

Branko Kovač
Schneider Electric
branko.kovac@se.com

DINAMIČKO GRAVITACIJSKO POLJE I PRIRODA INERCIJE

Sažetak: Članak opisuje teoretsko razmatranje hipotetskog dinamičkog gravitacijskog polja koje stvara silu inercije na isti način na koji statičko gravitacijsko polje stvara silu težine. Jednadžba za jakost dinamičkog gravitacijskog polja oko mase koja se ubrzava je izvedena korištenjem principa akcije i reakcije. Pretpostavka korištena pri izdvojenju jednadžbe je da zakon gibanja $F=ma$ vrijedi svugdje u prostoru. Jednadžba dinamičkog gravitacijskog polja je u suglasju sa opažanjima u prirodi vezanim uz ubrzanje mase i gibanjem planeta u solarnom sistemu. Dinamičko gravitacijsko polje opisano tom jednadžbom je dovoljno jako da se može detektirati u laboratoriju. Laboratorijski eksperiment koji se može koristiti da se potvrdi ili opovrgne hipoteza dinamičkog gravitacijskog polja je također opisan.

Ključne riječi: gravitacijska dinamika, inercija, dinamika mase, teorija polja

DYNAMIC GRAVITATIONAL FIELD AND NATURE OF INERTIA

Abstract: This article presents the theoretical consideration of the hypothetical dynamic gravitational field, which produces inertial force in the same way as the static gravitational field produces the weight of the mass. The equation for the strength of the dynamic field produced by accelerating mass is derived using the principle of action and reaction. The assumption used in the derivation of the equation is that the law of motion $F=ma$ is valid everywhere in the universe. The equation for the dynamic gravitational field agrees with the observations in nature related to mass acceleration and movement of the planets in our solar system. The dynamic gravitational field predicted by the equation is sufficiently strong to be detected in the laboratory. The laboratory experiment which can be used to prove or disprove the existence of the postulated dynamic gravitational field is also described.

Keywords: gravitational dynamics, inertia, mass dynamics, field theory

Uvod

Težina i inercijalna sila su dvije sile koje su povezane sa masom. Galileo je proučavao inercijalnu silu u svojim pokusima u kojima je promatrao kugle raznih dimenzija i težine koje je puštao da padaju sa visine ili da se spuštaju po kosini [1]. Na osnovi zapažanja u tim pokusima Galileo je formulirao zakone gibanja. Ustanovio je da se masa giba konstantnom brzinom ako nema sile koja djeluje na masu. Kada sila djeluje na masu brzina kojom se masa giba se mijenja u vremenu proporcionalno primijenjenoj sili.

Newton je svojim zakonom gravitacije [2] objasnio da je sila težine posljedicu privlačnosti masa, a ne svojstvo tijela. Taj zakon je korišten da bi se objasnile i druge pojave u prirodi kao što je gibanje planeta. Jednadžbe koje matematički opisuju Galileov zakon gibanja i Newton-ov zakon gravitacije su

$$\vec{F} = -m\vec{a} \quad (1a)$$

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \hat{r} \quad (1b)$$

Gdje je F sila koja djeluje na masu, m je masa tijela, a je akceleracija, G je gravitacijska konstanta i r_{12} je udaljenost između dvije mase. Newton-ov zakon gravitacije je eksperimentalno potvrđen pokusom koji je izveo Cavendish [7] oko stotinu godina nakon što je Newton predvidio zakon gravitacije.

Koncept polja sila je bio nepoznat u vrijeme kada su Galileo i Newton postavili njihove zakone. Taj koncept je razvijen tokom istraživanja elektromagnetizma. Sličnost Newton-ovog zakona i Coulomb-ovog zakona ukazuje na prirodu gravitacije kao polja sila. Koristeći koncept polja sila, Galileova jednadžba gibanja i Newton-ov zakon gravitacije se mogu napisati u obliku

$$\vec{g} = -\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (2a)$$

$$\nabla \cdot \vec{g} = -4\pi G\rho \quad (2b)$$

Gdje je g jakost gravitacijskog polja, G je gravitacijska konstanta a ρ je gustoća mase. Problem koji se javlja kada pokušavamo da primijenimo jednadžbu (2) na analizu ponašanja gravitacijskog polja jest da Newton-ov zakon gravitacije opisuje gravitacijsko polje u stacionarnom stanju. Pretpostavka u jednadžbi (2) jest da je brzina rasprostiranja gravitacijskog polja beskonačna [3].

Nekoliko gravitacijskih teorija je pokušalo riješiti problem beskonačne brzine prostiranja gravitacijskog polja i teorija koja ima najveću podršku je Einstein-ova opća teorija relativnosti. Po općoj teoriji relativnosti geometrijska svojstva zakrivljenog prostora i vremena opisuju gravitacijsko polje, a energija (ili masa) i moment opisuju izvor gravitacijskog polja. Ako razmatramo gravitacijsko polje koje je slabo i brzine gibanja koje su puno manje od brzine svjetlosti jednadžbe opće teorije relativnosti se mogu linearizirati. Linearizirane jednadžbe opće teorije relativnosti uz pretpostavku slabog gravitacijskog polja i male brzine gibanja, koja je zadovoljena u gotovo cijelom svemiru osim oko crnih rupa koje imaju jako gravitacijsko polje, su vrlo slične Maxwellovim jednadžbama za elektromagnetsko polje [4]

$$\nabla \cdot \vec{g} = -4\pi G\rho \quad (3a)$$

$$\nabla \cdot \vec{b} = 0 \quad (3b)$$

$$\nabla \times \vec{g} = -\frac{1}{2c} \frac{\partial \vec{b}}{\partial t} \quad (3c)$$

$$\nabla \times \frac{\vec{b}}{2} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{g}}{\partial t} + \frac{4\pi G}{c} \rho \vec{v} \quad (3d)$$

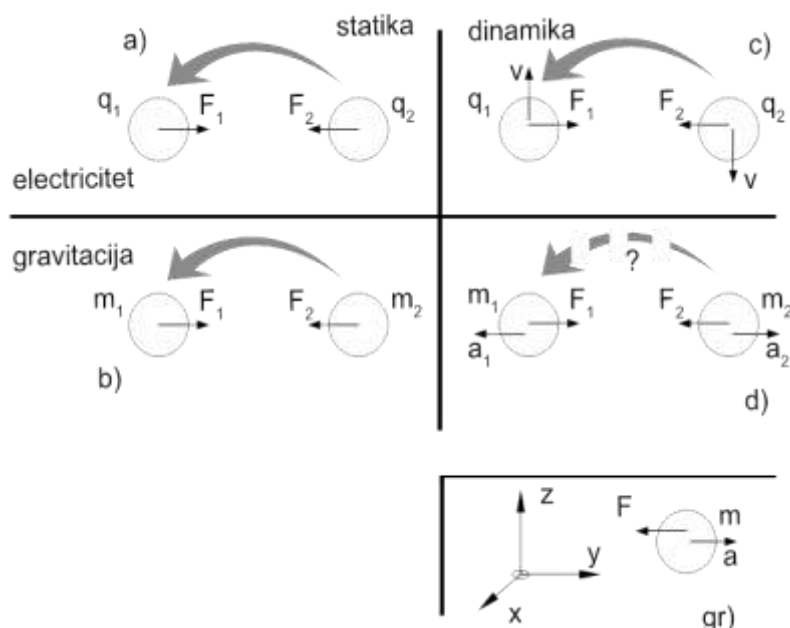
Jednadžbe (3) su takozvane gravito-elektro-magnetske (GEM) jednadžbe. U GEM g , G i ρ imaju isto značenje kao u jednadžbama (2), b je polje momenta, v je brzina mase i c je brzina prostiranja gravitacijskog polja. Slične jednadžbe je koristio Heaviside [5] kada je razmatrao jednadžbe gravitacijskog polja s konačnom brzinom prostiranja. Sile uzrokovane ubrzanjem mase prema GEM jednadžbama su premale da bi se njima mogla objasniti inercijalna sila. Inercijalna sila koja se mjeri u pokusima i dalje se računa jednadžbama (1.a) i (2.a), a ne pomoću jednadžbi polja. U općoj teoriji relativnosti inercija se tretira kao svojstvo mase da se opire promjeni brzine. Gravitacijski valovi su isto tako detektirani [6] tako da je potvrđeno da se gravitacija rasprostire konačnom brzinom slično kao elektromagnetsko polje.

