"PhyBox 3" - kutija pokusa iz fizike za treći razred srednje škole

Rumbak, Dino

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:682203

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-18**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Dino Rumbak

„PHYBOX3“ – KUTIJA POKUSA IZ FIZIKE ZA TREĆE RAZREDE SREDNJIH ŠKOLA

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA I TEHNIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

Dino Rumbak

Diplomski rad

„PhyBox3“ - a box of experiments for third grade of high school

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Željko Skoko

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja:

Zagreb, 2022.

Sažetak

U ovom diplomskom radu promotrit ćemo najznačajnije eksperimente iz područja elektromagnetizma, titranja i pojave valova (ogib, refrakcija i refleksija) koji su uvelike doprinijeli razvoju fizike. Obratit ćemo pažnju na ispravnost izvođenja tih eksperimenata u nastavi i poteškoćama s kojima se najčešće susreću nastavnici i učenici pri uvođenju novih fizičkih pojmova i pojava. Obrađeni pokusi su Örstedov pokus, magnetska sila između dva ravna paralelna vodiča, Faradayev zakon elektromagnetske indukcije, ovisnost perioda titranja matematičkog njihala, refleksija transverzalnog vala i interferencija valova pomoću užeta.

Teorijski dio rada opisuje sve navedene pokuse, relevantne fizikalne pojmove, pojave i veličine, navodi princip izvođenja svakog pojedinog pokusa i naposljetku navodi najčešće poteškoće i probleme učenika pri razumijevanju gradiva. U Dodatku se nalaze tablice, slike, skice i upute za slaganje pokusa koje bi nastavnicima trebale olakšati rad.

U rad je uključen i praktični dio izrade postave za svaki pokus (opis priložen u Dodatku), upute za slaganje i dodaci s listovima za praćenje pokusa koji će se zajedno nalaziti u kutiji PhyBox3.

Cilj diplomskog rada je pružiti školama i nastavnicima, naravno i učenicima, koji nemaju opremu u školi ili mogućnosti za izvođenje pokusa za treći razred srednjih škola, jednostavan i praktičan način da to ipak učine.

„PhyBox3“ - a box of experiments for third grade of high school

Abstract

In this master thesis, we will consider the most important experiments in the field of electromagnetism, oscillations and the appearance of waves (diffraction, refraction and reflection), which have greatly contributed to the development of physics. We will pay attention to the correctness of performing these experiments in the classroom and the difficulties that teachers and students most often encounter in introducing new physical concepts and phenomena. The processed experiments are Örsted's experiment, magnetic force between two straight parallel conductors, Faraday's law of electromagnetic induction, dependence of the period of oscillation of a mathematical pendulum, reflection of a transverse wave on a rope and interference of waves by a rope.

The theoretical part of the master thesis describes all the above experiments, relevant physical concepts, phenomena and quantities, states the principle of performing each experiment and finally lists the most common difficulties and problems of students in understanding the material. The Appendix contains tables, pictures, sketches and instructions for compiling the experiments, which should facilitate the work of professors.

The master thesis also includes the practical part of creating a setup for each experiment (description attached in the Appendix), stacking instructions and additions with test tracking sheets that will be together in the PhyBox3 box.

The aim of the thesis is to provide schools and professors, and of course students, who do not have the equipment in the school or the opportunity to perform experiments for the third grade of high school, a simple and practical way to do so.

Zahvala

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Skoku na uloženom trudu, strpljenju i korisnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskom rada. Zahvaljujem se svim profesorima i kolegama koji su mi pomogli i olakšali ovo poglavlje života.

Posebno hvala bliskim prijateljima i obitelji koji su mi bili podrška svih ovih godina studiranja, kojih nije bilo malo.

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Elektromagnetizam 2
2.1. Örstedov pokus 3
2.2. Magnetska sila između dva ravna paralelna vodiča 6
2.3. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije 9
2.4. Učeničke poteškoće u gradivima elektromagnetizma 12
3. Titranja i valovi 13
3.1. Ovisnost perioda titranja matematičkog njihala 14
3.2. Refleksija transverzalnog vala na užetu 17
3.3. Interferencija valova pomoću užeta 20
3.4. Učeničke poteškoće u gradivu titranja i valova 21
4. Zaključak 22
5. Dodatak 23
5.1. Popis opreme po pokusima 23
5.2. Izrada zavojnica 23
5.3. Tablice za pokus 3.1. 24
6. Literatura 25

1. Uvod

Pokus ili eksperiment je postupak kontroliranog opažanja i mjerenja pojava, koji se provode kako bi se provjerile znanstvene hipoteze [1]. Često se izvodi pomoću posebno složenih uređaja i dodatne opreme. Korištenje pokusa u nastavi fizike i drugih prirodoslovnih predmeta smatra se jednom od temeljnih nastavnih metoda pri uvođenju novih pojmova i veličina. Postoje dvije glavne vrste pokusa koji se koriste u nastavi: *(i)* demonstracijski (izvodi ga nastavnik, zahtjeva više znanja i opreza) i *(ii)* učenički (izvode ga učenici samostalno ili u manjim grupama). Prvi korak je postavljanje i rasprava o hipotezi, odnosno osmišljavanje modela kojim se može provjeriti ispravnost postavljene hipoteze. Drugi korak je provođenje pokusa i prikupljanje relevantnih podataka gdje je potrebno dobro obratiti pozornost na kontrolu pojedinih varijabli kako bi dobiveni podaci bili smisleni. U zadnjem koraku na temelju dobivenih podataka se dolazi do zaključka koji tada može potvrditi ili opovrgnuti postavljenu hipotezu. Izuzetnu važnost, kod izvođenja demonstracijskih pokusa, ima interakcija s učenicima kojoj je cilj potaknuti istraživački način razmišljanja [2].

