GRAVITACIJA

Pre Njutna nije se ni znalo za postojanje gravitacione sile. To što tela, kada izgube oslonac, uvek padaju prema zemlji je prihvatano kao normalno stanje stvari i nije se razmišljalo zašto je to tako. Njutn je, kažu, došao na ideju o postojanju sile koja tela privlači ka Zemlji – iznerviran time što mu je jabuka pala na glavu dok je spavao pod drvetom – pa je počeo da razmišlja o uzrocima tog pada. Priča je skoro izvesno apokrifna. Takođe je izvesno da je Njutn prvi došao na ideju da je sila koja upravlja kretanjem nebeskih tela, upravo ona ista sila koja primorava tela da padaju ka površini Zemlje.

Danas, svaki iole obrazovan čovek zna ovu činjenicu kao nešto svakodnevno, pa je zbog toga iz današnje perspektive teško zamisliti značaj Njutnovog otkrića. Međutim, ako je to otkriće bilo tako jednostavno zašto se onda niko pre Njutna nije tome dosetio.

Naročito je zanimljivo pitanje: a kako su naučnici koji su se pre Njutna bavili nebeskom mehanikom objašnjavali razloge orbitalnog kretanje planeta oko Sunca ? Pa i oni su znali da je uzrok ovakvog kretanja planeta izvesna privlačna sila između njih i Sunca. Na primer Johan Kepler – naučnik koji je postavio zakone kretanja planeta, koje mi inače i danas koristimo, je smatrao da je ta privlačna sila – magnetna sila. U to vreme jedina poznata posredna sila je bila magnetna sila pa je utoliko Keplerov izbor bio logičan.

Kada je završio rad na svojoj teoriji gravitacije Njutn je pokušao da je primeni na kretanje Meseca i na njegovo veliko razočaranje rezultati se nisu uklapali u podatke astronomskih osmatranja. Tako je on ovu svoju teoriju odložio u stranu za čitavih 20 godina, da bi se na kraju pokazalo da nisu bili dobri stari rezultati osmatranja, a da njegova teorija daje rezultate koji se dobro uklapaju u nove i tačnije reultate merenja. Njutn je teoriju gravitacije objavio, zajedno sa svoja tri dinamička zakona, u već pomenutoj knjizi »Principia«, što i označava početak fizike kao nauke.

Do matematičkog oblika zakona za gravitacionu silu Njutn je došao pomoću III Keplerovog zakona, pa je prirodan redosled stvari da pre uvida u Njutnov rad o gravitaciji pogledamo Keplerove zakone kretanja planeta. Međutim, za potpuno razumevanje onoga što je Kepler uradio, treba stvari postaviti u istorijski okvir. Priča o Sunčevom sistemu i kako on izgleda počinje mnogo ranije…

U trećem veku pre naše ere, grčki filozof Aristarh je postavio heliocentričnu hipotezu o Sunčevom sistemu. Po ovoj zamisli Sunce se nalazi u središtu sistema. Na ovu ideju je Aristarh najverovatnije došao tako što mu je bilo nelogično da jedno tako veliko telo kao Sunce, kruži oko jednog tako malog tela kakvo je Zemlja. Aristarh je inače dokučio da je Sunce mnogostruko veće od Zemlje, a i da je jako udaljeno od nje tako što je osmatrao senku Zemlje na Mesečevoj površini za vreme pomračenja Meseca. Njegovi savremenici su bili šokirani, njegovim drskim učenjem, toliko da su neki od njih tražili njegovo kažnjavanje. Inače u to vreme je vladalo opšte uverenje da je Zemlja ogavna i gnusna, a da su nebesa savršena i božanska – što potiče od Aristotela i Platona. Dva veka ranije, tadašnji naučni svet je odbio da prihvati učenje Anaksagore da je Sunce ognjeni kamen veličine Peloponeza, zato što su smatrali da je znatno preterao u proceni njegove veličine. U takvoj atmosferi Aristarh je Zemlju sa ostalim planetama stavio u orbite oko Sunca i rekao da Zemlja obiđe jedan krug oko Sunca za godinu dana, a da se okrene oko svoje ose za jedan dan. Na kraju, na osnovu osmatranja zvezda došao je do zaključka da su one mnogo udaljenije od nas nego Sunce.

Nasuprot ovakvoj »drskosti«, stoji Aristotelovo učenje o Zemlji u centru vasione – geocentrična hipoteza, iz četvrtog veka pre naše ere. Aristotelove ideje je proširio i doradio Ptolomej u drugom veku naše ere. Ptolomej je bio jedan od naučnika (astronom i geograf) koji je radio u Aleksandrijskoj biblioteci, prvom naučno – istraživačkom institutu naše civilizacije, a od koga danas nije ostalo skoro ništa, sa izuzetkom nekoliko arheoloških tragova. Dakle, Ptolomej je zamislio Vasionu sa Zemljom u centru, a oko nje se nalazi sedam kristalnih sfera po kojima klize: po najbližoj – Mesec, po sledećih pet – pet tada poznatih planeta (Merkur, Venera, Mars, Jupiter i Saturn), a po najdaljoj sedmoj Sunce i zvezde. Ptolomejevo učenje je ostalo i u našem modernom jeziku: kada se za nekog kaže da je na sedmom nebu, ili izraz »muzika sfera« za neku naročito lepu melodiju.

Ono što je mnogo značajnije je da je ovo učenje ostalo zvanično skoro jedan i po milenijum. Za to je odgovorna hrišćanska crkva u Evropi koja je ovo učenje prihvatila kao svoje, verovatno se uzdajući u

Aristotelov naučni ugled. Po rascepu crkve, na ovom učenju najviše insistira katolička crkva, da bi na kraju ovo učenje pokušavala da odbrani progonom i ubijanjem neistomišljenika. Kao najuticajnija sila u Evropi onog vremena, katolička crkva nije mogla da dozvoli da se učenje, koje je ona prihvatila kao ispravno, pokaže kao pogrešno.

To su na svojoj koži osetili brojni naučnici u srednjem veku, od kojih je najgore prošao Đordano Bruno, jer je odbivši da se odrekne svog učenja bio 1600. godine spaljen na lomači. A u njegovom učenju se samo kaže da je Sunce u središtu sunčevog sistema, da je Zemlja samo jedna od planeta koje kruže oko njega, da su zvezde udaljena sunca i da oko njih kruže druge planete, na kojima možda postoje druga živa bića – naša braća po razumu.

Među progonjenima je bio i Galileo Galilej (1564. – 1642. god.) – otac moderne fizike. Da bi izbegao sudbinu Đordana Bruna, Galilej se 1633. god. javno odrekao svog učenja o heliocentričnoj vasioni, da bi ostatak svog života proveo u kućnom pritvoru. Međutim, upravo tu su i nastala njegova najznačajnija dela, koja su kasnije prokrijumčarena u Holandiju i na taj način postala dostupna potonjim generacijama naučnika. Galilej je napravio prvi teleskop, pomoću koga je video kratere na površini Meseca i četiri Jupiterova satelita, što ga je samo učvrstilo u uverenju da je heliocentrična teorija ispravna, jer ako Jupiterovi sateliti kruže oko Jupitera, jasno je da nešto ipak nije u redu sa geocentričnom teorijom, po kojoj sva tela kruže oko Zemlje. Galilej je eksperimentalno ispitivao kretanje tela u zemljinom gravitacionom polju, da bi kasnije Njutn njegova saznanja uvrstio u svoje dinamičke zakone.

Ipak prvi naučnik koji je obnovio staru Aristarhovu heliocentričnu hipotezu je bio Nikola Kopernik 1543. godine. Njegov rad je nastavio Johan Kepler (1571. - 1630. god.). Kepler je do svojih zakona kretanja planeta došao matematičkim putem, koristeći pritom rezultate osmatranja verovatno najvećeg astronoma tog vremena Tiho Brahe-a.