Koncept polja sila, koji je zamijenio koncept akcije na udaljenost, ima neke karakteristike koje su zajedničke za sve slučajeve, kako električnog naboja tako i mase, kao što je to ilustrirano na Sl. 1

- Polje sila uzbuđuje prostor oko objekta. Sila se pojavljuje zbog polja sila u prostoru oko objekta a ne zbog nekog svojstva objekta koje je koncentrirano unutar samog objekta
- Sila na jednom objektu se pojavljuje zbog toga jer se taj objekt nalazi u polju sila koje stvara drugi objekt
- Sile se pojavljuju u paru i zadovoljavaju princip akcije i reakcije. Sile istog intenziteta će se pojaviti na oba objekta i bit će suprotno orijentirane

Slučaj za dva električna naboja u mirovanju je ilustriran na Sl. 1.a, a slučaj za dvije mase u mirovanju je prikazan na Sl. 1.b. Vidimo da naboj i masa u mirovanju stvaraju polje sila oko sebe. Prema konceptu polja sila, sile na nabojima se javljaju zato što jedan naboj stvara statičko električno polje a drugi naboj se nalazi u tom polju sila. Sila se prenosi kroz prostor elektrostatskim poljem kako je to ilustrirano širokom strelicom. Isto tako jedna masa na Sl. 1.b stvara gravitacijsko polje a sila se pojavljuje na drugoj masi jer se ta masa nalazi u

polju sila. Sila se prenosi kroz prostor pomoću statičkog gravitacijskog polja kako je to ilustrirano širokom strelicom. Sile koje se javljaju zadovoljavaju princip akcije i reakcije.



Sl. 1.: Svojstva polja sila za elektricitet i gravitaciju

Električni naboj u gibanju će stvoriti silu na drugom naboju u gibanju. Po Amper-ovom zakonu sila je proporcionalna brzini v kojom se naboj giba. Dinamička sila koja se javlja oko naboja u gibanju prenosi se elektromagnetskim poljem kako je to ilustrirano širokom strelicom na Sl. 1.c. Sila na jednom naboju u gibanju se stvara zbog polja sile oko naboja, a ne zbog nekog svojstva naboja koje je koncentrirano unutar samog naboja. Princip akcije i reakcije je zadovoljen za naboje u gibanju jer se sila istog iznosa i suprotnog smjera razvija na oba naboja.

Sl. 1.gr pokazuje stvaranje inercijalne sile po Newton-ovom razumijevanju koje se također koristi u općoj teoriji relativnosti. Prema Newton-ovom tumačenju inercijalna sila se javlja zbog svojstva inercije koju masa posjeduje te zato što se masa ubrzava u odnosu na apsolutni prostor. Nije potrebna druga masa da bi se javila inercijalna sila te princip akcije i reakcije nije zadovoljen. Po pretpostavki opće teorije relativnosti inercijalna sila se javlja na masi zbog toga što masa pri ubrzanju prelazi iz jednog inercijalnog sustava u drugi i masa ima svojstvo inercije. Ni u općoj teoriji relativnosti nije potrebna druga masa da bi se javila inercijalna sila.

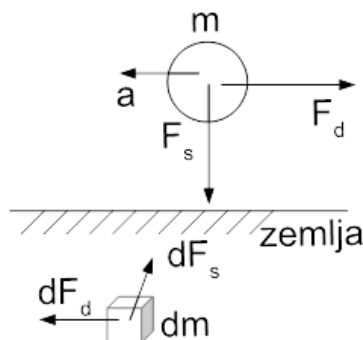
Ovaj članak razmatra hipotezu da se inercijalna sila javlja zbog polja sila koje mase koje se ubrzavaju stvaraju u prostoru oko sebe. Hipotetsko polje sila ću nazvati dinamičko gravitacijsko polje jer je uzrokovano dinamikom mase. To polje je ilustrirano isprekidanom strelicom na Sl. 1.d. Inercijalna sila, sukladno ovoj hipotezi, se javlja jer se masa nalazi u polju sila koje je stvoreno oko druge mase koja se ubrzava. Obadvije mase na Sl. 1.d se moraju ubrzavati i stvarati dinamičko gravitacijsko polje. Sila iste jakosti i suprotnog smjera se mora pojaviti na svakoj masi i time će princip akcije i reakcije biti zadovoljen. U članku se opisuje i pokus koji se može koristiti da se potvrdi ili opovrgne hipoteza dinamičkog gravitacijskog polja tako da se taj pokus može koristiti kao još jedan test opće teorije relativnosti.

Kada se razmatra hipoteza da je inercijalna sila uzrokovana nekim dinamičkim poljem sila oko mase koja se ubrzava, sama od sebe se postavljaju mnoga pitanja kao na primjer: kolika treba biti jakost takovog polja, kako to polje može izgledati, da li gibanje planeta može biti objašnjeno dinamičkim gravitacijskim poljem, kako se to polje može mjeriti, kako se to polje širi u prostoru, da li postoji nekakvo među polje slično magnetskom polju i druga pitanja. Na neka od ovih pitanja ću odgovoriti u ovom članku u mjeri koja je dovoljna da se pokusom može potvrditi ili opovrgnuti hipoteza o dinamičkom gravitacijskom polju.

1 Procjena jakosti dinamičkog gravitacijskog polja

Da bi se procijenila jakost hipotetskog dinamičkog gravitacijskog polja možemo razmatrati sile na masu koje je jednostavno mjeriti, a koje su ilustrirane na Sl. 2. Za masu m koju držimo iznad površine zemlje i koja

se ubrzava možemo mjeriti statičku silu težine F_s i dinamičku inercijalnu silu F_d . Po principu akcije i reakcije statičko i dinamičko gravitacijsko polje morat će razviti sile iste amplitude i suprotnog smjera na zemlji.



Sl. 2.: Procjena jakosti dinamičkog gravitacijskog polja

Kada razmatramo infinitezimalnu masu dm na zemlji imat ćemo silu reakcije koja je stvorena statičkim gravitacijskim poljem dF_s i silu reakcije koja je stvorena dinamičkim gravitacijskim poljem dF_d . Zbog principa akcije i reakcije integral sila reakcije dF_s preko cijelog volumena zemlje mora biti jednake amplitude kao statička sila težine F_s koju osjećamo na masi. Sila reakcije $-F_s$ na zemlji se računa kao

$$-\vec{F}_s = \int_V d\vec{F}_s = \int_V \vec{g}_s \rho dV \quad (4)$$

Gdje je $-F_s$ sila reakcije na težinu tijela, g_s je statičko gravitacijsko polje koje razvija masa m , ρ je gustoća zemlje a dV je infinitezimalni volumen.

Na isti način reakcija na inercijalnu silu $-F_d$ se može računati kao integral produkta mase dm i postuliranog dinamičkog gravitacijskog polja g_d koje je stvoreno kad se masa m ubrzava iznad površine zemlje. Koristeći dinamičko gravitacijsko polje g_d reakcija na inercijalnu silu F_d se može računati kao

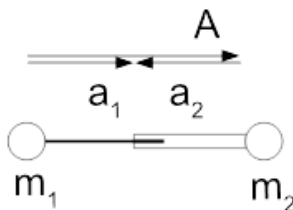
$$-\vec{F}_d = \int_V d\vec{F}_d = \int_V \vec{g}_d \rho dV \quad (5)$$

Ako se masa m ubrzava sa oko 10m/s^2 inercijalna sila F_d i težina tijela F_s će biti otprilike jednake amplitude. Tada će amplituda sila reakcije dF_s i dF_d na mali element mase dm biti blizu jedna drugoj. Sile reakcije dF_s i dF_d se neće razlikovati za nekoliko redova veličine. To znači da jakosti gravitacijskog polja g_s i g_d moraju imati otprilike iste amplitude.

Jakost hipotetičnog dinamičkog gravitacijskog polja koje masa razvija pri umjerenim ubrzanjima je dovoljno velika da bi se mogla detektirati laboratorijskim eksperimentom. Instrument potreban za detekciju dinamičkog gravitacijskog polja mora biti dovoljno osjetljiv da bi mogao detektirati statičko gravitacijsko polje. Jakost dinamičkog gravitacijskog polja je dovoljno malena da ne bude uočljiva jednostavnim promatranjem. Amper je otkrio silu koja se stvara među vodičima kojima teče struja bez posebnog instrumenta. U slučaju dinamičkog gravitacijskog polja potreban je osjetljivi instrument da bi se ono detektiralo.

2 Jednadžba dinamičkog gravitacijskog polja

Počnimo sa jednostavnim sistemom od dvije mase povezane šipkom i cilindrom kako to pokazuje Sl. 3. Pretpostavit ćemo da šipka i cilindar nemaju mase. Ako želimo ubrzati masu m_1 pomičući šipku unutar cilindra masa m_2 će se isto tako ubrzavati u suprotnom smjeru. Sile na mase m_1 i m_2 će biti u ravnoteži.



