-Strnad.pdf>

© 1990 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

FOUCAULTOVO NIHALO

Italijanski pisatelj Umberto Eco je pred leti zaslovel s knjigo *Ime rože*, ki spominja na napeto kriminalko, a globokoumno razgrinja srednjeveške zadrege in razprtije. Pred kratkim je doživela še večji uspeh Ecova knjiga *Foucaultovo nihalo*. Poglejmo, kaj vesta povedati o znamenitem nihalu fizika in njena zgodovina.

V času vesoljskih poletov ve vsak učenec, da je Zemlja krogla, ki se v 24 urah zavrti okoli svoje osi in v enem letu približno po krogu obide Sonce. Le navidezno se Sonce in zvezde gibljejo po nebu, ker jih opazujemo s površja vrteče se in krožeče Zemlje. V novem veku je prvi zagovarjal tako *heliocentrično sliko* poljski zvezdoslovec Nikolaj Kopernik v knjigi *De revolutionibus orbium coelestium* (O vrtenju nebesnih krogel) leta 1543. Prej je bila v veljavi *geocentrična slika*, ki so jo uporabljali številni dotedanji astronomi in ki jo imenujemo po aleksandrijskem astronomu Klavdiju Ptolemeju. Ta slika je navidezno gibanje proglasila za pravo in po njej se okoli Zemlje vrti krogla zvezd stalnic in kroži Sonce. Vsakdanje izkušnje, če jih sprejmemo brez globljega premisleka, podpirajo geocentrično sliko. Zato jo je bilo v Kopernikovih časih zelo težko izpodbiti.

Galileo Galilei je leta 1632 izdal knjigo *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* (Razgovor o dveh največjih svetovnih sistemih, ptolemejskem in kopernikanskem). V njej je navedel razloge proti geocentrični sliki in za heliocentrično. Samo enega od razlogov je oprl na to, kar je vedel o gibanju teles na Zemlji, in ta zadeva plimo in oseko. Galilei je na barkah, ki so v Benetke dovažale vodo, opazil, da se ob ustavljanju voda dvigne na sprednjem delu in ob speljavanju na zadnjem. Pri vrtenju in kroženju se venomer spreminja smer hitrosti. Galilei je mislil, da se te spremembe hitrosti zaradi kroženja točke na zemeljskem površju in zaradi kroženja Zemlje okoli Sonca sestavijo tako, da dajo plimovanje. Pri tem se je hudo motil. Plimovanje je dokončno pojasnil leta 1687 Isaac Newton s privlačnostjo Lune in Sonca. Galilei se je celo posmehoval tistim, ki so v njegovem času poskušali razlagati plimovanje z vplivom Lune.

Na srečo so Kopernikov opis sprejeli v Galilejevem času ali kmalu zatem, vsekakor še preden so spoznali prvi poskus, ki ga ni bilo mogoče pojasniti drugače kot z vrtenjem Zemlje. Ta poskus je leta 1851 naredil Léon Foucault.

Vzemimo nitno nihalo, to je utež na lahki niti. Utež odklonimo iz ravnovesne lege v določeno smer in spustimo. Utež niha v ravnini, ki jo določajo ravnovesna in začetna lega uteži in pritrdišče niti. Naredimo v mislih poskus na zemeljskem severnem tečaju. Na drobno utež deluje Zemlja s težo

v smeri proti svojemu središču. Če zanemarimo zračni upor, na utež poleg teže in sile vrvice ni nobene druge sile in obe ti sili ležita v navedeni ravnini. To, da se Zemlja vrti, na gibanje uteži ne vpliva. Utež niha ves čas v ravnini nihanja, to je v ravnini, v kateri, je začela nihati. Zemlja se zavrti v 24 urah za poln kot, to je za 360° . Ko opazujemo gibanje nihala z vrteče se Zemlje in se vrtimo z njo, se zavrti ravnina nihanja v 24 urah za 360° v nasprotni smeri vrtenja Zemlje (slika 1).

"Dobro", boste rekli, "toda severni tečaj z zemljepisno širino 90° je daleč, Ljubljana ima zemljepisno širino $\phi = 46^\circ$." (Natančneje: pasažni instrument Astronomsko-geofizikalnega observatorija na Golovcu ima zemljepisno širino $46^\circ 2' 37,5'' = 46,04375^\circ$). To kar precej zaplete opis gibanja nihala v Ljubljani. Vendar se tega ne ustrašimo, saj znamo nekaj trigonometrije.