Pogledajmo sada tri Keplerova zakona kretanja planeta.

I Keplerov zakon

Orbite po kojima se planete kreću oko Sunca su elipse, a u zajedničkoj žiži svih tih elipsi se nalazi centar Sunca.

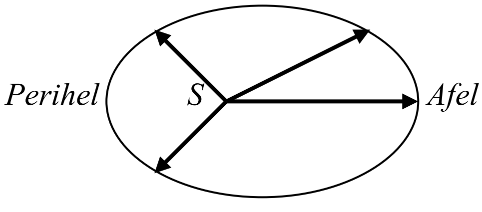
Ovom Keplerovom zakonu treba dodati i kasnije utvrđenu činjenicu da se orbite svih planeta nalaze u istoj ravni koja se naziva ekliptika.

II Keplerov zakon

Površine koje, u jednakim vremenskim intervalima, prebriše radijus vektor: Sunce – planeta su međusobno jednake.

Na sl. 1. se mogu videti dve takve površine. Jasno je da je njihova jednakost, zbog nejednakih dužina radijus vektora, uslovljena i nejednakim putevima koje planeta pređe iako su izabrani intervali vremena jednaki. Tamo gde su radijus vektori kraći tu pređeni put planete mora biti duži i obrnuto.

Posledica ovakvog razmatranja je da brzina planete nije svuda ista, tamo gde je pređeni put za isto vreme duži tu je planeta brža, a to je očigledno slučaj u blizini perihela njene orbite.



sl. 1.

Sa slike se može videti da je perihel tačka u kojoj se planeta nalazi najbliže Suncu, dok je afel tačka u kojoj je planeta najudaljenija od Sunca.

Ako počnemo da pratimo kretanje planete na orbiti, možemo uočiti da se pri njenom udaljavanju od Sunca - njena brzina smanjuje, dok se pri približavanju Suncu - njena brzina povećava. Ovo ukazuje na to da Sunce neprekidno privlači planetu nekom silom. Kepler je, kao što je već rečeno, smatrao da je ova sila magnetna. Mi danas znamo da je ova sila gravitaciona, međutim u Keplerovo vreme je jedina poznata privlačna sila bila magnetna, pa je Keplerova greška sasvim razumljiva.

Redosled činjenica u prethodnom razmatranju nas može dovesti do pogrešnog zaključka o tome šta je uzrok, a šta posledica. Ovaj redosled ukazuje da iz jednakih prebrisanih površina (uzrok), sledi promenljiva brzina planete na orbiti (posledica). Stvari u prirodi su upravo obrnute: jer iz nejednakih brzina planete (uzrok), sledi II Keplerov zakon tj. jednakost površina (posledica).

III Keplerov zakon

Odnos: kvadrata perioda obilaska planete oko sunca i kuba velike poluose njene orbite je isti za sve planete.

Ovaj zakon se može iskazati i na sledeći način:

$$\frac{T_1^2}{r_1^3} = \frac{T_2^2}{r_2^3} = ... = \frac{T_8^2}{r_8^3}, \qquad \text{ili:} \qquad \frac{T^2}{r^3} = const.$$

U prvom izrazu imamo osam članova zato što u Sunčevom sistemu postoji osam planeta.

Pogledajmo konkretnu primenu ovog zakona na slučaj određivanja rastojanja Jupitera od Sunca, pri čemu znamo period njegovog obilaska, koji iznosi približno T_5 = 11 godina. Inače, period obilaska planete oko Sunca je relativno lako odrediti astronomskim osmatranjem njenog kretanja.

Prvo ćemo odrediti vrednost Keplerove konstante iz poznatih podataka za našu planetu:

$$\frac{T_3^2}{r_3^3} = \frac{(1god)^2}{(1ajd)^3} = 1\frac{god^2}{ajd^3} = const.$$

Ovde je uzeto da je vreme za koje Zemlja obiđe oko Sunca iznosi T_3 = 1 godina, a da rastojanje Zemlja – Sunce iznosi r_3 = 1 *ajd*. tj. jednu astronomsku jedinicu dužine. (1 *ajd*. = 149 500 000 *km*).

Sada, na osnovu III Keplerovog zakona primenjenog na Jupiter i Zemlju:

$$\frac{T_5^2}{r_5^3} = \frac{T_3^2}{r_3^3} = const.$$

imamo:
$$\frac{T_5^2}{r_5^3} = 1\frac{god^2}{ajd^3},$$

tj. zamenom:
$$\frac{(11god)^2}{r_5^3} = 1\frac{god^2}{ajd^3}$$

Sledi:
$$r_5^3 = \frac{121god^2 \cdot ajd^3}{god^2}$$

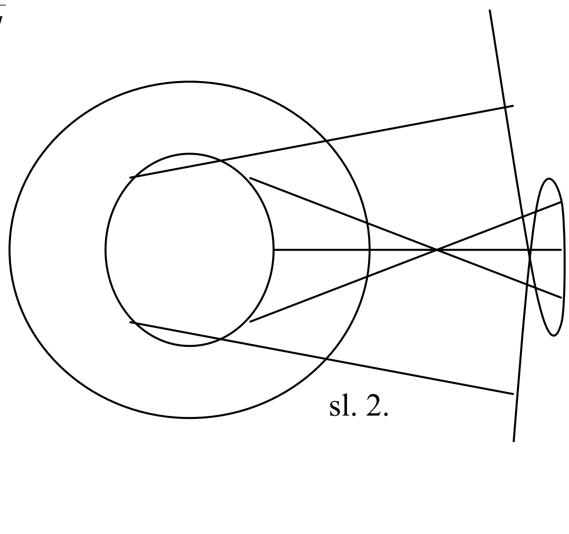
odakle je:
$$r_5 = \sqrt{121ajd^3}$$

tj.
$$r_5 = 4{,}946ajd \approx 5ajd\,.$$

Razmotrimo sada posledice ovako dobijenog rezultata. Možemo videti da je Jupiter pet puta udaljeniji od Sunca nego naša planeta. To znači da je i putanja po kojoj se Jupiter kreće pet puta duža od Zemljine orbite (možemo približno smatrati da su obe orbite kružne i da se mogu izračunati iz obrasca za obim kruga: $O = 2\pi \cdot r$). Međutim za prelaženje te putanje Jupiteru je potrebno jedanaest puta veće vreme nego Zemlji, odakle možemo izvesti zaključak da je prosečna orbitalna brzina Jupitera približno dva puta manja nego prosečna orbitalna brzina Zemlje, što se može pokazati na sledeći način:

$$\frac{v_5}{v_3} = \frac{\dfrac{2\pi \cdot r_5}{T_5}}{\dfrac{2\pi \cdot r_3}{T_3}} = \frac{\dfrac{5ajd}{11god}}{\dfrac{1ajd}{1god}} = \frac{5}{11} \approx \frac{1}{2}.$$

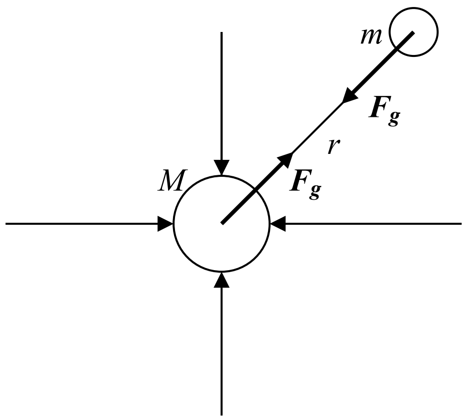
Dakle unutrašnje planete sunčevog sistema imaju veću orbitalnu brzinu od spoljašnjih. Upravo ovo Keplerovo otkriće omogućava objašnjenje jedne stare misterije, vidi sl. 2. Još u staro doba je bilo poznato da se planete kreću u odnosu na sazvežđa (što je uostalom i osnova astrologije, tj. pravljenja horoskopa). To kretanje je vrlo sporo, a pritom planeta na zvezdanom zaleđu povremeno pravi putanju u vidu petlje, pri čemu se izvesno vreme planeta kreće unazad – problem retrogradnog kretanja.



sl. 2.