Sl. 3.: Sistem sa dvije točkaste mase

Za računanje dinamičkih sila u sistemu koristit ćemo Galileovu jednadžbu gibanja jer je ona potvrđena pokusima. Mi možemo mjeriti akceleraciju A između dvije mase ali ne možemo mjeriti pojedinačne akceleracije jer ne znamo gdje je ishodište referentnog koordinatnog sistema. Mi znamo da će razlika pojedinačnih akceleracija masa a_1 i a_2 biti jednaka ukupnoj akceleraciji među masama A kako je to prikazano na Sl. 3. Za sistem od dvije mase m_1 i m_2 koje se ubrzavaju jedna prema drugoj možemo napisati

$$-\vec{a}_2 = \frac{m_1}{m_2} \vec{a}_1 \quad (6a)$$

$$\vec{a}_1 = \vec{A} \frac{m_2}{M} \quad (6b)$$

Gdje je M ukupna masa ($m_1 + m_2$) i ostali simboli su prikazani na Sl. 3.

Da bi izveli izraz za jakost dinamičkog gravitacijskog polja oko mase koja se ubrzava, početi ćemo sa izrazom (6.a), koji predstavlja ravnotežu sila u sistemu od dvije mase. Po hipotezi dinamičkog gravitacijskog polja, masa m_1 , koja se ubrzava akceleracijom a_1 , će razviti dinamičko gravitacijsko polje g_{d1} oko mase m_2 koje će proizvesti silu. U izrazu (6.a) zamijenit ćemo negativnu akceleraciju mase m_2 sa jakošću dinamičkog gravitacijskog polja koje razvija masa m_1 kako je to definirano izrazom za definiciju jakosti gravitacijskog polja u jednadžbi (2.a):

$$-\vec{a}_2 = \vec{g}_{d1} = \frac{m_1}{m_2} \vec{a}_1 \quad (7)$$

Ova jednadžba se bazira na definiciji jakosti gravitacijskog polja, ravnoteži sila te na zakonu gibanja koji je poznat iz eksperimenata. Jednadžba (7) nam daje jakost dinamičkog gravitacijskog polja koje akceleracija mase m_1 stvara na lokaciji na kojoj se nalazi masa m_2 . Jednadžba (7) se treba modificirati da bi opisivala dinamičko gravitacijsko polje u cijelom prostoru oko mase koja se ubrzava. Ako pomnožimo svaku masu u jednadžbi (7) sa gravitacijskom konstantom G i podijelimo je sa kvadratom udaljenosti među masama r_{12} dobit ćemo slijedeći izraz za jakost dinamičkog gravitacijskog polja:

$$\vec{g}_{d1} = G \frac{m_1}{r_{12}^2} \frac{\vec{a}_1}{G \frac{m_2}{r_{12}^2}} = G \frac{m_1}{r_{12}^2} \frac{\vec{a}_1}{g_{s2}} \quad (8)$$

Gdje je g_{d1} dinamičko gravitacijsko polje koje masa m_1 razvija na mjestu na kojem se nalazi masa m_2 , G je gravitacijska konstanta, a_1 je akceleracija mase m_1 , r_{12} je udaljenost među masama i g_{s2} je magnituda statičkog gravitacijskog polja točkaste mase m_2 na lokaciji mase m_1 .

Pomnožili smo svaku masu u (7) sa G jer je polje sila gravitacijsko i čineći to možemo praviti usporedbu jakosti dinamičkog gravitacijskog polja sa jakošću statičkog gravitacijskog polja. Dijelimo svaku masu sa kvadratom udaljenosti jer se polje prostire od mase koja ga razvija ravnomjerno u svim smjerovima. Dinamičko gravitacijsko polje je proporcionalno masi koja ga proizvodi i opada sa kvadratom udaljenosti od te mase. Dinamičko gravitacijsko polje je proporcionalno kvocijentu akceleracije i statičkog gravitacijskog polja koje proizvodi druga masa, u našem slučaju masa m_2 . Smjer dinamičkog gravitacijskog polja je u smjeru akceleracije mase koja ga proizvodi.

Jednadžba (8) opisuje dinamičko gravitacijsko polje koje masa m_1 razvija na lokaciji mase m_2 . Možemo koristiti tu jednadžbu za računanje jakosti dinamičkog gravitacijskog polja u bilo kojoj točki u prostoru ako koristimo udaljenost između mase m_1 i izabrane točke u prostoru. Dinamičko gravitacijsko polje koje akceleracija mase m_1 razvija u bilo kojoj točki prostora je:

$$\vec{g}_{d1} = G \frac{m_1}{r^2} \frac{\vec{a}_1}{g_{s2}} \quad (9)$$

Ako postoji više masa u sistemu, uz mase m_1 i m_2 , utjecaj sila reakcije tih masa se treba uzeti u obzir kad računamo dinamičko gravitacijsko polje za masu m_1 . Te mase će doprinositi magnitudi statičkog gravitacijskog polja na lokaciji mase m_1 .

$$\vec{g}_{d1} = G \frac{m_1}{r^2} \frac{\vec{a}_1}{\sum_{i=2}^n G \frac{m_i}{r_{1i}^2}} \quad (10)$$

Lako se provjeri za jednadžbu (10) da je suma sila na svim ostalim masama, uzrokovana dinamičkim gravitacijskim poljem mase m_1 koja se ubrzava, jednaka reakciji na inercijalnu silu

$$m_1 \vec{a}_1 = \sum_{j=2}^n m_j \vec{g}_{d,1j} \quad (11)$$

Jednadžba za dinamičko gravitacijsko polje sa kontinuiranom distribucijom drugih masa u sistemu ρ , može se pisati kao

$$\vec{g}_{d1} = G \frac{m_1}{r^2} \frac{\vec{a}_1}{\int_V G \frac{\rho_i}{r_{1i}^2} dV} \quad (12)$$

Volumni integral u nazivniku jednadžbe (12) je skalarna veličina koja predstavlja magnitudu statičkog gravitacijskog polja drugih masa u sistemu. Dinamičko gravitacijsko polje koje masa m_1 razvija će biti jače za istu akceleraciju ako su druge mase manje i ako su na većoj udaljenosti od mase m_1 .

Uz pretpostavku da je zemlja sferičnog oblika sa radijusom R i jednolikom gustoćom mase ρ skalarno statičko gravitacijsko polje u nazivniku jednadžbe (12) za zemlju je

$$g_s = 2\pi G \rho R \quad (13)$$

Magnituda vektora statičkog gravitacijskog polja na površini zemlje prema Newton-ovom zakonu gravitacije (2.b) je

$$\vec{g}_s = -\frac{4}{3}\pi G \rho R \hat{r} \quad (14)$$

Magnituda skalarnog statičkog gravitacijskog polja na površini zemlje je 50% veća od magnitude vektora statičkog gravitacijskog polja. Numerička vrijednost skalara g_s na površini zemlje je aproksimativno 14.72 m/s^2 , tako da se dinamičko gravitacijsko polje za masu koja se ubrzava na površini zemlje može računati koristeći slijedeći izraz

$$\vec{g}_{d1} = G \frac{m_1}{r^2} \frac{\vec{a}_1}{14.72} \quad (15)$$

Svojstva inercijalne sile koja se stvara opisanim dinamičkim gravitacijskim poljem su u skladu sa ponašanjem mase koje se uočava u prirodi.

- Smjer inercijalne sile na masi m_2 računate na ovaj način će uvijek biti suprotan smjeru akceleracije mase m_2 jer je inercijalna sila uzrokovana dinamičkim gravitacijskim poljem koje razvija akceleracija mase m_1 .
- Dinamičko gravitacijsko polje je takovo da je princip akcije i reakcije uvijek zadovoljen. Sila na masu koja se ubrzava je uvijek jednaka sili na okolnim masama koje se ubrzavaju u suprotnom smjeru.
- Inercijalna sila ne zavisi o smjeru akceleracije prema zemlji. Inercijalna sila za istu akceleraciju će biti jednakog iznosa ako se masa ubrzava paralelno ili okomito na površinu zemlje.
- Inercijalna sila je neovisna o mjestu ubrzanja. Inercijalna sila će biti ista za istu akceleraciju mase na polu kao i na ekvatoru. To je zbog toga što se statičko gravitacijsko polje zemlje, u nazivniku jednadžbe (15), a s njim i dinamičko gravitacijsko polje, mijenja sa položajem na zemlji. Čak i kada se odmaknemo od zemlje inercijalna sila će uvijek biti proporcionalna akceleraciji.
- Dinamičko gravitacijsko polje, a s njime i inercijalna sila, je linearno proporcionalno masi koja ga razvija a ne kvadratu mase. Energija magnetskog polja oko električnog naboja u gibanju je

proporcionalna kvadratu naboja. Kinetička energija mase u gibanju je linearno proporcionalna sa masom.