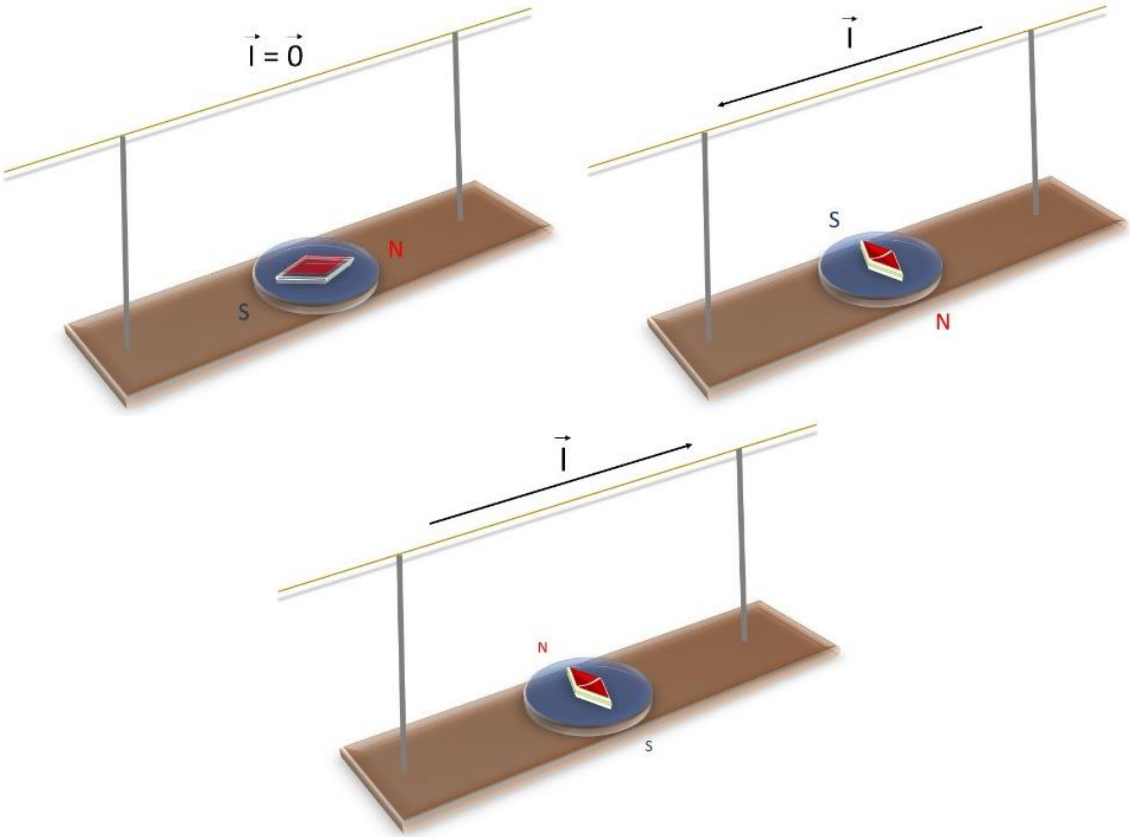
2. Elektromagnetizam

Grana klasične fizike koja istražuje utjecaje električnih i magnetskih pojava te njihovu međusobnu povezanost, objašnjava elektromagnetske valove, zakone optike i svjetlosne pojave naziva se *elektromagnetizam* [1]. Područje elektromagnetizma dijeli se na tri grane: *elektrostatika* (bavi se istraživanjem električnih polja, sila i pojava koje uzrokuju električni naboji u mirovanju i stalna gustoća naboja), *magnetostatika* (istražuje magnetska polja i sile stalnih struja), te *elektrodinamika* (istražuje pojave vezane uz električne naboje koji se gibaju) [3]. Razvoj ove grane započeo je početkom 19. st. najutjecajnijim pokusima toga vremena koje su provodili Hans Christian Örsted, André-Marie Ampére i Michael Faraday, teorijski ju proširuje James Clerk Maxwell koji zakone elektromagnetizma sažima u četiri jednadžbe (koje uključuju Gaussov, Ampéreov i Faradayev zakon), te ju naposljetku nadopunjuje specijalna teorija relativnosti Alberta Einsteina.

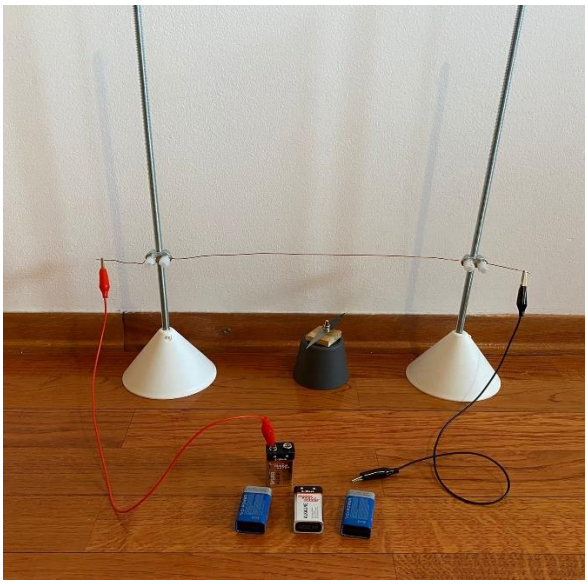
U osmome razredu osnovne škole učenici usvajaju osnovne pojmove i pojave vezane za elektricitet i magnetizam, električnu struju, otpor i napon. U trećem razredu gimnazije (i drugim strukovnim školama koje rade po gimnazijskom programu) postojeće znanje se proširuje i uvode se novi pojmove kao što su električna sila i potencijal, električna potencijalna energija, magnetska sila i elektromagnetska indukcija. Ovdje ćemo opisati tri najutjecajnija pokusa koja su bili pokretači razvijanja grane elektromagnetizma koji se mogu izvesti u nastavi fizike: Örstedov pokus (pojavu magnetskog polja oko ravnog vodiča kojim teče struja), pojavu magnetske sile između dva vodiča kojima teče struja i Faradayev pokus (pojavu elektromagnetske indukcije).

2.1. Örstedov pokus

1820. godine Hans Christian Örsted prvi je pokazao kako postoji povezanost između električne struje i magnetskog polja [1]. Ključna ideja je bila pokazati da li struja koja prolazi ravnim vodičem stvara oko sebe magnetsko polje. Örsted je postavio ravnu bakrenu žicu i ispod nje magnetsku iglu (kompas) koja je pokazivala smjer Zemljinog magnetskog polja, te je krajeve žice spojio je na polove akumulatora (mi ćemo zbog praktičnosti koristiti baterije).

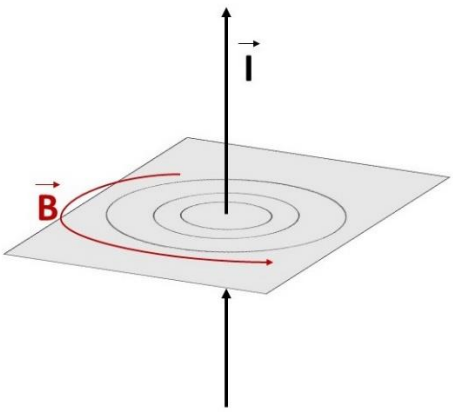


Slika 2.1. Örstedov pokus



Slika 2.2. Postav - Örstedov pokus

U trenutku kada se zatvori sklopka, električna struja poteče bakrenom žicom, te se magnetska igla zakrene i promjeni smjer pokazivanja. Pomičući magnetsku iglu iz položaja ispod bakrene žice (Slika 2.1.) u položaj iznad žice primjećujemo kako se smjer pokazivanja igle mijenja i tada pokazuje u suprotnom smjeru. To nam dokazuje kako struja koja teče ravnim vodičem proizvodi magnetsko polje koje je u svakoj točki oko vodiča okomito na spojnicu žice i igle. Linije magnetskog polja su koncentrične kružnice (kažemo linije magnetskog polja jer ne pokazuju smjer sile stoga nisu silnice) čiji smjer možemo odrediti pravilom desne ruke. Pravilo desne ruke govori da ako postavimo palac u smjeru struje, savinuti prsti će pokazivati smjer magnetskog polja oko vodiča.



Slika 2.3. Prikaz magnetskog polja oko ravne žice kojom teče struja

Sljedeći korak u eksperimentu je pokazati o čemu ovisi nastalo magnetsko polje. Koristimo metodu kontrole varijabli u tri slučaja: *(i)* iznos i smjer struje držimo konstantnom, mijenjamo udaljenost i kut magnetske igle od žice (primjećujemo da je efekt slabiji, odnosno zakretanje magnetske igle je „sporije“ kada smo udaljeniji od žice), *(ii)* smjer struje ne mijenjamo, ali povećamo iznos struje s obzirom na prvi slučaj spajanjem dviju ili više baterija u serijski spoj (vidimo da se utjecaj magnetskog polja na iglu može uočiti na većoj udaljenosti nego u prethodnom slučaju i povećava se brzina zakretanja magnetske igle), *(iii)* iznos struje i položaj magnetske igle držimo stalnim, mijenjamo smjer struje tako da jednostavno zamijenimo **(+)** i **(–)** priključke (primjećujemo da se magnetska igla zakreće u suprotnom smjeru). Cilj eksperimenta je zaključiti kako magnetsko polje ovisi o smjeru struje koja prolazi žicom, jakosti struje i udaljenosti od same žice. Na udaljenosti *r* od ravne žice kojom prolazi struja *I*, jakost magnetskog polja se računa po formuli:

$$\boldsymbol{B} = \mu \frac{I}{2\pi r} \hat{\boldsymbol{r}} \qquad (1)$$

gdje je μ ($\mu = \mu_0 \mu_r$) koeficijent proporcionalnosti koji nazivamo *permeabilnost,* a $\hat{r}$ nam predstavlja jedinični vektor Kartezijevog koordinatnog sustava. Vrijednost permeabilnosti ovisi o sredstvu u kojem djeluje magnetsko polje (npr. μ_r za vakuum iznosi 1, μ_0 je konstanta koja iznosi $4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m·A^{-1}).

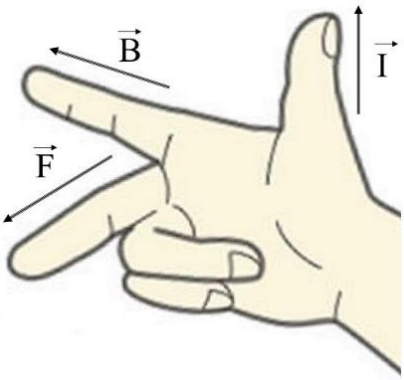
Potrebno je naglasiti kako struja nije vektor, već skalar, iako za smjer struje uzimamo suprotan smjer od smjera gibanja elektrona unutar vodiča (tehnički smjer). Zbog praktičnosti prikazivanja na slikama i skicama ipak označavamo struju kao vektor iako je pravi vektor duljina vodiča. Kod pisanja formula i ostalih izraza bitno je paziti da fizikalna veličina s lijeve strane i dobivena veličina s desne strane budu istih dimenzija (skalar = skalar, vektor = vektor).