Zanihajmo nihalo v ljubljanski poldnevniški ravnini, to je v ravnini skozi Ljubljano, zemeljsko središče in severni tečaj, in sicer naj se papir, po katerem rišemo, na začetku pokriva s to ravnino. Narišimo še tangento na poldnevniški krog, ki podaja v Ljubljani vodoravnico. Zapomnimo si točko P, v kateri tangenta seka zemeljsko os (slika 2). Proti tej točki se giblje utež, ko jo na začetku spustimo. Nihalo niha ves čas v isti ravnini, a Zemlja se v določenem času zavrti za kot β . Potem imamo ljubljansko poldnevniško ravnino za kot β zasukano proti začetni legi. Tudi zdaj seka tangenta zemeljsko os v točki P, a utež se ne giblje več v smeri proti njej, ampak še naprej v smeri začetne tangente. Med obema legama poldnevniške ravnine zazeva kot β , med obema tangentama pa kot γ . Ravnina nihanja se je tako v Ljubljani zavrtela za ta kot, ki ga izrazimo s kotom β .

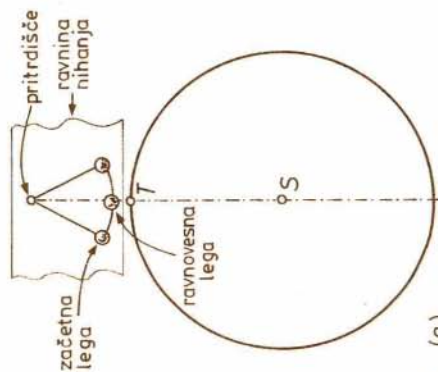
V ta namen na dva načina izračunamo lok, ki ga je prepotovala v določenem času Ljubljana. Najprej ugotovimo, da leži Ljubljana v razdalji $r \cos \phi$ od zemeljske osi, če je r zemeljski radij. Nato izračunamo razdaljo Ljubljane od točke P, to je $b = r \cos \phi / \sin \phi$. Kota s pravokotnimi kraki sta namreč enaka in velja enačba $r \cos \phi = b \sin \phi$. V obeh primerih dobimo lok, ki ga prepotuje Ljubljana tako, da kot pomnožimo z radijem. Najprej je to lok nad kotom β pri radiju $r \cos \phi$, torej $\beta r \cos \phi$. Nato je to lok nad kotom γ pri radiju $r \cos \phi / \sin \phi$, torej $\gamma r \cos \phi / \sin \phi$. Oboje je enako in iz enačbe

$$\beta r \cos \phi = \gamma r \cos \phi / \sin \phi$$

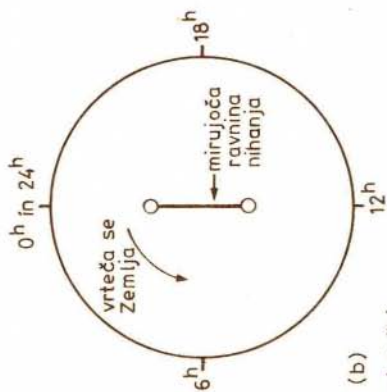
sledi

$$\gamma = \beta \sin \phi$$

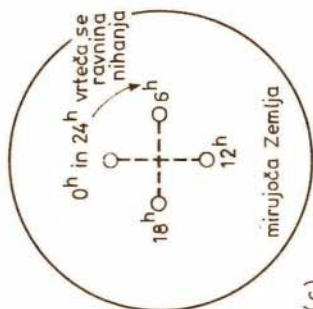
Na polu je $\phi = 90^\circ$ in $\gamma = \beta$ in na ekvatorju $\phi = 0$ in $\gamma = 0$. Na polu se ravnina nihala zavrti v 24 urah za 360° ali v 1 uri za 15° . V



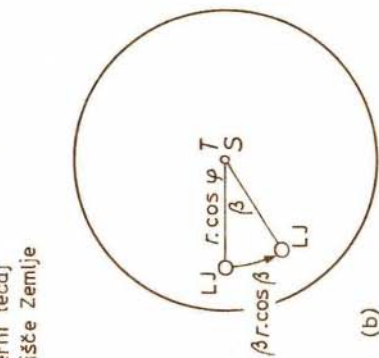
Slika 1 (a)



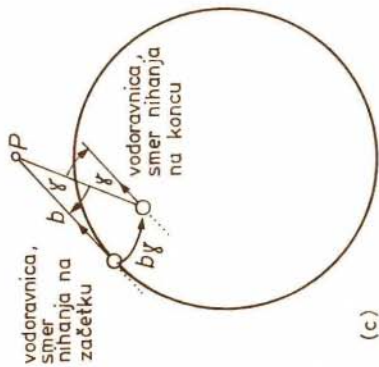
(b)



(c)



(b)



(c)

Slika 2 (a)

Slika 1. Nihanje nitnega nihala na severnem tečaju določa ravnino nihanja, ki se ujema z ravnino papirja (a). Nihalo niha v nepremični ravnini in Zemlja se vrti "od vzhoda proti zahodu" in se zavrti enkrat v 24 urah. Znamenja kažejo, denimo, smer proti vzhodu (b). Za opazovalca na Zemlji se ravnina nihanja vrti v nasprotni smeri "od zahoda proti vzhodu" in se prav tako zavrti enkrat v 24 urah. Znamenja kažejo lego smeri, ki se ujema s smerjo gibanja nihala na začetku (c). Prva slika je naris, drugi dve tlorisa.