3 Jednadžbe gibanja planeta

Trebamo provjeriti da li se jednadžba dinamičkog gravitacijskog polja slaže sa uočenim gibanjem planeta u našem solarnom sistemu. Treba se pokazati da je akceleracija planeta računata pomoću jednadžbe dinamičkog gravitacijskog polja jednaka akceleraciji računatoj pomoću Newton-ovog zakona gravitacije i jednadžbe gibanja.

Jednadžbe za ravnotežu sila u sistemu masa koje se gibaju i imaju statičko i dinamičko gravitacijsko polje trebaju uzeti obadva polja u razmatranje. Tijela u svemiru nemaju oslonac koji proizvodi neku silu nego su sile koje djeluju na tijelo uvijek u ravnoteži tako da sile koje statičko i dinamičko gravitacijsko polje drugih masa stvaraju na svakoj masi m_j moraju biti u ravnoteži.

$$\sum_i \vec{F}_i = 0 \quad (16a)$$

$$\sum_i \vec{F}_{si} + \vec{F}_{di} = \sum_{i \neq j} m_j (\vec{g}_{sij} + \vec{g}_{dij}) = 0 \quad (16b)$$

U gornjoj jednadžbi g_{sij} je jakost statičkog gravitacijskog polja koje masa m_i stvara na lokaciji mase m_j , a g_{dij} je dinamičko gravitacijsko polje koje masa m_i stvara na lokaciji mase m_j . Jednadžba (16) će biti zadovoljena za svaku masu samo ako je suma statičkih i dinamičkih polja stvorenih drugim masama jednaka nuli na lokaciji mase m_j . Za sistem sa dvije točkaste mase koje imaju statičko i dinamičko polje jednadžbe su:

$$G \frac{m_1}{r_{12}^2} \frac{\vec{a}_1}{G \frac{m_2}{r_{12}^2}} + G \frac{m_1}{r_{12}^2} \hat{r} = 0 \quad (17a)$$

$$G \frac{m_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{a}_2}{G \frac{m_1}{r_{12}^2}} - G \frac{m_2}{r_{12}^2} \hat{r} = 0 \quad (17a)$$

Primjena jednadžbe dinamičkog gravitacijskog polja za računanje gibanja jednog planeta i sunca daje isti rezultat za akceleraciju planeta kao primjena Newton-ovog zakona i zakona gibanja. To znači da će orbitalni period računat na jedan način biti isti kao orbitalni period računat na drugi način. Orbitalni period planeta se može računati pomoću akceleracije i jakosti statičkog gravitacijskog polja prema izrazu

$$a = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r = G \frac{m_s}{r^2} \quad (18)$$

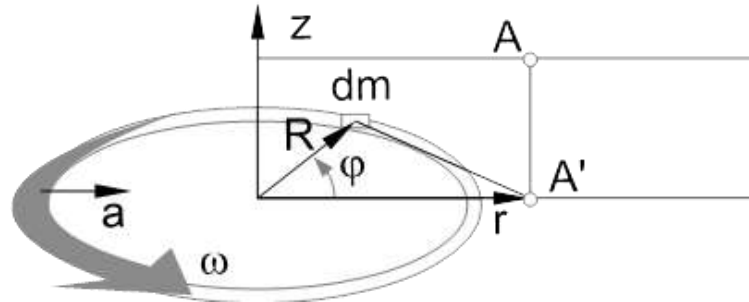
Gdje je

- a – akceleracija planeta
- T – orbitalni period planeta
- r – udaljenost planeta od sunca
- m_s – masa sunca

Iz jednadžbi (17) vidimo da će jakost dinamičkog gravitacijskog polja biti veća za istu akceleraciju za planete udaljenije od sunca nego za planete koji su bliže suncu. Bez tog efekta sile reakcije za gibanje planeta ne bi bile u ravnoteži na suncu. Konceptualna razlika u računu gibanja planeta koristeći dinamičko gravitacijsko polje i Newton-ovu metodu je da svi planeti i sunce moraju imati akceleraciju. Ne možemo imati solarni sistem gdje je sunce stacionarno. Trebamo biti svjesni da se svaka masa ubrzava ili ćemo imati sistem gdje sile neće biti u ravnoteži. Ubrzanje može biti numerički zanemarivo ali to ubrzanje postoji i stvara ravnotežu sila. Daljnja razlika je da će akceleracija planeta stvarati silu na druge planete. Dinamičko i statičko gravitacijsko polje svakog planeta će utjecati na gibanje drugih planeta.

4 Dizajn eksperimenta za detektiranje dinamičkog gravitacijskog polja

Jakost dinamičkog gravitacijskog polja za masu koja se ubrzava na zemlji predviđena jednačbom (15) je dovoljno velika da bi se mogla detektirati prikladno projektiranim instrumentom. Ako u laboratoriju želimo mjeriti dinamičko gravitacijsko polje oko kugle koja se spušta niz kosinu ili je ispuštena sa neke visine jakost polja i trajanje pojave bi bili premali da se detektiraju jednostavnim instrumentom. Ako koristimo zvrk koji se okreće kako je to pokazano na Sl. 4. imat ćemo masu dm koja se neprestano ubrzava konstantnom akceleracijom na istoj lokaciji u odnosu na nas. Jakost dinamičkog gravitacijskog polja u prostoru oko zvrka će biti konstantna.

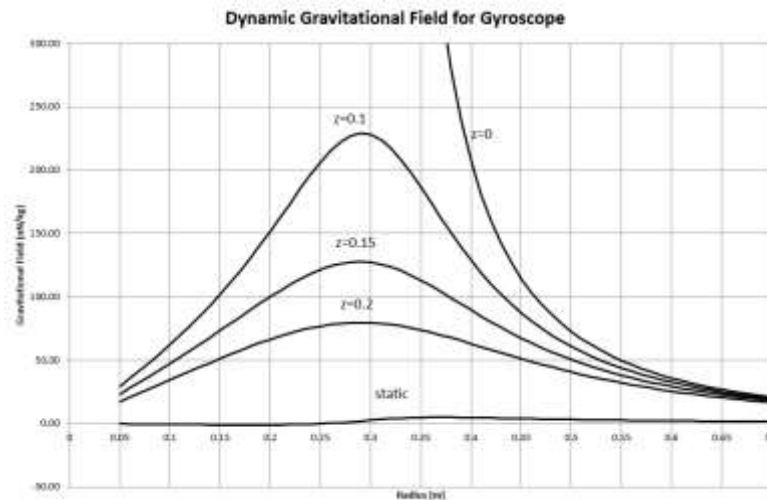


Sl. 4.: Zvrk za generiranje dinamičkog gravitacijskog polja

Jakost dinamičkog gravitacijskog polja u prostoru oko zvrka možemo naći tako da integriramo doprinose mase dm po cijelom obodu zvrka. Izraz za jakost dinamičkog gravitacijskog polja koje mala masa dm stvara u točki A na udaljenosti r od ishodišta pod kutom θ rad i na visini z se može napisati u cilindričnom koordinatnom sustavu kao:

$$\vec{g}_d = \int_{-\pi}^{\pi} G \frac{\omega^2 R}{14.72} \frac{\cos(\varphi) \lambda R d\varphi}{(z^2 + r^2 + R^2 - 2rR \cos(\varphi))} \quad (19)$$

Gdje su r , φ i z cilindrične koordinate, R je radijus zvrka, λ je linijska gustoća mase na obodu zvrka, G je gravitacijska konstanta, ω je kružna brzina zvrka. Jednačba (19) je primjena jednačbe za jakost dinamičkog gravitacijskog polja na ubrzanje mase na zemlji. Izraz $(\omega^2 R)$ je akceleracija mase dm , $(\lambda R d\varphi)$ je diferencijalna masa dm , u nazivniku je udaljenost mase dm od točke u prostoru A, a član $\cos(\varphi)$ u brojniku izraza je zbog toga jer je sila vektorska veličina i razmatramo samo komponentu koja djeluje prema središtu zvrka. Točka A' je projekcija točke A na ravninu u kojoj se vrti zvrk. Udaljenost mase dm od točke u prostoru A se nađe kao suma kvadrata visine z i udaljenosti mase dm od A'. Pri računanju kvadrata udaljenosti točke A' od mase dm koristi se kosinusov poučak.