2.2. Magnetska sila između dva ravna paralelna vodiča

Ampéreov pokus nam je već pokazao djelovanje stalnog magnetskog polja (permanentnog magneta) na ravni vodič kojim protječe električna struja. Ukratko da se podsjetimo, na vodič kojim teče električna struja i koji se nalazi u magnetskom polju djeluje sila $\boldsymbol{F}$ proporcionalna jakosti magnetskog polja $\boldsymbol{B}$, duljini žice l i jakosti električne struje I. Smjer Ampéreove sile određujemo pravilom desne ruke, a iznos računamo prema sljedećem izrazu:

$$\boldsymbol{F} = I \cdot (\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}) \qquad (2)$$

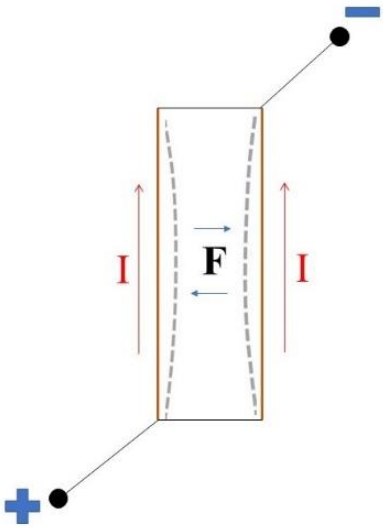
U ovome slučaju se pravilo desne ruke primjenjuje na drugačiji način. Prste ispružimo u smjeru električne struje I, zatim ih savijemo prema smjeru magnetskog polja $\boldsymbol{B}$, palac tada pokazuje smjer sile $\boldsymbol{F}$. Još jedan način primjene pravila desne ruke je da palac postavimo u smjeru el. struje, kažiprst u smjeru mag. polja i tada srednji prst pokazuje smjer sile (prsti su u međusobno okomitom položaju, Slika 2.4.).



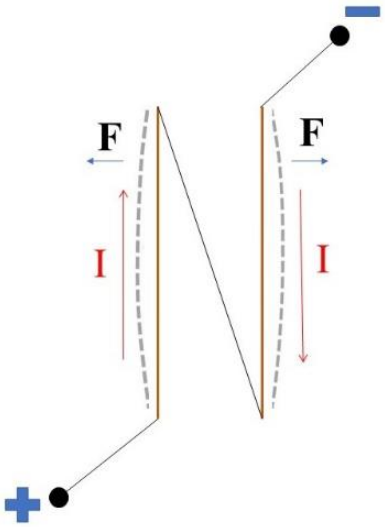
Slika 2.4. Pravilo desne ruke [5]

Budući da smo iz Örstedovog pokusa vidjeli kako struja koja protječe vodičem stvara magnetsko polje, postavlja se pitanje što se događa kada imamo više vodiča kojima protječu struje (u istim ili suprotnim smjerovima), a nalaze se u magnetskim poljima stvorenim protjecanjem struja u drugim vodičima.

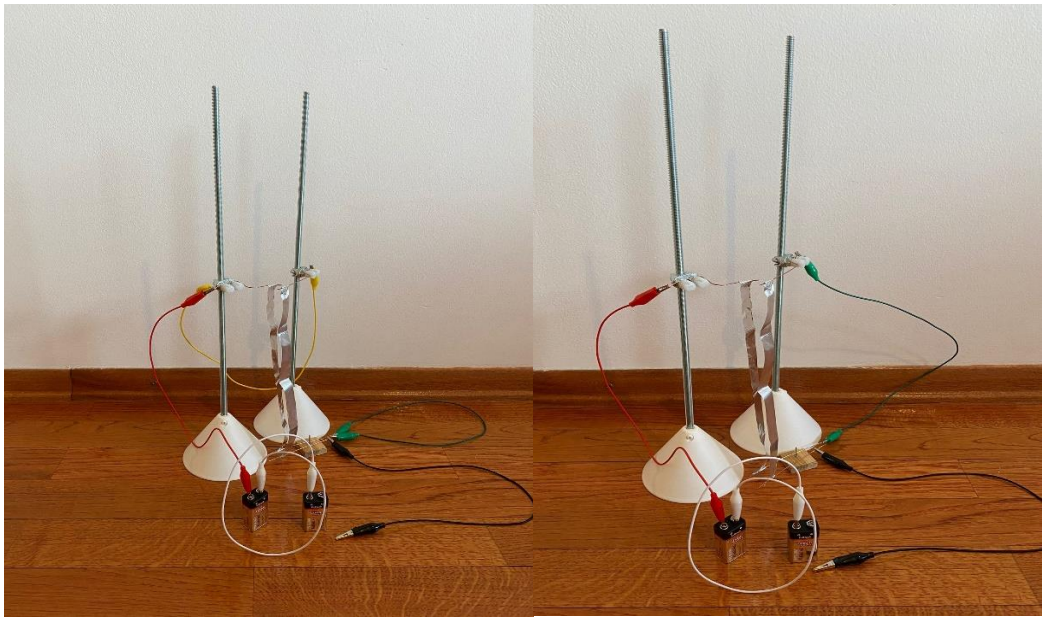
Izvođenje pokusa: najjednostavnije je ako u obzir uzmemo samo dva vodiča istog materijala, iste duljine i istog poprečnog presjeka (trake aluminijske folije, debljine d = 0.02mm, duljine l = 290mm i širine w = 17mm) kojima teče struja jednake jakosti, u strujni krug spojena samo jedna baterija kao električni izvor. U prvome slučaju ćemo postaviti vodiče tako da struja koja teče ima isti smjer u oba vodiča (paralelni spoj) kao što je prikazano na Slici 2.4., udaljenost između vodiča je konstantna, te ćemo mijenjati iznos struje (barem tri različita iznosa) dodavanjem serijski spojenih izvora.



Slika 2.5. isti smjer struje



Slika 2.6. suprotan smjer struje



Slika 2.7. Postava pokusa – sila između dva paralelna vodiča

U drugom slučaju ponavljamo pokus, ali sada spajamo vodiče serijski na način prikazan na Slici 2.5. kako bi smjer struje bio suprotan. U trećem slučaju smjer i jakost struje ne mijenjamo, ali povećavamo razmak između vodiča.

Cilj ovoga pokusa je odrediti kakva i kolika sila djeluje između dva paralelna vodiča kojima protječe struja. Vidljivo je iz pokusa kako je sila privlačna kad struja ima isti smjer (Slika 2.5.), a odbojna kad struja ima različiti smjer (Slika 2.6.). Primjećujemo i kako je sila proporcionalna s iznosom struje, a obrnuto proporcionalna s udaljenošću među vodičima. Nije vidljivo iz pokusa da sila ovisi i o duljini vodiča, ali to svakako napominjemo. Naposljetku dolazimo do izraza kojim računamo iznos te sile:

$$F = \mu \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi r} \cdot l \qquad (3)$$

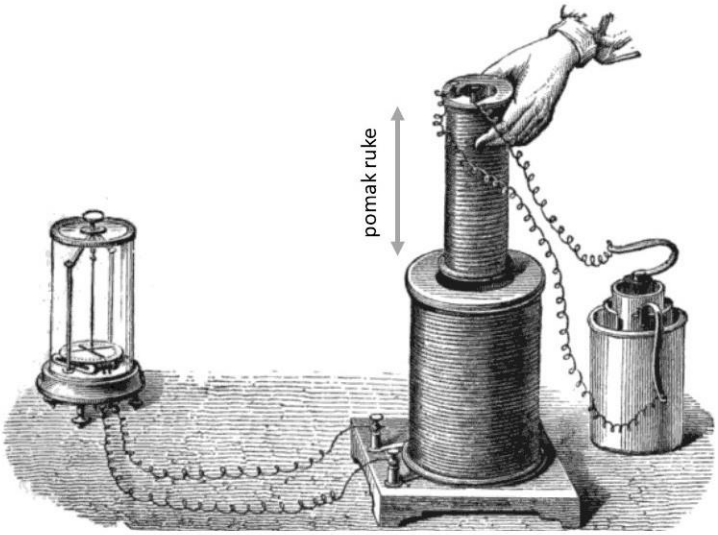
pri čemu je I_1 iznos struje koja prolazi prvim vodičem, I_2 iznos struje koja prolazi drugim vodičem, r udaljenost između vodiča i l duljina vodiča (uzimamo duljinu kraćeg vodiča ako nisu iste duljine). Iz formule je vidljivo da će sila biti privlačna kada su struje u istim smjerovima i odbojna kada su u suprotnim. Ukoliko imamo više od dva paralelna vodiča, ukupna sila na pojedini vodič se računa po principu superpozicije.