Ljubljani z zemljepisno širino 46° se ravnina nihala zavrti v 24 urah za $360^\circ \sin 46^\circ = 259^\circ$ in v 1 uri za $15^\circ \sin 46^\circ = 11^\circ$. Za poln kot se v Ljubljani ravnina nihala zavrti v 24 urah/ $\sin \phi = 24$ urah/ $\sin 46^\circ = 33,4$ urah.

Jean Bernard Léon Foucault je bil rojen v Parizu leta 1819. Ni obiskoval nobene od tedanjih znamenitih pariških šol, ampak je v očetovi knjigarni prebiral knjige in naposled brez navdušenja postal zdravnik. Pritegnil ga je izum fotografije, s katero se je začel navdušeno ukvarjati. To ga je usmerilo v optična raziskovanja, pri katerih si je pridobil precejšen sloves. Spoprijateljil se je s Hippolytom Fizeaujem, ki je bil prav toliko star, prav tako brez višjih šol in prav v tolikšni meri spreten pri optičnih poskusih. Prijatelja sta se namenila izmeriti hitrost svetlobe, pa sta se pri tem sprla. Prvi je izmeril hitrost svetlobe v zraku Fizeau leta 1849, Foucault pa jo je naslednje leto prvi izmeril v vodi. S tem je potrdil misel, da je svetloba valovanje. V tej vlogi je Foucault že nastopil v Preseku (1986/87, št. 4).

Leta 1850 so povabili Foucaulta, naj za pariško svetovno razstavo naslednje leto pripravi kak znanstveni prispevek. Pogovor z mentorjem Francoisem Aragojem in prejšnje izkušnje z nihanjem dolgih tankih palic, vpetih v vrtečo se stružnico, so ga pripeljale do nihala. Z našim začetnim sklepanjem smo povzeli njegove misli. O tem priča članek z naslovom *Demonstration physique du mouvement de rotation de la Terre au moyen du pendule* (Fizikalni prikaz gibanja vrtenja Zemlje z nihalom), ki je izšel v zbranih delih pariške akademije znanosti leta 1851. O nihanju nihala na tečaju je zapisal: "Gibanje Zemlje, ki se nenehno vrti od zahoda proti vzhodu, bi opazili glede na nepremično ravnino nihanja. Njena sled bi se na površju Zemlje gibala

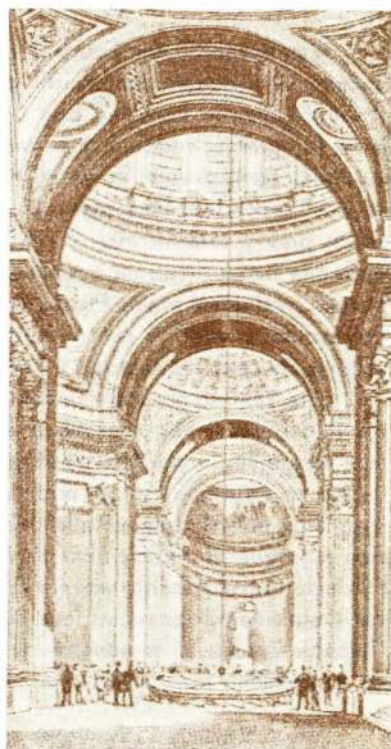
Slika 2. V Ljubljani z zemljepisno širino ϕ zanihamo nihalo v poldnevniški ravnini, ki se na začetku ujema z ravnino papirja (a). Čez nekaj časa se poldnevniška ravnina Ljubljane zavrti za kot β okoli zemeljske osi. Tedaj se ravnina nihanja ne ujema več z ravnino papirja. V tem času opiše Ljubljana lok (b) in se tangenta skozi Ljubljano v poldnevniški ravnini, to je vodoravnica in smer nihanja nihala, zavrti za kot γ okoli točke P (c). Prva slika je naris, druga tloris in tretja perspektivna.

kot nebesna krogla. Če bi mogli podaljšati nihanje na 24 ur, bi sled te ravnine zaključila poln vrtljaj okoli navpične projekcije pritrdišča." Njegov račun za gibanje nihala pri poljubni zemljepisni širini se tudi ne razlikuje dosti od našega.