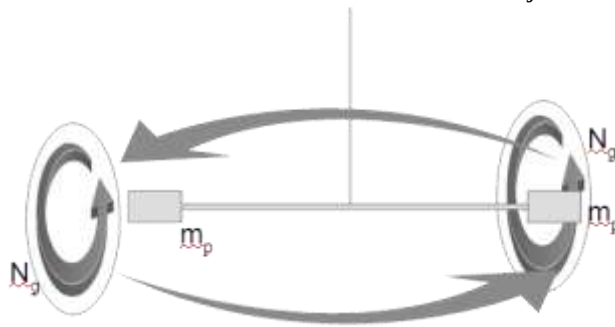


Sl. 5.: Jakost dinamičkog gravitacijskog polja oko zvrka

Dinamičko gravitacijsko polje zvrka koji ima masu 10kg jednoliko raspoređenu po obodu kruga radijusa 0.3m, kao kotač bicikla, je prikazano na Sl. 5. Jakost dinamičkog polja je računata pomoću jednačbe (19).

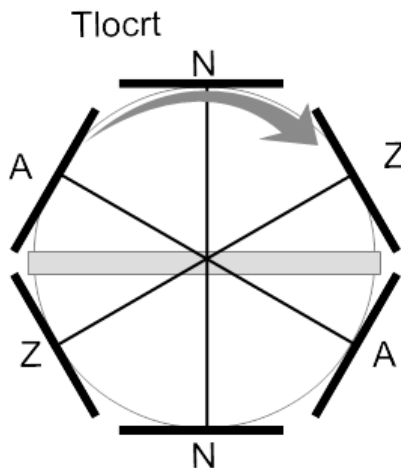
Zvrk se okreće sa 6 okreta u sekundi ili 360 okreta u minuti [rpm]. Obod kruga se giba sa oko 40km/h i akceleracija mase dm je oko 426m/s^2 . Jakost dinamičkog gravitacijskog polja u $n\text{N/kg}$ je prikazana na uspravnoj osi. Na vodoravnoj osi je pokazan radijus r od centra zvrka u metrima. Pozitivna vrijednost polja je usmjerena prema centru zvrka. Visina z od ravnine u kojoj se zvrk vrti je parametar na svakoj krivulji. Komponenta statičkog gravitacijskog polja koja djeluje prema centru zvrka na visini 0.1m je pokazana za usporedbu. Ovo gravitacijsko polje može biti detektirano instrumentom kao što je torziona vaga. Instrument mora biti u stanju da radi u okolini gdje su prisutne smetnje uzrokovane vibracijama zvrka koji nikada ne može biti idealno balansiran.

Instrument mora biti u mogućnosti pouzdano detektirati gravitacijsko polje iznad nivoa smetnji koje su izazvane vibracijama zvrka od 50nN/kg . U eksperimentu koji je napravio Cavendish da bi izmjerio masu zemlje jakost gravitacijskog polja je bila oko 200nN/kg . Kugle težine oko 158kg bile su postavljene na udaljenosti oko 23cm od gravitacijskih sonde. Trebamo uzeti u obzir kućište oko sonde instrumenta koje će štititi sondu od gibanja zraka i elektrostatskih sila tako da ne možemo doći jako blizu sonde sa zvrkom.



Sl. 6.: Modificirani Cavendish-ev eksperiment

Prikaz eksperimenta koji se može koristiti za detekciju dinamičkog gravitacijskog polja je pokazana na Sl. 6. U eksperimentu imamo torzionu vagu sa masama sonde m_p i dva zvrka. Zvrkovi će se okretati radnom brzinom N_g . Tokom eksperimenta jakost dinamičkog gravitacijskog polja se podvostručava tako da mijenjamo smjer dinamičkog gravitacijskog polja okretanjem zvrkova oko sonde sličnu kao u Cavendish-evom eksperimentu [7]. Mogu se napraviti i drugačiji eksperimenti za detektiranje dinamičkog gravitacijskog polja ali opisani eksperiment izgleda najjednostavniji iako nije trivijalan.



Sl. 7.: Pozicija zvrka tokom pokusa

Na Sl. 7. prikazani su položaji zvrkova tokom pokusa gledano odozgo. Gravitacijske sonde su u kućištu a zvrkovi su na okretnom stolu i os koja prolazi kroz središte zvrka se može okrenuti u položaje A, N i Z. Kada je okretni stol u položaju A onda bi dinamičko gravitacijsko polje pomaklo sondu u pozitivnom smjeru, kada je okretni stol u položaju Z otklon bi bio u negativnom smjeru, a kada je okretni stol u položaju N dinamičko gravitacijsko polje ne bi imalo utjecaja na otklon sonde.

U svojim pokusima za mjerenje jakosti statičkog gravitacijskog polja Cavendish je mjerio nekoliko oscilacija položaja sonde i na osnovu nekoliko oscilacija je određivao konačnu vrijednost otklona. Konačnu

vrijednost otklona je računao iz rezultata tih nekoliko prvih oscilacija kao srednju vrijednost otklona u jednom smjeru i srednje vrijednosti dvaju susjednih otklona u suprotnom smjeru.

$$X_k = \frac{X_{n,+} + \frac{X_{n-1,-} + X_{n+1,-}}{2}}{2} \quad (20)$$

Gdje je:

- X_k je konačna vrijednost položaja sonde,
- $X_{n,+}$ je vršna vrijednost otklona u pozitivnom smjeru u oscilaciji n
- $X_{n-1,-}$ je vršna vrijednost otklona u negativnom smjeru prije pozitivnog vrha
- $X_{n+1,-}$ je vršna vrijednost otklona u negativnom smjeru nakon pozitivnog vrha

Cavendish je računao konačnu vrijednost za vršne vrijednosti koje su bile pozitivne i negativne. On u svom članku navodi da je ovakav način računanja konačne vrijednosti pouzdanija mjera otklona nego čekati da se sonde umire jer položaj sonde ima “drift” ako se promatra satima. Razlika u položaju sonde koja se mjeri u kratkom periodu nema “drift” koji bi utjecao na rezultat mjerenja. U nizu pokusa Cavendish je postavljao utege u razne kombinacije položaja Z,A ; N,A,Z ; A,N,A... Da bi odredio utjecaj magnetskog polja i druge utjecaje okoline na otklon instrumenta radio je pokuse pomicanjem uređaja bez utega, sa zagrijavanjem utega...

5 Mehanička konstrukcija instrumenta

Izgled modela instrumenta sa zvrkovima kojega koristim u pokušaju detektiranja dinamičkog gravitacijskog polja pokazan je na Sl. 8. Instrument sam nazvao Jele po kraljici Jeleni zaštitnici udovica i siročadi.



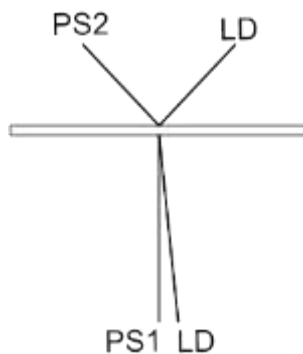
Sl. 8.: Model instrumenta za mjerenje dinamičkog gravitacijskog polja

U kućištu instrumenta je zakretna nit i letva koja nosi dvije mase na svojim krajevima. Nit je od čelične žice promjera 0.2 mm. Kućište je izrađeno od drva i iznutra je obloženo aluminijskom folijom da se eliminira utjecaj elektrostatskog polja. Na krajevima ruku instrumenta oplata je od prozirne plastike tako da se pozicija letve unutar kućišta može vizualno provjeriti. Na vrhu tornja instrumenta je elektronika za podešavanje

položaja letve koja nosi mase kojima se mjeri gravitacijsko polje. Zvrkovi su kotači električnog bicikla. Na svaki kotač je namotano 11kg bakrene žice. Kotači su postavljeni na okretni stol koji se upravlja istosmjernim motorom. U kasnijoj izvedbi zvrkovi su obloženi kućištem da bi se spriječilo da strujanje zraka uzrokovano okretanjem kotača utiče na otklon instrumenta.