Njutnov zakon gravitacije

Svako telo mase M je izvor gravitacionog polja. Na sl. 3. je prikazano gravitaciono polje. Po definiciji iz moderne fizike: ***fizičko polje je izvesna materijalnost okoline tela koja se posebno ispoljava dejstvom odgovarajuće sile.*** Pod »izvesnom materijalnošću« se podrazumeva energija fizičkog polja (u ovom slučaju energija gravitacionog polja) u prostoru oko tela. U slučaju gravitacionog polja sila, pomenuta u definiciji, je gravitaciona sila.



sl. 3.

Telo koje predstavlja izvor gravitacionog polja se nalazi u njegovom središtu pa se zato naziva – centralno telo, a uobičajeno je da se njegova masa obeležava velikim slovom *M*. Telo koje unesemo u polje, a na koga deluje gravitaciona sila, se naziva probno telo i njegova masa se obično obeležava sa: *m*. Linije, sa strelicama na vrhu, pomoću kojih obeležavamo samo polje, se nazivaju linije sile. One nisu realni objekti već su zamišljene linije kojih ima proizvoljno mnogo. Međutim, postoji dogovor da se jače polje obeležava proporcionalno većim brojem linija sile. Smer linija sile ukazuje na to da li je sila koja deluje u polju privlačna ili odbojna. U slučaju gravitacionog polja sila je uvek privlačna, pa su zato njegove linije sile usmerene uvek ka centralnom telu.

Kako je gravitaciona sila prava sila, ona predstavlja međusobno dejstvo dva tela, što znači da silu koja deluje na probno telo možemo shvatiti kao akciju, a silu koja deluje na centralno telo kao reakciju. U daljem razmatranju uzećemo u razmatranje samo silu akcije koja deluje na probno telo.

Na osnovu svojih i Galilejevih proučavanja kretanja tela, kao i na osnovu trećeg Keplerovog zakona, Njutn je, matematičkom analizom, došao do sledećeg obrasca za gravitacionu silu:

$$F_g = \gamma \frac{M \cdot m}{r^2}$$

Ovaj obrazac predstavlja Njutnov zakon gravitacije. U njemu γ je univerzalna gravitaciona konstanta, čiju je vrednost je prvi eksperimentalno odredio Kevendiš i koja iznosi: $\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$.

Njutnov zakon gravitacije možemo pročitati na sledeći način: ***gravitaciona sila, koja deluje između dva tela, je direktno srazmerna proizvodu njihovih masa, a obrnuto je srazmerna kvadratu rastojanja njihovih centara.***

To što je gravitaciona konstanta univerzalna, znači da ne postoji nikakav način da se njena vrednost promeni. To dalje znači da ne postoji nikakva izolacija od dejstva gravitacione sile, jer bi eventualni izolacioni materijal morao da ima vrednost konstante manju od zadate vrednosti, a to je baš ono što je nemoguće jer smo već rekli da je konstanta univerzalna.

Dakle intenzitet gravitacione sile isključivo zavisi od masa tela i njihovog međusobnog rastojanja i to na sledeći način:

- veća masa – jača sila i obrnuto i
- veće rastojanje – slabija sila i obrnuto.

Pritom treba imati u vidu da jačina sile zavisi od kvadrata rastojanja, što znači da će na tri puta većem rastojanju sila biti devet puta slabija itd.

Pogledajmo sada kolika je jačina gravitacione sile između dva tela jediničnih masa na jediničnom rastojanju:

$M = 1\ kg$
$m = 1\ kg$
$r = 1\ m$ $\qquad F_g = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot \frac{1kg \cdot 1kg}{(1m)^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot \frac{kg}{m^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} N$

$F_g = ?$ $\qquad$ tj. $\quad F_g = 0{,}0000000000667 N$

Kao što se može videti, gravitaciona sila je vrlo slaba, ona je daleko najslabija od svih posrednih sila. Međutim, ona je ta sila koja upravlja događajima u svemiru, jer ostale posredne sile (elektrostatička, magnetna i elektromagnetna) mogu biti i privlačne i odbojne, pa iako su mnogo jače od gravitacione ne mogu imati značajniju ulogu u upravljanju svemirom jer se većina njihovih dejstava, na nivou svemira, međusobno poništavaju. Dotle je gravitaciona sila uvek privlačna, pa se sva njena dejstva, na nivou svemira, međusobno sabiraju, što daje jednu ukupnu i izuzetno jaku silu koja upravlja događajima u megasvetu.

Jedina još posredna sila koja je, kao i gravitaciona sila, uvek privlačna je jaka nuklearna sila – najjača sila u svemiru, ali ona ima izuzetno kratak domet (koji se svodi na dimenzije atomskog jezgra), pa zato ona suvereno upravlja događajima upravo u jezgrima atoma, ali ne može konkurisati gravitacionoj sili koja je dugodometna. U stvari, domet pojedinačne gravitacione sile je teorijski beskonačan, dok se praktično njeno dejstvo na većim rastojanjima može zanemariti, zbog načina na koji zavisi od rastojanja.

Jačina gravitacionog polja – *G* $\left(\frac{N}{kg}\right)$

Ovo je osnovna veličina u gravitacionom polju, a ne gravitaciona sila, zato što je za dejstvo sile pored centralnog potrebno još jedno (probno) telo, dok jačina polja postoji i u odsustvu probnog tela.

Po definiciji: ***jačina gravitacionog polja, u datoj tački, je brojno jednaka gravitacionoj sili koja deluje na jedinicu mase probnog tela unetog u tu tačku***

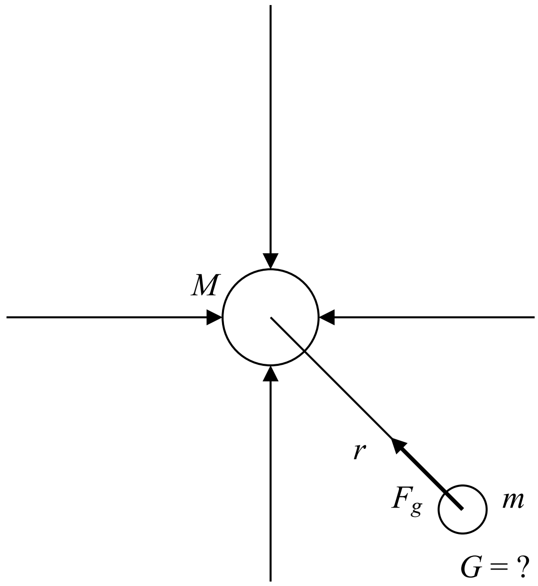
tj. $G = \frac{F_g}{m}$.

Uzmimo jedan konkretan primer:

neka je $F_g = 20N$

a $m = 2kg$.

Tada je: $G = \frac{F_g}{m} = \frac{20N}{2kg} = 10\frac{N}{kg}$



sl. 4.

Dakle ako na celo telo mase $m = 2\ kg$ deluje 20 *N* gravitacione sile, tada na svaki kilogram njegove mase deluje 10 *N* sile, što i predstavlja jačinu gravitacionog polja u tački u kojoj se probno telo nalazi. Sada dolazimo do upotrebe ove veličine: dakle, ako znamo jačinu gravitacionog polja u datoj tački tada je dovoljno samo još znati i masu tela unetog u tu tačku da bi odredili jačinu gravitacione sile koja na njega deluje, prostim okretanjem prethodnog obrasca: $F_g = m \cdot G$.

Ako u obrazac za jačinu gravitacionog polja: $G = \frac{F_g}{m}$ zamenimo obrazac za gravitacionu silu:

$F_g = \gamma \frac{M \cdot m}{r^2}$ dobićemo: $G = \frac{F_g}{m} = \frac{\gamma \frac{M \cdot m}{r^2}}{\frac{m}{1}} = \gamma \frac{M}{r^2}$.

