



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Jednostavni demonstracioni eksperimenti iz dinamike

- diplomski rad -

Mentor:

prof. dr. Maja Stojanović

Kandidat:

Srđan Višković 276/12

Novi Sad, 2021.

Koristim priliku da se zahvalim: mentoru prof. dr. Maji Stojanović na pomoći pri izradi ovog rada, i porodici na izuzetno velikom strpljenju tokom svih ovih godina.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. EKSPERIMENT U NASTAVI FIZIKE	2
2.1. Demonstracioni eksperimenti	4
2.2. Konstruktivistički pristup korišćenja eksperimenta u nastavi fizike	7
3. DINAMIKA.....	9
3.1. Uzajamno delovanje tela, sila i momenat sile.....	11
3.1.1. Neki primeri sila od značaja za eksperimente	15
3.2. Masa i momenat inercije	22
3.3. Impuls i momenat impulsa.....	25
3.4. Osnovni zakoni dinamike.....	27
3.4.1. Prvi Njutnov Zakon – Zakon inercije	28
3.4.2. Drugi Njutnov Zakon – Osnovni zakon dinamike.....	29
3.4.3. Treći Njutnov Zakon – Zakon akcije i reakcije	31
3.5. Galilejev princip relativnosti kretanja.....	32
3.5.1. Inercijalni i neinercijalni referentni sistemi, Inercijalna sila	32
4. EKSPERIMENTI	35
4.1. Sila	36
4.1.1. Translatorno i rotaciono kretanje tela	36
4.1.2. Sila trenja – Ispitivanje karakteristika	38
4.1.3. Sila otpora sredine – Koji će papir pre pasti?	40
4.1.4. Sila elastičnosti – Zavisnost sile deformacije od izduženja opruge	41
4.1.5. Centripetalna sila – Vrištajući balon.....	43
4.2. Momenat sile – Momenat sile otvaranja vrata	44
4.3. Masa – Merenje mase terazijama	45
4.4. Momenat inercije – Upoređivanje momenata inercije	46
4.5. Impuls - Sudar novčića	48
4.6. Momenat impulsa – Magično obrtanje	51
4.7. Osnovni zakoni dinamike	52
4.7.1. Prvi Njutnov Zakon – Novčić, papir, čaša	52
4.7.2. Drugi Njutnov Zakon – Verifikacija Drugog Njutnovog Zakona	54
4.7.3. Treći Njutnov Zakon – Prosta mašina	56
5. ZAKLJUČAK	57
6. LITERATURA	58
7. KORIŠĆENA SREDSTVA – WEB-SAJTOVI (SLIKE I EKSPERIMENTI)	59
8. KRATKA BIOGRAFIJA KANDIDATA	60
9. KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	61

1. UVOD

Fiziku kao nastavni predmet u školama po svom obimu i sadržaju ne možemo poistovetiti sa fizikom kao naukom. Fizika kao predmet proučava proverene zakone prirode koji su, generalno gledano, formulisani tako da odgovaraju intelektualnom i fizičkom uzrastu učenika. Naravno, ona stalno mora da prati fiziku kao nauku a kao konačan rezultat dobija se sužen obim i sadržaj sa jednostavnim matematičkim aparatom, radi lakšeg upoznavanja istraživanih fizičkih fenomena sa učenicima. Možemo slobodno reći da je fizika kao nastavni predmet samo jedan uzani deo fizike kao nauke.

Teorijsko objašnjenje (nekih pojava, procesa, zakonitosti, entiteta, itd.) u fizici kao i u drugim prirodnim naukama i disciplinama nezaobilazno prate i **eksperimenti** (kvalitativni, kvantitativni, misaoni, laboratorijske vežbe). S obzirom na isprepletanost ovih faktora koji čine jezgro svake prirodne nauke, uloga fizike kao predmeta u školi jeste da učenicima upravo putem teorije i prakse pruži mogućnost sticanja znanja o fundamentalnim pojavama i procesima koji nas svakodnevno okružuju.

Ako bismo zavirili u prošlost i pogledali istoriju nastave fizike mogli bismo da vidimo da tek u XIX veku započinje nastava fizike koja je utemeljena na eksperimentima, tj. posmatranju. Na Kongresu Prirodnjaka u Meranu 1905. godine, iskristalisana su neka od osnovnih načela koja su doprinela razvoju nastave fizike:

- nastava prirodnih nauka nema smisla ako se ne bazira na eksperimentu, tj. posmatranju
- fiziku u nastavi treba smatrati prirodnom naukom a ne primjenom matematikom
- za nastavu fizike su od ključnog značaja organizovane eksperimentalne vežbe

Tako da za jedan čas fizike u školi nije dovoljno koristiti parče krede i tablu već i izvoditi praktične demonstracije putem eksperimenta. To je svakako jedan od oblika promovisanja interesovanja za fiziku kod učenika kao i podsticanje učenika da samovoljno i bez straha učestvuju u nastavi. Pri tome, nastavnik se mora obavezno oslanjati kako na *teoriju*, tako i na *eksperiment*, što čini jezgro svakog istraživačkog rada. S tim u vidu, nastava fizike u školi je jedan veoma složen i odgovoran posao.

Opšti cilj ovog rada jeste prikaz nekih od jednostavnih školskih eksperimenata demonstraciono-ilustrativnog formata iz oblasti klasične dinamike, demonstracija osnovnih dinamičkih veličina i osnovnih zakona dinamike, sa akcentom na tematsku celinu “*Sila*” a razlog tome je taj što se radi o temi kojom se učenici uvode u oblast dinamike. Pri tome je teorijska potkrepljenost ovih eksperimenata (poglavlje 3. Dinamika) na nivou srednje škole sa pristojnim primerima i bez komplikovanijeg matematičkog aparata. Drugi cilj rada je ukazivanje na sam značaj izvođenja eksperimenata u nastavi fizike kao i opis nekih pristupa korišćenja eksperimenta u nastavi fizike.

2. EKSPERIMENT U NASTAVI FIZIKE

Svaki put kada učimo o nečemu novom i nepoznatom, najpre posmatramo koristeći osnovna čula; prvenstveno vid, dodir i sluh. Zatim razmišljanjem stvaramo informacije o posmatranom. Tako i istraživanje u fizici u opštem slučaju otpočinje posmatranjem neke pojave ili predmeta. Osnovu procesa posmatranja čini *čulno opažanje*, pre svega vizuelno. Pored čulnog opažanja postoji *misaono poimanje* i povezivanje viđenog. Posmatranje je utoliko uspešnije ukoliko je preciznije i objektivnije. U tu svrhu se koristi **eksperiment** (lat. *eksperimentum* – ispitivanje). U nauci je eksperiment krucijalan metod istraživanja. Pre nego što je eksperiment kao takav uveden, prirodne pojave i fenomeni su proučavani samo u trenutku kada su se odvijale. Takav metod posmatranja ne može kao rešenje predstaviti precizne zaključke o posmatranoj pojavi jer u prirodnim uslovima, postoji niz nekontrolisanih faktora koji ometaju njen prirodan tok, a prirodan tok pojave pokazuje njena suštinska svojstva. Pa se za eksperiment može reći da je **to izazivanje prirodnih pojava u posebno pripremljenim uslovima koji se mogu kontrolisati**. Nije retkost čuti da se takvi uslovi nazivaju još i *veštačkim* ili *laboratorijskim* uslovima.

Zaslugu za uvođenje eksperimenta u nauku možemo pripisati Galileju (*Gallileo Gallilei*, 1564-1642) koji je eksperiment, kao naučni metod, upotrebio pre više od 300 godina (slika 2.1.).



Slika 2.1. Galilejev eksperiment – osnovne kinematičke zakonitosti kretanja tela sa konstantnim ubrzanjem

U okviru kako naučnog tako i nastavnog aspekta fizike, u cilju proučavanja se spajaju *čulno* i *misaono* kao dva mehanizma usvajanja znanja. Čulno-opažajno i misaono-logičko čine jedan nekontradiktoran dualizam i mogu se tretirati kao dve osnovne komponente tzv. **spoznajnog procesa**. Čulno i misaono imaju svoje korespondente u naučnom metodu a to su eksperiment i teorija, respektivno. Suštinska osobina odnosa teorije i eksperimenta se ogleda u međusobnom razvitku i uslovljavanju tako da ih naučna metoda u fizici kao nauci i fizici kao predmetu podjednako koristi. Može se reći da je jedinstvo i isprepletanost teorije i eksperimenta kičma svake prirodne nauke, pa tako i fizike.

U nastavi fizike, kao i u fizici kao nauci, eksperiment ima višestruku ulogu. Eksperiment je:

- izvor znanja
- sredstvo očiglednosti
- kriterijum naučne istine

Što se poslednje stavke tiče, eksperimentom se potvrđuje (dokazuje) ili opovrgava prethodno formulisana teorijska pretpostavka. Školski eksperiment se ne može identifikovati sa naučnim, ali u njemu naravno da ima naučnih karakteristika – postavka, izvođenje, analiza rezultata i dokazivanje ili opovrgavanje teorijske pretpostavke. Dakle, eksperiment u nastavi fizike se može posmatrati kao odsjaj eksperimentalne metode u fizici kao nauci i kao takav služi za upoznavanje učenika sa osnovama eksperimentalnih metoda.

Školski eksperimenti se mogu podeliti, u zavisnosti od kriterijuma, na više načina. Prema *karakteru*, dele se na: ilustrativne, fundamentalne i istraživačke. **Ilustrativni eksperimenti** su ogledi najmanje pedagoške vrednosti. Njima se postiže princip očiglednosti, opisuju pojave i dokazuju zakoni, pokazuje rukovanje aparaturom, itd. **Fundamentalni eksperimenti** su ogledi koji su nauci omogućili formiranje naučnih teorija i proveru hipoteza koje su imale suštinski značaj za nauku. **Istraživački eksperimenti** su ogledi u kojima je proučavan neki ne sasvim poznat problem. Na osnovu svog iskustva i predznanja, učenici u ovakvom eksperimentu poseduju dovoljno veštine da ga sami mogu izvoditi. S obzirom da ovakav tip eksperimenta zahteva vreme za realizaciju, on se može realizovati na dodatnoj nastavi ili u okviru sekcije za fiziku.

Prema *didaktičkom cilju*, eksperimenti se dele na: **demonstracione eksperimente i laboratorijske vežbe**.

Demonstracione oglede uglavnom izvodi nastavnik, mada nije isključeno da u izvođenju ovih ogleda učestvuju i đaci (ukoliko je bezbedno da ih sami izvode). Laboratorijske vežbe izvode đaci, uz nadzor nastavnika; to su vežbe kvantitativnog karaktera u kojima je cilj izračunavanje vrednosti konkretnih fizičkih veličina, zavisnosti između njih, itd.

Školski eksperiment se mora shvatiti kao organski deo nastave, odnosno jedno od dva glavna “sredstva” za ostvarivanje zadataka nastave fizike.

2.1. DEMONSTRACIONI EKSPERIMENTI

Kao što je rečeno, jedna od osnovnih funkcija eksperimenta u nastavi fizike jeste da je to sredstvo očiglednosti. To se naravno uklapa u jedan od osnovnih didaktičkih principa – princip očiglednosti. Demonstracioni eksperimenti se po tradiciji primenjuju u onim slučajevima kada nastavnik želi da usmeri čula i tok misli na objašnjavanje konkretnе fizičke pojave. Kao što je istaknuto, demonstracione eksperimente najčešće izvodi nastavnik, mada je poželjno da ih i učenici izvode (slika 2.2.). Ovi eksperimenti se mogu koristiti kako pri obradi novog gradiva, tako i na časovima utvrđivanja i uopštavanja gradiva.



Slika 2.2. Izgled demonstracionog eksperimenta

Sami demonstracioni eksperimenti mogu se podeliti u dve osnovne grupe. To su **kvalitativni** i **kvantitativni** demonstracioni eksperimenti. Kod **kvalitativnog** eksperimenta, učenik ima mogućnost da posmatra tok neke pojave ili svojstvo nekog predmeta. Kod **kvantitativnog** eksperimenta, pored posmatranja, aktuelno je i merenje neke fizičke veličine. Često se u nastavi fizike izopštava kvantitativni karakter demonstracionog eksperimenta. To ne bi trebalo tako da bude i naprotiv, kad god je to moguće, treba izvoditi kvantitativnu analizu neke pojave.

Što se tiče konkretnih ciljeva demonstracionih eksperimenata, oni mogu biti različiti:

- samo posmatranje fizičke pojave
- “otkrivanje” zakona fizike ili obrnuto, demonstracija zakona fizike do kog se došlo teorijskim putem
- upoznavanje učenika sa praktičnom primenom neke pojave, tj. zakona
- upoznavanje učenika sa tehnikom izvođenja eksperimenta

Osnovni metodološki zahtevi za demonstraciju ogleda su sledeći:

- 1) **Svrishodnost eksperimenta** – ukaz na svrhu i pravilan izbor eksperimenta
- 2) **Pouzdanost** – priprema nastavnika i isprobavanje eksperimenta pre izvođenja na času
- 3) **Vidljivost** – mogućnost za lako praćenje eksperimenta od strane svih prisutnih na času
- 4) **Pristupačnost i očiglednost** – jednostavnost aparature koja se koristi
- 5) **Naučna zasnovanost** – postupci izvedbe i analiza rezultata moraju biti u skladu sa didaktičkim principima i fizike kao nauke
- 6) **Bezbednost i zaštita** – ukoliko postoji rizik od fizičke povrede, moraju biti preuzete mere za zaštitu učenika
- 7) **Vreme izvođenja** – eksperiment ne treba da traje suviše dugo

Svrha izvođenja demonstracionih eksperimenata se ne može ispoljiti ukoliko se oni ne izvedu u skladu sa određenim **metodičkim zahtevima i tehnikama njihovog izvođenja**.

Metodika izvođenja eksperimenta treba da odgovori na tri ključna pitanja: **koji ogled** izabrati za dati čas? Za jednu pojavu ili zakonitost, postoji mnoštvo demonstracionih eksperimenata koji mogu verno da je opišu i izdvoje suštinu. Za nastavnika je nemoguće da koristi sve moguće tipove i on bi trebao da izabere jedan eksperiment koji ispunjava najviše metodičkih zahteva, odnosno onaj eksperiment koji ima najvišu pedagošku vrednost kao i to da izabrani eksperiment bude u skladu sa saznajnim mogućnostima učenika. **Kada** u toku časa izvesti ogled? Ne postoji jasan odgovor na ovo pitanje. Trenutak izvedbe eksperimenta zavisi isključivo od procene nastavnika i samog gradiva. **Kako** izvoditi ogled? Svaki nastavnik mora da potraži svoj, autentični način izvođenja.

Pod *tehnikom* se misli na način izvođenja eksperimenta a pri tome imamo dve glavne komponente: potrebni koraci kod izvođenja i korišćena sredstva.

Neki tehnički zahtevi pri izvođenju eksperimenata bi mogli biti takvi koji bi podrazumevali korišćenje svih raspoloživih materijalnih resursa, počevši od samih elemenata aparature gde je preporučljivo njen montiranje pred učenicima (izuzetak su složeniji sistemi), korišćenje pomoćnih skica, šema, slika na tabli ili video-projekciji radi upoznavanja učenika sa aparaturom, upotreba modela i maketa, upotreba raznih tehničkih pomagala i efekata (pozadina – da bi se neki procesi lakše uočili, pojačavač – kod procesa kod kojih su efekti slabi, marker – za označavanje promene u odnosu na prethodno stanje, stroboskopski efekat, itd.). Ovo bi bili objektivni faktori tehnike izvođenja eksperimenta. Subjektivni faktor predstavlja samog nastavnika i njegove sposobnosti.

Ne postoje jasna i univerzalna pravila koja se tiču procesa izvođenja eksperimenta u nastavi zato što sama nastava zavisi od velikog broja varijabli. Naravno, kao što je pomenuto, postoje određeni "recepti" kako nastavu koja uključuje eksperiment održavati, ali nažalost kao i u svakom poslu, postoje i određene otežavajuće okolnosti. Prilikom izvođenja nekog eksperimenta, poželjno je najviše biti u situaciji da svi učenici mogu da posmatraju određenu pojavu i da to sve povežu sa izloženom teorijom ili obrnuto, da iz eksperimenta na bazi svog iskustva i pretpostavki pokušaju da *konstruišu* suštinu posmatrane pojave, odnosno fizičkog zakona.

Neke od otežavajućih okolnosti što se tiče izvođenja eksperimenata u školi su upravo te da je teško izvesti eksperiment pred celim razredom i biti siguran da su svi učenici uspeli da zapaze najbitnije delove eksperimenta. Tu su i drugi bitni faktori kao što su vremensko ograničenje časa, koncentracija učenika, njihova zainteresovanost i afinitet prema prirodnim naukama... Na kraju možemo pomenuti da je opšte poznato da većina škola u Republici Srbiji u suštini ne poseduje kabinete, tj. laboratorije za prirodne nukve, kao ni adekvatnu opremu i aparaturu za izvođenje eksperimenata. Naravno, postoji alternativa, tj. prikaz eksperimenata putem multimedijalnih sredstava ili izrada jednostavnih učila i aparata koji verno mogu demonstrirati neku izučavanu pojavu. Druga varijanta je vrlo ograničena jer zahteva vreme da se učila izrade a i nepraktična je za demonstraciju komplikovanih prirodnih fenomena. Pored toga, u našim školama je prisutan i prednjutnovski pristup eksperimentu u nastavi, tako da se akcenat radije stavlja na rešavanje numeričkih problema, a eksperiment se, nažalost, u većini slučajeva zanemaruje.

Može se zaključiti da je glavni faktor od kog zavisi u kom smeru će se odvijati nastavni čas sam nastavnik. Počevši od same ličnosti pa do stepena razumevanja materije, odnosno stručnosti, dobar nastavnik fizike bi morao da poseduje određene kvalitete od kojih bi najbitniji, za ostvarivanje zadataka nastave fizike, bili dobro poznavanje gradiva i sposobnost da to gradivo na kvalitetan i zanimljiv način prezentuje kao i veština u praktičnom izvođenju ogleda.