Relacijom (3) i pojavom sile među vodičima je definiran amper, osnovna mjerna jedinica za iznos struje. Amper je onaj iznos struje koji prolazeći kroz dva beskonačna, ravna, paralelna vodiča, u vakuumu, na međusobnoj udaljenosti od 1m, zanemarivog kružnog presjeka uzrokuje silu po jedinici dužine vodiča od $2 \cdot 10^{-7}$ N/m.

2.3. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije

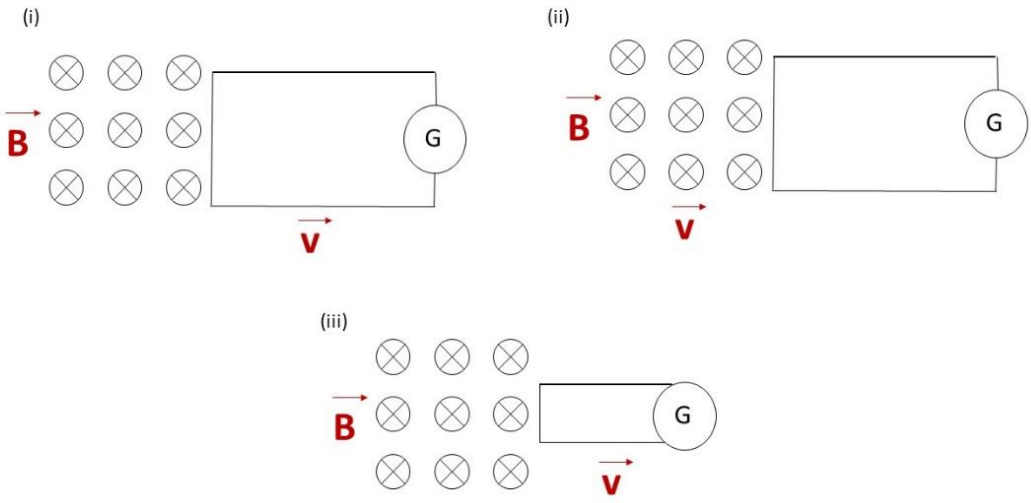
Do sada smo već upoznati s fenomenom stvaranja magnetskog polja kao posljedicom protjecanja električne struje, isto tako i postojanjem magnetske sile između dvaju vodiča kojima protječe električna struja čime je definiran amper kao fundamentalna mjerna jedinica. Nameće se prirodno pitanje, ako električna struja može stvoriti magnetsko polje, može li magnetsko polje stvoriti električnu struju? Michael Faraday je 1831. godine osmislio pokus kojim je upravo to pokušao ispitati.

Faraday je konstruirao pokus na način da je jednu zavojnicu (užu) spojio na pozitivni i negativni kraj baterije, drugu zavojnicu (širu) spojio je na krajeve galvanometra (G). U trenutku kada se zavojnice nisu gibale relativno jedna naspram druge, galvanometar nije očitavao nikakve vrijednosti, ali kada se uža zavojnica giba u ili iz šire zavojnice na galvanometru se očitava postojanje električne struje. Gibanjem uže zavojnice unutar šire zavojnice mijenja se magnetski tok što uzrokuje induciranje (stvaranje) električne struje [6].



Slika 2.8. Faradayev pokus [7]

Promjena magnetskog toka unutar petlje (standardno kvadratne petlje) može se dobiti na tri načina: 1. gibanjem same petlje (Slika 2.9. (i)), 2. gibanjem magnetskog polja (Slika 2.9. (ii)), 3. promjenom površine same petlje (Slika 2.9. (iii)). U slučaju ove postave Faradayevog pokusa, kakvog ćemo demonstrirati na nastavi, koristimo dvije različite zavojnice i dva različita magneta. Brzinu promjene magnetskog toka postižemo promjenom brzine gibanja magneta, zamjenom zavojnica (s drugom koja ima više ili manje namotaja, dodatkom jezgre, itd.), zamjenom magneta čime mijenjamo jačinu magnetskog polja ili promjenom kuta između zavojnice i magneta. Opet obraćamo pažnju na kontrolu varijabli.



Slika 2.9. (i) giba se petlja, (ii) giba se mag. polje, (iii) promjenom kuta između zavojnice i magnetskog polja mijenja se površina kojom prolazi mag. polje, odnosno mag. Tok

Pri svakoj promjeni magnetskog toka u vodiču se inducira napon, a ukoliko je strujni krug zatvoren nastat će inducirana struja i tu pojavu nazivamo elektromagnetskom indukcijom. Faradayev zakon elektromagnetske indukcije govori da će inducirani napon biti proporcionalan broju namotaja petlje i brzini promjene magnetskog toka. Brzina promjene magnetskog toka količnik je iznosa promjene magnetskog toka i vremenskog intervala u kojem se ta promjena događa.

Magnetski tok računamo po relaciji (4), a inducirani napon po relaciji (5):

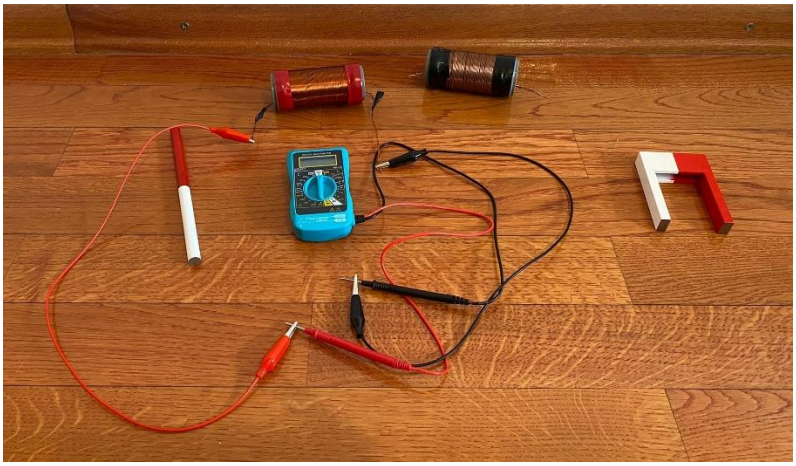
$$\phi_m = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = B \cdot A \cdot cos\alpha \qquad (4)$$

$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{\Delta\phi_m}{\Delta t} \qquad (5)$$

pri čemu je ϕ_m iznos magnetskog toka, **A** vektor normale na površinu petlje, ε_{ind} inducirani napon i N je broj namotaja petlje. Tok je najveći kada kut između magnetskog polja i vektora normale površine petlje iznosi 0°, a nula kada kut iznosi 90°.

Bitno je naglasiti postojanje negativnog predznaka u formuli za računanje induciranog napona koji ima važno fizikalno značenje. Negativan predznak dolazi zbog zakona očuvanja energije koji se u ovom obliku naziva Lentzovo pravilo: smjer inducirane struje je takav da stvara magnetsko polje koje se protivi promjeni magnetskog polja koje ju je izazvalo („priroda se protivi promjeni“) [3].