Dobijeni obrazac: $G = \gamma \frac{M}{r^2}$ možemo pročitati na sledeći način:

jačina gravitacionog polja, u datoj tački, je direktno srazmerna masi centralnog tela, a obrnuto je srazmerna kvadratu rastojanja od centra centralnog tela do te tačke.

Izračunajmo sada jačinu gravitacionog polja na površini Zemlje, pri čemu ćemo uzeti da je masa Zemlje: $M = 5{,}97 \cdot 10^{24}\, kg$, a poluprečnik Zemlje: $r = 6{,}37 \cdot 10^{6}\, m$.

$$G_z = \gamma \frac{M}{r^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot \frac{5{,}97 \cdot 10^{24}\, kg}{\left(6{,}37 \cdot 10^{6}\, kg\right)^2} = \frac{6{,}67 \cdot 5{,}97}{40.5769} \cdot \frac{10^{-11} \cdot 10^{24}}{10^{12}} \cdot \frac{Nm^2 kg}{kg^2 m^2} = 9{,}81 \frac{N}{kg} .$$

Međutim, ova vrednost nam je poznata od ranije kao: $g = 9{,}81\frac{m}{s^2}$, a predstavlja ubrzanje tela u polju sile zemljine teže. Postavlja se pitanje da li su ove dve veličine slučajno brojno jednake, ili obe praktično predstavljaju istu veličinu. S obzirom da je: $\frac{N}{kg} = \frac{kg\frac{m}{s^2}}{kg} = \frac{m}{s^2}$, može se videti da jednakost brojnih vrednosti nije slučajna, tj. može se tvrditi da je: $G = g$.

Sa druge strane, može se primetiti da je vrednost jačine gravitacionog polja na površini Zemlje stalna, jer smo je izračunali iz tri veličine koje su konstantne (r, M i γ). To, takođe, znači da je i ubrzanje sile zemljine teže konstantno za sva tela, nezavisno od njihove mase. To je jedinstven slučaj kod fizičkih polja. Kao što je ranije, u dinamici, već rečeno, samo još fiktivne sile unutar ubrzanih – neinercijalnih sistema daju telima, nezavisno od njihove mase, isto ubrzanje.

Treba još primetiti da vrednost G tj. g koju smo prethodno izračunali važi samo na površini Zemlje, dok bi se sa porastom visine iznad površine Zemlje ova vrednost smanjivala. Takođe, s obzirom da Zemlja nije savršeno loptasta (dakle poluprečnik Zemlje nije svuda isti), već je na ekvatoru ispupčena (dakle $r_{\max}$), a na polovima spljoštena (dakle $r_{\min}$), imamo za posledicu da je vrednost G na ekvatoru približno 9,79 a na polovima 9,83. Dakle vrednost koju smo prethodno izračunali (9,81) je prosečna vrednost jačine zemljinog gravitacionog polja na njenoj površini.

Vrste kretanja tela u gravitacionom polju

Razmotrićemo sledećih pet vrsta kretanja tela pod uticajem gravitacione sile (ali ćemo zanemariti dejstvo sile otpora vazduha na telo): slobodan pad, hitac naniže, vertikalni hitac, kosi hitac i horizontalni hitac.

Slobodan pad

Telo vrši slobodan pad ako se nalazi na izvesnoj visini iznad površine Zemlje i ako izgubi oslonac, pa otpočne kretanje naniže bez početne brzine, a sa ubrzanjem $a = g = 9{,}81\frac{m}{s^2}$.

U ovom slučaju se za opisivanje kretanja tog tela mogu upotrebiti jednačine za jednako – ubrzano pravolinijsko kretanje, ali bez početne brzine:

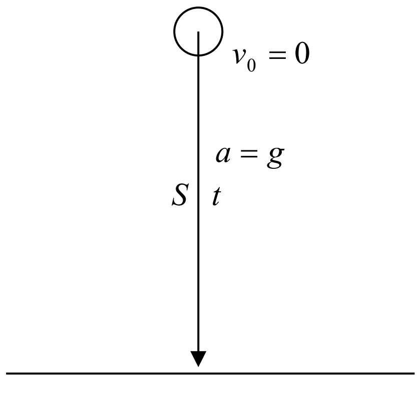
$$v = g \cdot t,$$

$$v_{sr} = \frac{g \cdot t}{2},$$

$$S = \frac{g \cdot t^2}{2}$$

i

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot S$$



sl. 5.

Hitac naniže

Hitac naniže se od slobodnog pada razlikuje samo po početnoj brzini, jer je telo kod hica naniže bačeno vertikalno naniže početnom brzinom v_0. Zato su jednačine ovog kretanja:

$$v = v_0 + g \cdot t,$$

$$v_{sr} = v_0 + \frac{g \cdot t}{2},$$

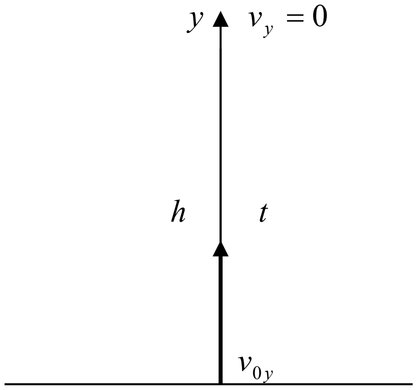
$$S = v_0 \cdot t + \frac{g \cdot t^2}{2},$$

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot g \cdot S$$

jer ovo kretanje predstavlja jednako – ubrzano pravolinijsko kretanje naniže sa početnom brzinom.

Vertikalni hitac

Telo na početku biva izbačeno sa površine Zemlje vertikalno uvis početnom brzinom v_0, a onda nastavi da se kreće usporeno vertikalno naviše sve dok se ne zaustavi na visini *h*. U drugom delu kretanja telo praktično izvodi slobodan pad. Zbog odsustva sile otpora vazduha brzina kojom telo krene je brojno jednaka brzini kojom na kraju kretanja padne na površinu Zemlje.



sl. 6.

Problem koji se ovde javlja je što se u prvoj polovini kretanja telo kreće usporeno sa početnom brzinom, da bi se u drugoj polovini kretanja kretalo ubrzano bez početne brzine. To znači da bi se za opisivanje ovog kretanja morala koristiti dva seta različitih jednačina. Ipak postoji način da se ova neprijatna situacija izbegne. Ako duž putanje tela, vertikalno uvis usmerimo *y* – osu, tada možemo uvesti samo jedan set jednačina za opisivanje ovog kretanja i to:

$$v_y = v_{0y} - g \cdot t$$

i

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}.$$

Pritom je uveden i sledeći dogovor za određivanje znaka u jednačinama:

- ako je kretanje ubrzano znak je (+), a ako je kretanje usporeno znak je (-) i
- ako je kretanje u smeru y – ose znak je (+), a ako je smer kretanja suprotan smeru y – ose tada je znak u jednačinama (-).

Sada možemo objasniti zašto je u jednačinama uvek znak (-):

- kada se telo kreće naviše ono usporava pa je znak (-), ali se zato kreće u smeru y – ose pa je zbog toga znak (+), a ukupno (-) * (+) = (-) i
- kada se telo kreće naniže ono ubrzava pa je znak (+), ali se zato kreće suprotno smeru y – ose pa je zato znak (-), što ukupno daje (+) * (-) = (-).

Međutim, svaki ovakav postupak ima i svoju cenu. U ovom slučaju cena je to što druga jednačina ne određuje pređeni put, kako bi to trebalo da bude, već određuje visinu y na kojoj se telo nalazi. U prvoj polovini kretanja, dok se telo kreće naviše imamo da je: $S = y$, međutim u drugoj polovini kretanja može se videti da je: $S = 2 \cdot h - y$.