6 Elektronika instrumenta

Otklon letve koja nosi gravitacijske sonde se mjeri sa dva detektora pozicije „position sensing detectors“ S3932 koje proizvodi Hamamatsu. Detektori pozicije imaju foto osjetljivu površinu od 12mm i na toj površini mogu registrirati položaj svijetle točke. Izvor svjetlosti koji proizvodi točku je laserska dioda koja daje crvenu svjetlost valne dužine 650nm sa lećom za križno fokusiranje svjetlosti. Na letvi koja nosi gravitacijske sonde su montirana dva ogledala. Ogledala nisu napravljena od stakla nego imaju površinu koja reflektira svjetlost tako da se izbjegava prelamanje svjetlosne zrake pri prolazu kroz staklo do površine za refleksiju. Struje koje proizvodi S3932 se pojačavaju operacionim pojačalima TL074 i pretvaraju u digitalni signal 16 bitnim AD pretvaračem ADS1115. Arduino mikro kontroler očitava digitalne signale sa AD pretvarača i računa poziciju letve svakih 5 sekundi. Rezultat računa zajedno sa ostalim mjerenim veličinama se prenosi na računalo pomoću bluetooth veze. Rezultati se spremaju u csv datoteku. Letva koja visi na nitima ne giba se samo torziono nego i oscilira u drugim stupnjevima slobode. Da bi se detektirale oscilacije u drugim stupnjevima slobode i povećala pouzdanost mjerenja, koristi se sustav sa dva senzora pozicije. Jedan je postavljen blizu letve i svjetlost se reflektira od ogledala pod velikim kutom. Drugi je postavljen na većoj udaljenosti od ogledala i zraka svjetla se reflektira gotovo okomito sa ogledala kako je to prikazano na Sl. 9.



Sl. 9 Detekcija otklona letve

Letva koji nosi gravitacijske sonde treba biti pozicionirana tako da je u sredini kućišta. Ako je sonda blizu jednog zida kućišta udaljenost od sonde do zvrka bi bila krivo procijenjena i to bi doprinosilo pogreški mjerenja. Sonda se pozicionira u sredinu kućišta pozicionim mehanizmom koju zakreće ovjesište koje drži nit na kojoj visi letva. Pozicioni mehanizam koristi koračni motor 28BYJ-48 sa upravljačkim sklopom ULN2003. Motor je povezan sa ovjesištem remenom GT-2 širokim 5mm. Motor ima zupčanik sa 20 zubaca i ovjesište ima zupčanik sa 60 zubaca. Akcija pozicioniranja počinje kada dotaknem letvu rukom tako da ona oscilira između dva zida kućišta. Željena pozicija (set point) letve se računa kao srednja vrijednost minimalnog i maksimalnog otklona letve. Letva na niti je oscilatorni sistem sa jako malim prigušenjem. Da bi pozicionirao letvu blizu željene pozicije koristim adaptivni algoritam za upravljanje a kao povratnu veličinu koristi se signal sa kašnjenjem signala pozicije letve. Vremenska konstanta kašnjenja signala pozicije je 500 sekundi. Pozicija ovjesišta se podešava svakih 900 sekundi ili 15 minuta. Koračni motor se napaja iz 12V izvora. Da bi se smanjilo zagrijavanje motora, napon na upravljačkom sklopu se isklopi u periodu kad motor ne treba da se giba. Zbog trenja između zupčanika i kućišta ovjesište ostaje u konstantnoj poziciji i bez napona na koračnom motoru.

Zvrkovi su postavljeni na okretnom stolu koji ih okreće od jedne sonde do druge. Pozicija okretnog stola se kontrolira pomoćnim Arduinoom. Pomoćni Arduino komunicira sa vodećim svakih pet sekundi. Pomoćni Arduino dobiva komandu da pozicionira okretni stol u željenu poziciju ili da pošalje mjerene vrijednosti na ispis. Kad Arduino dobije komandu da pozicionira okretni stol na neku poziciju, Arduino uključi istosmjerni motor u željenom smjeru okretanja pomoću relejnog modula XC-4440. Motor je povezan sa okretnim stolom

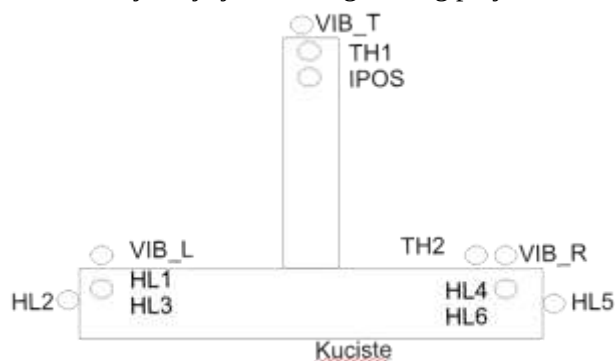
zupčastim remenom HTD5M širokim 15mm. Remen je povezan sa davačem položaja EAW0J-B24-AE0128L koji mjeri poziciju okretnog stola. Pozicija okretnog stola se mjeri sa rezolucijom od 0.8mm.

Zvrk je napravljen kao kotač električnog bicikla kojemu je na obodu namotano 11 kg bakrene žice. Neizolirana bakrena žica koju sam koristio je promjera 1.65mm. Kotač je 26" stražnji kotač 48V 1000W kojeg proizvodi Voilamart. Kotač ima motor sa permanentnim magnetima. Pretvarač koji napaja kotač je generički pretvarač 350W koji sam našao na tržištu. Kod pretvarača sam uspio identificirati vodiče koji služe za mjerenje brzine i kontrolu brzine. Brzina vrtnje se mjeri pomoću Hallove sonde. Signal Hallove sonde sam filtrirao da bi dobio pravokutni napon čija frekvencija je proporcionalna brzini vrtnje. Ustanovio sam da motor ima 23 pola. Brzina kotača se kontrolira analognim naponskim signalom 0-5V kojeg sam generirao pomoću 12bitnog DA pretvarača MCP4725. Struja koju uzima motor se mjeri pomoću strujnog senzora ACS712-05.

7 Električne smetnje i utjecaj okoline

Sonde i ostali dijelovi instrumenta su napravljeni od nevodljivog materijala tako da se elektrostatski naboj može nakupiti na površini tih dijelova. U prvoj izvedbi instrumenta nisam imao oblog od aluminijske folije na unutrašnjosti kućišta i na sondama. Bez elektrostatske zaštite letva se nije mogla stabilizirati u sredini kućišta. Udarila bi u jedan zid kućišta i ostala prilijepljena sve dok mehanizam za pozicioniranje ne bi djelovao i odlijepio je od jednog zida, a onda bi udarila u drugi zid i ostala zalijepljena na drugom zidu. Aluminijske folije koje sam postavio na unutarnje zidove kućišta, na sonde i letvu su međusobno povezane tako da se elektrostatski naboj prazni te je time riješen problem sa elektrostatskim nabojem.

Svaki materijal ima neka magnetska svojstva i reagirat će na magnetsko polje. Čak će i dijamagnetski ili paramagnetski materijali reagirati na magnetska polja. Da bi se eliminirao utjecaj vrtložnih struja koje se mogu pojaviti zbog nepravilnosti u zvrku, sonde su napravljene od nevodljivog materijala. Sonde su napravljene od plastične cijevi promjera 65mm dužine 80mm koja je ispunjena pijeskom i cementom. Magnetska susceptibilnost betona ovisi u velikoj mjeri o vlažnosti betona [9] tako da su sonde sušene nekoliko tjedana prije nego li su prekrivene aluminijskom folijom. Ako je magnetsko polje konstantno mehanizam za pozicioniranje će stvoriti protusilu tom polju i otklon instrumenta neće biti pod utjecajem te sile. Elektromotori za pogon zvrka imaju neko rasipno magnetsko polje koje se ne može eliminirati pa su oko gravitacijskih sondi postavljene Hallove sonde za mjerenje magnetskog polja. Utjecaj magnetskog polja na otklon sondi će se provjeriti baždarnim postupkom. Permanentni magneti će se prinijeti sondama i mjerit će se otklon instrument zbog magnetskog polja uz istovremeno mjerenje jakosti magnetskog polja.



Sl. 10.: Položaj detektora za utjecaj okoline na kućištu instrumenta

Smetnje u mjerenju nisu uzrokovane samo prisutnošću električnih i magnetskih polja. Da bi se smetnje i utjecaj okoline promatrali tokom eksperimenta postavljeno je nekoliko senzora oko instrumenta

- 6 Hallovih sondi (HL) za mjerenje magnetskog polja
- 3 sonde sa piezo-kristalima (VIB) za mjerenje vibracija
- 2 sonde za mjerenje temperature i vlažnosti zraka (TH)
- Sonda za mjerenje pozicije tornja instrumenta i iluminacije svijetlosti (IPOS)

Signali sa ovih sondi se spremaju u datoteku svakih pet sekundi zajedno sa signalima položaja štapa, brzine vrtnje zvrka, struje pogonskog motora zvrka i vibracija na zvrku.