Izvođenje pokusa: u prvom mjerenju koristimo zavojnicu Z1 („crna“) i štapićasti magnet, mijenjamo brzinu gibanja magneta (veća brzina gibanja magneta = veći inducirani napon). Rezultati mjerenja očitavanjem napona na digitalnom multimetru pri nekoj srednjoj brzini gibanja su vrijednosti $U_{ind} \approx \pm 60$ μV. Zatim zamijenimo štapićasti magnet s magnetom u obliku potkove te ponovimo postupak pokušavajući gibati magnet približno istim brzinama kao i u prvom slučaju. Dobiveni rezultati bi trebao biti vrijednosti $U_{ind} \approx \pm 30$ μV. Kompletnu proceduru ponovimo koristeći zavojnicu Z2 („crvena“). Kod mjerenja pri korištenju štapićastog magneta očekujemo rezultate vrijednosti $U_{ind} \approx \pm 220$ μV, a pri korištenju magneta „potkove“ rezultate vrijednosti $U_{ind} \approx \pm 160$ μV. Vrijednosti induciranog napona koje se mogu očitati na multimetru su spomenute kao smjernica prema redu veličina očekivanih rezultata, pri čemu su navedeni rezultati približno maksimalne vrijednosti koje se provođenjem pokusa mogu ostvariti. Kao zadnju promjenu varijable, mijenjamo kut između zavojnica i magneta ponavljajući još jednom sve prethodne postupke. Cilj je pokazati kako inducirani napon ovisi o vrsti zavojnice i o brzini promjene magnetskog polja unutar same zavojnice.



2.10. Postav pokusa – elektromagnetska indukcija

2.4. Učeničke poteškoće u gradivima elektromagnetizma

Veliki je broj novih pojmova i pojava koji se uvode u gradivu elektromagnetizma. Kao i do sada kod uvođenja novih pojmova, pogotovo apstraktnijih, učenici imaju više poteškoća pri shvaćanju istih, a profesori s pronalaskom načina jednostavnijeg povezivanja. Ispitujući učenike o njihovim pretpostavkama veznim za rezultate pokusa potičemo ih da aktivnije sudjeluju u nastavi i dobivamo uvid u njihovo eventualno krivo shvaćanje pojava.

Prve poteškoće se javljaju kod određivanja smjera vektora dobivenog vektorskih umnoškom. Iako je na prvi pogled pravilo desne ruke jednostavno, učenici i studenti često dolaze do krivih rezultata. Važno je jasno navesti sve primjene i vrste pravila desne ruke, te koje vrste koristimo u pojedinim slučajevima. Bitno je naglašavati koje su fizikalne veličine vektori i inzistirati na tome da ih učenici zapisuju pravilnim redoslijedom u formulama.

Pri rješavanju zadataka u većem broju slučajeva je bitna i vizualna interpretacija, skiciranje i crtanje elemenata i polja. Učenici imaju poteškoća s crtanjem silnica i linija polja, brzopletost u određivanju smjera vektora „u“ ili „iz“ papira, te opet krivo korištenje pravila desne ruke. Učestalo je i nepotpuno shvaćanje pojmova magnetskog polja i magnetskog toka, poistovjećivanje jednog s drugim. Objašnjavanje magnetskog toka može se pojednostaviti i povezati s tokom vode iz slavine u čašu gdje će učenicima biti jasnije zašto koristimo vektor normale na površinu i kako promjena kuta može utjecati na tok. Naposljetku trebamo spomenuti i nekorištenje Lenzovog pravila, zbog nepotpunog učeničkog shvaćanja definicija i primjena ovog pravila često nisu zadovoljavajući. [8]

3. Titranja i valovi

Titranje je gibanje pri kojem se materijalna točka periodično giba između dva krajnja položaja među kojima se nalazi ravnotežni položaj i gdje se periodično mijenjaju ostale veličine (položaj, energija, brzina itd.) ponavljanjem niza stanja u određenim vremenskim intervalima (periodima) [1]. Pojave titranja u prirodi su jako česte, titranjem glazbenih žica nastaje ton (zvuk), titranjem električnih naboja nastaju elektromagnetski valovi. Uvodimo nove pojmove kao što su amplituda, frekvencija, period, rezonancija, interferencija itd. Razumijevanje periodičnih titranja iznimno je važno za shvaćanje valova, zvuka, svjetlosti i izmjeničnih strujnih krugova.

Val je pojava širenja poremećaja kojim se prenosi energija kroz medij, dok se medij kao cjelina ne giba [1]. Pri opisivanju valova koristimo valnu jednadžbu u kojoj se koriste novi pojmovi kao valna duljina i valni broj, interferencija (konstruktivna i destruktivna). Postoji više vrsta valova s kojima opisujemo prirodne pojave kao što su mehanički valovi (potresni valovi i zvuk, šire se u elastičnom mediju titranjem čestica povezanih elastičnim silama oko ravnotežnog položaja), elektromagnetski valovi (svjetlost, prenose se titranjem električnog i magnetskog polja u propusnom mediju ili vakuumu), valovi tvari (kvantnomehanički) i gravitacijski valovi (poremećaji gravitacijskog polja). Još je važnija podjela valova prema smjeru titranja čestica i smjeru širenja vala:

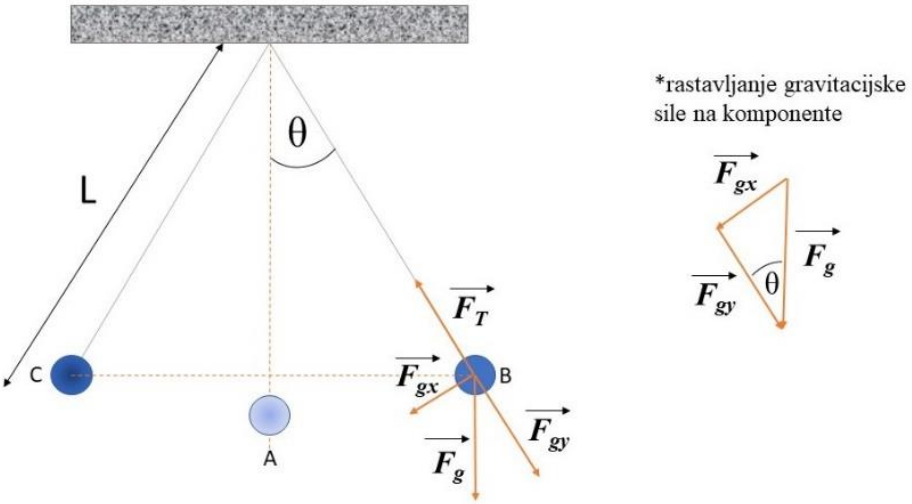
i. longitudinalni – čestice titraju u smjeru širenja vala (zvuk)
ii. transverzalni – čestice titraju okomito na smjer širenja vala
iii. stojni – pojedine čestice titraju, a pojedine miruju

U ovom poglavlju obratit ćemo pozornost na harmonijske valove kod kojih se poremećaj mijenja prema trigonometrijskog funkciji sinus, pokuse i pojave vezane za period titranja matematičkog njihala, refleksije valova, interferencije valova i lomu valova na granici različitih sredstva.

3.1. Ovisnost perioda titranja matematičkog njihala

Kako bismo bili spremni za izvođenje ovog eksperimenta najprije je potrebno ponoviti relevantne pojave i fizikalne veličine kojima opisujemo gibanje matematičkog njihala. Započeti ćemo s *amplitudom* (oznaka A, mjerna jedinica metar ili kada se promatra kut otklona oznaka je θ, mjerna jedinica je radijan) koja nam predstavlja apsolutni pomak od ravnotežnog položaja, *frekvencija* (oznaka f, mjerna jedinica Hz) označava broj titraja u sekundi, *period* (oznaka T, mjerna jedinica sekunda) iskazuje trajanje jednog ciklusa periodične promjene.

Kada govorimo o matematičkom njihalu moramo naglasiti da se podrazumijeva kako je tijelo promatrano kao materijalna točka ovješena na tanku, neelastičnu nit zanemarive mase, duljine L, otklonjeno od ravnotežnog položaja za kut θ. Preporuka je da se koriste utezi mase veće od 20g iz razloga da utjecaj otpora zraka ne bude previše izražen.



Slika 3.1. Matematičko njihalo

Na Slici 3.1. su prikazani položaji A (ravnotežni položaj) te B i C (maksimalni položaj otklona), kut otklona θ, duljina niti L, te sile koje djeluju na tijelo mase m ($\boldsymbol{F_g}$ i $\boldsymbol{F_n}$). Pomoću tih veličina odrediti ćemo o čemu ovisi trajanje perioda titranja. Tijelo se giba po kružnom luku oko ravnotežnog položaja pri čemu se jednostavno može izračunati dužina puta jednog titraja koristeći formulu za računanje duljine kružnog luka gdje uzimamo kut 4θ (dva puta zbog otklona na lijevu i desnu stranu i dva puta zbog gibanja u oba smjera).