2.2. KONSTRUKTIVISTIČKI PRISTUP KORIŠĆENJA EKSPERIMENTA U NASTAVI FIZIKE

Postoje četiri osnovna pristupa preko kojih bismo mogli da opišemo korišćenje eksperimenta kao naučnog metoda u nastavi fizike. To su: **prednjutnovski, empiristički, pozitivistički i konstruktivistički pristup**.

Prednjutnovski pristup – u ovakvom pristupu se eksperimenti uopšte ne koriste. Podsetimo se samo isprepletanosti teorije i eksperimenta i njihovo međusobno dopunjavanje, kako u fizici kao nauci a tako i u fizici kao predmetu. Na našim prostorima, mentalitet čoveka je takav da rešenje nekog problema radije nudi verbalnim putem, nego praktičnim. To je uveliko i odraz na nastavu fizike – gde se akcenat u nastavi kod mnogih nastavnika stavlja na teorijsko i numeričko rešavanje problema.

Empiristički pristup – zasniva se isključivo na čulnom opažanju i predstavljanja svesti kao *tabule rase* (prazne table) na koju “čula zapisuju istinitu sliku sveta”. Time istraživanju uvek prethodi opažanje, a iz opažanja je izvedeno fizičko znanje proučavane pojave. Eksperiment se tako tretira kao sredstvo koje je potpuno nezavisno od razmišljanja i očekivanja eksperimentatora. Pokazalo se da empiristički pristup daje neispravnu sliku o istraživanju u prirodnim naukama iz prostog razloga što čulni podaci koji ulaze u našu svest zapravo zapisuju sliku sveta baziranu na našim verovanjima, iskustvima i očekivanjima. Na slici 2.3. su prikazani začetnici empirizma.



Slika 2.3. Predstavnici empirizma (Francis Bacon, John Locke, David Hume)

Pozitivistički pristup – zasniva se isključivo na činjenicama. Fizičko znanje se u ovom pristupu tretira kao gotovo predstavljena istina, a eksperiment u pozitivizmu služi za potvrđivanje rezultata te, predstavljene “istine”. Jedna fundamentalna mana pozitivizma jeste da se u njemu obrće prirodni tok sticanja znanja i iskustva. Prema Piagezu (Jean Piaget, 1896-1980), prirodni redosled je da se prvo stiče fizičko a potom logičko-matematičko iskustvo, nikako obrnuto. (Lj. Nešić, 2015.)

Konstruktivistički pristup – po ovom pristupu, standardan slučaj jeste nastavnikovo objašnjavanje pojave uz aktivno učestvovanje učenika dok se eksperiment izvodi. Pored toga, postoji još i tzv. “tiha” demonstracija gde se od učenika traži da sami izvedu zaključke nakon izvedbe, i suprotno – kada se od učenika pre izvođenja eksperimenta traži da pretpostave šta će se u posmatranom eksperimentu odigrati. Konstruktivizam se bazira pre svega na učenju pomoću *diskusije*. Za tako nešto, potrebna je jedna vedra, interaktivna sredina. Bez takve sredine, kao sredine u kojoj se mlađi umovi razvijaju, nije dovoljno samo izvesti eksperiment. Nastavnik učenicima ne može ni dati, ni pokloniti znanje. Srž konstruktivističkog pristupa se sastoji u tome da se obezbedi takva atmosfera u kojoj će učenici sopstvenim trudom formirati i obogaćivati svoje znanje. To je, dakle, proces samostalne konstrukcije znanja. Neretko se desi da učenici imaju neispravnu intuitivnu ideju pri zaključivanju i usvajanju znanja. Nastavnik je dužan da skrene pažnju na “greškice” i da ih ispravi.

Dakle, u ovom pristupu suštinsku ulogu imaju interaktivna sredina u odeljenju, konstruktivna diskusija i usaglašavanje mišljenja oko interpretacije rezultata merenja (posmatranja). Ovakav pristup daje učenicima pre svega dovoljno vremena za **konstrukciju mišljenja** o aktuelnoj problematiki, generalnu **diskusiju , korigovanje** hipoteza učenika od strane nastavnika ukoliko nisu na ispravan način donešene, **isticanje suštine** i najbitnije, **razumevanje** ispravne (ispravljene) interpretacije. Dakle, u nastavi fizike, generalno angažovanje učenika daje posebnu notu nastavi.

Konstruktivizam je usko povezan sa teorijom kognitivnog razvoja čiji je tvorac Žan Piaget (slika 2.4.).



Slika 2.4. Jean Piaget

3. DINAMIKA

Kretanje kao pojava (ili svojstvo realnih tela) bi najjednostavnije moglo da se definiše kao *promena položaja jednog tela u odnosu na drugo, referentno telo*. Isto telo može da se kreće u odnosu na jedno, a da miruje u odnosu na drugo, referentno telo. Standardan primer bi bio naše mirovanje u odnosu na Zemlju, ali i naše kretanje zajedno sa Zemljom kroz Sunčev sistem. Time je kretanje relativna pojava. U najelementarnijem slučaju razlikujemo dve vrste kretanja: translatoryno i rotaciono, drugi nazivi za ove dve osnovne vrste kretanja (klasifikovanih po obliku putanje po kojoj se telo kreće – prava linija ili kriva) jesu progresivno i obrtno, respektivno. Postoje naravno i složeniji oblici kretanja kao na primer, kretanje točkova automobila, koje se može razložiti na translaciju i rotaciju; kretanje Zemlje je složeno kretanje – ona se obrće oko Sunca po krivoj, zatvorenoj putanji ali i vrši rotaciju oko sopstvene ose. Obe vrste kretanja se služe posebnim (i međusobno analognim) fizičkim veličinama koje ih karakterišu.

Od elementarnih čestica do masivnih astronomskih objekata, grana fizike koja proučava kretanje po svim njegovim aspektima, naziva se mehanika. U ovom radu ćemo se fokusirati isključivo na klasičnu, mehaniku makroskopskog sveta. Klasična mehanika se dalje deli na tri elementarne oblasti: ***kinematiku, dinamiku i statiku***. U nastavi fizike, najpre se izučava kinematika, kinematičke veličine i odgovarajući pojmovi (materijalna tačka, putanja, put, vreme, brzina, ubrzanje,...), jer kinematika proučava osnovne fizičke parametre kretanja (npr. pređeni put i vreme čiji odnos definiše brzinu ili promena brzine po vremenu što definiše ubrzanje). Razlika između kinematike i dinamike je ta što dinamika proučava kretanje tela opisivajući uzroke njegovog nastajanja, dok se u kinematici to ne razmatra. U dinamici se, naravno, služimo i kinematičkim veličinama kao što su brzina i ubrzanje, tako da između ove dve oblasti postoji poseban odnos i tesna veza. Statika, pak, proučava uslove i vrste ravnoteže tela (ili mehaničkih sistema) pritom se služeći dinamičkim veličinama kao što je sila i njen rotacioni analog – momenat sile.

Dakle, za razliku od kinematike, dinamika se bavi pitanjima kao što su: kada se telo nalazi u stanju mirovanja, zašto se neka tela kreću ravnomerno a neka ravnomerno ubrzano, koji je to faktor koji uzrokuje kružno ili rotaciono kretanje, kada se tela deformišu i kada menjaju dimenzije, itd. Uvođenjem osnovnih dinamičkih veličina (sile, mase, impulsa) i njihovim povezivanjem sa osnovnim kinematičkim veličinama mi dobijamo jasniji i potpuniji opis kretanja tela. Dok se u kinematici kretanje ***opisuje***, u dinamici se kretanje ***opisuje i objašnjava***. (M. Raspopović, 2004.)

Pri opisivanju kretanja tela, uobičajeno je koristiti modele radi pojednostavljenja opisa kretanja tela, poput modela *materijalne tačke* i modela *krutog tela*. Materijalna tačka – ako se sve tačke (delovi) jednog tela kreću na isti način, dovoljno je poznavati kretanje samo jedne od njih. Posmatrano telo se predstavlja tačkom određene mase a time se zanemaruju oblik i dimenzije tela i otklanja potreba za poznavanje položaja svakog delića posmatranog tela. Pri tome važe

neka opšta pravila. Na primer, telo možemo smatrati materijalnom tačkom ukoliko su mu dimenzije zanemarljive u odnosu na pređeni put. Drugo pravilo jeste da se ovaj model može primeniti na tela koja se kreću translatorno, jer u rotacionom režimu kretanja, ovaj model gubi fizički smisao. Isto tako, model materijalne tačke ne možemo primeniti u proučavanju deformacija tela. Kruto telo – predstavlja mehanički sistem od velikog broja materijalnih tačaka. Osnovni princip na kojem počiva ovaj model je taj da rastojanje između dve proizvoljne tačke krutog tela ostaje nepromenjeno prilikom delovanja sile. Prilikom kretanja, svaka tačka krutog tela opisuje sopstvenu putanju. Ovim principom u modelu krutog tela se otklanja potreba za poznavanjem parametara kretanja svake njegove tačke. Pored ovih, u mehanici postoje i modeli poput modela neprekidnih sredina, i drugi.

Dinamika je utemeljena na tri principa, tj. zakona koje je formulisao engleski fizičar, matematičar, astronom i teolog Isak Njutn (*Isaac Newton* 1643-1727). Ovi zakoni su, njemu u čast, nazvani **Njutnovim Zakonima** ili **Osnovnim zakonima klasične mehanike**. Osnovni zadatak dinamike jeste, dakle, opis i objašnjenje kretanja tela ili sistema tela, pri poznatim početnim uslovima i silama koje deluju na njega.

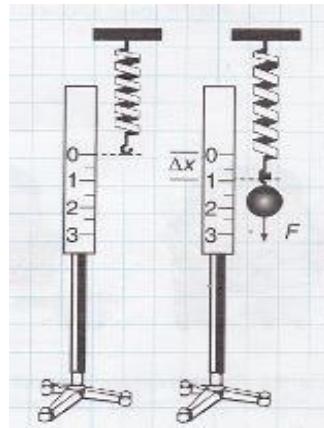
Učenici se sa dinamikom prvi put susreću u osnovnoj školi i zato ih je u prvom razredu srednje škole kada se ponovo susreću s njom (prema cikličnom režimu predavanja gradiva u nastavi fizike) potrebno podsetiti osnovama prilikom obrade teme – *sila*.

3.1. UZAJAMNO DELOVANJE TELA, SILA I MOMENAT SILE

Uzajamno delovanje tela ili **interakcija** se može definisati kao **promena stanja kretanja tela** i kao **uzrok njegove deformacije**. Primera za interakcije ima bezbroj iz svakodnevnog života, i kao takve mogu biti različite, pritom se odvijajući ili **neposrednim kontaktom tela** (npr. bokseri koji se tuku, lokomotiva koja vuče vagone, itd.) ili **posredstvom fizičkog polja** (npr. gravitaciono polje – Sunce kao masivni objekat koji privlači planete, Zemlja koja posredstvom gravitacije privlači tela iznad njene površine; magnetno polje – magneti i privlačenje metalnih predmeta, itd.). Dakle, u oba slučaja dolazi do promene stanja kretanja tela koja je prouzrokovana delovanjem drugih tela. Pri uzajamnom delovanju, može nastati i deformacija tela. Deformacije su nekada vrlo uočljive a najtipičniji primer jeste metalna opruga koji se usled opterećenja tegovima isteže.

Sa svim navedenim u vidu, potrebno je interakciju između tela kvantifikovati nekom fizičkom veličinom. Ta fizička veličina naziva se **sila**. Sila je dakle, **kvantitativna mera uzajamnog delovanja tela** i sila je **uzrok deformacije tela**. Tako možemo definisati i dve vrste uzajamnog delovanja, koje ujedno i definišu način merenja sile:

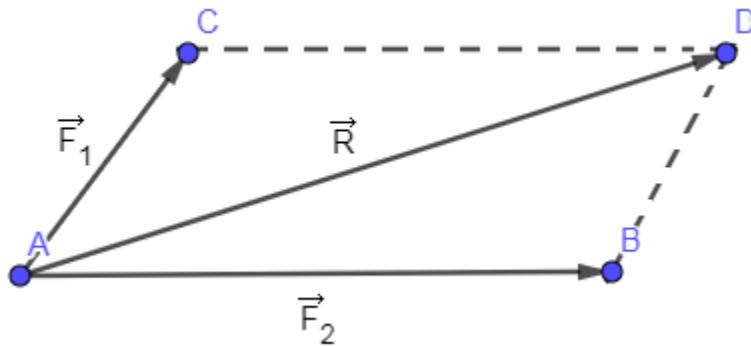
- 1) **Dinamičko uzajamno delovanje – koje uzrokuje promenu stanja kretanja tela.** Tada se sila može meriti merenjem parametara koje definišu kretanje tela – u ovom slučaju masa i ubrzanje (dinamički metod merenja sile).
- 2) **Statičko uzajamno delovanje – koje uzrokuje samo deformaciju tela.** Ovde se sila može izmeriti dinamometrom, u slučaju postojanja proporcionalnosti između sile koja deluje na telo i deformacije tela (statički metod merenja sile, prikazan na slici 3.1.).



Slika 3.1. statički metod merenja sile dinamometrom gde je intenzitet sile proporcionalan istezanju opruge Δx

U praksi se najviše koristi statički metod jer merenje ubrzanja tela nije najzgodniji način.

Eksperimentalno je utvrđeno da dejstvo neke sile zavisi od: **napadne tačke**, njenog **intenziteta, pravca i smera**. Može se zaključiti da se ovde radi o *vektorskoj veličini*. Stoga se mogu primeniti konkretne vektorske operacije. Na primer, ako na neko telo deluju dve ili više sila, telo će se kretati na isti način kao što bi se kretalo kada bi na njega delovala samo rezultanta tih sila, koja je određena pravilima vektorskog slaganja delujućih sila (slika 3.2.).



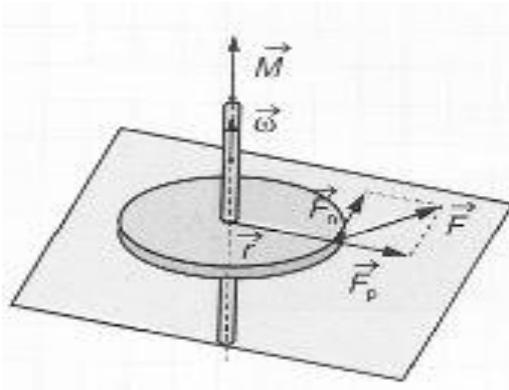
Slika 3.2. Primer vektorskog slaganja sila čija je rezultanta $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$

Jedinica za intenzitet sile je **njutn**, a to je izvedena jedinica, koja se prema Drugom Njutnovom zakonu (poglavlje 3.4.2.) može napisati kao: $1\text{ N} = 1\text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Opisivano je uzajamno delovanje tela pri translacionom kretanju pri čemu je telo moglo biti predstavljeno i kao materijalna tačka. Pri rotacionom kretanju, stvari su nešto drugačije. Za buduće izlaganje, najpre je potrebno podsetiti se pojma **težišta tela**. Za težište tela postoji više definicija, kako formalnih tako i neformalnih. Po jednoj (neformalnoj) definiciji, težište tela predstavlja karakterističnu tačku u kojoj je "sadržana" kompletan težina tela; po drugoj (formalnoj) definiciji, težište tela je napadna tačka sile Zemljine teže. Težište tela je karakteristična tačka svih realnih tela.

Kao što ćemo videti u jednom od eksperimenata (4.1.1.), spoljašnja sila koja deluje na posmatrano telo, pokreće ga translaciono ukoliko se pravac njenog dejstva poklapa sa tačkom težišta tela. U suprotnom, ako se pravac dejstva primenjene sile ne poklapa sa težištem tela, telo se može obrtati (prevrtati, rotirati). Kod translacionog kretanja telo dobija ubrzanje koje je po pravcu i smeru definisano dejstvom sila (ili njihovom rezultantom) a pritom pravci delovanja tih sila mogu biti proizvoljni.

Da bi neko telo rotiralo oko nepokretnе ose (najelementarniji slučaj rotacije tela), sila ne može delovati duž proizvoljnog već duž određenog pravca. Nepokretna osa je osa čiji je položaj fiksiran u prostoru.



Slika 3.3. Momenat sile

Neka je posmatrano telo homogeni disk čiji je radijus određen vektorom \vec{r} . Sa slike 3.3. se vidi delovanje sile \vec{F} na ivici ovog diska, kao i to da ova sila nije normalna na radijus-vektor diska, odnosno zakrenuta je za određeni ugao. Stoga se delovanje sile \vec{F} može razložiti na dve komponente: komponentu \vec{F}_p koja je kolinearna (paralelna) sa radijus-vektorom i komponentu \vec{F}_n koja je normalna na radijus-vektor. Komponenta \vec{F}_p može jedino da pokrene telo na translaciju dok pri rotaciji ona ne igra nikakvu ulogu. Komponenta \vec{F}_n međutim može pokrenuti telo na rotaciju. Jasno je da normalna komponenta sile nije jedina koja bi trebala dobiti zaslugu za rotaciju, suštinsku ulogu igra i rastojanje napadne tačke primenjene sile od ose rotacije. Zato je potrebno uvesti novu veličinu koja opisuje uzajamno delovanje tela pri rotaciji a koja je analogna sili pri translatornom kretanju, a to je **momenat sile**. Momenat sile se najčešće obeležava sa \vec{M} i definiše se kao vektorski proizvod vektora \vec{r} i \vec{F} , odnosno:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

Pravac i smer ovog vektora je definisan **pravilom desnog zavrtnja** a intenzitet mu se u opštem slučaju (kada sila nije normalna na radijus-vektor) definiše na osnovu definicije vektorskog proizvoda kao:

$$M = rF_n = rF \sin \alpha(\vec{r}, \vec{F})$$

U posebnom slučaju kada je sila normalna na radijus-vektor, intenzitet momenta sile se može napisati kao:

$$M = rF$$

Dakle, intenzitet momenta sile je definisan proizvodom intenziteta sile i najmanjeg normalnog rastojanja od napadne tačke sile do ose rotacije. Jedinica za momenat sile je njutn-metar [Nm].