Upotrebimo sada jednačine kretanja da bi smo odredili vreme (t_m) potrebno da telo dostigne maksimalnu visinu, a onda i kolika je maksimalna visina (h), u oba slučaja u funkciji od početne brzine:

$t_m = ?$, tada je: $v_y = 0$

$$v_y = v_{0y} - g \cdot t$$

$$0 = v_{0y} - g \cdot t_m$$

$$g \cdot t_m = v_{0y}$$

$$t_m = \frac{v_{0y}}{g}$$

$y_{max} = h = ?$, tada je: $t = t_m$

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{g}{2} \cdot t^2$$

$$h = v_{0y} \cdot t_m - \frac{g}{2} \cdot t_m^2$$

$$h = v_{0y} \cdot \frac{v_{0y}}{g} - \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{v_{0y}}{g} \right)^2$$

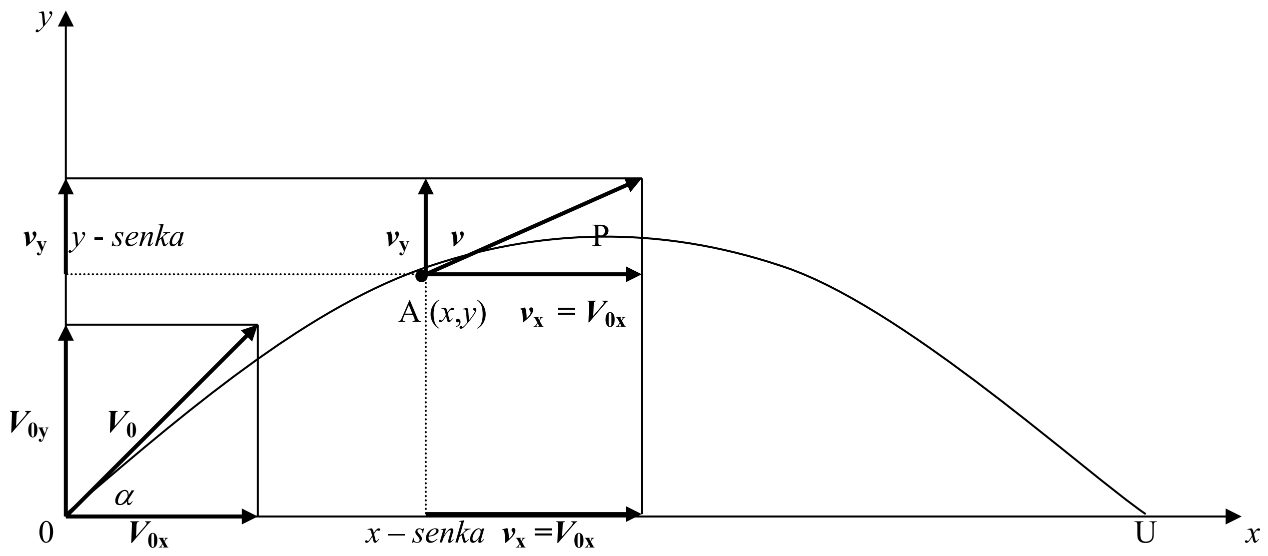
$$h = \frac{v_{0y}^2}{g} - \frac{g}{2} \cdot \frac{v_{0y}^2}{g^2}$$

$$h = \frac{2 \cdot v_{0y}^2}{2 \cdot g} - \frac{v_{0y}^2}{2 \cdot g}$$

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2 \cdot g}$$

Sada, ako znamo samo početnu brzinu kretanja i ako uzmemo da je g približno 10, a ne 9,81, tada možemo, koristeći prethodno izvedene obrasce, napamet izračunati i vreme potrebno za dosezanje maksimalne visine, kao i samu maksimalnu visinu. Na primer: ako je: $v_0 = 30\ m/s$, onda je: $t_m = 3\ s$, a: $h = 45\ m$.

Kosi hitac



sl. 7.

Kao što se vidi sa slike, telo je izbačeno sa površine zemlje ukoso, početnom brzinom v_0, čiji pravac zaklapa ugao α sa horizontalnom površinom. Kretanje samog tela je vrlo složeno i predstavlja jedno nepravilno neravnomerno krivolinijsko kretanje. Mi nismo u stanju da direktno odredimo jednačine koje bi opisivale ovo kretanje. Ipak postoji način da do ovih jednačina dođemo. Taj način je sledeći:

Prvo ćemo definisati horizontalnu x – osu i vertikalnu y – osu sa koordinatnim početkom u tački iz koje se telo pokrene. Dalje, tokom kretanja nećemo pratiti samo telo, već ćemo pratiti njegove senke tj. projekcije. To su x- senka, koja se kreće ispod tela udesno po x – osi i y- senka koja se kreće u prvoj polovini kretanja naviše, a onda, u drugoj polovini kretanja, naniže po y – osi.

Razmotrimo sada kojim tipovima kretanjima se kreću obe senke.

X – senka se kreće u horizontalnom pravcu duž koga ne deluje nijedna sila. Jedina sila koja deluje na telo je gravitaciona sila zemljine teže, a ona deluje u vertikalnom pravcu, tj. duž y – ose. Zbog toga ova sila ne vrši nikakav uticaj na x – senku, pa možemo tvrditi da se x – senka kreće ravnomerno pravolinijski. Pritom se treba setiti da je sila otpora vazduha zanemarena po dogovoru.

Za to vreme y – senka se u prvoj polovini kretanja kreće usporeno naviše pod uticajem gravitacione sile, kada telo stigne u tačku P (koja označava polovinu kretanja) y – senka se zaustavi, a u drugoj polovini kretanja tela (od tačke P do tačke U) y – senka se kreće ubrzano naniže. Ovakvo kretanje y – senke, koja je izložena samo gravitacionoj sili, je kretanje koje smo već razmotrili u prethodnoj lekciji, a to je vertikalni hitac.

Oba kretanja su nam poznata od ranije, pa sada možemo napisati jednačine koje određuju kretanje obe senke:

x – senka:

$$v_x = v_{0x} = const.$$
$$x = v_{0x} \cdot t$$

y – senka:

$$v_y = v_{0y} - g \cdot t$$
$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

v_{0x} i v_{0y} su početne brzine x i y – senke. One su određene metodom razlaganja vektora početne brzine v_0 na komponente duž horizontalnog i vertikalnog pravca tj. duž x i y - ose. Mogu se izračunati ako je poznata vrednost početne brzine i vrednost nagibnog ugla α.

Iz jednačina koje opisuju kretanje senki možemo prvo izračunati njihove brzine pod pretpostavkom da znamo početne brzine senki i da nam je zadat trenutak vremena kada izračunavamo njihove brzine. Pretpostavimo da je to onaj trenutak u kome se telo nalazi u tački A (vidi sl. 7.). Da bi smo na osnovu tako izračunatih brzina senki izračunali brzinu samog tela, moramo primeniti Pitagorinu teoremu tj. $v^2 = v_x^2 + v_y^2$.

Zamenom dobijamo: $v = \sqrt{v_{0x}^2 + \left(v_{0y} - g \cdot t\right)^2}$.

Dakle, postupak uvođenja senki i jednačina koje opisuju njihovo kretanje ipak daje rezultate.

Drugi par jednačina, koje određuju pozicije senki, dovode pod istim početnim uslovima do sledećih rezultata. Ako izračunamo x to će istovremeno biti i pozicija x – senke, ali i njen pređeni put. Ako izračunamo y to će onda biti samo visina na kojoj se y – senka nalazi, tj njena pozicija, kao i kod vertikalnog hica. Istovremeno, x i y će predstavljati i koordinate tačke A u kojoj se telo nalazi, pa će na taj način određivati poziciju tela. Međutim sprovedeni postupak ne omogućava izračunavanje dužine puta koji telo pređe za zadato vreme t.