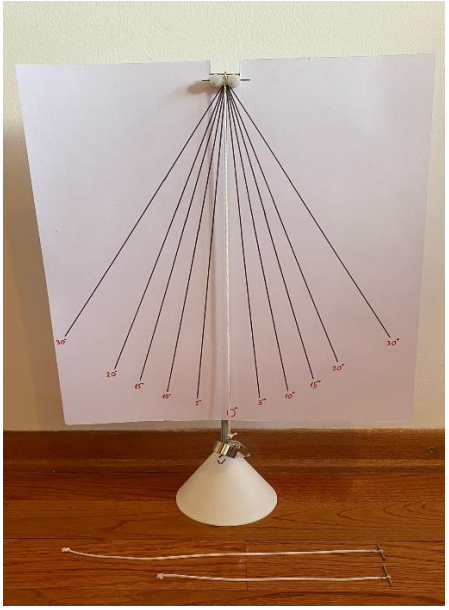
Tri varijable koje su nam bitne su masa tijela, duljina niti i kut otklona. Kao i do sada moramo paziti na kontrolu varijabli (jednu varijablu mijenjamo, dvije držimo konstantnima).

Izvođenje pokusa: u prvom slučaju mijenjamo kut otklona koji određujemo pomoću „kutomjera“ koji ćemo postaviti na vrh stalka koji koristimo za ovaj pokus. „Kutomjer“ koji koristimo je hamer papir formata A3, na kojem su označeni kutovi veličina 5°, 10°, 15°, 20°, 30° u otklonu lijevo i desno od ravnotežnog položaja od 0°. Napraviti ćemo tablicu za popunjavanje (koja je priložena u dodatku) koja sadrži stupac u koji upisujemo kut otklona, a u druge stupce upisujemo trajanje perioda. Budući da očekujemo kratko trajanje perioda, zgodnije je da pomoću štoperice mjerimo trajanje deset perioda, pa lako izračunamo trajanje jednog. Prijedlog je da se svako mjerenje (za svaki kut) izvodi tri puta te da se uzima srednja vrijednost mjerenja zbog točnijih rezultata. Za prvi dio pokusa gdje je kut jedina varijabla koju mijenjamo, koristio sam uteg mase 25g, nit duljine 200mm, kutove od 5°, 10° i 15°. Pretpostavke učenika će vjerojatno biti takve da očekuju duže trajanje perioda s svakim povećanjem kuta otklona jer se povećava i put kojeg tijelo prelazi. U drugom mjerenju tijelo ćemo otklanjati za isti kut, duljinu niti ostavljamo kao u prvom slučaju, ali mijenjamo mase tijela. Koristimo dva utega, jedan mase m_1=25g, drugi mase m_2=50g, nit koju koristim je duljine 200mm i kut otklona je 10°. Ukoliko vidimo potrebu za tim , utege možemo spojiti kako bismo dobili i treću masu, kombinacijom dobivamo m_3=75g. Učenicima će biti intuitivno da se promjenom mase tijela mijenja i trajanje perioda, veća masa uzrokuje duži period zbog tromosti tijela. Treće mjerenje izvodimo mijenjajući duljinu niti pri čemu su masa 25g i kut otklona 10° konstantni, opet mjereći vrijeme perioda, priložena tablica. Koristimo tri niti duljina l_1=200mm, l_2=300mm i l_3=400mm. Moramo provjeriti učeničke pretpostavke koje mogu biti da očekuju duže trajanje perioda kod dužih niti iz razloga što tijelo prelazi veći put, kao i kod povećavanja kuta otklona.

Iz dobivenih mjerenja vidljivo je kako period titranja ne ovisi o masi tijela niti o kutu otklona, već samo o duljini niti na koje je tijelo ovješeno. Nije moguće samo iz ovih rezultata dobiti izraz za računanje perioda, tako da učenicima dajemo sljedeću relaciju:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (6)$$

Relacija (6) vrijedi samo u slučajevima kada je kut otklona θ<15°.



Slika 3.2. Postav pokusa – ovisnost perioda titranja matematičkog njihala

Možemo ukratko spomenuti razlog zašto za veće kutove ne vrijedi spomenuta relacija, ali ne komplicirati previše kako ne bismo zbunili učenike. Poznajući sve sile koje djeluju na točkastu masu dolazimo do jednakosti:

$$m \cdot \boldsymbol{a} = m \cdot g\hat{x} - F_T(t)\hat{\varphi} \qquad (*)$$

gdje su $\hat{x}$ i $\hat{\varphi}$ jedinični vektori u sfernom koordinatnom sustavu, $F_T(t)$ predstavlja silu napetosti niti u ovisnosti o vremenu koja se periodički mijenja. Pretvarajući jedinične vektore iz sfernog koordinatnog sustava u desni Kartezijev koordinatni sustav i uvrštavanjem poznatih veličina dolazimo do izraza:

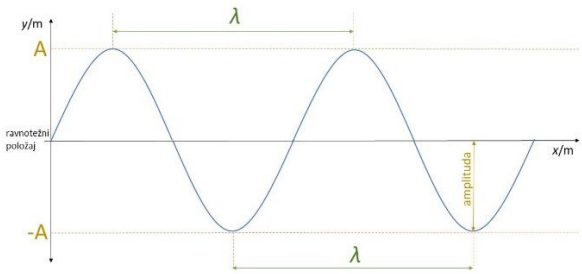
$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g}}\ [1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right) + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 sin^6\left(\frac{\theta}{2}\right) + \ldots] \quad (*)$$

iz čega dolazimo do zaključka kako je izraz $sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$ zanemariv za male kutove tako da to svodimo na relaciju (6).

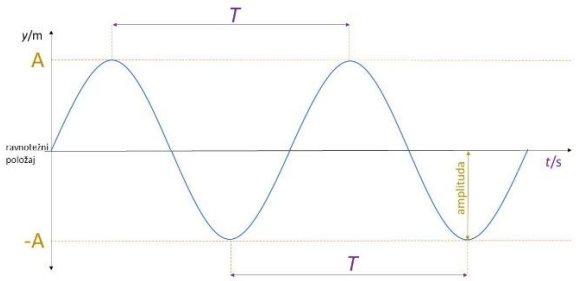
Napomena: sila koja prouzrokuje titranje je komponenta gravitacijske sile $\boldsymbol{F_{gx}}$ ($F_{gx} = m \cdot g \cdot sin(\theta)$) u smjeru tangencijalnom na luk koji opisuje tijelo. Kad ne bi bilo otpora zraka i trenja između niti i oslonca, njihalo bi se stalno podizalo do iste visine, odnosno otklanjalo za isti kut, ovako se energija „troši“ (kinetička energija se pretvara u toplinsku) na otpor zraka i trenje pa je realan primjer zapravo prigušeno titranje, tijelo ima sve manji otklon dok se na posljetku ne umiri u ravnotežnom položaju.

3.2. Refleksija transverzalnog vala

U prirodi je refleksija (odbijanje) valova česta pojava [4], sada ćemo produbiti shvaćanje transverzalnih valova, ne samo vizualno nego i s matematičkim opisom koji nam pomaže opisati njegovo ponašanje pri čemu uzimamo u obzir dvije situacije: refleksija transverzalnog vala na čvrstom i slobodnom kraju. U opisivanju koristimo nove relevantne veličine kao što su valna duljina (λ, najmanja udaljenost između dvije točke koje titraju u fazi), fazni pomak (ϕ, razlika u fazi titranja između dva vala koja promatramo) i brzina širenja vala (v). Valna duljina ujedno predstavlja i jedan puni titraj vala, broj titraja u nekoj točci u periodu od jedne sekunde nazivamo frekvencijom vala. Moramo biti pažljivi kod skiciranja valova budući da ne možemo na istoj skici označiti i valnu duljinu i period, stoga koristimo *y-t* i *y-x* grafove. Graf *y-t* nam predočava kako izgleda amplituda vala u ovisnosti o vremenu, *y-x* kako amplituda izgleda u ovisnosti o smjeru širenja vala.