Dakle, u dinamici rotacije, momenat sile je kvantitativna mera uzajamnog delovanja tela.

Pojam "sila" se od vremena Aristotela do vremena Njutna i Galileja upotrebljavao u nauci za označavanje uzroka nepoznatih pojava. Vremenom je ustanovljeno da tela mogu da se kreću i kad nema delovanja spoljašnje sile (ravnomerno pravolinijsko kretanje). Upravo su Njutn i Galilej principijelno izmenili smisao ove fizičke veličine. Oni su dokazali da je sila zapravo uzrok promene *stanja kretanja* (ne i samog kretanja), uzrok čija je posledica ubrzanje tela, odnosno promena brzine u određenom vremenskom intervalu. Prema savremenoj interpretaciji kretanja, ono se tretira kao opšte *svojstvo* tela. Interakcije (sile) same po sebi mogu biti različite. One su mehanizam preko kojeg tela dolaze u kontakt, a one se uočavaju svuda, od elementarnih čestica pa sve do makroskopskih tela. Postoje četiri osnovne interakcije između tela (odnosno čestica), a to su: *jaka*, *slaba*, *elektromagnetna* i *gravitaciona*. Svaka od ovih ima svoje karakteristike: relativni intenzitet, domet dejstva i vreme trajanja. Jaka interakcija, logično, ima najveći intenzitet, radijus dejstva joj je ograničen na red veličine dimenzija jezgra atoma, ona predstavlja interakciju između nukleona u jezgru i najkraće traje. Elektromagnetna je slabija od jake, ali u nekim slučajevima je može nadvladati (fisija jezgra) i ona deluje do u beskonačnost. Slaba interakcija je takođe nuklearna i posrednik je u nekim procesima kao što je beta raspad, a u nekim izvorima se može poistovetiti sa elektromagnetnom po svom intenzitetu. Gravitaciona interakcija je najmanjeg intenziteta od svih, deluje do u beskonačnost i deluje na sva tela sa masom različitom od nule, bez izuzetka, mada se po pravilu u fizici elementarnih čestica može zanemariti, dok se njen uticaj najviše ispoljava kod astronomskih objekata.

3.1.1. NEKI PRIMERI SILA OD ZNAČAJA ZA EKSPERIMENTE

U problemima dinamike i statike, često se susrećemo sa različitim “vrstama” sila. U ovom poglavlju će u kratkom formatu biti nabrojani i objašnjeni vrste sila koje će biti posmatrane u eksperimenatima sile u završnom delu rada, radi njihovog lakšeg pojašnjena.

Težina tela i Sila Zemljine teže

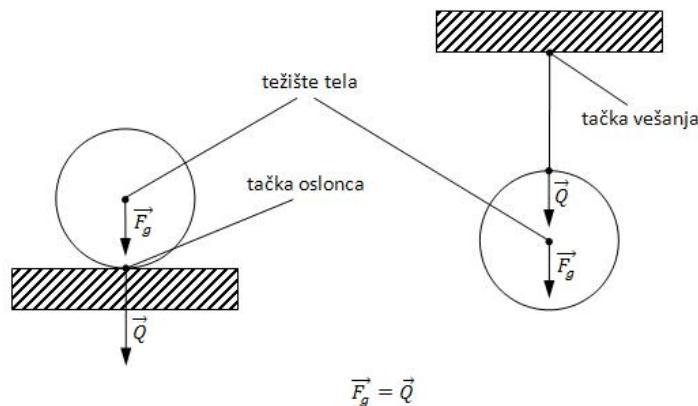
Težina tela je sila koja pre svega zavisi od *mase* tela (poglavlje 3.2.) i uticaja Zemljine teže. Zemljina teža \vec{F}_g je sila gravitacione prirode koja utiče na sva tela, a koja prouzrokuje njihovo kretanje u formi slobodnog pada.

Pri ovome, telima se saopštava ubrzanje koje ne zavisi od mase tela; to je *gravitaciono ubrzanje* koja se u raznim problemima može smatrati konstantom, a takav njen prosek iznosi $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ iako ova veličina zavisi od geografske širine mesta na Zemlji na kojoj se ovo ubrzanje određuje. Ovaj faktor, kao i čitava problematika gravitacije su određeni *Univerzalnim zakonom gravitacije*.

Težina tela \vec{Q} se matematički može prikazati kao:

$$\vec{Q} = m\vec{g}$$

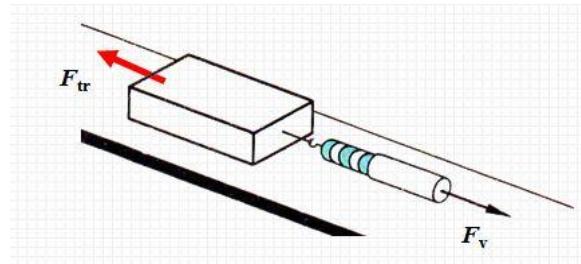
Dakle, težina tela je sila čiji je intenzitet jednak proizvodu mase tela i gravitacionog ubrzanja. Bitna napomena se tiče razlikovanja sile Zemljine teže i težine tela. Imaju jednak intenzitet, pravac i smer ali nemaju istu napadnu tačku. Sila Zemljine teže deluje na *težište* tela, dok težina tela deluje u *tački oslonca* (na horizontalnoj podlozi) ili u *tački vešanja* tela (slika 3.4.).



Slika 3.4. Napadne tačke sile Zemljine teže i težine tela

Sila trenja

Svako telo koje se kreće po nekoj podlozi se nakon izvesnog vremena zaustavlja. Uzrok ove pojave jeste molekularna interakcija između tela i podloge. Ova pojava naziva se **trenje**. Trenje se, dakle, javlja kod dva različita tela ili između dva dela jednog tela koji se nalaze u mehaničkom kontaktu. Kvantitativna mera trenja je **sila trenja** koja uvek ima suprotan smer od kretanja tela, odnosno, ona deluje nasuprot sili koja je uzrok kretanju. Sila trenja se manifestuje u raznim oblicima: sila statičkog trenja, sila viskoznog trenja, sila trenja klizanja, sila trenja kotrljanja, sila otpora sredine. Sada uzmimo i objasnimo najjednostavniji primer *sile trenja klizanja* F_{tr} koja se javlja usled kretanja jednog tela na drugom (slika 3.5.).



Slika 3.5. Sila trenja klizanja

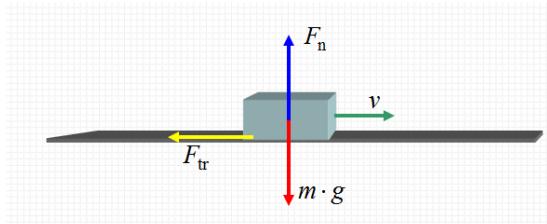
Intenzitet ove sile:

- **ne zavisi** od dodirne površine klizećeg tela
- **zavisi** od sastava, tj. prirode dodirujućih tela
- **zavisi** od sile kojom telo deluje normalno na podlogu, i proporcionalna je sa njom

Odnos između sile trenja F_{tr} i sile delovanja tela normalno na podlogu F_n je bezdimenzionalna konstanta, definisana je za vrstu materijala podloge i naziva se *koeficijent trenja* μ .

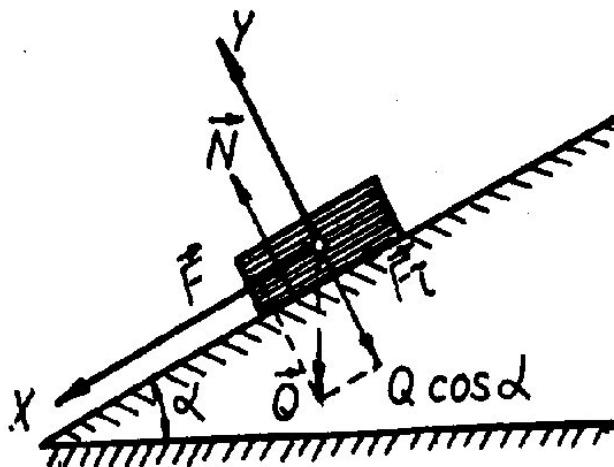
$$F_{tr} = \mu F_n$$

Sila F_n se može smatrati i rezultantom sila koje normalno deluju na podlogu. U slučaju kretanja tela po horizontalnoj podlozi, ova sila je jednaka težini tela (slika 3.6.).



Slika 3.6. Kretanje tela po horizontalnoj podlozi i odgovarajuće sile koje sejavljaju

Naravno, postoji i slučaj kretanja tela po podlozi koja ima nagib pod određenim uglom. To je klasični problem kretanja tela na *strmoj ravni*. Na slici 3.7. sa F_t je označena sila trenja.



Slika 3.7. Kretanje tela po strmoj ravni

Trenje postoji i pri kotrljanju tela. U ovom režimu kretanja, sila trenja je manja nego kod klizanja (slika 3.8.).



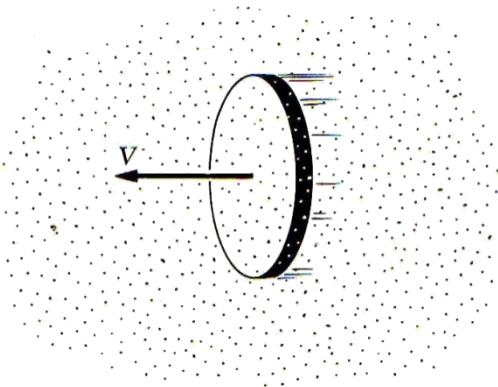
Slika 3.8. Mudri balegar okreće svoj rekvizit sfernog oblika radi smanjenja trenja kotrljanjem

Posledice trenja su najpre štetne a primeri su brojni. Kao najočiglednije možemo izdvojiti trošenje materijala i njegovo zagrevanje. U tehnici, trenje predstavlja jedan od ozbiljnih problema, zato se pribegava svakoj alternativi, npr. uglačavanje površina materijala (metoda koja je ograničena), upotreba kugličnih ležajeva na osovinama motora, itd.

Sila trenja se u slučaju klizanja jednostavno može određivati dinamometrom, ali postoji i poseban uređaj za merenje sile trenja – *tribometar*.

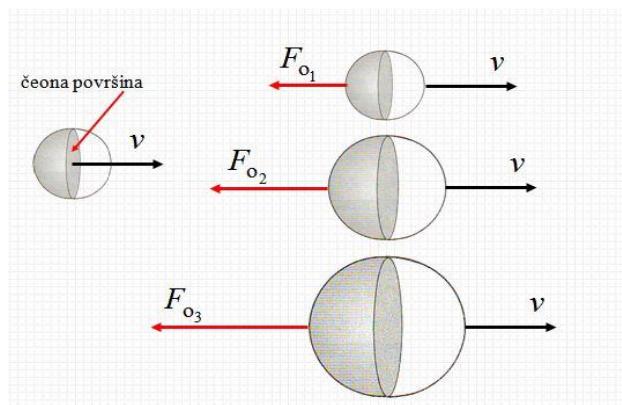
Sila otpora sredine

Prilikom kretanja tela kroz neku sredinu, kao što je voda ili vazduh, dolazi do suprotstavljanja sredine kretanju tog tela kroz nju. Mehanizam interakcije između tela i sredine jeste *sila otpora sredine*. Kao i trenje, sila otpora sredine ima isti pravac, ali suprotan smer u odnosu na kretanje tela (pravac vektora njegove brzine). Primer kretanja tela kroz neku sredinu je dато на слици 3.9.



Slika 3.9. Kretanje tela kroz sredinu

Ova sila zavisi od dva faktora – brzine kretanja tela kroz nju i fizičkog izgleda tela – njegovog oblika, dimenzija i njegovom površinom. Pri manjim brzinama izraz za silu otpora je $F_O = kv$, dok je pri većim brzinama sila otpora sredine srazmerna kvadratu brzine tela. Koeficijent proporcionalnosti k je faktor koji zavisi od fizičkog izgleda, a tu se pre svega misli na **čeonu površinu** tela – površinu poprečnog preseka tela normalnu na pravac njegovog kretanja. Sila otpora sredine je dakle, proporcionalna čeonoj površini tela (slika 3.10.).



Slika 3.10. Čeona površina tela

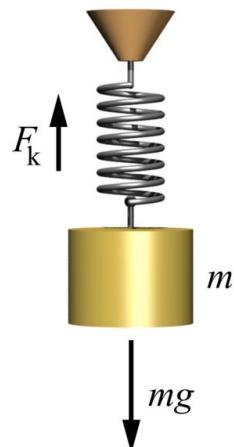
Postavlja se pitanje, ako je sila otpora sredine proporcionalna sa brzinom tela, koju maksimalnu vrednost brzine će telo dostići? Pod dejstvom sile Zemljine teže brzina tela će da raste, a sa tim i sila otpora sredine. Sila teže F_g ima konstantnu vrednost za telo i u jednom trenutku će se izjednačiti sa silom otpora sredine F_O . U tom trenutku će ove dve sile biti jednake po intenzitetu i pravcu ali suprotnih smerova, što znači da će se međusobno poništiti. Tada na telo ne deluje rezultantna sila koja bi mu saopštila ubrzanje, te se ono kreće ravnomerno pravolinijski sa tzv. **graničnom brzinom**. Za telo koje se kreće graničnom brzinom kaže se da se ono nalazi u stanju *dinamičke ravnoteže*. Još jedan aspekt sile otpora sredine koji je pomenu, jeste njena zavisnost od oblika tela. Najmanji otpor sredini imaju aerodinamična tela poput riba, dok najveći otpor pružaju tela poput padobrana.

Sila elastične opruge (elastičnosti)

Sila elastične opruge je sila koja prouzrokuje deformaciju tela odnosno promenu njegovih dimenzija. Ukoliko bismo o slobodan kraj metalne opruge kačili tegove, došlo bi do vrlo uočljive promene njene dužine. Mehanizam ovakve deformacije je sledeći: opruga se isteže pod dejstvom privlačenja Zemljine teže koja deluje na teg, da bi se nakon kratkog vremena sila elastičnosti izjednačila sa silom teže. U tom trenutku, deformacija tela prestaje. To je ujedno i princip na kojem počiva konstrukcija dinamometra, odnosno statičkog merenja sile gde postoji jasna proporcionalnost intenziteta sile i izduženja opruge. Naravno, postoji i granica do koje elastičnost tela može da egzistira, odnosno da se nakon deformacije, opruga (telo) vрати u prvobitni oblik i zapreminu. Po *Hukovom zakonu*, sila elastične opruge (slika 3.11.) ima oblik:

$$\vec{F}_k = -k\vec{x}$$

k – konstanta opruge ; \vec{x} - vektor čiji pravac definiše pravac deformacije



Slika 3.11. Elastična metalna opruga pod opterećenjem

Centripetalna i centrifugalna sila

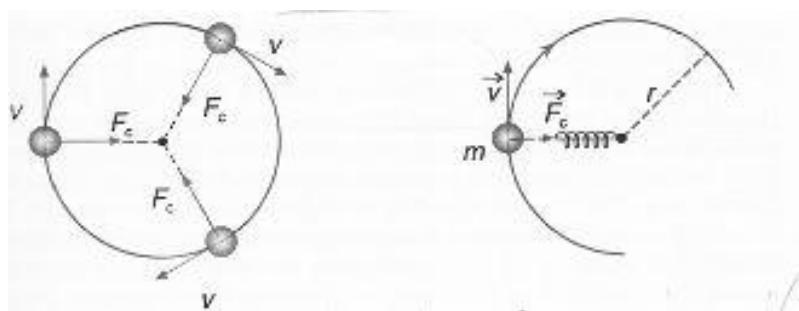
Da bismo objasnili centripetalnu silu, morali bismo se podsetiti nekih karakteristika ravnomernog kružnog kretanja. Takvo kretanje tela se definiše konstantnim intenzitetom brzine tela, međutim, proučavanjem ravnomernog kružnog kretanja se može ustanoviti da vektor brzine menja svoj pravac, što znači da je takvo kretanje u stvari promenljivo – karakteriše ga određeno ubrzanje tela. To ubrzanje je usmereno ka centru putanje i naziva se **centripetalno ubrzanje**. Ono ima intenzitet $a_c = \frac{v^2}{r}$, gde je v intenzitet brzine a r poluprečnik putanje.

Prema Drugom Njutnovom zakonu na telo deluje sila, takođe *usmerena ka centru*, i takva sila se naziva **centripetalna sila**. Njen intenzitet je definisan proizvodom mase tela i centripetalnog ubrzanja: $F_c = ma_c$

Ukoliko bismo zamenili izraz intenziteta centripetalnog ubrzanja u izraz centripetalne sile, dobili bismo sledeću zavisnost od brzine:

$$F_c = m \frac{v^2}{r}$$

Dakle, centripetalna sila je proporcionalna kvadratu brzine i masi tela, a obrnuto je proporcionalna poluprečniku kružne putanje po kojoj se telo kreće.



Slika 3.12. Centripetalna sila

Primeri centripetalne sile su razni. Najjednostavniji primer bi bilo malo telo koje je zavezano kanapom. Ukoliko bismo rukom vrtili kanap, pojavila bi se sila koja bi delovala ka tački u kojoj je kanap pričvršćen našim prstima – tačka koja predstavlja centar kružne putanje. U opštem slučaju, svaka sila može biti centripetalna, pod uslovom da je uvek usmerena ka jednoj tački. To se vidi na desnoj strani slike 3.12. gde i sila elastične opruge može imati centripetalni karakter.