Upotrebimo sada jednačine koje opisuju kretanje senki za rešavanje sledećih problema:

Koliko je vremena potrebno telu da stigne u tačku P (t_p = ?) i koju maksimalnu visinu telo dosegne u tački P ($h = y_{max}$ = ?).

$t = t_p = ?$, tada je: $v_y = 0$

$$v_y = v_{0y} - g \cdot t$$

$$0 = v_{0y} - g \cdot t_p$$

$$g \cdot t_p = v_{0y}$$

$$t_p = \frac{v_{0y}}{g}$$

$h = y_{\max} = ?$, tada je: $t = t_p$

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

$$h = v_{0y} \cdot t_p - \frac{g}{2} \cdot t_p^2$$

$$h = v_{0y} \cdot \frac{v_{0y}}{g} - \frac{g}{2} \cdot \frac{v_{0y}^2}{g^2}$$

$$h = \frac{2 \cdot v_{0y}^2}{2 \cdot g} - \frac{v_{0y}^2}{2 \cdot g}$$

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2 \cdot g}$$

Očigledno je da su rezultati isti kao i kod vertikalnog hica, što se i moglo očekivati.

Sledeća dva problema su: koliko vremena treba telu da stigne u tačku U, tj. da završi kretanje (t_u = ?) i koliki je maksimalni domet u horizontalnom pravcu kod kosog hica (x_{max} = ?).

$t = t_u = ?$, tada je: $y = 0$

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}$$

$$0 = v_{0y} \cdot t_u - \frac{g}{2} \cdot t_u^2$$

$$\frac{g}{2} \cdot t_u^2 - v_{0y} \cdot t_u = 0$$

$$t_u \cdot \left(\frac{g}{2} \cdot t_u - v_{0y} \right) = 0$$

Ova jednačina ima dva rešenja:

1. $t_u = 0$ i **2.** $\frac{g}{2} \cdot t_u - v_{0y} = 0$

$$\frac{g}{2} \cdot t_u = v_{0y}$$

$$t_u = \frac{2 \cdot v_{0y}}{g}$$

Zanimljivo je primetiti dve stvari.

Prvo: da je ovo vreme dvostruko duže od vremena t_p što se i moglo očekivati s obzirom da je u tački P telo tačno na polovini kretanja.

Drugo: postoje sasvim neočekivano dva rešenja, od kojih je, očigledno, drugo rešenje ono koje smo očekivali. Pa odakle onda prvo rešenje koje, na prvi pogled, izgleda besmisleno? Pogledajmo zato na koji način smo postavili početne uslove. To što smo zadali da je $y = 0$ dovodi upravo do dva rešenja, od kojih se jedno odnosi na sam početak kretanja – gde se telo takođe nalazi na visini jednakoj nuli i do drugog na kraju kretanja.

$x_{\max} = ?$, tada je: $t = t_u$

$$x = v_{0x} \cdot t$$

$$x_{\max} = v_{0x} \cdot t_u$$

$$x_{\max} = v_{0x} \cdot \frac{2 \cdot v_{0y}}{g}$$

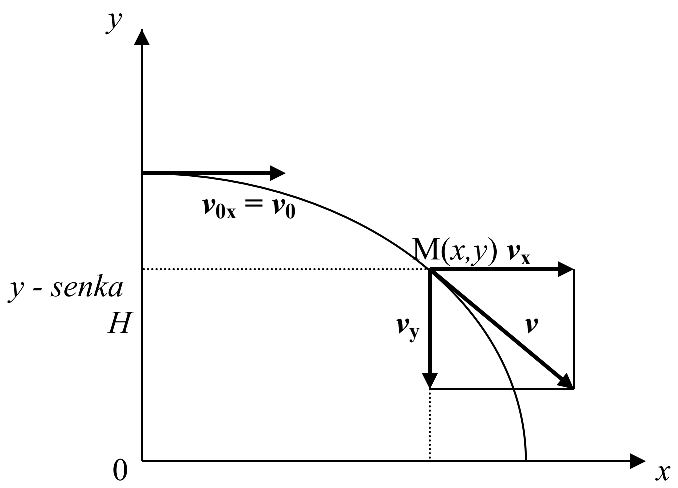
$$x_{\max} = \frac{2 \cdot v_{0x} \cdot v_{0y}}{g}$$

Maksimalni domet kod kosog hica je najveći za ugao: $\alpha = 45^0$. Tada su početne brzine senki međusobno jednake $v_{0x} = v_{0y}$, a to je upravo razlog da domet bude najveći.

Horizontalni hitac

Da bi telo izvelo horizontalni hitac potrebno je da se nalazi na izvesnoj visini *H* iznad površine zemlje, a onda ga treba baciti, početnom brzinom v_0, u horizontalnom pravcu. Putanja koju tada telo pređe predstavlja drugi deo kretanja kod kosog hica od tačke P do tačke U (vidi sl. 7.).

Kao i kosi hitac i ovo kretanje je nepravilno: neravnomerno krivolinijsko kretanje. Zbog toga se i ovde koriste *x* i *y* – senke. *X* – osa se postavlja na površinu zemlje.



sl. 8.

X – senka se kreće ravnomerno pravolinijski, zato što u pravcu *x* – ose ne deluje nijedna sila. Jedina sila koja deluje na telo je gravitaciona sila, pa se pod njenim uticajem *y* – senka kreće ubrzano naniže, ali bez početne brzine, što znači da *y* – senka izvodi slobodan pad sa visine *H*.

Zbog toga sledeće jednačine opisuju kretanje senki:

x – senka:	*y* – senka:
$v_x = v_{0x} = v_0 = const.$	$v_y = -g \cdot t$
$x = v_0 \cdot t$	$y = H - \frac{g \cdot t^2}{2}$

Ako uzmemo funkciju oblika $y = f(x)$, pa uzmemo specijalan slučaj kada je: $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ ova funkcija predstavlja krivu liniju koja se zove parabola (setimo se iz matematike za osmi razred da je funkcija oblika $y = k \cdot x + n$ jednačina koja opisuje pravu liniju). Možemo dokazati da je putanja tela kada ono izvodi horizontalni hitac parabola:

iz: $x = v_0 \cdot t$ a iz: $y = H - \frac{g \cdot t^2}{2}$

sledi: $t = \frac{x}{v_0}$ zamenom dobijamo: $y = H - \frac{g}{2} \cdot \frac{x^2}{v_0^2}$

ili sređivanjem: $$y = -\frac{g}{2 \cdot v_0^2} \cdot x^2 + H$$

Ako uzmemo: $a = -\frac{g}{2 \cdot v_0^2}$, $b = 0$ i $c = H$, pokazuje se da je dobijeni izraz nepotpuna kvadratna funkcija, oblika: $y = a \cdot x^2 + c$, (dakle bez linearnog člana) što takođe predstavlja parabolu.

Bestežinsko stanje

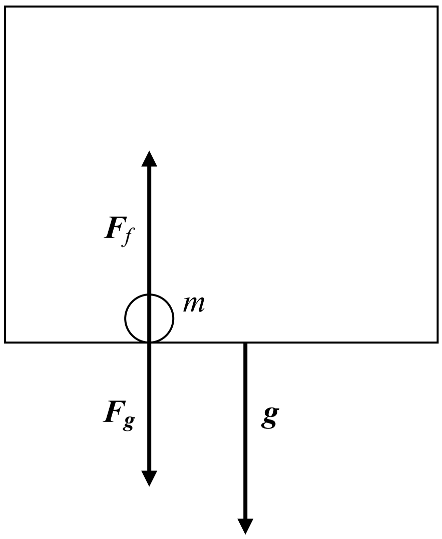
Deo prostora u kome nema gravitacionog polja je bestežinsko stanje.