Slika 3.3. Transverzalni val, *y-x* graf



Slika 3.4. Transverzalni val, *y-t* graf

Za matematički opis valova koristimo relaciju valne funkcije (7):

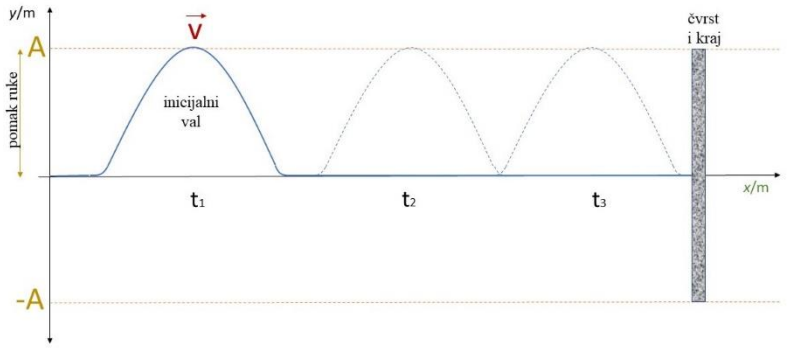
$$y = A \cdot sin\,(\omega t - \phi) \quad (7)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (8)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (9)$$

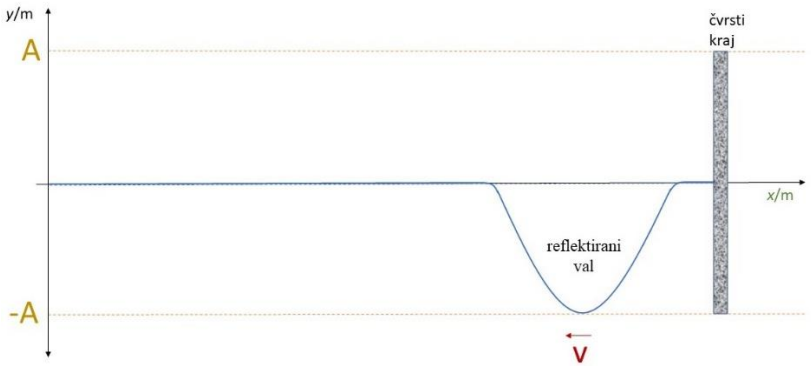
gdje y predstavlja pomak, A amplitudu (maksimalnu elongaciju), ω kutnu frekvenciju, t vrijeme promatranja i ϕ fazni pomak. Vidljivo je da je argument trigonometrijske funkcije sinus u relaciji (7) izražen u radijanima ili u stupnjevima (standardno se koristi zapis u radijanima). Razlika faza valova jednakih frekvencija iznosi nula radijana ako su valovi u fazi, a π radijana ako su u protufazi.

U prvom djelu pokusa promatrat ćemo što se događa s fazom i brzinom vala kada se on reflektira od čvrstog kraja. Za postav ovog pokusa koristit ćemo *slinky* (mekana, elastična zavojnica) kojoj je jedan kraj slobodan i na tom kraju rukom stvaramo titraj, dok je drugi kraj pričvršćen za stalak (bolje koristiti nogu stolca ili stola jer tada možemo jače nateknuti *slinky* i efekt je vidljiviji). Brzina širenja vala ovisi o faktoru elastičnosti i napetosti samog *slinky*-a (nećemo mjeriti niti računati brzinu već ćemo samo promatrati eventualnu promjenu).



Slika 3.5. Prikaz stvaranja i širenja transverzalnog vala na užetu

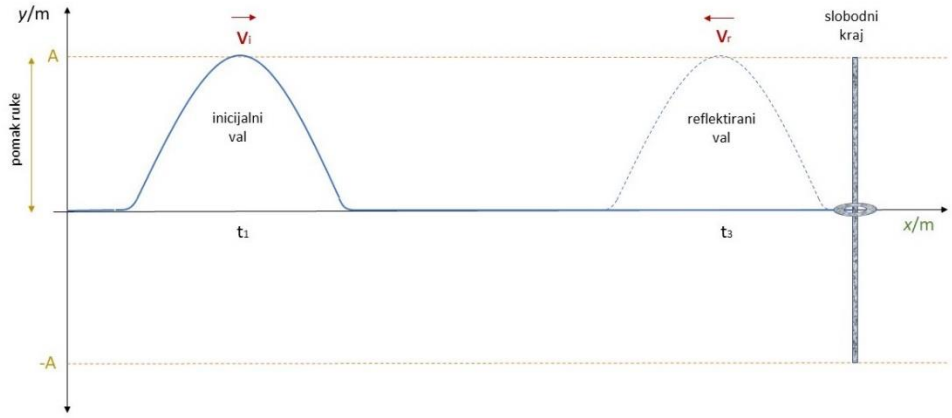
Val na *slinky*-u nastaje pomakom ruke (titrajem) u vertikalnom smjeru, brzina njegovog širenja je u smjeru *osi x* dok se širi prema čvrstom kraju. U trenutku kada val stiže do čvrstog kraja djeluje silom prema gore na čvrsti kraj, dok čvrsti kraj djeluje na *slinky* silom prema dolje (isti iznos sile, suprotan smjer) i tada se *slinky* izravnava u ravnotežni položaj (zbog pojave interferencije koji ćemo dodatno objasniti u nastavku rada). Titraj se tada izokrene i val se počinje širiti u smjeru osi *-x*.



Slika 3.6. Prikaz transverzalnog vala nakon refleksije od čvrstog kraja

Nakon refleksije valu se ne mijenja iznos brzine već samo smjer brzine i faza, reflektirani val ima pomak u fazi za $\phi = \pi$ rad. Zaključak je da su inducirani i reflektirani valovi u protufazi. Pokus možemo ponovno izvoditi s užetom koje se sastoji od tanjeg i debljeg djela. Rezultat je isti, val će se reflektirati od čvrstog kraja, ali i na točki prelaska s tanjeg djela užeta na deblje. Imamo priliku vidjeti kako se amplituda mijenja na granici dvaju sredstava.

Drugi dio pokusa izvodimo tako da nam kraj *slinky*-a koji je do sada bio pričvršćen u ovom slučaju bude slobodan (pomični prsten). Upadni val podiže prsten prema gore, napinje *slinky* i zatim ga elastična sila povlači dolje. Slobodni kraj ponaša kao novi izvor vala. Reflektirani val ne mijenja fazu niti iznos brzine već samo smjer širenja.



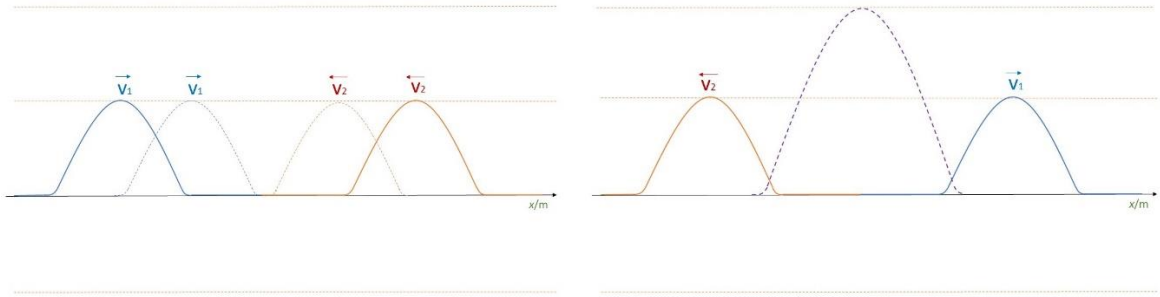
Slika 3.7. Prikaz transverzalnog vala nakon refleksije na slobodnom kraju

Pri izvođenju ovih pokusa potrebno je tražiti od učenika da skiciraju svaki zasebni slučaj i provjeriti jesu li veličine dobro označene. Umjesto *slinky*-a se može koristiti uže i elastična gumena cijev kojoj pojedini dijelovi mogu biti obojani kako bi se bolje mogle primijetiti pojave koje se događaju. Osobna preporuka je da neovisno o pomagalu koje koristimo, ono bude duljine minimalno tri metra kako bi se lakše opažao cijeli pokus.

Napomena: pokus je bolje izvoditi dok je *slinky*, uže ili elastična cijev na podu i kada je pomak ruke koji stvara amplitudu u smjeru lijevo-desno umjesto gore-dolje, lakše se kontrolira vraćanje ruke u ravnotežni položaj i vidljiviji je efekt koji promatramo.