U svakom neinercijalnom referentnom sistemu – koji se kreće ubrzano, u odnosu na inercijalni referentni sistem – koji se kreće ravnomerno pravolinijski ili je u stanju relativnog mirovanja, (više reči o tome u poglavlju 3.5.) javljaju se tzv. inercijalne (nerealne ili fiktivne) sile. Centrifugalna sila predstavlja inercijalnu силу i javlja se kod onih neinercijalnih sistema koji se kreću ubrzano po kružnoj putanji.

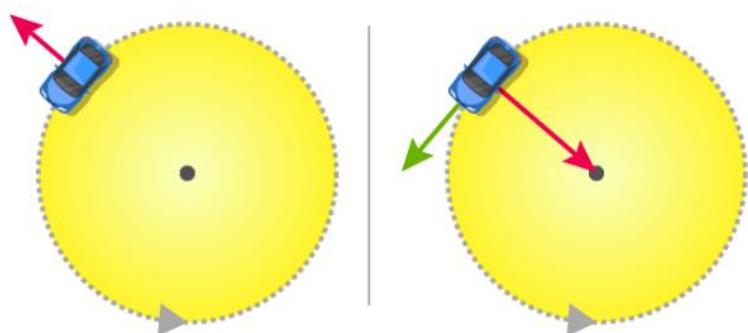
Najkraće rečeno, inercijalne su one sile koje *ne predstavljaju* uzajamnu interakciju između dva tela, već se “javljaju” kao posledica kretanja ubrzanog sistema.

Centrifugalnu silu F_{CF} karakteriše isti pravac a različit smer od centripetalnog ubrzanja, a intenzitet joj je:

$$F_{CF} = \frac{mv^2}{r} = mr\omega^2$$

Ovu силу можемо shvatiti na jednostavnim svakodnevnim primerima. Recimo, u vožnji u gradskom autobusu можемо primetiti da se pomeramo u suprotnom smeru u odnosu na centar krive putanje kada autobus skreće, a zidovi i stakla autobrašuna nas sprečavaju da ne “odletimo”. Takođe, čuli smo u domaćinstvu često puta da neko pominje “centrifugu” veša. Posmatranjem rada veš-mašine, можемо konstatovati da se veš “lepi” za bubanj, dok ga isti taj bubanj sprečava do odleti. Dakle, centrifugalna sila se ispoljava kao opiranje tela da se kreće ubrzano po kružnoj putanji.

Još je bitno napomenuti da se centrifugalna sila javlja isključivo kod neinercijalnih sistema a centripetalna kod inercijalnih. U jednom istom sistemu referencije istovremeno ne mogu da postoje obe sile, a time i njihovo poništavanje. Na slici 3.13. su prikazani pravci delovanja ovih sile.



Slika 3.13. Centrifugalna (levo) i centripetalna sila (desno)

3.2. MASA I MOMENAT INERCIJE

Ako bismo pokušali da izmerimo silu prilikom neke interakcije dinamičkim metodom, ustanovili bismo da dejstvo iste sile ima različite efekte na različita tela. Tim postupkom bismo registrovali različite vrednosti kinematičkih parametara što znači da se tela razlikuju po nekoj osobini. Iz svakodnevnice nam je poznato da je za, recimo, pomeranje ili dizanje nekih predmeta potrebno uložiti više, a za neke predmete manje napora. Na primer, dizanje veš-maštine prilikom selidbe nije isto kao bacanje kamenčića u jezero. Posmatrajući interakciju između dva neidentična tela, merenjem se može zaključiti da jedno od njih nakon interakcije dobija manju brzinu. Kao primer, navedimo sudar dva klikera istog sastava, ali različitih dimenzija. Očigledno je da će manjem klikeru nakon sudara biti saopštena veća brzina. Veći kliker će se udaljiti sa manjom brzinom i za takva tela kažemo da su **inertnija**.

Tako se može uvesti pojam **inertnosti**, odnosno *tromosti*. Kvantitativna mera inertnosti jeste **masa** a inertnost je svojstvo tela koje se ogleda u tome da tela sa većom masom sporije prihvataju promenu stanja svog kretanja, odnosno promenu brzine i ubrzanja. Konkretnija definicija bi bila da je inertnost težnja tela da ostane u relativnom stanju mirovanja ili u stanju jednoliko pravolinijskog kretanja. Iz prethodnih primera je jasno da veći kliker ima veću masu od manjeg, kao što veš-maština ima veću masu od kamenčića. Nakon interakcije tela sa različitim masama, eksperimentalno je ustanovljeno da je odnos njihovih brzina koje su im saopštene obrnuto proporcionalan odnosu njihovih masa. Može se pisati:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Pojam mase tela se tokom istorije nauke menjao. Masu je u fiziku uveo Njutn, gde njen pojam izjednačava sa pojmom količine materije kao i sa pojmom količine supstancije. Međutim, masa se ne može shvatati na taj način jer je materija opštiji pojam od mase. Drugi problem se sastojao o poistovećenju materije sa supstancijom, time svedevši supstanciju na samo jedno od njenih svojstava. Danas je poznato da supstancija ima različita svojstva: tačka topljenja/ključanja, gustina, nai elektrisanje, namagnetisanje, itd. Prema savremenom naučnom shvatanju mase, ona opisuje inertna i gravitaciona svojstva tela. U klasičnoj mehanici postoji zakon o održanju mase (ukupna masa sistema ostaje ista pri svim njegovim promenama) dok u relativističkoj fizici npr. postoji problem *defekta mase*.

Masa je uvek pozitivna, skalarna veličina (obično se obeležava sa m) i pre svega se vezuje za translatorno kretanje tela (ili njegovo relativno mirovanje). Jedinica za masu je jedna od osnovnih sedam SI jedinica – kilogram [kg]. Masa je aditivna veličina.

Jedan od osnovnih metoda određivanja mase jeste metod upoređivanja mase na terazijama.

Sila ima svoju analognu veličinu pri rotacionom kretanju, pa se isto može primeniti za svaku fizičku veličinu u mehanici koja opisuje kretanje. Na primer, pređeni put je analogan opisanom uglu pri kružnom kretanju, brzina tela \vec{v} je analogna ugaonoj brzini $\vec{\omega}$, itd. Tako i masa ima svoj analog pri rotacionom kretanju a to jeste **momenat inercije**. Dakle, momenat inercije je **mera inertnosti tela koje vrši rotaciono kretanje**. Po analogiji shvatanja mase, momenat inercije se može definisati i kao mera otpora tela promeni brzine i ubrzanja njegove rotacije.

Izračunavanje momenta inercije nekog tela se svodi na deljenje tela na veliki broj delova i izračunavanjem dejstva momenta sile (njegov intenzitet) na svaki pojedinačni deo. Primer ovakvog izračunavanja jeste određivanje momenta inercije homogenog tankog obruča. Ako izdelimo obruč na n delova, intenzitet momenta sile na posmatrani i -ti deo se može napisati kao:

$$M_i = rF_i$$

gde je F_i sila koja je uzrok momentu M_i koji deluje na posmatrani deo, gde se sila F_i se može napisati (Drugi Njutnov zakon) kao proizvod mase posmatranog dela i njegovog tangencijalnog ubrzanja a_τ .

$$M_i = rm_i a_\tau$$

Ako se podsetimo veze između tangencijalnog i ugaonog ubrzanja α tj. veze između njihovih intenziteta ($a_\tau = \alpha r$), može se pisati:

$$M_i = m_i r^2 \alpha$$

Poslednji izraz predstavlja Drugi Njutnov zakon pri rotacionom kretanju tela. Stoga, nije teško zaključiti da momenat inercije i -tog dela ima oblik:

$$I_i = m_i r^2$$

Momenat inercije celokupnog obruča se može izračunati kao suma momenata inercije svih njegovih delova, odnosno:

$$I = \sum_i^n I_i = \sum_i^n m_i r^2 = (m_1 + m_2 + \dots + m_n) r^2$$

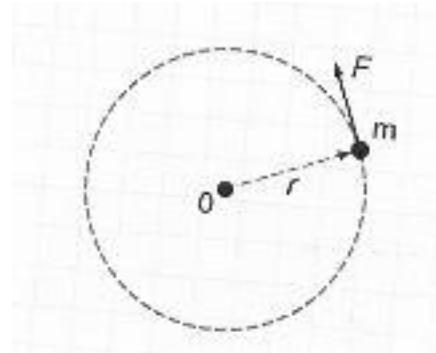
gde je zbir masa svih delića obruča jednak masi celog obruča $m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ pa je ukupan momenat inercije obruča jednak:

$$I = mr^2$$

Radi uopštenja se može reći da momenat inercije posmatranog tela možemo posmatrati kao sumu momenata inercije svih njegovih delova, od kojih je momenat inercije jednog dela jednak proizvodu njegove mase i kvadrata njegovog rastojanja od ose rotacije:

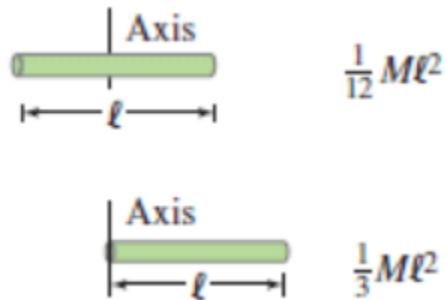
$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \cdots + m_n r_n^2$$

Jedan takav delić možemo posmatrati i kao materijalnu tačku mase m koja vrši kružno kretanje (slika 3.14.). Tada je njen momenat inercije $I = mr^2$.



Slika 3.14. Kretanje materijalne tačke po kružnoj putanji

Momenat inercije materijalne tačke u odnosu na neku osu rotacije jednak proizvodu njene mase i kvadrata rastojanja od te ose. Iz ovoga se može videti i da moment inercije zavisi od izbora ose rotacije. Uzmimo na primer, tanak štap dužine l koji rotira oko ose rotacije koja je normalna na osu štapa. U prvom se slučaju osa rotacije nalazi na njegovoj polovini, a u drugom slučaju na jednom njegovom kraju. Može se videti da se izrazi za momente inercije jednog istog štapa razlikuju (slika 3.15.).



Slika 3.15. Momenat inercije tankog štapa za različite konfiguracije ose rotacije

Po tzv. **Štajnerovoj teoremi** se može izračunati momenat inercije tela oko ose koja je paralelna osi koja prolazi kroz centar mase tela. Matematička formulacija ove teoreme je sledeća:

$$I = I_0 + md^2$$

I_0 – momenat inercije tela vezan za osu rotacije koja prolazi kroz centar mase tela ; I – momenat inercije tela oko paralelne ose ; d – rastojanje između osa

Momenat inercije je kao i masa, aditivna veličina i njegova osnovna jedinica jeste *kilogram-metar na kvadrat* [$kg \cdot m^2$].

3.3. IMPULS I MOMENAT IMPULSA

Prisetimo se sudara dva tela različitih masa. Rečeno je da inertnija tela – tela sa većom masom, prilikom interakcije dobijaju manju brzinu, a da je količnik masa interagujućih tela obrnuto proporcionalan količniku njihovih brzina ($\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}$). To znači da je proizvod mase i brzine jednog tela jednak proizvodu mase i brzine drugog:

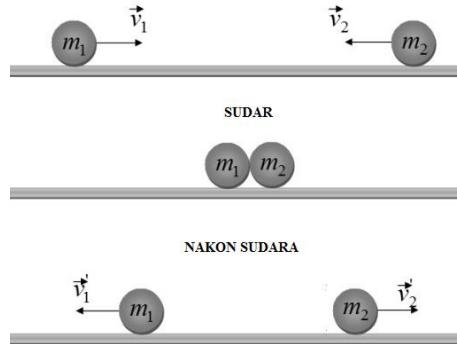
$$m_1 v_1 = m_2 v_2$$

U vektorskom obliku, gornja jednakost ima oblik $m_1 \vec{v}_1 = -m_2 \vec{v}_2$, tako da je:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = 0$$

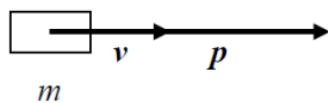
Ovaj proizvod predstavlja jednu od osnovnih karakteristika mehaničkog kretanja i novu fizičku veličinu koja se zove **impuls**. Drugi naziv za impuls je **količina kretanja**. Gornju, vektorsku jednakost možemo interpretirati tako da je ukupan impuls sistema interagujućih tela pre i nakon interakcije jednak nuli. Impuls je prvi u mehaniku uveo Njutn, a njegova opšta matematička formulacija je:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$



Slika 3.16. Sudar dva tela

Impuls je vektorska veličina jer predstavlja proizvod skalara (mase m) i vektora (brzine \vec{v}); njegov pravac i smer je definisan pravcem i smerom vektora brzine tela (kolinearan je sa njime) a njegov intenzitet je određen proizvodom mase i intenziteta brzine (slika 3.17.). Jedinica za impuls je $[kg \frac{m}{s}]$.



Slika 3.17. Vektori brzine i impulsa tela

Analogno, može se definisati i **momenat impulsa** koji opisuje rotaciono kretanje tela. Logično je da će ova veličina biti jednaka proizvodu momenta inercije i ugaone brzine: $\vec{L} = I\vec{\omega}$, a osnovna veza između momenta impulsa i impulsa je:

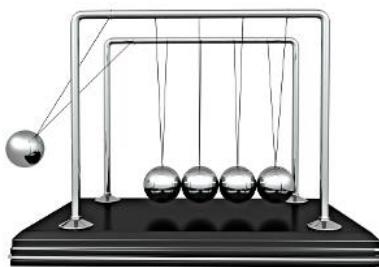
$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

Impuls je vrlo zanimljiva fizička veličina jer se uglavnom vezuje za rešavanje problema koji se tiču interakcije (sudara) tela (slika 3.16.). Za njega, kao i za momenat impulsa, važe specifični zakoni – **zakoni održanja** koji tvrde da je **ukupan impuls (momenat impulsa) sistema tela u inercijalnom sistemu referencije konstantan**. Pa, za momenat impulsa, kao i za impuls, važi:

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2$$

Primer održanja momenta impulsa nalazimo u umetničkom klizanju. Klizačica pri realizaciji piruete najpre postiže rotaciju klizaljkama sa određenom ugaonom brzinom ω_1 i raširenim rukama postiže maksimalni momenat inercije. U drugom položaju, sa rukama primaknutim ka sebi, momenat inercije se smanjuje, a ugaona brzina rotacije povećava radi održanja početne vrednosti momenta impulsa. Jedinica za momenat impulsa je $\left[kg \frac{m^2}{s} \right]$.

Lep primer za demonstraciju “prenošenja” impulsa jeste tzv. “Njutnova kolevka” (slika 3.18.). To je sistem koji se sastoji od određenog broja kuglica identičnih masa, povezanih nitima za metalne, horizontalne šipke. Ovim aparatom su omogućeni sudari kuglica. Nakon što jedna kuglica pogodi drugu, dolazi do predaje impulsa prve kuglice drugoj, druge trećoj, itd. Ovaj impuls se prenosi do poslednje kuglice u nizu koja nastavlja kretanje.

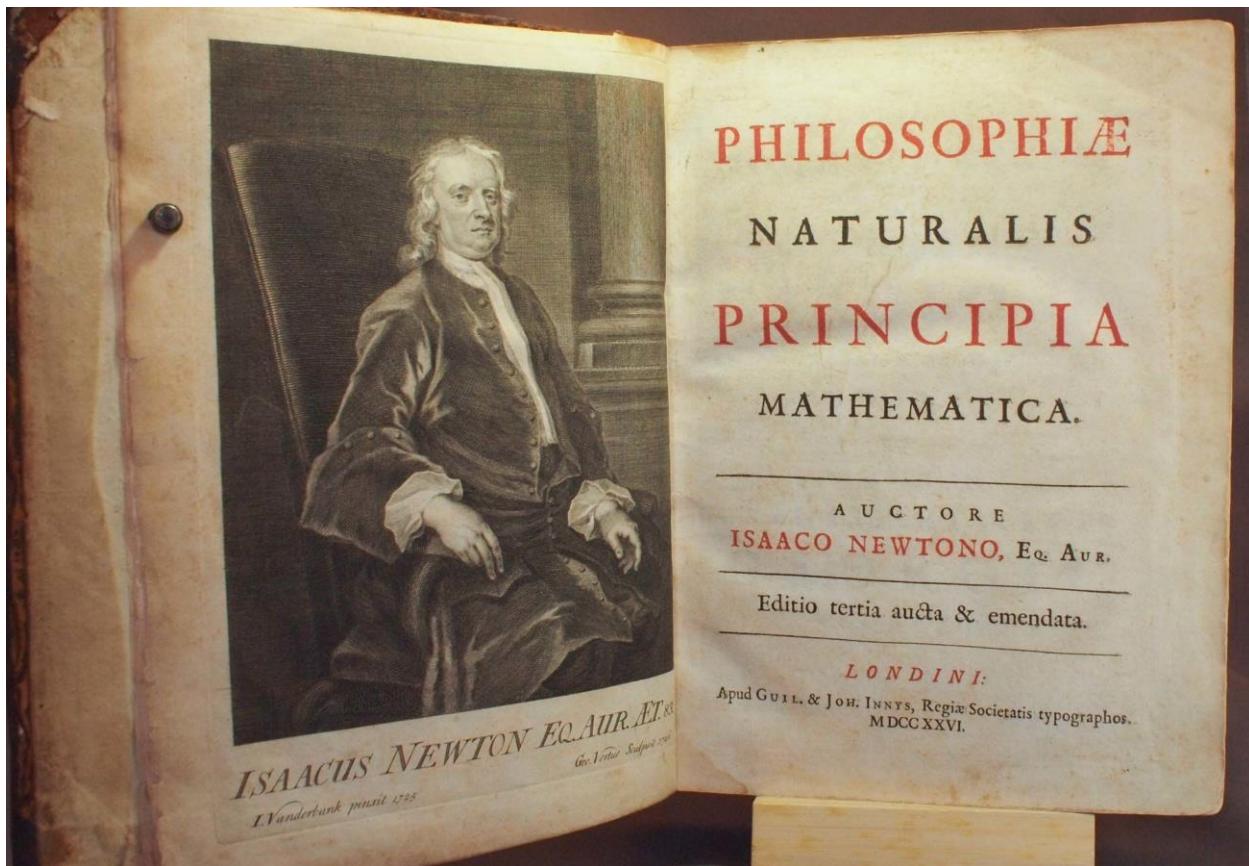


Slika 3.18. Njutnova kolevka

Dakle, ove veličine imaju primenu u rešavanju nekih praktičnih problema gde nije potrebno znati kompletan opis kretanja tela ili mehaničkog sistema kao što je na primer poznavanje prirode i intenziteta sila koje deluju na telo (sistem).