8 Mehaničke smetnje u instrumentu

Gravitacijske sile koje se mjere instrumentom su jako male tako da strujanje zraka oko sonde može izazvati otklon instrumenta. Sila otpora strujanja zraka oko sonde se može računati prema izrazu [10]:

$$F_d = C_d \rho A \frac{v^2}{2} \quad (21)$$

Gdje su F_d sila otpora strujanja zraka, C_d koeficijent otpora strujanja zraka, ρ gustoća zraka, A površina preko koje zrak struji i v brzina strujanja zraka. Ako pretpostavimo da je koeficijent otpora zraka 1.2, brzina strujanja zraka koja bi proizvela istu silu na sondu kao gravitacijsko polje od 50nN/kg, je oko 1.6mm/s. Iz rezultata ove jednostavne provjere vidimo da se sonda mora zaštititi kućištem od strujanja zraka. Strujanje zraka može biti izazvano gradijentom temperature tako da dimenzije kućišta ne smiju biti velike.

Veliki izvor mehaničkih smetnji su vibracije koje stvara zvrk. Utjecaj tih vibracija se može smanjiti na nekoliko načina: dobrim balansiranjem zvrka, oplatom oko zvrka koja eliminira strujanje zraka oko zvrka, izoliranjem instrumenta od vibracija koje stvara zvrk u zemlji oko instrumenta, povećanjem brzine zvrka tako da su smetnje relativno manje u odnosu na koristan signal i mijenjanjem rezonantne frekvencije zvrka ili instrumenta dodavanjem mase. Ove smetnje još uvijek nisu eliminirane do te mjere da je moguće mjeriti dinamičko gravitacijsko polje tako da je pokus još uvijek u toku.

9 Baždarenje instrumenta

Računanje osjetljivosti instrumenta preko perioda oscilacija je pouzdanija metoda nego pokušaj da se procijeni krutost niti pomoću tabele. Gibanje sonde pod utjecajem sile je određeno mehaničkom jednačbom gibanja

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + kx = F \quad (22)$$

U ovoj jednačbi je m masa, γ faktor prigušenija oscilacija, k konstanta opruge i F sila koja uzrokuje gibanje. Sila će u našem slučaju biti izazvana djelovanjem gravitacije na sondu. Ako ovu jednačbu podijelimo sa masom m dobit ćemo

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\gamma}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = \frac{F}{m} \quad (23)$$

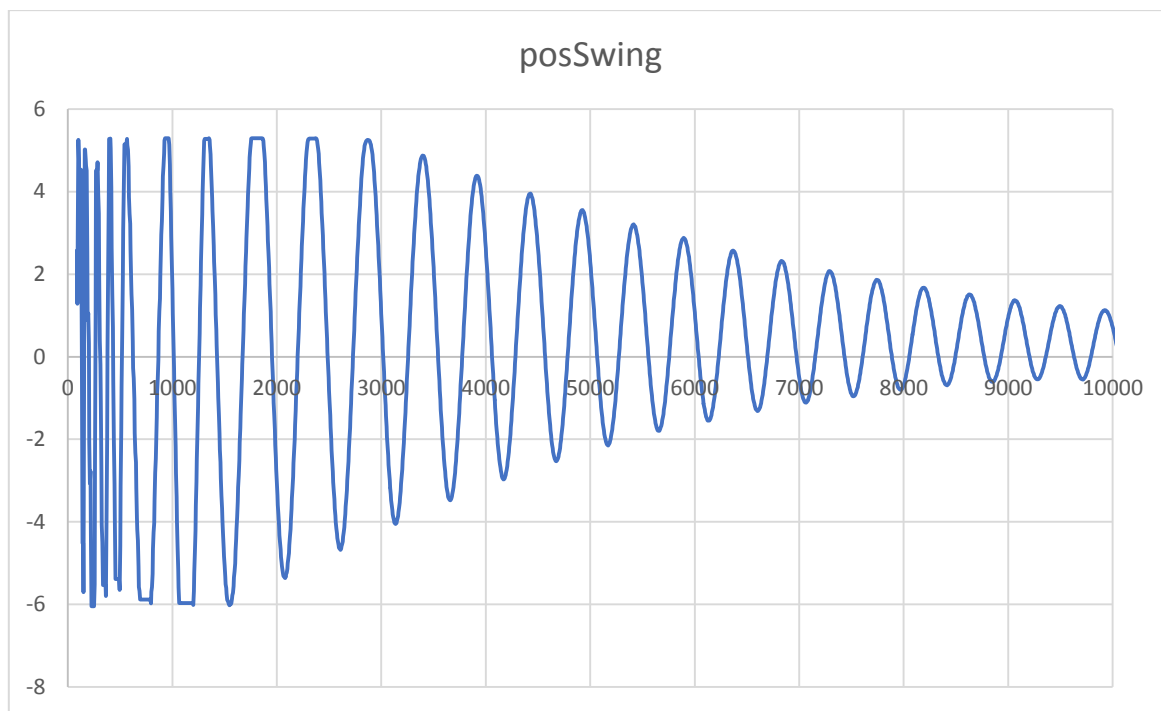
Ova jednačba se može napisati u drugom obliku

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{2}{\tau} \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = g \quad (24)$$

U gornjoj jednačbi je τ vremenska konstanta prigušenija oscilacija, ω_0 kružna frekvencija neprigušenih oscilacija i g jakost gravitacijskog polja koje mjerimo. Vremensku konstantu prigušenja i period oscilacija lako se očitava sa dijagrama mjerenja pozicije letve. Kada završe prijelazno pojave prva i druga derivacija pozicije će biti nula tako da je otklon instrumenta nakon prijelazne pojave dan izrazom

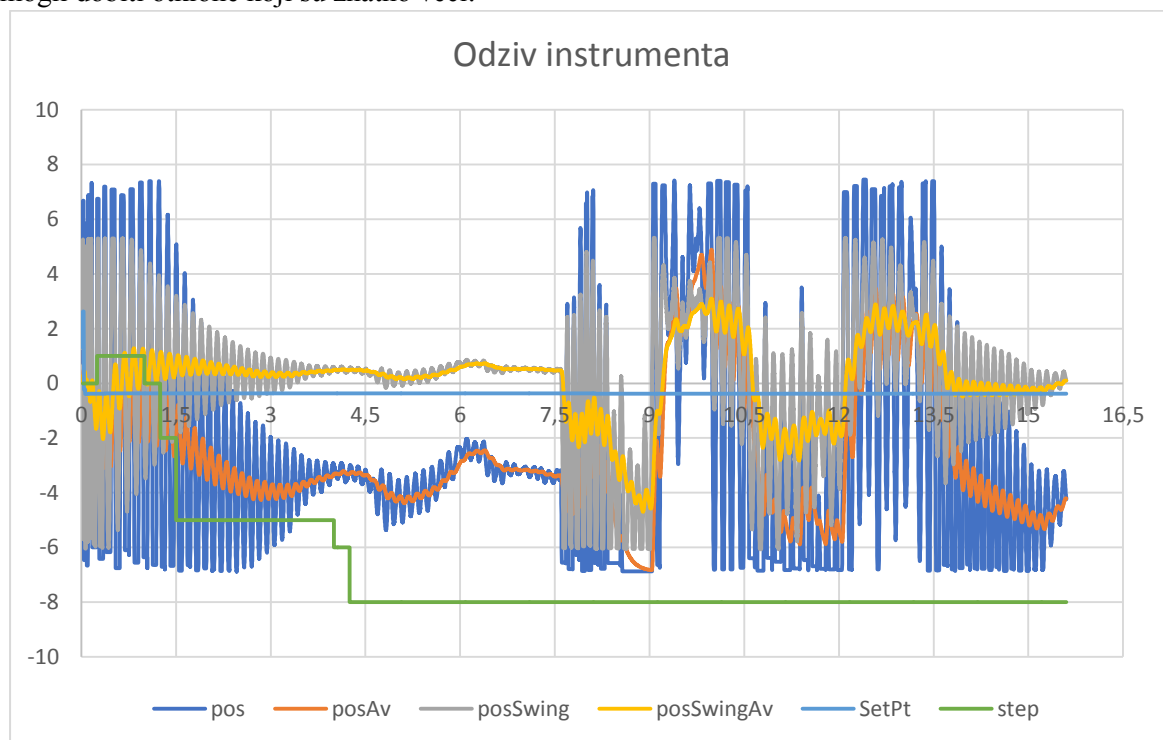
$$x = \frac{g}{\omega_0^2} = \frac{T^2}{4\pi^2} g \quad (24)$$

Gdje je T period oscilacija.