Na telo, koje se nalazi u bestežinskom stanju ne deluje gravitaciona sila, pa samim tim telo nema težinu, što je i razlog za naziv ovog stanja. U bestežinskom stanju telo lebdi, pa je ova situacija neobična za nas koji smo navikli na stalno dejstvo gravitacione sile.

Na prvi pogled izgleda besmisleno pitanje: da li se unutar neke kabine, koja se nalazi u gravitacionom polju, može izazvati bestežinsko stanje? Posebno, s obzirom da smo već rekli da ne postoji ni delimična, a kamoli totalna izolacija od dejstva gravitacione sile (setimo se da je gravitaciona konstanta univerzalna).

Međutim, odgovor je ipak potvrdan. Dejstvo gravitacione sile može biti poništeno dejstvom neke sile koja bi morala da ima iste osobine kao i ona. Takva sila nam je već poznata, to je fiktivna sila. Dakle, ako bi se u nekoj kabini (sistemu) našlo telo koje je istovremeno izloženo dejstvu i gravitacione i dejstvu fiktivne sile, a ako bi one bile suprotno usmerene a istog intenziteta, tada bi se ove dve sile poništile i telo bi se našlo u bestežinskom stanju.

Ovako izrečeni uslovi deluju dosta komplikovano za ostvarivanje, ali nije tako. Dovoljno je da se sistem tj. kabina, u kojoj se telo nalazi, pusti da slobodno pada u spoljašnjem gravitacionom polju (sl. 9.)



sl. 9.

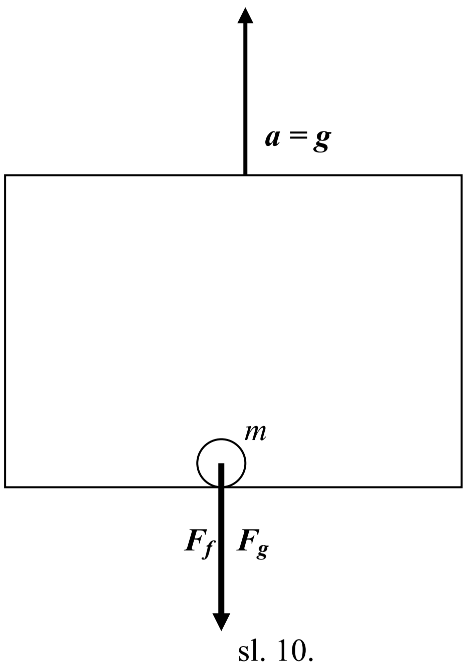
Tada će gravitaciona sila delovati na telo u kabini vertikalno naniže, dok će fiktivna – inercijalna sila delovati na telo u smeru suprotnom od smera u kome kabina ubrzava, a to znači vertikalno naviše. Kako je ubrzanje, koje fiktivna sila (po II Njutnovom zakonu) daje telu, jednako spoljašnjem ubrzanju kabine:

$$a_f = g$$

a znamo da su ove dve sile:

$$F_f = m \cdot a_f \qquad \text{i} \qquad F_g = m \cdot g$$

gde je m masa tela koje se nalazi u kabini, možemo zaključiti da su i sile iste jačine – što znači da se međusobno poništavaju. Zaključak je da za telo u kabini važi bestežinsko stanje. Ovakva situacija se dešava u kabini lifta koji se otkači i počne da slobodno pada ka površini zemlje. U tom kratkom intervalu dok lift ne padne na tlo, čovek u njemu bi se nalazio u bestežinskom stanju, tj. on bi lebdeo u kabini, što mu nimalo ne bi pomoglo pri prizemljenju. Na sličan način se izaziva veštačko bestežinsko stanje za buduće kosmonaute. Specijalan avion se sa oko 20 *km* visine pusti da slobodno pada ka površini zemlje i u njemu astronauti vežbaju, što traje oko 1 minut, a onda sa visine od oko 3 *km* avion ih ponovo vrati na početnu visinu, pa sve ispočetka.



sl. 10.

U slučaju koji je prikazan na sl. 10. situacija je upravo obrnuta. Kabina ubrzava vertikalno naviše ubrzanjem $a = g$, pa zato telo u kabini trpi obe sile, ali ovoga puta isto usmerene – obe naniže. U ovom slučaju telo ima težinu koja je dvostruko veća od njegove normalne težine (kada miruje na površini zemlje). Jednu težinu telo ima zbog dejstva gravitacione sile, a drugu od dejstva fiktivne sile. Ove dve težine se sabiraju, zato što se sabiraju i same sile koje ih izazivaju. Ako se ubrzanje tela naviše povećava, povećava se i težina tela, zbog porasta fiktivne sile.

Tako, pri poletanju svemirskih brodova, njihovo ubrzanje naviše je ogromno (i do $a = 9 \cdot g$), što znači da tela kosmonauta imaju težinu i do deset puta veću od normalne. Privikavanje budućih astronauta na ovakva opterećenja se vrši u specijalnim centrifugalnim kabinama. Slične stvari se dešavaju vozačima Formule I u krivinama, kada bočna opterećenja vozača iznose i do: $6 \cdot g$, zbog ogromne centrifugalne sile. Pritom treba uzeti u obzir da je centrifugalna sila direktno srazmerna kvadratu brzine kojom formula savladava krivinu jer je: $F_{cf} = m \cdot \frac{v^2}{r}$.

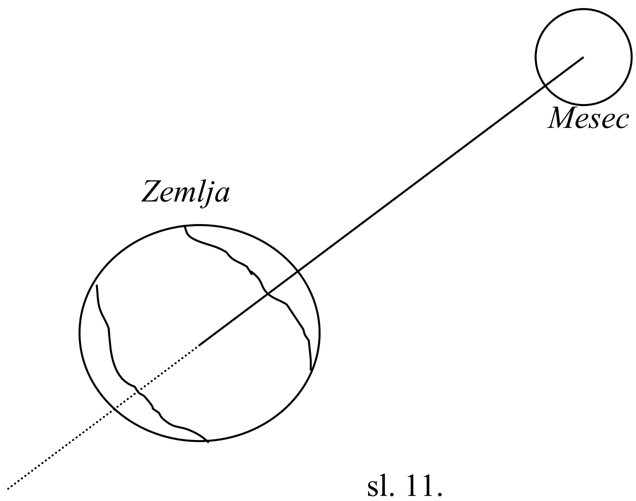
Vratimo se sada na bestežinsko stanje. Postoje, dakle, dva načina da se telo nađe u bestežinskom stanju. Jedan je da se nađe van gravitacionog polja – pravo bestežinsko stanje, a drugi da se nađe u kabini koja slobodno pada u gravitacionom polju – veštačko bestežinsko stanje.

Postavlja se sada sasvim opravdano pitanje: da li se ova dva bestežinska stanja razlikuju međusobno, bar po nekom fenomenu ?

Odgovor je potvrdan, iako je taj fenomen uočljiv tek u izuzetno jakim gravitacionim poljima i tek tada ga i treba uzimati u obzir. U gravitacionom polju kao što je zemljino, fenomen o kome ćemo sada pričati je zanemarljivo slab.

Taj fenomen se naziva: gravitaciono plimsko istezanje.

Ako čovek stoji na površini Zemlje, Njutnov zakon gravitacije uslovljava da na njegove noge (koje su bliže Zemlji) deluje jača, a na njegovu glavu (koja je dalje od Zemlje) deluje slabija gravitaciona sila. Razlika ovih sila isteže telo čoveka po vertikalnoj liniji. Na ovaj način Mesec izaziva plimu i oseku na površini Zemlje. Na pravoj liniji, koja povezuje centre Meseca i Zemlje pojavljuju se istovremeno dve plime i dve oseke (vidi sl. 11.). Jedna plima se javlja na onoj strani Zemlje koja je bliža Mesecu, u vidu vodenog brega koji je opkoljen kružnom šancem oseke. Isti takav plimsko – osečni talas se nalazi na suprotnoj strani zemljine kugle, samo što je zbog veće udaljenosti od Meseca plimsko istezanje slabije, pa je visina plimskog brega manja.



sl. 11.