3.4. OSNOVNI ZAKONI DINAMIKE

Isak Njutn je petog jula, 1687. godine u delu “*Philosophiae naturalis principia mathematica*” (*Matematički principi filozofije prirode*, slika 3.19.) formulisao osnovne zakone kretanja tela uključujući i univerzalni zakon gravitacije. Ovim aksiomama se formiraju osnove klasične mehanike i novi matematički aparati poput integralnog i diferencijalnog računa (u okviru matematičke analize) koji su dizajnirani upravo za potrebe proračuna u fizici.



Slika 3.19. “Matematički principi filozofije prirode”

Osnovne zakone dinamike čine tri zakona: **zakon inercije**, **osnovni zakon dinamike i zakon akcije i reakcije**.

3.4.1. PRVI NJUTNOV ZAKON – ZAKON INERCIJE

Od malih nogu, poznato nam je da se predmeti koji miruju oko nas ne mogu pokrenuti sami od sebe već da je za tako nešto potrebno dejstvo drugih tela, da li od nas samih ili od drugih predmeta koji se nalaze u stanju kretanja. Iz naše persektive, može se zaključiti da kretanje jednih tela uslovljava kretanja drugih tela putem međusobne interakcije. Takođe, iz života nam je poznato da se tela koja se kreću nakon određenog vremenskog intervala zaustavljaju a vremenom u školi dođemo do saznanja da je uzrok tome pojava *trenja*. Jedan od suštinskih Njutnovih eksperimenata pri formulisanju jednog od osnovnih zakona kretanja se sastojao u ispitivanju kretanja tela na raznim podlogama. Predmeti su puštani da se kreću po njima, a pređeni put tela je zavisio od vrste podloge. No, ukoliko bismo misaono eliminisali uticaj trenja kao i svakog faktora koji onemogućava dalje kretanje tela, mogli bismo zaključiti da bi se telo kretalo beskonačno dugo, konstantnom brzinom, pravolinijskom putanjom.

Time se došlo do formulacije **Prvog Njutnovog zakona**, ili **Zakona inercije** koji nam govori da **svako telo ostaje u stanju mirovanja ili ravnomernog pravolinijskog kretanja sve dok dejstvo neke sile to stanje ne promeni**. Pojava koja se ogleda u tome da telo teži da održi stanje mirovanja ili ravnomernog pravolinijskog kretanja naziva se **inercija**. Dakle, inercija je svojstvo svakog tela. Sam zakon inercije ima univerzalan značaj za sva tela. Prvi ga je ustanovio Galilej, ali ga je Njutn uopštil među tri fundamentalna aksioma klasične mehanike.

Zakon inercije nam, dakle, govori o stanju kretanja tela kada na njega ne deluju druga tela, ili kad su njihova dejstva na posmatrano telo međusobno poništena.

Treba istaći i pojmove *mirovanja i ravnomernog* kretanja. Za ova stanja kretanja tela, Njutn je smislio da se ona odigravaju u tzv. “apsolutnom prostoru i vremenu”, gde telo prilikom kretanja menja svoj “apsolutni” položaj. Poznato je da nijedno telo u prirodi ne miruje apsolutno, tj. sva tela se u prirodi kreću, te se ne može govoriti o ikakvom izboru univerzalnog, apsolutno mirujućeg referentnog sistema. Ovo objašnjenje nije od naučnog značaja te se stoga pribegava izboru referentnog sistema u odnosu na kojeg se kretanje opisuje, a takve sisteme predstavljaju druga realna tela. Dakle, takva referentna tela se uslovno mogu smatrati nepokretnim, tako da opis kretanja jednog tela pre svega zavisi od izbora referentnog sistema. Nameće se prost zaključak: **opis kretanja tela je relativan proces**.

3.4.2. DRUGI NJUTNOV ZAKON – OSNOVNI ZAKON DINAMIKE

Prvim Njutnovim zakonom je ustanovljeno stanje kretanja tela kada na njega ne deluje sila, ili rezultanta više sila. Drugi Njutnov zakon nam, međutim, govori o stanju kretanja tela kada dejstvo sila na telo postoji. Pored toga, on uspostavlja osnovni odnos između dinamičkih i kinematičkih veličina.

Nakon uzajamnog delovanja tela, dolazi do promene njegovog vektora brzine. To bi trebalo da znači da nakon interakcije dolazi i do promene *impulsa* tela koja zavisi od promene brzine tela:

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

Njutn je primetio da je upravo ta promena impulsa u određenom vremenskom intervalu srazmerna *sili* koja je uzrok promene stanja kretanja tela.

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

Time je formulisan *Osnovni zakon dinamike* koji glasi: **Odnos promene impulsa tela i vremenskog intervala za koji se ta promena desila, jednak je sili koja deluje na telo tokom tog vremenskog intervala.** Ovo je opšta forma Drugog Njutnovog zakona.

Postoji još očiglednija forma koja bi na jednostavniji način opisala uzrok i posledicu promene stanja kretanja tela. U klasičnoj mehanici, u većini problema koji podrazumevaju proučavanje interakcije među telima, može se smatrati da su njihove mase *održane*, tj. da se ne menjaju tokom vremena. Time izraz za silu postaje:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t} = |m = \text{const.}| = m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = m\vec{a}$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

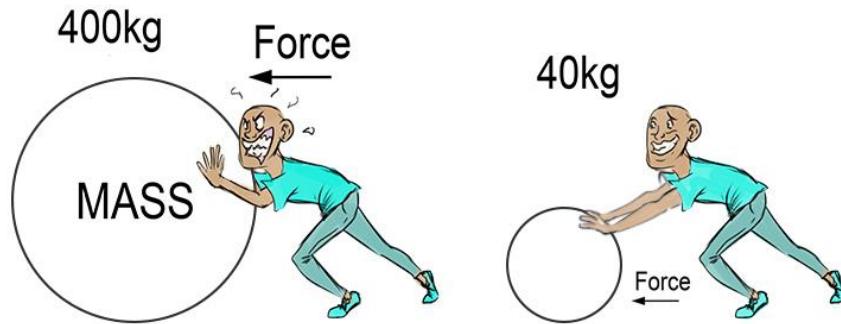
Eksperimenti potvrđuju ovaj odnos veličina (eksperiment: Verifikacija Drugog Njutnovog Zakona, 4.7.2.), te se Drugi Njutnov zakon može formulisati i na sledeći način:

Proizvod mase i ubrzanja tela je jednak rezultantnoj sili koja na to telo deluje.

Pri tome je sila proporcionalna ubrzaju i masi, a po vektorskoj analizi vidimo da vektor ubrzaja ima isti pravac i smer kao i sila. Ubrzanje je, kao što se vidi, obrnuto proporcionalno masi.

$$a \propto F ; \quad m \propto F ; \quad a \propto \frac{1}{m}$$

Sila je, dakle, **uzrok** promene stanja kretanja; ubrzanje je **posledica** te promene. Pri delovanju sile, telo počinje da se kreće ravnomerno ubrzano pravolinijski. Kao primer možemo navesti jednu očiglednu činjenicu: za telo veće mase potrebno je uložiti veću силу da bi se ono ubrzalo nego u odnosu na telo manje mase da bi se kretalo istim ubrzanjem (slika 3.20.).



Slika 3.20. Sile koje deluju na tela različitih masa koja se kreću istim ubrzanjem

Odnos intenziteta sile i ubrzanja je za dato telo uvek konstantan, stoga ovaj zakon izražava i svojstvo *inertnosti* tela.

Što se tiče dva pomenuta oblika osnovnog zakona dinamike, treba istaći da oni nisu u potpunosti ekvivalentni. Druga forma $\vec{F} = m\vec{a}$ se može primeniti pod uslovom da se masa tela ne menja. Opšta forma $\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ je univerzalna. Primeri u kojima tela menjaju svoju masu prilikom kretanja su svakako rakete koje sagorevanjem goriva poprimaju manju masu; obrnut slučaj je kretanje kiše kroz vlažnu sredinu – kapi tada “gomilaju” masu.

Ovaj zakon ima svoju analogiju i pri rotaciji tela. Tako se definiše **Osnovni zakon dinamike rotacije**. S obzirom da su korespondentne veličine sile, mase i impulsa pri rotacionom kretanju momenat sile, momenat inercije i momenat impulsa, respektivno, moguće je formirati odgovarajuće izraze, a to su:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} \Rightarrow \vec{M} = \frac{\Delta \vec{L}}{\Delta t}$$

$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{M} = I\vec{\alpha}$$

gde je $\vec{\alpha}$ ugaoano ubrzanje tela (čestice).

3.4.3. TREĆI NJUTNOV ZAKON – ZAKON AKCIJE I REAKCIJE

U prva dva osnovna zakona dinamike, objašnjene su osnovne postavke dejstva sile na telo kao i slučaj odsustva delovanja sile. U krajnjem slučaju, sila predstavlja međusobnu interakciju dva tela, što znači da oba tela deluju jedno na drugo. Nekad se delovanje jednog tela-učesnika može zanemariti; npr. sila teže nas privlači, ali i mi privlačimo Zemlju s tim da se naš uticaj može praktično zanemariti. To je jedan od univerzalnih principa – za svaku **akciju**, postoji **reakcija**, a primera tome naravno ima bezbroj, u bukvalnom smislu te reči. Ukoliko bismo pokušali da pomerimo lenjog magarca (slika 3.21.) , delovali bismo na njega određenom silom \vec{F}_{12} , ali isto tako bi on na nas delovao izvesnom silom \vec{F}_{21} . Pokazuje se da su ove sile *jednake po intenzitetu i pravcu* ali *različite* po pitanju njihovih **smerova**. U vektorskom obliku se može pisati:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

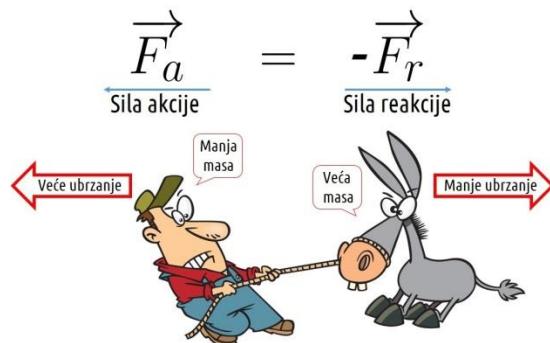
U ovom slučaju, sila kojom delujemo na magarca naziva se **sila akcije** , a druga sila kojom magarac deluje na nas naziva se **sila reakcije**. Gornja jednakost se može napisati i različitim simbolima:

$$\vec{F}_a = -\vec{F}_r$$

Time se može formulisati Treći Njutnov zakon ili **Zakon akcije i reakcije** koji kaže:

Uzajamno dejstvo dva tela je jednak po intenzitetu a različito po smeru.

Po Drugom Njutnovom zakonu, telo sa manjom masom dobija veće ubrzanje i obrnuto, telo sa većom masom dobija manje ubrzanje.



Slika 3.21. Sile akcije i reakcije

Zakon akcije i reakcije nam govori da se ove dve sile uvek pojavljuju u paru, iste su prirode i zajedno nestaju nakon interakcije. Takođe, ove se sile ne mogu poništiti jer deluju na različita tela – mehanika nam govori da se sile mogu kompenzovati samo ukoliko deluju na isto telo.

3.5. GALILEJEV PRINCIP RELATIVNOSTI KRETANJA

3.5.1. INERCIJALNI I NEINERCIJALNI SISTEMI REFERENCIJE, INERCIJALNA SILA

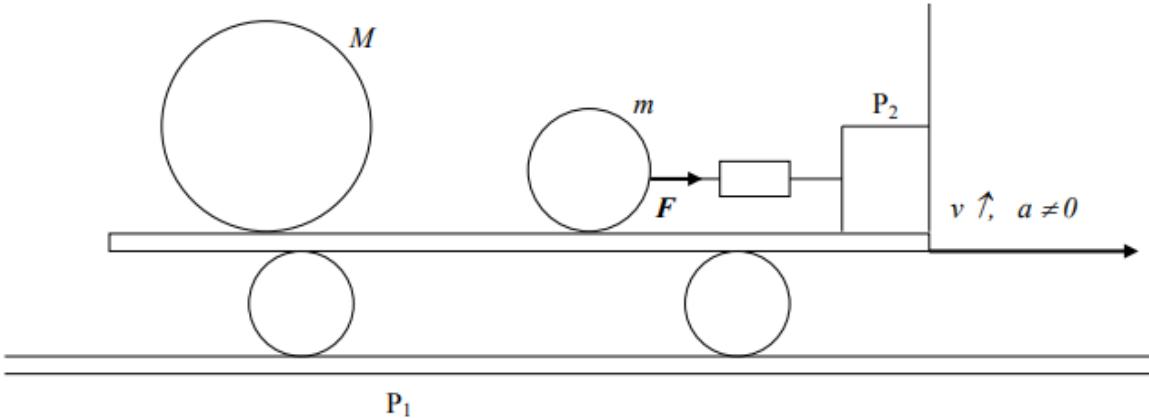
Zakon inercije nam govori o svojstvu tela, odnosno njegovo težnji da održi stanje mirovanja ili jednoliko pravolinijskog kretanja. Ono što nam Zakon inercije ne govori, jeste u odnosu na koji referentni sistem se posmatrano telo nalazi u ovim stanjima. Kao što je istaknuto više puta, kretanje je relativna pojava i opis kretanja posmatranog tela pre svega zavisi od perspektive posmatrača. Pre svega, napomenimo da su eksperimenti u transportnim vozilima najpogodniji za ispitivanje sledećih problema.

Na primer, ukoliko bismo se vozili autoputem ravnomerno pravolinijski, i ako bi se pored nas istom brzinom krećao drugi automobil, mogli bismo možda reći da naš automobil miruje u odnosu na drugi. Pogledom kroz prozor, konstatovali bismo možda da se razni objekti poput drveća, stubova ili zgrada kreću ravnomerno unazad, a da opet, mi mirujemo. Ali, dovoljno smo mudri da znamo iz iskustva da se u stvari naš automobil kreće a mi zajedno sa njim. Mi možemo vezati sistem za takva tela koja se ili kreću ravnomerno ili (relativno) miruju kao što je u ovom slučaju: naš auto, auto pored nas, objekti koji miruju pored nas, itd. **Takvi referentni sistemi, u kojima važi Zakon inercije nazivaju se inercijalni referentni sistemi.** Treba istaći da su referentni sistemi koji se ravnomerno pravolinijski kreću ili se nalaze u stanju mirovanja u odnosu na neki inercijalni sistem takođe inercijalni. Inercijalnost u prirodi se sreće na primer kod heliocentričnog koordinatnog sistema.

Zamislimo sada da smo stali na benzinskoj pumpi, da se malo odmorimo i da izvršimo još jedan eksperiment. Mi u odnosu na benzinsku pumpu mirujemo. Neka nam iz suprotног smera prilazi autobus sa izvesnim ubrzanjem. Putnici u autobusu bi registrovali da se mi krećemo u suprotnom smeru određenim ubrzanjem, a da oni miruju u odnosu na autobus. Dakle, za posmatrača iz sistema koji se kreće ubrzano ne važi Zakon inercije, pa se stoga takvi referentni sistemi nazivaju **neinercijalnim referentnim sistemima.** Dakle, **neinercijalni referentni sistem je onaj referentni sistem koji se u odnosu na neki inercijalni sistem kreće ubrzano.**

Eksperimentalno je ustanovljeno da ne postoji nijedna mehanička pojava koja bi posmatraču iz nekog inercijalnog sistema pomogla da odgovori na pitanje da li se on kreće ravnomerno ili je u stanju mirovanja. Možemo se poslužiti primerom matematičkog klatna, koje bi na isti način oscilovalo bilo da se nalazi u stanju mirovanja na Zemlji ili u nekom transportnom vozilu koje se kreće ravnomerno. Dakle, *ne može* se napraviti razlika između ovih stanja kretanja. Ovaj princip se naziva **Galilejev princip relativnosti kretanja** koji kaže: **U svim inercijalnim sistemima referencije, mehaničke pojave se manifestuju na istovetan način.** Ovaj princip govori i o primenljivosti osnovnih zakona mehanike na inercijalne sisteme, odnosno da oni ne zavise od izbora inercijalnog sistema kao i to da u njima imaju isti oblik.

Postavlja se pitanje: šta se događa sa mehaničkim pojavama u neinercijalnim sistemima? Razmotrimo sledeći standardni eksperiment.