Glavna težava je bila v tem, da je zračni upor nihanje dušil, tako da je po določenem času zamrlo. Dva poskusa, prvi v domači kleti, drugi v dvorani pariške zvezdarne, nista zadovoljila. Šele tretji poskus v Pantheonu, ki so ga v času Napoleona III uporabljali kot cerkev, se je posrečil (slika 3). Napoleon III sam se je dobrohotno zanimal za poskus. Železna utež je imela maso 28 kilogramov in je visela na 67 metrov dolgi niti. S tem je Foucault dosegel, da je nihalo imelo dovolj veliko začetno energijo nihanja in nihanje dovolj dolgo ni zamrlo. Na začetku je izmaknil utež iz ravnovesne lege v določeni smeri in jo privezal z vrvico. Potem ko se je utež popolnoma umirila, je vrvico prežgal. S tem se je izognil motnjam, do katerih bi prišlo, če bi kako drugače spravil nihalo v nihanje. Zares so pri poskusu zlahka opazovali, kako se ravnina nihanja vrtil "od zahoda proti vzhodu". Utež je imela navzdol obrnjeno ost, ki je v mivki na nizki mizi puščala jasno sled. V Parizu z zemljepisno širino 49° traja en vrtljaj nihajne ravnine 31 in $3/4$ ure. Nekako toliko je nameril Foucault.

Naslednje leto je Foucault ugotovil, da tudi prosto gibljivo vrteče se kolo obdrži v prostoru smer svoje osi. Podoben pojav izkoriščajo današnji *girokompassi* z vrtavkami.

Foucaultov poskus je zbudil veliko pozornost in so ga velikokrat ponovili. To je storil tudi Vincenzo Antinori v Firencah. V tej zvezi je pregleдал stare zapiske tamkajšnje



Slika 3. Foucaultov poskus z nihalom leta 1851 v Pantheonu.

Slika 4. Foucaultovo nihalo v pred-dverju palače Združenih narodov v New Yorku. Žica iz nerjavečega jekla, ki je pritrjena na strop 37 metrov visoke dvorane, nosi stokilogramsko pozlačeno kroglo. Vrtanje ravnine nihanja je mogoče zasledovati na obroču s premerom dveh metrov, tik nad katerim se giblje krogla. V New Yorku z zemljepisno širino 40 in 3/4 stopinj traja en obhod 36 in 3/4 ure. Na nihalu je napisana misel nizozemske kraljice Julijane: "Prednost je živeti danes in jutri."



Academie del Cimento (akademije poskusov). Naletel je na zapis Galilejevega življenjepisca Vincenzia Vivianija, "da se nihalo neznatno odkloni iz svoje prvotne poti". Kaže, da so bili pojavu na sledi že pred Foucaultom.

V Foucaultovem času so nihala pri opisanem poskusu nihala dušeno in jih je bilo treba potem, ko je nihanje zamrlo, znova pognati. Danes pa se nihala samodejno poganjajo in to ni več potrebno. Posebno znamenito je nihalo v pred-dverju palače Združenih narodov (slika 4). To in druga znamenita nihala so dokaj dolga. V zadnjem času pa je uspelo narediti tudi Foucaultova nihala, ki so dolga le meter ali dva in nihajo nedušeno. Pri tem so morali rešiti štiri vprašanja: kako nihalu dovajati energijo, ki jo zgubi zaradi trenja in upora, kako pritrčiti žico, kako preprečiti, da bi se utež gibala po elipsi ali po osmici, in kako spraviti nihalo v nihanje. Energijo navadno dovajajo z elektromagnetom, ki ga proži železna utež sama naravnost ali preko fotocelice. Nekaj časa so poskušali vrhnje krajišče žice kardansko vpeti, a se to ni obneslo. Zdaj vrhnje krajišče raje vpnejo v prižemo, vrtljivo okoli navpične osi. Nezaželenemu eliptičnemu in osmičastemu gibanju uteži se izognejo s posebnim obročem, skozi katerega speljejo žico. Stik žice s tem obročem, ki ga je uvedel Francoz M.F.Charron, v nekaterih izvedbah uporabljajo za poganjanje nihala. Nihanje začnejo na Foucaultov stari način z vrvico, ki jo prežgejo. "Vseeno je izdelava kratkega Foucaultovega nihala zelo zahtevna. Doseči je treba popolno simetrijo, če naj se nihajna ravnina zavrti v pričakovanem času in če naj nihalo ne išče odlikovane smeri." Tako je zapisal R.S.Mackay v American Journal of Physics leta 1953, dobrih sto let po prvi izvedbi Foucaultovega poskusa.