Sl. 11.: Pozicija letve tokom prvih 10 000 sekundi pokusa

Iz dijagrama na Sl. 11 možemo vidjeti da je perioda oscilacija oko 480 sekundi ili osam minuta. Na vodoravnoj osi je pokazano vrijeme u sekundama a na okomitoj osi otklon letve u mm mjereno senzorom pozicije PS2 kako je to pokazano na Sl. 9. Otklon instrumenta pri mjerenju gravitacijskog polja jakosti 200 nN/kg bi bio 1.167 mm . Ovaj otklon raste sa kvadratom broja okretaja u minuti tako da bi povećanjem broja okreta mogli dobiti otklone koji su znatno veći.



Sl. 12.: Odziv instrumenta tokom pokusa

Odziv instrumenta tokom pokusa pokazan je na Sl. 12. Na vodoravnoj osi prikazano je vrijeme u satima a na okomitoj otklon letve mjereno u mm. Krivulje koje su na dijagramu su:

- *pos* – pozicija letve mjerena pozicionim senzorom PS1
- *posAv* – filtrirana vrijednost pozicije *pos*

- *posSwing* – pozicija letve mjerena senzorom PS2
- *posSwingAv* – filtrirana vrijednost pozicije *posSwing*
- *SetPt* – željena vrijednost pozicije letve
- *step* – korak konačnog motora za podešavanje pozicije letve

Tokom mjerenja prvih 4.5 sata se podešava pozicija letve da bi ona bila u centru kućišta, a zvrk se drži u neutralnom položaju N kako je to prikazano na Sl. 7 i ne okreće se radnom brzinom. Program položaja okretnog stola i brzine zvrka tokom mjerenja prikazanog na Sl. 13 dan je u tablici 1.

Tablica 1.: Program položaja i brzine zvrka tokom pokusa

Vrijeme [h]	Položaj okretnog stola	Brzina zvrka [rpm]
0-4.5	N	0
4.5-6	A	0
6-7.5	Z	0
7.5-9	N	360
9-10.5	A	360
10.5-12	Z	360
12-13.5	A	360
13.5-...	N	0

Iz rezultata pokusa pokazanih na Sl. 11 i Sl. 12 jasno je da je osjetljivost instrumenta blizu željene osjetljivosti. Gravitacijsko polje koje želimo mjeriti je u području mjerenja i može se detektirati instrumentom. Ako je potrebno jakost polja se može pojačati tako da se poveća radna brzina zvrka. Potrebno je poraditi na otklanjanju smetnji i umirenju instrumenta jer su smetnje uzrokovane vibracijama zvrka prevelike da bi se moglo zaključiti da li postoji otklon uzrokovan dinamičkim gravitacijskim poljem ili ne postoji.

Zaključak

U članku je prikazano teoretsko razmatranje hipoteze da svaka masa koja se ubrzava stvara dinamičko gravitacijsko polje oko sebe te da je inercijalna sila koju osjećamo pri ubrzanju mase posljedica tog polja. Laboratorijski pokus koji se može koristiti za detektiranje dinamičkog gravitacijskog polja je isto tako opisan. Jednadžba koje opisuju hipotetsko polje je izvedena koristeći princip akcije i reakcije te pretpostavku da Galileov zakon gibanja vrijedi svugdje u prostoru. Dinamičko gravitacijsko polje u toj jednadžbi je kvazi-stacionarno jer jednadžba ne opisuju prostiranje tog polja kroz prostor.

Pokazano je da su svojstva inercijalne sile računate primjenom dinamičkog gravitacijskog polja u skladu sa svojstvima inercije koja se mogu mjeriti pokusima u prirodi. Isto tako je pokazano da je orbitalna brzina planeta u našem sunčanom sistemu računata pomoću jednadžbe dinamičkog gravitacijskog polja u skladu sa posmatranjem. Jakost dinamičkog gravitacijskog polja koje stvara inercijalnu silu je dovoljno velika da bi se to polje moglo detektirati laboratorijskim pokusom.

Jakost hipotetskog gravitacijskog polja opisanog u članku ovisi o razdiobi masa oko prostora gdje se masa ubrzava. Za istu akceleraciju mase jakost dinamičkog gravitacijskog polja će biti različita ovisno o tome da li je masa koja se ubrzava blizu ili daleko od drugih masa. Masa ubrzana istom akceleracijom na mjesecu i na zemlji će razviti dinamičko gravitacijsko polje koje je oko šest puta jače na mjesecu nego li je na zemlji. Ovakav zaključak nije intuitivan kao što ni činjenica da je težina tijela različita na raznim planetima nije intuitivna bez poznavanja statičkog gravitacijskog polja.

Sile koje se javljaju oko naboja u mirovanju i mase u mirovanju mogu se objasniti pomoću teorije polja. Isto tako elektrodinamičke sile se mogu objasniti pomoću teorije polja. Logično bi bilo da se pokuša znanstvenim eksperimentom provjeri pretpostavka da li su i gravitodinamičke sile, uključujući silu inercije, isto tako uzrokovane nekim poljem. Činjenica da nemamo eksperimentalnog dokaza da dinamičko gravitacijsko polje postoji nije dokaz da takovo polje ne postoji. Činjenice koje podupiru potrebu za eksperimentalnim istraživanjem hipotetskog dinamičkog gravitacijskog polja su:

- Postulirano dinamičko gravitacijsko polje zadovoljava princip akcije i reakcije za dinamiku mase a to je univerzalni princip koji važi za ostale slučajeve u polju sila

- Jednadžba dinamičkog gravitacijskog polja je u suglasju sa dinamikom mase koja je uočena u eksperimentima na zemlji
- Jednadžba dinamičkog gravitacijskog polja je u suglasju sa gibanjem planeta u solarnom sistemu

U literaturi [8] se navodi da su rađeni pokusi da se potvrdi jednakost inercijalne i gravitacijske mase, da se potvrdi valjanost zakona gravitacije o recipročnoj vrijednosti kvadrata udaljenost masa i neki drugi pokusi. Jednakost inercijalne i gravitacijske mase je bila pretpostavka koju su svi koristili kao poznatu prije nego li je Eötvös izveo njegove eksperimente. Nakon što je izveden pokus kojim se pokazalo da su ove mase jednake do jako velike preciznosti, rezultat eksperimenta se koristi kao potvrda jednakosti gravitacijske i inercijalne mase, a ne pretpostavka koja je opće prihvaćena. Za inercijalnu silu se pretpostavlja da je uzrokovana inercijom koja je svojstvo mase. Hipoteza da je inercijalna sila posljedica nekog polja koje se stvara oko mase koja se ubrzava može objasniti inercijalnu silu. Nigdje nisam našao zapise o pokušaju da se eksperimentom potvrdi koja je pretpostavka točna. Nisam naišao ni na zapise da se hipoteza dinamičkog gravitacijskog polja razmatrala. Pitanje postojanja ili nepostojanja dinamičkog gravitacijskog polja je značajno pitanje i trebalo bi izvesti pokus da bi se dobio eksperimentalni odgovor na to pitanje. Rezultat eksperimenta će biti nova potvrda opće teorije relativnosti u njenom sadašnjem obliku ili će otvoriti vrata za nova istraživanja u gravitaciji.

Napravljen je model eksperimenta koji je opisan u članku i dan je prikaz rezultata sa modela. Vidljivo je iz predloženih rezultata da je instrument koji je napravljen dovoljno osjetljiv da bi mogao detektirati hipotetsko polje. Smetnje i vibracije koje proizvodi zvrk su toliko velike da nije moguće iz sadašnjih rezultata odgovoriti na pitanje da li dinamičko gravitacijsko polje doista postoji ili ne postoji.

Literatura:

- [1] S. Bonechi, "How They Make me Suffer" <https://www.museogalileo.it/en/museum/explore/meet-galileo/37-life/778-how-they-make-me-suffer.html>
- [2] M. Fowler, "Isaac Newton" <http://galileoandstein.physics.virginia.edu/lectures/newton.html>
- [3] H. Ohanian, R. Rufini, "Gravitation and Spacetime" W.W. Norton & Company 1994
- [4] M. L. Ruggiero, A. Tartaglia, "Gravitomagnetic Effects" February 2008 arXiv:gr-qc/0207065
- [5] O. Heaviside, "A Gravitational And Electromagnetic Analogy" Part I, The Electrician, 31, 281-282 (1893)
- [6] B. P. Abbott & all. "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger" PRL 116, 061102 (2016)
- [7] H. Cavendish, "Experiments to Determine the Density of the Earth" <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1798.0022>
- [8] Y. T. Chen, A. Cook, "Gravitational Experiments in the Laboratory" Cambridge University Press, 2005
- [9]- J Davis, Y Huang, S. G. Millard, J. H. Bungey, Determination of dielectric properties of insitu concrete at radar frequencies, International Symposium (NDT-CE 2003)
- [10] The Drag Equation <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drageq.html>