Slika 3.22. Provera zakona dinamike u neinercijalnim sistemima

Posmatrajmo vagon (slika 3.22.) koji na sebi ima sledeće komponente: dva tela (kugle) sa masama M i m , i klupu na kojoj sedi posmatrač P_2 neinercijalnog sistema (vagon se ubrzano kreće sa ubrzanjem \vec{a}). Klupa je dinamometrom povezana za telo mase m . Radi pojednostavljenja problema možemo smatrati da između ovih tela i poda vagona nema trenja. Pored šina po kojima se vagon kreće, nalazi se posmatrač inercijalnog sistema P_1 koji miruje u odnosu na Zemlju. Kako će posmatrači opisati kretanje vagona i njegovih komponenata? Posmatrač u inercijalnom sistemu P_1 tvrdi da telo M miruje u odnosu na prugu dok se telo m kreće ubrzano zajedno sa vagonom. Posmatrač u vagonu, u neinercijalnom sistemu P_2 tvrdi da se telo M ubrzano kreće ka zadnjem delu vagona dok telo m miruje u odnosu na vagon. Ono što je zanimljivo da oba posmatrača vide da dinamometar pokazuje određenu vrednost sile. Za posmatrača P_1 važe Prvi i Drugi Njutnov zakon, odnosno, na telo m deluje elastična sila opruge dinamometra te dinamometar pokazuje meru te sile, a na telo M ne deluje nijedna sila pa ono ostaje "u mestu". Posmatrač P_2 konstatiše da u njegovom opisu kretanja tela ne funkcionišu zakoni dinamike: telo m miruje u odnosu na vagon iako dinamometar pokazuje vrednost elastične sile, dok se telo M kreće ubrzano unazad iako na njega ne deluju sile. U opisanom eksperimentu nameće se zaključak da *zakoni dinamike ne važe u neinercijalnim referentnim sistemima*.

Naravno, opšti zakoni kretanja tela se ne mogu izopštiti iz prostog razloga zato što su univerzalne prirode, te se pribeglo varijanti "štimovanja" osnovnih zakona dinamike vezanih za neinercijalne sisteme. Došlo se do zamisli da bi trebalo proširiti pojam sile i uvesti novi mehanizam pri objašnjenju ovog problema, a to jeste **inercijalna sila**. Dakle ove sile nisu *prave*, u smislu da nisu manifestovane uzajamnim delovanjem tela već su okarakterisane sistemom koji se kreće ubrzano. Zato se inercijalne sile nazivaju još i *fiktivnim silama*.

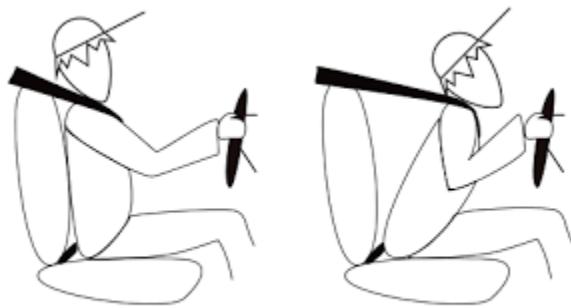
Dakle, u neinercijalnom sistemu referencije deluje i sila inercije koja je posledica ubrzanja neinercijalnog referentnog sistema. Sila inercije se za dato telo koje se nalazi u takvom sistemu definiše, po Drugom Njutnovom zakonu kao **proizvod mase tela i ubrzanja neinercijalnog sistema**, pri čemu je njen smer kretanja suprotan smeru kretanja sistema:

$$\vec{F}_i = -m\vec{a}$$

Dakle, **inercijalne sile postoje samo u neinercijalnim sistemima**. Ukoliko na telo koje se nalazi u neinercijalnom sistemu deluju i realne sile, onda pri formulaciji Drugog Njutnovog zakona u ovom slučaju uzimamo u obzir njihovu rezultantu, pri čemu telu može biti saopšteno ubrzanje \vec{a}_i u odnosu na neinercijalni sistem. Stoga, zakon sile je:

$$\vec{F} + \vec{F}_i = m\vec{a}_i$$

Primer za “delovanje” inercijalne sile možemo opet videti u transportnim vozilima koji se kreću ubrzano. Pri završetku eksperimenta na benzinskoj pumpi, postali smo vrlo umorni i nevoljno smo zaspali. Međutim, kada smo se probudili, shvatili smo da ćemo zakasniti na koncert na koji smo krenuli. Upalili smo automobil i hitro krenuli ka odredištu. Ubrzavajući, osetili bismo “nešto” da nas “lepi” za sedišta; usporavajući zbog neravnina na putu (ili nesretnе životinjice), osetili bismo da nas isto to “nešto” gura napred (slika 3.23.). Upravo to “nešto” jeste dejstvo inercijalne sile. Iz perspektive posmatrača koji stoji pored puta, to bi bila težnja naših tela da održimo stanje relativnog mirovanja, odnosno ravnomernog pravolinijskog kretanja. Primer inercijalne sile pri kružnom kretanju jeste – centrifugalna sila.



Slika 3.23. Dejstvo inercijalne sile u vozilu pri ubrzaju (levo) i usporenu (desno)

4. EKSPERIMENTI

U ovom poglavlju će biti nabrojani eksperimenti koji demonstriraju osnovne dinamičke veličine i osnovne zakone dinamike. Eksperimenti koji inače “ne pripadaju” ovde su vezani za impuls i momenat impulsa jer te veličine ima smisla demonstrirati u kontekstu *zakona održanja*, a to je posebna celina koja se po planu i programu srednje škole razrađuje nakon celine “dinamika”.

SILA:

- 1) Sila – translatorno i rotaciono kretanje tela
- 2) Sila trenja – ispitivanje karakteristika
- 3) Sila otpora sredine – Koji će papir pre pasti?
- 4) Sila elastičnosti – Zavisnost sile deformacije od izduženja opruge
- 5) Centripetalna sila – Vrištajući balon

MOMENAT SILE:

- 6) Momenat sile otvaranja vrata

MASA:

- 7) Merenje mase terazijama

MOMENAT INERCIJE:

- 8) Momenat inercije tela

IMPULS:

- 9) Sudar novčića

MOMENAT IMPULSA:

- 10) Magično obrtanje (zakon održanja momenat impulsa)

OSNOVNI ZAKONI DINAMIKE:

- 11) Prvi Njutnov Zakon – Novčić, papir, čaša
- 12) Drugi Njutnov Zakon – Verifikacija Drugog Njutnovog Zakona
- 13) Treći Njutnov Zakon – Prosta mašina

4.1. SILA

4.1.1. Translatorno i rotaciono kretanje tela

Teorijsko poglavlje: *Uzajamno delovanje tela; sila i momenat sile 3.1.*

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni.

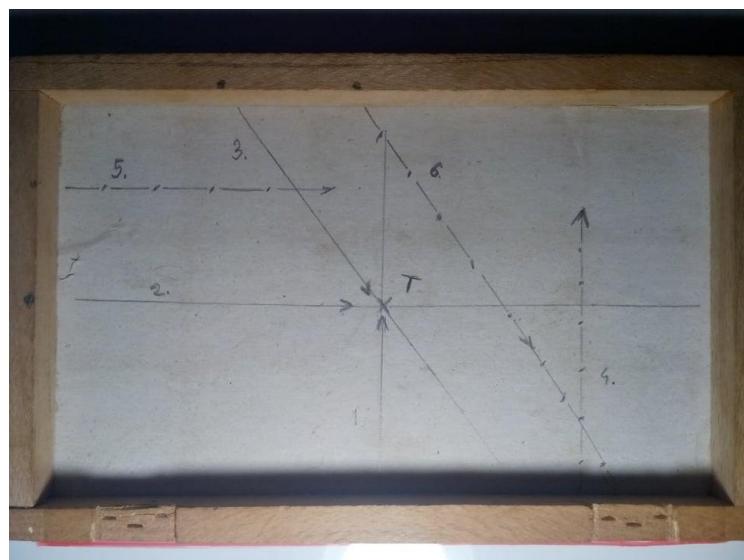
Potreban materijal: Telo sa pravim stranicama (npr. poklopac od drvene kutije ili tvrdo ukoričena sveska); marker ili olovka za obeležavanje i funkcionalan prst.

Izvođenje eksperimenta: Najpre naći i obeležiti težište tela predmeta (slika 4.1.).



Slika 4.1. Intuitivno određivanje težišta tela

Uspravljenim prstom delovati silom na obod predmeta u dva slučaja: kada se pravac primenjene sile poklapa sa težištem i kada se pravac sile poklapa sa težištem. Olovkom iscrtati pravce delovanja sila na predmetu. U ovom prikazu eksperimenta imamo 6 pravaca delovanja: na sredini manje stranice, na sredini veće, pravac "ukoso" koji prolazi kroz težište tela, kao i 3 pravca paralelnim pomenutim pravcima (koji ne prolaze kroz težište tela). Na slici 4.2. su ovi pravci kao i tačka težišta, obeleženi olovkom. Dakle, treba voditi računa da prst kojim delujemo na telo bude u istom pravcu kao i nacrtane linije.



Slika 4.2. Proizvoljni pravci delovanja sila i težište tela (tačka T)

Posmatrati kretanje tela izazvanog primenjenim silama.

Objašnjenje: U prvom slučaju, kada se pravac dejstva sile poklapa sa tačkom težišta tela – predmet se pokreće translatorno, u drugom (suprotnom) slučaju – rotaciono. U drugom slučaju se ispunjava uslov za formiranje *momenta* primenjene *sile* koji je zaslužan za rotaciono kretanje tela, jer bitnu ulogu igra i sila teže čija je napadna tačka težište tela.

Vreme izvođenja u nastavi: Tokom izlaganja celina “Dinamika rotacije” i “Momenat sile”. Ovaj eksperiment se može izvesti na početku časa.

Značaj eksperimenta: Eksperiment se ogleda u povezivanju pojma *momenat sile* sa prethodno usvojenim pojmom *sila*. Takođe, eksperiment služi i kao uvid kada se telo pokreće na translaciju a kada na rotaciju.

4.1.2. Sila trenja – ispitivanje karakteristika

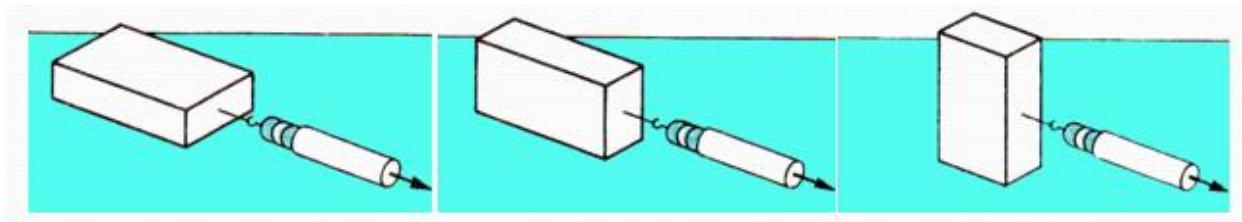
Teorijsko poglavlje: *Neki primeri sila od značaja za eksperimente 3.1.1.*

Vrsta eksperimenta: Kvantitativni.

Potreban materijal: Dinamometar, predmet u obliku kvadra, tanki konopac (nije neophodan), podloge od plastike, stakla i drveta, tegovi.

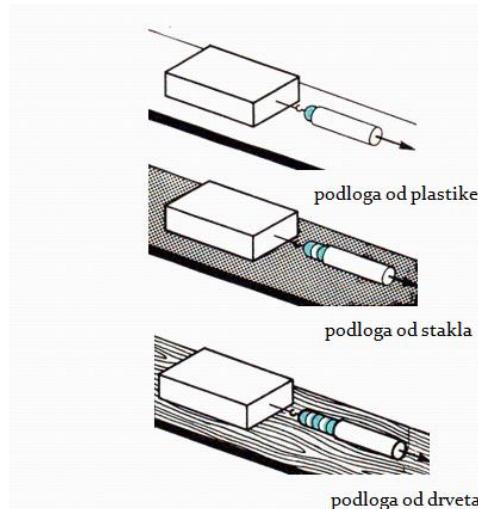
Izvođenje eksperimenta: Podeljeno je u tri etape.

- I etapa: Dinamometar prikačiti na predmet u centru svih bočnih površina predmeta, na tri različita načina (slika 4.3.). Ako predmet nema "rekvizite" preko kojih bi se dinamometar mogao zakačiti, iskoristiti tanak konopac. Izmeriti silu trenja u sva tri slučaja prilikom kretanja tela na jednoj podlozi i uporediti rezultate.



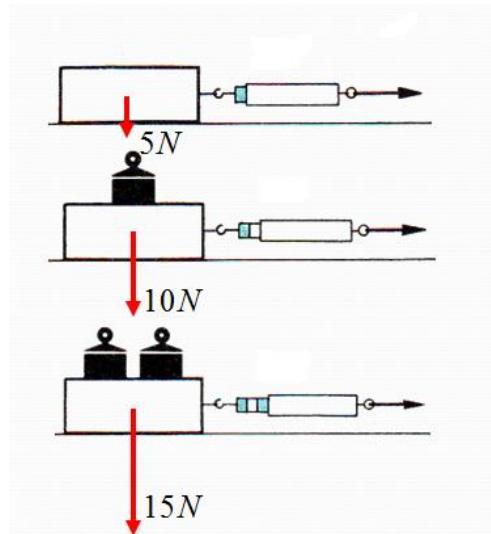
Slika 4.3. Kretanje tela pri različitim dodirnim površinama

- II etapa: Izmeriti silu trenja koja deluje na telo pri njegovom kretanju po različitim podlogama: plastika, staklo i drvo (slika 4.4.). Uporediti rezultate.



Slika 4.4. Kretanje tela po različitim podlogama

- III etapa: Uzeti u obzir rezultate sile trenja u prvoj etapi. Zatim, dodavati tegove na predmet (slika 4.5.). Pri svakom dodavanju mase, meriti vrednosti sile trenja i uporediti rezultate.



Slika 4.5. Ispitivanje zavisnosti sile trenja od težine

Objašnjenje: U prvoj etapi imamo slučaj ispitivanja sile trenja klizanja pri različitim dodirnim površinama tela sa podlogom. Rečeno je da intenzitet ove sile *ne zavisi* od pomenute površine. Zaključak: potpuno je svejedno u kom položaju tela čemo meriti intenzitet sile trenja.

U drugoj etapi, ispituje se sila trenja po podlogama različite vrste. Ova sila *zavisi* od prirode podloge. Zaključak: tri izmerene vrednosti sile trenja na ovim podlogama će biti različite.

U trećoj etapi se utvrđuje zavisnost sile trenja od težine tela. Zaključak: sva merenja sile trenja pri svakom dodavanju tegova će biti različita.

Vreme izvodenja u nastavi: Prilikom izlaganja celine “Trenje, sile trenja mirovanja, klizanja i kotrljanja”. Moguće je izvođenje eksperimenta u toku teorijskog izlaganja.

Značaj eksperimenta: Ukoliko se eksperiment izvede u toku izlaganja, učenici imaju prilike da na licu mesta vide neka opšta svojstva pojave trenja. Takođe, eksperiment je izuzetno jednostavan, tako da ga i učenici sami mogu izvoditi i konstruisati zaključke.

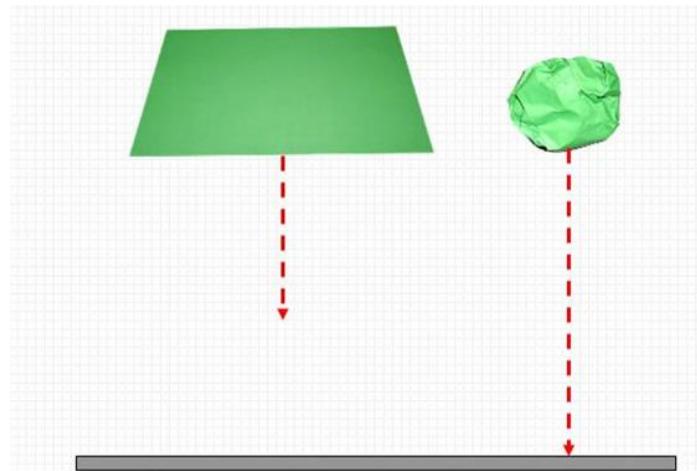
4.1.3. Sila otpora sredine – Koji će papir pre pasti?

Teorijsko poglavlje: Neki primeri sila od značaja za eksperimente 3.1.1.

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni ili kvantitativni.

Potreban materijal: dva identična papira ili jedan papir i štopericu.

Izvođenje eksperimenta: Prvi način – uzeti dva identična lista papira (nebitno kog formata, bitno je da su identični po masi i dimenzijama). Jedan list zgužvati a drugog ostaviti u normalnom stanju (slika 4.6.). Istovremeno ih baciti sa iste visine i prodiskutovati rezultate.



Slika 4.6. Papiri u normalnom i zgužvanom stanju

Drugi način – da bi se izbegla sumnja da se ovde radi o dva neidentična lista papira, moguće je iskoristiti samo jedan list i štopericu. Tako ovaj eksperiment postaje kvantitativnog karaktera. Najpre se list u normalnom stanju pušta sa određene visine, a pri tome se meri vreme za koje je potrebno da papir padne na pod. Isti list se zatim zgužva, pa se procedura ponovi.

Objašnjenje: Rečeno je da je sila otpora sredine proporcionalna čeonoj površini tela koje se kreće kroz nju. List papira u zgužvanom stanju ima manju čeonu površinu od lista u normalnom stanju. Zaključuje se da papir u zgužvanom obliku ima veću brzinu i pre pada na pod nego kada je normalnog oblika iz razloga što ispod njega ima manje vazduha za "savlađivanje". List papira u normalnom obliku pruža veći otpor nego u zgužvanom.

Vreme izvođenja u nastavi: Prilikom izlaganja celine vezane za silu trenja. Moguće je izvesti eksperiment u toku objašnjavanja sile otpora sredine.

Značaj eksperimenta: Eksperiment demonstrira opštu zavisnost otpora sredine od čeone površine tela.

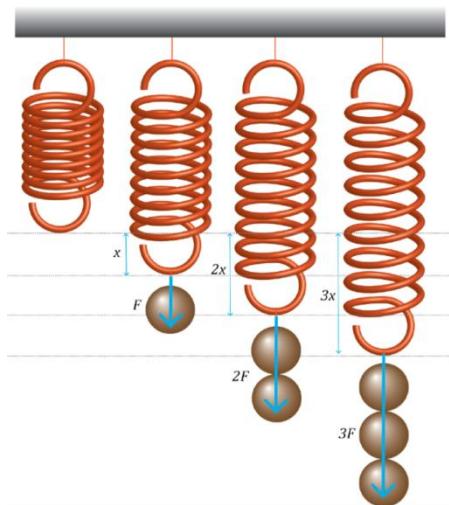
4.1.4. Sila elastične opruge – Zavisnost sile deformacije opruge od njenog izduženja

Teorijsko poglavlje: Neki primeri sila od značaja za eksperimente 3.1.1.