Plima nastaje tako što Mesec jače privlači vodu na površini okeana (na bližoj strani), nego vodu na dnu okeana, a razlika te dve sile rasteže vodu u okeanu, izazivajući plimski breg. Međutim kako je voda skoro sasvim nerastegljiva, dolazi do slivanja vode iz okolnog područja u plimski breg, pri čemu se u tom području javlja manjak vode, tj. oseka. Na taj način nastaje karakteristični plimsko – osečni talas, koji se nalazi uvek ispod Meseca, a pokreće se po površini svetskog okeana prateći kretanje Meseca oko Zemlje. Na suprotnoj strani Zemlje, Mesec jače privlači vodu na dnu okeana, a slabije na površini, što takođe dovodi do napona na rastezanja vode, a posledica je opet plimsko – osečni talas.

Vratimo se na čoveka izloženog gravitacionom plimskom istezanju. Na zemljinoj površini ovakvo istezanje je zanemarljivo slabo, zato što zemljino gravitaciono polje nema veliku jačinu. Međutim, pojačanje gravitacionog polja bi srazmerno povećalo i plimsko istezanje. U svemiru postoje objekti zvezdanog porekla (beli i crni patuljci, neutronske zvezde i crne rupe) čija su gravitaciona polja izuzetno jaka zbog velike gustine ovih objekata (detaljnije o ovim objektima ćemo učiti u IV razredu). Svako približavanje ovakvim objektima bi dovelo do opasnosti da i brod i nesrećna posada budu, ogromnim plimskim istezanjem, rastrgnuti na komade.

Kao konačan zaključak možemo reći da u pravom bestežinskom stanju nema efekta gravitacionog plimskog istezanja, dok u veštački izazvanom bestežinskom stanju, u kabini koja slobodno pada u gravitacionom polju, efekat plimskog istezanja je prisutan.

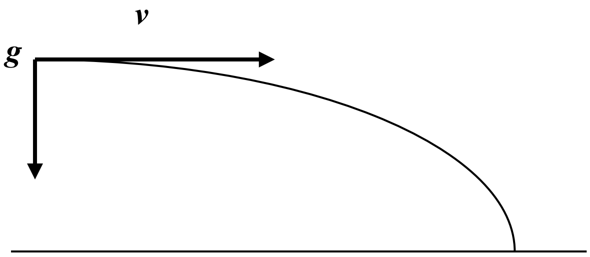
Još jedno zanimljivo pitanje je: kako je moguće da u orbitalnim stanicama, koje kruže oko Zemlje, vlada bestežinsko stanje? Na prvi pogled ovo pitanje nema smisla, jer se orbitalna stanica nalazi u svemiru. Ali nije baš tako, zato što orbitalne stanice kruže oko Zemlje na relativno maloj visini – oko 1000 *km*. U odnosu na poluprečnik Zemlje, koji iznosi: $R = 6370\ km$, ovo i nije neka naročito velika visina, posebno ne dovoljno velika da bi na tom rastojanju od centra Zemlje jačina zemljinog gravitacionog polja bila jednaka nuli. Da bi ovo potvrdili možemo i izračunati G na toj visini:

$$G = \gamma \cdot \frac{M}{(R+h)^2} = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\frac{Nm^2}{kg^2} \cdot \frac{5{,}97 \cdot 10^{24}\, kg}{(6370km + 1000km)^2} = \frac{6{,}67 \cdot 5{,}97}{7{,}37^2} \cdot \frac{10^{-11} \cdot 10^{24}}{(10^6)^2} \cdot \frac{Nm^2 kg}{kg^2 m^2}$$

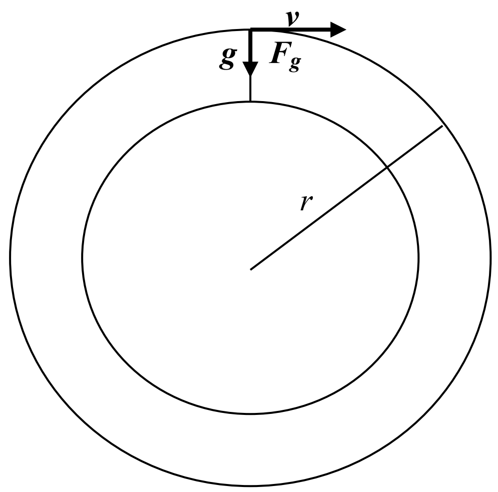
$$G = \frac{39{,}8199}{54{,}3169} \cdot \frac{10^{13}}{10^{12}} \cdot \frac{N}{kg} = 0{,}7331 \cdot 10 \frac{N}{kg} = 7{,}331 \frac{N}{kg}.$$

Kao što se i moglo očekivati na ovoj visini polje je slabije nego na površini Zemlje, ali ne i jednako nuli – na ovoj visini ono je još uvek oko 4,5 puta jače nego na površini Meseca. Dakle, ni govora o pravom bestežinskom stanju u orbitalnim stanicama. Jedini zaključak koji nam preostaje je da u njima vlada veštačko bestežinsko stanje. Ali kako je to moguće, kada znamo da je za to potrebno da orbitalna stanica slobodno pada, a mi znamo da ona kruži oko Zemlje.

Razmotrimo zato kretanje orbitalne stanice. Ona u stvari vrši istovremeno dva kretanja: slobodno pada ka površini Zemlje, a istovremeno se kreće stalnom brzinom pod pravom uglom (beži u stranu) u odnosu na liniju slobodnog pada. Da je površina Zemlje ravna ploča onda bi se ovakvo kretanje »orbitalne« stanice svelo na horizontalni hitac, što bi na kraju dovelo do njenog neizbežnog pada na površinu Zemlje, nezavisno od njene bočne brzine (sl. 12.). Veća brzina bi samo dovela do većeg dometa. Objašnjenje ovakvog dvostrukog kretanja, a naročito zašto telo orbitalne stanice izvodi slobodan pad, je prilično jednostavno. Orbitalna stanica nema nikakav oslonac, a izložena je gravitacionom polju čiju smo jačinu malopre izračunali. Zato upravo ne postoji mogućnost da telo izbegne slobodan pad, ali nikada ne padne na površinu planete zbog svoje bočne brzine, ali i zbog toga što je površina Zemlje loptasta (sl. 13.). U stvari potrebno je da krivina zemljine površine prati krivolinijsku putanju po kojoj se orbitalna stanica kreće, pa da na taj način ona ostane uvek na istoj visini iznad površine. Da bi bio postignut ovaj uvek isti razmak ove dve krive linije, potrebno je da jačina gravitacionog polja (na rastojanju na kome se nalazi orbitalna stanica) i njena brzina budu strogo usklađene i to tako da što je gravitaciono polje jače, to je potrebna sve veća brzina. Zaključak je da što je telo koje orbitira bliže Zemlji, to mu je potrebna veća orbitalna brzina i obrnuto. Ali do ovakvog zaključka je znatno pre nas došao Johan Kepler i izrekao ga u svom III zakonu kretanja planeta. Zato je orbitalna brzina planete najbliže Suncu – Merkura najveća, a najmanja orbitalna brzina najudaljenije planete – Neptuna.



sl. 12.



sl. 13.

Dakle, orbitalna stanica stvarno izvodi slobodan pad, pa zato u njoj vlada bestežinsko stanje.

Na kraju možemo reći da bestežinsko stanje, sa kojim će ljudska vrsta tek u budućnosti imati posla, deluje na ljudsko telo tako da nepostojanje težine tela smanjuje potrebu za mišićnim naporom pri kretanju, pa opada opšti mišićni tonus tela – što je vrlo opasno kada je u pitanju recimo srčani mišić, a vrlo neprijatno i bolno kada su u pitanju mišići muskulature tela, pri povratku na površinu Zemlje.