Vrsta eksperimenta: Kvantitativni.

Potreban materijal: Elastična metalna opruga, 3-5 tegova jednake mase, vertikalna skala dužine (nije neophodna) ili marker za obeležavanje položaja.

Izvođenje eksperimenta: Najpre treba postaviti oprugu u vertikalni položaj i obeležiti na pozadini (ili zapisati podatak sa skale dužine postavljene pored opruge) položaj njenog slobodnog kraja. Zatim, potrebno je obesiti teg određene mase za oprugu, obeležiti trenutni položaj njenog kraja i izračunati vrednost sile elastičnosti. Postupak ponoviti dodavanjem jednog po jednog tega identičnih masa (slika 4.7.). Napraviti tabelu i grafik zavisnosti sile elastičnosti opruge i njenog izduženja.

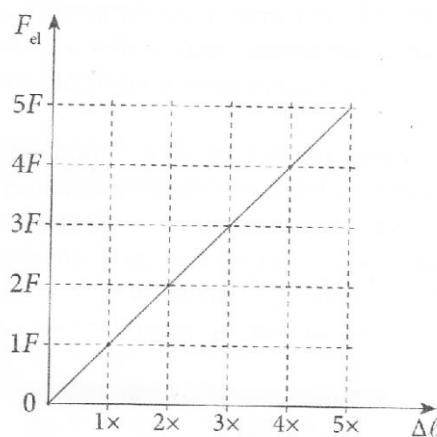


Slika 4.7. Istezanje opruge

Objašnjenje: Opruga se isteže sve dok se sila Zemljine teže koja deluje na obešeni teg i sila elastičnosti opruge ne uravnoteže. To znači da su tada ove dve sile jednake po intenzitetu i pravcu a različite po smeru i tada opruga miruje. S obzirom da se svakim narednim vešanjem ekvivalentnih masa, opruga isteže za isti podeljak (izduženje), logično je zaključiti da je sila elastičnosti opruge direktno proporcionalna njenom izduženju. Na primer, u prvom vešanju imamo dejstvo određene sile F i izduženje x ; u drugom vešanju dvostruko veću silu $2F$ i izduženje $2x$; u trećem trostruku veću silu i izduženje, itd. Primer tabele rezultata je dat u tabeli 4.1. a grafik linearne zavisnosti ovih veličina je dat na slici 4.8.

broj tegova	intenzitet sile elastičnosti F_{el}	izduženje Δl
0	0	0
1	1 F	1 x
2	2 F	2 x
3	3 F	3 x
4	4 F	4 x
5	5 F	5 x

Tabela 4.1. Uprošćen primer rezultata merenja



Slika 4.8. Grafik linearne zavisnosti F_{el} od Δl

Vreme izvođenja u nastavi: Pri obradi teme “Uzajamno delovanje tela – sila” kada se napominju vrste sila. Eksperiment je moguće izvršiti pre izlaganja o spomenutoj zavisnosti.

Značaj eksperimenta: Učenici stiču uvid o zavisnosti izduženja opruge od primenjene sile.

4.1.5. Centripetalna sila – Vrištajući balon

Teorijsko poglavlje: Neki primeri sila od značaja za eksperimente 3.1.1.

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni.

Potreban materijal: Običan providan balon, mali metalni predmet (npr. matica za šraf).

Izvođenje eksperimenta: Najpre staviti mali predmet u balon. Zatim naduvati balon i vrteti ga tako da predmet rotira po njegovoj unutrašnjosti (slika 4.9.).



Slika 4.9. Vrištajući balon

Objašnjenje: Pri kretanju našeg malog predmeta po unutrašnjosti balona, na njega deluje centripetalna sila usmerena ka centru krivine po kojoj se kreće. Posmatranje možemo tumačiti i iz perspektive neinercijalnog sistema koji ubrzano rotira – balona, pri čemu se javlja “dejstvo” centrifugalne sile, koja teži da odvuče predmet iz balona. Međutim, zidovi balona sprečavaju predmet da odleti, te predmet “surfuje” po njima.

Vreme izvođenja u nastavi: Prilikom obrade teme “Centripetalna sila”. Eksperiment je najbolje vršiti nakon izloženog teorijskog izlaganja.

Značaj eksperimenta: Zbog svoje jednostavnosti i zvučnih efekata, ovaj ogled je jedan od najboljih za demonstraciju rotacionog kretanja i centripetalne sile.

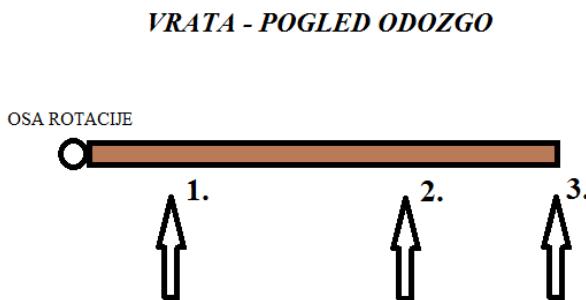
4.2. MOMENAT SILE – Momenat sile otvaranja vrata

Teorijsko poglavlje: *Uzajamno delovanje tela, sila i momenat sile 3.1.*

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni.

Potreban materijal: Vrata, funkcionalna ruka.

Izvođenje eksperimenta: Kretanje vrata je klasičan primer rotacije tela oko nepokretnе ose. Prvo otvoriti vrata i osigurati da mogu da se pomeraju. U prvom slučaju, potrebno je gurati vrata od sebe gde napadna tačka treba da je blizu ose rotacije. U drugom slučaju, gurati vrata bliže ivici. U trećem slučaju, gurati vrata na samoj ivici. Eksperiment je prikazan na slici 4.10. U sva tri slučaja pokušati da se deluje istom silom normalnom na osu rotacije dok napadne tačke mogu biti proizvoljne (u granicama ovog uputstva). U kojem položaju ćemo najlakše pokrenuti vrata?



Slika 4.10. Vrata (pogled odozgo)

Objašnjenje: Treći slučaj je sasvim sigurno najpovoljniji. Za rotaciju vrata oko ose zaslužan je *momenat sile*, a on je u trećem slučaju najveći pod uslovom da smo na vrata u sva tri slučaja delovali silom istog intenziteta.

Vreme izvođenja u nastavi: Pri obradi teme “Dinamika rotacije” i “Momenat sile”, gde se ovaj eksperiment može realizovati nakon izložene teorije.

Značaj eksperimenta: Vrlo jednostavan eksperiment koji verno demonstrira ponašanje momenta sile.

4.3. MASA – Merenje mase terazijama

Teorijsko poglavlje: *Masa i momenat inercije 3.2.*

Vrsta eksperimenta: Kvantitativni.

Potreban materijal: Terazije, razni predmeti manjih dimenzija.

Izvođenje eksperimenta: Terazije (slika 4.11.), metod poređenja – o jedan tas terazija staviti predmet čija se masa želi izmeriti; stavljati kontraopterećenje dokle god tasovi ne budu u ravnoteži. Tada je zbir masa svih tegova na drugom tasu pri ravnoteži terazija jednaka masi posmatranog predmeta. Zatim, izmeriti masu drugog predmeta po istoj proceduri. Onda, staviti oba predmeta na jedan tas terazija, izračunati njihovu masu i uporediti sa zbirom masa oba predmeta dobijenim iz pojedinačnih merenja.



Slika 4.11. Terazije

Objašnjenje: Masa je aditivna veličina, stoga ako na tas dodajemo nova tela, masa sistema tela će se ravnomerno povećavati za iznose masa “novoprdošlih” tela.

Vreme izvođenja u nastavi: Pri obradi teme “Masa tela”. Eksperiment je poželjno izvoditi nakon izložene teorije.

Značaj eksperimenta: Ovim jednostavnim eksperimentom, učenici imaju uvid o aditivnom karakteru mase i stiču elementarno iskustvo o tehnici merenja mase metodom poređenja.

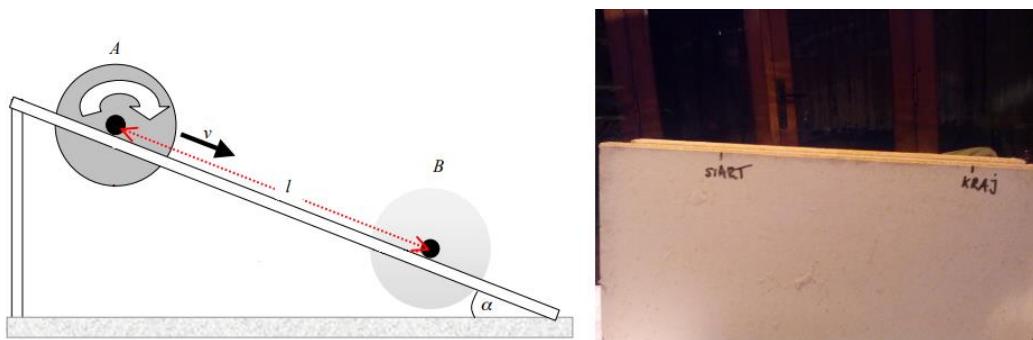
4.4. MOMENAT INERCIJE – Upoređivanje momenata inercije

Teorijsko poglavlje: Masa i momenat inercije 3.2.

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni i kvantitativni.

Potreban materijal: 5-6 CD-ova (kompakt diskova), predmet u obliku cilindra koji se može provući kroz rupu CD-a, selotejp, strma ravan sa usekom, štoperica.

Izvođenje eksperimenta: Na strmu ravan najpre obeležiti "start" (A) i "kraj" (B) položaje (slika 4.12.).



Slika 4.12. Kretanje rotirajućeg tela niz strmu ravan

Prvo pustiti manji predmet u obliku cilindra da se kotrlja niz strmu ravan pri tom mereći vreme koje je mu je potrebno da pređe od tačke starta do tačke kraja. Mali cilindar i njegovo postavljanje na start su prikazani na slici 4.13.



Slika 4.13. Mali cilindar i postavljanje na start položaj

Zatim, cilindar treba provući kroz CD-ove koji su zapepljeni selotejpom, i to tako, da se sistem CD-ova nalazi na sredini cilindra. Ponoviti postupak merenja vremena za ovakav sistem tela (slika 4.14.).



Slika 4.14. Sistem tela (cilindar + CD-ovi) i njegovo postavljanje na start položaj

Napomena: u eksperimentu je korišćena lepljiva traka, kako bi popunila prostor između cilindra i CD-ova.

Objašnjenje: Rečeno je da je momenat inercije mera inertnosti tela pri rotaciji. Nakon izvršenih merenja vremena, može se zaključiti da je samom cilindru (bez CD-ova) potrebno mnogo manje vremena da pređe odgovarajuću distancu, dok je za sistem tela (cilindar + CD-ovi) potrebno duže vreme da se ta masa ubrza. Dakle, i pri translaciji. i pri rotaciji, inertnija tela “sporije prihvataju” promenu stanja kretanja. Što je rotirajuće telo masivnije i veće po svom radijusu, veći je i momenat inercije tela.

Napomena: Pre svega, prikaz ovog eksperimenta u ovom radu ima veliki manjak estetike. Dalje, u eksperimentu je postignuto: strma ravan sa nagibom od $\alpha \approx 16^\circ$; rastojanje od tačke starta do tačke kraja $l \approx 20 \text{ cm}$; prosečno vreme prolaska cilindra između pomenutih tačaka je u okviru 1s , dok je prosečno vreme prolaska kombinovanog sistema tela u okviru 6s .

Vreme izvođenja u nastavi: Tokom obrade teme “Dinamika rotacije” i “Momenat inercije”. Eksperiment je najbolje izvesti nakon izložene teorije.

Značaj eksperimenta: Ovim eksperimentom se stiče uvid o meri inertnosti tela pri njegovoj rotaciji.

4.5. IMPULS – Sudar novčića

Teorijsko poglavlje: *Impuls i momenat impulsa* 3.3.

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni.

Potreban materijal: 5 identičnih novčića.

Izvođenje eksperimenta: Podeljeno u 4 etape.

- I etapa: Uzeti dva identična novčića. Jedan treba da se nalazi u stanju mirovanja, a drugog puštamo da se sudari sa prvim (slika 4.15)



Slika 4.15. Prva etapa

- II etapa: Uzeti pet identičnih novčića, pri čemu su četiri poređani u niz i u fizičkom su kontaktu (slika 4.16). Ponoviti proces sudara jednim novčićem, na ovakav sistem tela.



Slika 4.16. Druga etapa

- III etapa: Ista postavka kao i u etapi II, s tom razlikom što su četiri novčića u stanju mirovanja između sebe razmaknuti za određeno rastojanje (slika 4.17.).



Slika 4.17. Treća etapa

- IVa etapa: Uzeti dva nepokretna novčića u kontaktu, i fiksirati jedan (sa desne strane) prstom (slika 4.18.). Ponoviti sudar tako da novčić udari u fiksirani nepokretni novčić.



Slika 4.18. Četvrta (a) etapa

- IVb etapa: Ista postavka kao i u etapi IVa , s tim što imamo sistem od tri nepokretna novčića od kojih je jedan (sa desne strane) fiksiran prstom. Ovog puta vršimo sudar sa dva “aktivna” novčića (slika 4.19.).



Slika 4.19. Četvrta (b) etapa

Objašnjenje: U prvoj etapi aktivni novčić će udariti u novčić koji miruje, izgubiti na brzini i stati, dok će novčić u mirovanju nastaviti kretanje – predaja impulsa.

U drugoj etapi dolazi do predaje impulsa aktivnog novčića prvom novčiću u nizu, prvi predaje preuzeti impuls drugom, drugi trećem, itd. Tako, poslednji novčić u nizu nastavlja kretanje.

U trećoj etapi, postavka i rezultat su slični, s tim što novčić koji primi impuls od aktivnog novčića se kreće, sudara se sa susednim u nizu i predaje mu impuls; isto to se dešava i sa drugim i trećim novčićem itd. Dakle, ovde dolazi do predaje impulsa lančanim sudarom.

U četvrtoj etapi imamo dve varijante izvođenja. Fiksirani novčić se prilikom sudara ne pomera, stoga on prenosi impuls novčiću iza njega (sa leve strane) gde isti nastavlja kretanje. Iz obe varijante se može zaključiti da na kraju niza, nastavlja kretanje onaj broj novčića koliko ih je aktivnih delovalo na niz. Dakle u IVa, samo jedan nastavlja kretanje, a u IVb dva.

Na slici 4.20. su dati rezultati ogleda po svim etapama.



Slika 4.20. Rezultati eksperimenta

Vreme izvođenja u nastavi: Obrada teme “Masa i impuls” i “Zakon održanja impulsa”. Eksperiment je bolje izvesti nakon usmenog izlaganja.

Značaj eksperimenta: Ovim eksperimentom se demonstrira “prenošenje” impulsa sa jednog tela na druga.

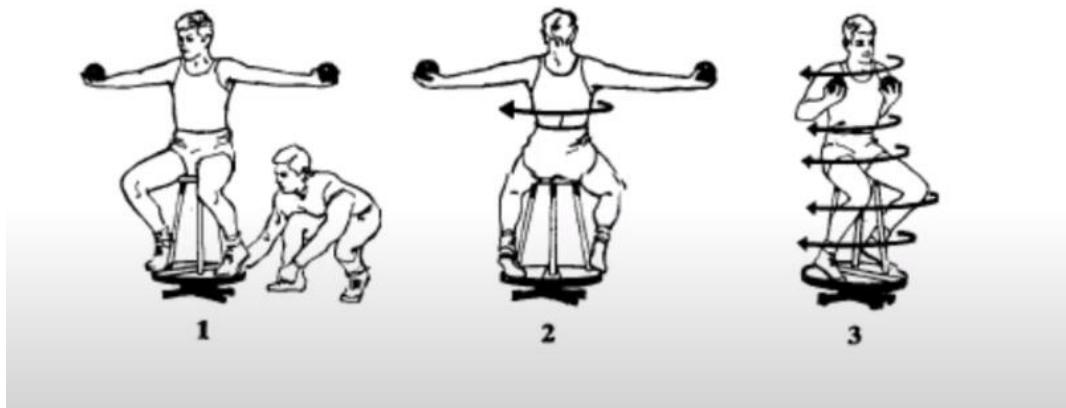
4.6. MOMENAT IMPULSA – Magično obrtanje

Teorijsko poglavlje: *Impuls i momenat impulsa 3.3.*

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni.

Potreban materijal: Stolica ili postolje koje može da se obrće, tegovi.

Izvođenje eksperimenta: Najpre je potrebno sesti na stolicu i zavrteti se (uglavnom uz pomoć drugih). U početku, sa tegovima u rukama, raširiti ruke (položaj 1 na slici 4.21). Vrteti se dve-tri revolucije a zatim skupiti ruke ka sebi (položaj 3).



Slika 4.21. Postavka i koraci eksperimenta

Objašnjenje: U početnom trenutku, vrteći se određenom ugaonom brzinom, raširili smo ruke sa tegovima (položaj 1) dostigavši maksimalnu vrednost momenta inercije i tako definisali momenat impulsa rotirajućeg sistema. Zatim smo posle par revolucija primakli ruke ka sebi, tako smanjivši momenat inercije. Pošto momenat impulsa sistema tela koji je saopšten u početnom trenutku mora biti održan, ugaona brzina se povećala, te smo počeli brže da se vrtimo.

Vreme izvođenja u nastavi: Obrada teme “Zakon održanja momenta impulsa”. Eksperiment je najbolje izvesti posle izlaganja.

Značaj eksperimenta: Jednostavan eksperiment koji demonstrira zakon održanja momenta impulsa. Za učenike je ovo posebno zanimljiv eksperiment, s obzirom na njegovu dinamiku. Takođe, ovaj eksperiment pomaže učenicima u povezivanju fizičkih veličina momenta impulsa, momenta inercije i ugaone brzine.

4.7. OSNOVNI ZAKONI DINAMIKE

4.7.1. Prvi Njutnov Zakon – Novčić, papir, čaša

Teorijsko poglavlje: *Prvi Njutnov Zakon – Zakon inercije 3.4.1.*

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni.

Potreban materijal: Novčić, papir ili kartončić, providna staklena čaša.

Izvođenje eksperimenta: Prvo, na čašu je potrebno staviti papir ili karton manjih dimenzija (npr. razglednica), bitno je da prekrije čašu. A na čašu se stavlja novčić. Onda, polako privlačiti papir ka sebi (slika 4.22.).



Slika 4.22. Privlačenje papira i novčića ka sebi

Zatim, vratiti sistem u prvobitno stanje i impulsnim udarom prsta ili “čvogerom” delovati na papir (slika 4.23.).



Slika 4.23. Pred delovanje na papir

Objašnjenje: U prvom slučaju, kada polako primačemo papir sa novčićem na sebi, novčić se kreće zajedno sa papirom jer primenjena sila nije nadjačala trenje između papira i novčića. Međutim, u drugom slučaju (slika 4.24.), impulsnim udarom mi saopštavamo papiru ubrzanje odnosno delujemo silom koja savlađuje силу trenja, te se papir počinje kretati a novčić ostaje u mestu i pada u čašu pod uticajem gravitacije.



Slika 4.24. Pad novčića u čašu

Vreme izvođenja u nastavi: Ovaj ogled se može demonstrirati u okviru tema “Prvi Njutnov Zakon” i “Inercijalni i neinercijalni sistemi referencije, Inercijalna sila”. Eksperiment je moguće izvoditi pre ili nakon usmenog izlaganja.

Značaj eksperimenta: Jednostavan eksperiment koji na jednostavan način demonstrira težnju tela da održi stanje mirovanja. Takođe, pogodan je i za objašnjenje inercijalne sile u neinercijalnom sistemu referencije.

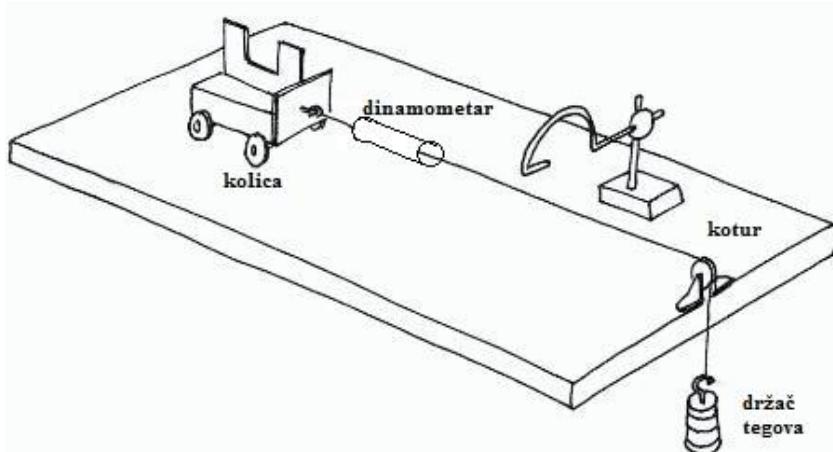
4.7.2. Drugi Njutnov Zakon – Verifikacija Drugog Njutnovog Zakona

Teorijsko poglavlje: Drugi Njutnov Zakon – Osnovni zakon dinamike 3.4.2.

Vrsta eksperimenta: Kvantitativni.

Potreban materijal: sto, kotur, neistegljivi konac, dinamometar (nije neophodan), kolica poznate mase, tegovi poznatih masa.

Izvođenje i objašnjenje eksperimenta: Na slici 4.25. , prikazan je izgled aparature koja se koristi pri ovom demonstracionom eksperimentu. Kolica su koncem povezana preko kotura sa držačem tegova. Na kolica je moguće stavljati tegove poznatih masa jer to osigurava situaciju da se kolica ne pomeraju pre početka merenja. Takođe, kolica se sa koncem mogu povezati dinamometrom. Kada se na držač postavi dovoljna masa, kolica počinju da se kreću ubrzano pod dejstvom sile koja je po intenzitetu jednaka sili zatezanja konca (dinamometar pokazuje ovu vrednost). Ubrzanje kolica se meri preko rastojanja koja kolica pređu u jednakim intervalima vremena. Treba izračunati odnos prikazane sile koja deluje na kolica i ubrzanja kolica.



Slika 4.25. Postavka eksperimenta

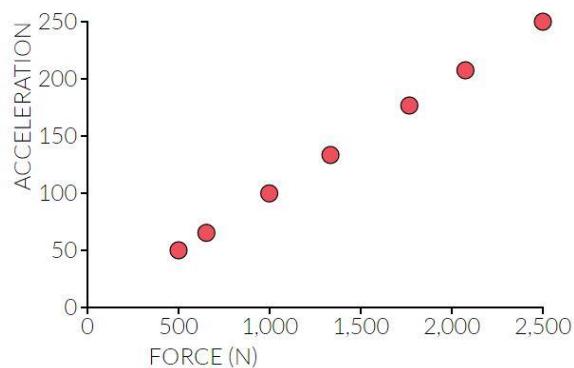
Ubrzanje se lako može izmeriti preko obrasca: $a = \frac{2s}{t^2}$, gde se smatra da je vreme konstantno. U tabeli (primer dat u tabeli 4.2.) treba predstaviti rezultate.

$F [N]$	$s [m]$	$t [s]$	$a \left[\frac{m}{s^2}\right]$	$\frac{F}{a}$
20	0.25	0.5	2	10
40	0.75	0.5	4	10

Tabela 4.2. Uprošćen primer rezultata

Odnos $\frac{F}{a}$ naravno nije isti broj za sva merenja, stoga tabela 4.2. predstavlja uprošćeno stanje stvari. Takođe, moguće je napraviti grafik (slika 4.26.), gde se na apscisu stavljaju vrednosti za silu, a na ordinatu vrednosti ubrzanja. Iz nagiba linije se može izračunati faktor srazmernosti koji je približan izmerenoj masi kolica (i tegova na kolicima).

Može se izvući zaključak da je sila koja deluje na kolica direktno proporcionalna ubrzanju kolica, a faktor proporcionalnosti je upravo – masa kolica (sa dodatim tegovima poznate mase).



Slika 4.26. Grafički prikaz proporcionalnosti sile i ubrzanja tela

Vreme izvođenja u nastavi: Prilikom obrade teme “Drugi Njutnov zakon – Zakon akcije i reakcije”. Eksperiment je poželjno izvesti pre izlaganja.

Značaj eksperimenta: Ovaj eksperiment direktno pokazuje zavisnost između veličina koje figurišu u Osnovnom zakonu dinamike.

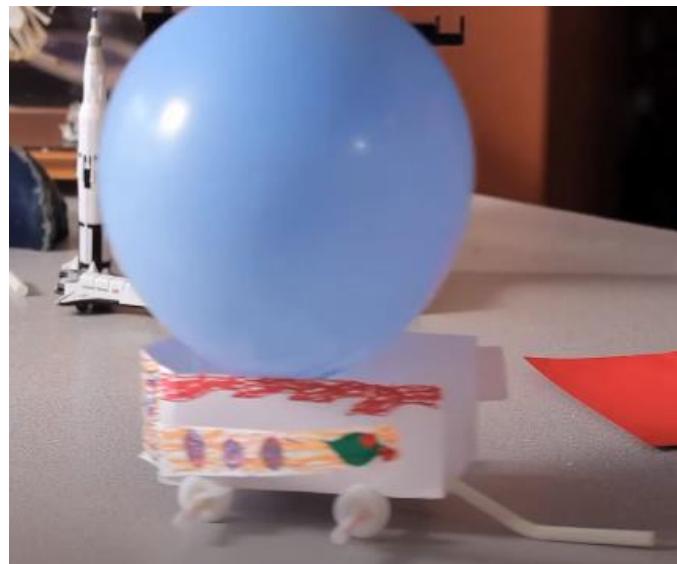
4.7.3. Treći Njutnov Zakon – Prosta mašina

Teorijsko poglavlje: *Treći Njutnov Zakon – Zakon akcije i reakcije 3.4.3.*

Vrsta eksperimenta: Kvalitativni.

Potreban materijal: 4 jednaka okrugla mala predmeta (ili točkovi od igračke automobila), parče kartona, papir, balon, lepak i selotejp, gumica, tri slamčice.

Izvođenje eksperimenta: Od navedenih potrebnih materijala realizovati “mašinu” sa slike 4.27.; bazu kolica i točkove napraviti od kartona gde dve slamčice predstavljaju osovine točkova, povezati guminicom treću slamčicu sa balonom i lepkom je zlepiti na bazu. Naduvati balon preko slamčice a zatim pustiti vazduh dok su kolica na horizontalnoj podlozi.



Slika 4.27. Prosta mašina

Objašnjenje: Kada pustimo vazduh iz balona da izade napolje preko slamčice, vazduh će vršiti silu na slamčicu koja će se pokrenuti zajedno na kolicima na kojima je zlepjena, u suprotnom smeru, što je u skladu sa Trećim Njutnovim zakonom.

Vreme izvođenja u nastavi: Prilikom obrade teme “Treći Njutnov zakon – Zakon akcije i reakcije”. Eksperiment je moguće izvesti u toku izlaganja.

Značaj eksperimenta: Jednostavan eksperiment koji verno demonstrira Treći Njutnov zakon.

5. ZAKLjUČAK

Sam proces učenja nepoznatog se bazira na principu gradacije. Kroz život se krećemo učeći najpre jednostavnije forme, tako dolazeći do sve složenijih, obogaćujući svoj “saznajni buđelar”. Isto je sa učenjem azbuke i kombinovanjem slova u reči. Na isti način se može naučiti gde se na muzičkom instrumentu nalaze određeni tonovi da bismo docnije naučili da odsviramo neku smislenu melodiju. Identično je i sa eksperimentima. Polazeći od jednostavnih, ilustrativnih i očiglednih eksperimenata, do sve složenijih, do laboratorijskih vežbi, a na kraju (potencijalno) do samog dizajniranja kompleksnog aparata i dokazivanja novih fizičkih teorija i otkrivenih prirodnih zakonitosti. Učenicima se jednostavno mora omogućiti da učestvuju u eksperimentima od trenutka kada su po prvi put na kakav-takav način izloženi fizici, a to su časovi “Prirode i Društva”, dve godine unazad u odnosu na VI razred osnovne škole – gde se učenici po prvi put formalno upoznavaju sa fizikom. U ovom radu se ističe i status školskog eksperimenta na našim prostorima. Ovaj naučni metod ni u kom slučaju ne bi trebao da se zapostavlja, jer na kraju se može slobodno reći da izučavanje fizike koristeći naučne metode na kojima je zasnovana, predstavlja razvoj opšteg obrazovanja i formiranje naučnog pogleda na svet.

Ovaj rad se bazira na predstavljanju jednostavnih ogleda iz dinamike, više kvalitativnog nego kvantitativnog karaktera. Stoga, možemo zaključiti da ovi eksperimenti na vrlo jednostavan način demonstriraju osnovne zakone dinamike, osnovne dinamičke fizičke veličine – masu, impuls i silu, kao i njihove analoge pri rotacionom kretanju; pritom stavljujući akcenat na silu i njene vrste koje se javljaju u specifičnim situacijama. Zašto baš dinamika? Eksperimenti iz dinamike su malobrojni, jer su fundamentalni dinamički eksperimenti poprilično “nezgodni” i nepraktični za izvođenje, mada postoje, kao što je u ovom radu prezentovano, par njih koji autentično mogu da demonstriraju (male) delove ove problematike. Možda bi autoru ovog rada bilo mnogo lakše da je u pitanju statika ili elektromagnetizam, gde postoji mnoštvo eksperimenata. Dakle, ovo su eksperimenti koje svako može da izvodi bez ikakvog straha od povreda s obzirom da opisani eksperimenti ne zahtevaju niti ozbiljnu aparaturu niti ozbiljnija merenja i većina ih se može “improvizovati” pomoću jednostavnih predmeta koji se lako mogu nabaviti. Cilj ovih eksperimenata je da uz prethodno usmeno izlaganje na času, učenici usvoje pojmove dinamičkih veličina kao i osnovne principe (zakone) dinamike. Naravno, u poglavlju 4. je napomenuto da se izvesni eksperimenti mogu izvoditi i u toku samog izlaganja. Svakako da vreme izvođenja eksperimenata zavisi od samog gradiva i procene predavača.

Osnovni cilj školskih eksperimenata jeste da se kod učenika formiraju osnovne predstave o fizičkim pojavama, procesima, veličinama, zakonima... kao i shvatanje adekvatnih naučnih pojmoveva i ubedjenja. Zatim sticanje znanja, veština i navika rukovanja korišćenom aparaturom. I ono najbitnije – da se kod učenika razvije sigurnost pri izvođenju eksperimenta, samostalnost u radu i da se oslobođe straha od nepoznatog, u okvirima eksperimentalne procedure.

6. LITERATURA

1. Milan O. Raspopović ; *Metodika nastave fizike: šesti, sedmi, osmi razred osnovne škole* , Zavod za udžbenike, Sajnos , Novi Sad 2013.
2. Milan O. Raspopović ; *Metodika nastave fizike* , Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 1992.
3. Ljubiša Nešić ; *Poglavlja metodike nastave fizike* , Atlantis, Niš 2015.
4. Dušan Lazar, Ivana Rančić ; *Osnovi metodike nastave fizike [Elektronski izvor]* , Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, Novi Sad 2019.
5. Božidar Žižić ; *KURS OPŠTE FIZIKE: fizička mehanika (četvrto popravljeno izdanje)* , IRO >>GRAĐEVINSKA KNJIGA<< , Beograd 1987.
6. Milan O. Raspopović ; *Fizika za prvi razred gimnazije* , Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd 2004.
7. Darko Kapor, Sonja Skuban ; *Fizika: Zakoni i formule* , Zmaj, Novi Sad 2008.
8. Miodrag Krmar ; *Uvod u nuklearnu fiziku*, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, Novi Sad 2013.

7. KORIŠĆENA SREDSTVA - WEB-SAJTOVI (SLIKE I EKSPERIMENTI):

www.geogebra.org

www.peko-step.com

www.sciencebuddies.org

www.researchgate.net

www.ontariotechu.ca

www.wordpress.com

www.blogger.com

www.wikipedia.org

www.mammothmemory.net

www.shtreber.com

www.borastankovic.edu.rs

www.jaeeapte.com

www.thefactfactor.com

www.kiwico.com

www.youtube.com (kanali: TheMrHandyMan , HomeshoolScientist , TutorVista , Malmesbury Education , Ontario Tech Kinesiology)

8. KRATKA BIOGRAFIJA KANDIDATA



Srđan Višković, rođen je 29.11.1993. godine u Novom Sadu. Detinjstvo je proveo u Bačkom Petrovom Selu i Bečeju. Pohađao je osnovnu školu u B.P. Selu do drugog razreda. Završio je osnovnu školu "Zdravko Gložanski" i gimnaziju u Bečeju, i 2012. godine upisao osnovne akademske studije na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu, departman za fiziku, smer diplomirani profesor fizike. Bavi se muzikom i raznim hobijima.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

<i>Redni broj:</i>	
RBR	
<i>Identifikacioni broj:</i>	
IBR	
<i>Tip dokumentacije:</i>	Monografska dokumentacija
TD	
<i>Tip zapisa:</i>	Tekstualni štampani materijal
TZ	
<i>Vrsta rada:</i>	Diplomski rad
VR	
<i>Autor:</i>	Srđan Višković, 276/12
AU	
<i>Mentor:</i>	prof. dr. Maja Stojanović
MN	
<i>Naslov rada:</i>	Jednostavni demonstracioni eksperimenti iz dinamike
NR	
<i>Jezik publikacije:</i>	srpski (latinica)
JP	
<i>Jezik izvoda:</i>	srpski/engleski
JI	
<i>Zemlja publikovanja:</i>	Republika Srbija
ZP	
<i>Uže geografsko područje:</i>	Vojvodina
UGP	
<i>Godina:</i>	2021
GO	
<i>Izdavač:</i>	Autorski reprint
IZ	
<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	5/64/2/52/2/2
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Metodika nastave fizike
ND	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	školski, demonstracioni, eksperimenti, dinamika, sila, Njutnovi zakoni
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	nema
VN	
<i>Izvod:</i>	Opisani su jednostavni eksperimenti iz dinamike koji se mogu primeniti pri obradi nastavne teme "Dinamika" u I razredu gimnazije ili VI razredu osnovne škole.
IZ	

Datum prihvatanja teme od NN veća: 20.10.2021.
DP

Datum odbrane: 22.10.2021.
DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: dr. Ivana Bogdanović , vanredni profesor
član: dr. Olivera Klisurić , redovni profesor
član: dr. Maja Stojanović , redovni profesor

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
ANO	
<i>Identification number:</i>	
INO	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
DT	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
TR	
<i>Content code:</i>	Final paper
CC	
<i>Author:</i>	Srđan Višković, 276/12
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	ph.D. Maja Stojanović
MN	
<i>Title:</i>	Simple demonstration experiments in dynamics
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2021
PY	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	5/64/2/52/2/2
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Methodology of physics education
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	school, demonstration, experiments, dynamics, force, newton's laws
SKW	
UC	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	Simple dynamics experiments are described in this paper, which could be utilized during "Dynamics" class lessons in I grade of high school and VI grade of elementary school.
AB	

Accepted by the Scientific Board: 20.10.2021.
ASB
Defended on: 22.10.2021.
DE
Thesis defend board:
DB
President: ph.D. Ivana Bogdanović , associate professor
Member: ph.D. Olivera Klisurić , full professor
Member: ph.D. Maja Stojanović , full professor