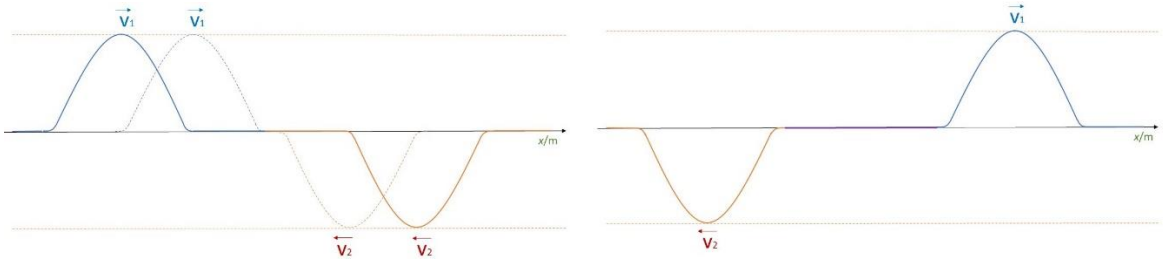
3.3. Interferencija valova pomoću užeta

Pojam interferencije označava međudjelovanje dvaju ili više pojava (u našem slučaju valova) koje se nalaze u istoj točki prostora u istom trenutku [4]. Pomak bilo koje točke sredstva jednak je zbroju pomaka svakog pojedinog vala što nazivamo pravilom superpozicije. Valovi se šire neovisno jedan o drugom, a na mjestu preklapanja dolazi do interferencije. Uvjeti za granične slučajeve interferencije valova su da valovi budu koherentni što znači da im se ne mijenja faza, da imaju identične valne duljine i amplitude. Pokus izvodimo držeći uže ili gumenu cijev na jednom kraju i uz pomoć nekog učenika koji drži na drugom kraju, pokušavajući istovremeno napraviti titraje istih amplituda u istom trenutku kako bi se interferencija dogodila što bliže sredini užeta ili cijevi.



Slika 3.8. Prikaz konstruktivne interferencije dvaju transverzalnih valova

Do interferencije dolazi kada se god dva vala susretnu, a granični slučajevi mogu biti konstruktivna i destruktivna interferencija. Konstruktivna interferencija se javlja kada se susreću dva brijega, a destruktivna kada se susreću brijeg i dol. Bitno je naglasiti da razlika hoda utječe na ishod interferencije. Razlika hoda je razlika duljine puteva koju prijeđu valovi od svog izvora do točke u kojoj interferiraju. Ako je razlika hoda $\delta=n\cdot\lambda$ (za n=1,2,3…) tada su valovi u fazi i dolazi do konstruktivne interferencije (Slika3.8.), ako je razlika hoda $\delta=(n+1/2)\cdot\lambda$, valovi su u protufazi i dolazi do destruktivne interferencije (Slika3.9.).



Slika 3.9. Prikaz destruktivne interferencije dvaju transverzalnih valova

3.4. Učeničke poteškoće u gradivu valova

Najčešće krivo shvaćanje teorije u opisu valova je poistovjećivanje gibanja vala s gibanjem čestica sredstva. Posebno, i više puta, trebamo naglasiti kako se u pojavi valova prenosi energija kroz medij, a ne sami medij, čestice medija titraju oko ravnotežne točke.

Val se treba tretirati kao fizikalna pojava, odnosno događaj, a ne kao fizikalni objekt. Poteškoće se javljaju i pri primjeni metode superpozicije kada učenici primjenjuju tu metodu samo u točkama maksimalne ili minimalne amplitude, zanemarujući sve ostale točke interferencije. Također ne razumiju i teško primjenjuju uvjete konstruktivne i destruktivne interferencije, nepotpuno shvaćanje i primjena pojma razlike hoda. Potrebno je kvalitetno objasniti da brzina širenja vala ne ovisi o brzini pomaka ruke već samo o mediju kojim se val širi.

Kao i uvijek, posebnu pozornost moramo obratiti pri uvođenju matematičkih opisa valova, kvalitetno navesti karakteristike i razlike za prostorni i vremenski opis i fizikalne veličine koje se koriste za pojedine opise. [8]

4. Zaključak

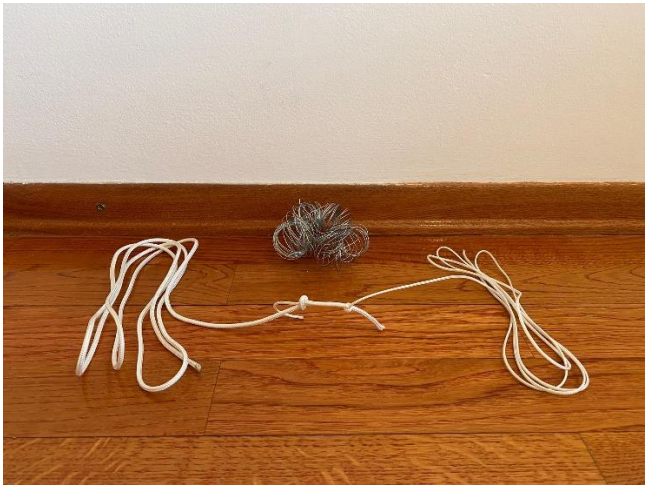
Tema ovog diplomskog rada bila je izrada i provođenje eksperimenata iz područja elektromagnetizma, titranja i pojave valova (ogib, refrakcija i refleksija), za treći razred gimnazija i strukovnih srednjih škola, koji su uvelike doprinijeli razvoju fizike. Tokom same izrade dijela opreme, došle su na vidjelo neke naizgled zanemarive sitnice koje ipak imaju utjecaj na rezultate pokusa, veći od očekivanog. Također, izvođenjem pokusa ustanovili smo na koje dijelove i pojave moramo obratiti dodatnu pažnju, kako zbog ispravnosti izvođenja samog pokusa, tako i zbog lakšeg i boljeg rješavanja problema nastalih učeničkim poteškoćama razumijevanja i usvajanja pojedinih dijelova gradiva. Za svaki eksperiment detaljno je napisan opis izvođenja kao i očekivani rezultati (napisane okvirne vrijednosti mjerenja za pokuse gdje su se mjerenja izvodila).

Troškovi izrade i kupovine svih dijelova opreme koje se koriste u ovom diplomskom radu (uključujući i samu kutiju) ne prikazuju realan trošak budući da se dio opreme oštetio pa sam morao nanovo izrađivati, neke dijelove sam radio po principu „pokušaj-promašaj“ kako bih dobio optimalno rješenje. Najskuplji dijelovi opreme su bili oni koje sam morao „gotove“ kupiti, a ne ih sam kao cjelinu izraditi. Cijena magneta (potkove i štapa), magnetske igle i utega od 25g i 50g je iznosila 546.25 HRK, što je i većinski dio troškova. Procjena troškova finalnog „proizvoda“ (uključujući i potrošni materijal – baterije) iznosi otprilike 850 HRK. Pozitivan dio je što oprema koja se nalazi u PhyBox3 kutiji može biti iskorištena i za druge pokuse koji se izvode tokom sva četiri razreda gimnazija i strukovnih srednjih škola.

5. Dodatak

5.1. Popis opreme po pokusima

Örstedov pokus	stalci, vodljive žice, magnetna igla, baterije 9V
Magnetska sila između dva ravna paralelna vodiča	stalci, vodljive žice, baterija 9V, dvije metalne trake (aluminijske)
Faradayev zakon elektromagnetske indukcije	žice, multimetar (EMOS M0320, MD-110, po standardu IEC-61010), dvije zavojnice, dva magneta
Ovisnost perioda titranja matematičkog njihala	dva utega (25g i 50g), tri niti, stalak, kutomjer (raster), štoperica
Refleksija i interferencija transverzalnih valova	Slinky, uže, stalak, prsten za slobodni kraj



Slika 5.1. Oprema za pokuse refleksije i interferencije valova

5.2. Izrada zavojnica

Za izradu zavojnica koristio sam neizoliranu bakrenu žicu promjera $Ø_1$=1mm, spojne PVC cijevi za odvod promjera $Ø$=36 mm, duljine l=95 mm i električarsku izolacijsku traku. Prvu zavojnicu (Z1, „crnu“) sam omotao žicom u tri sloja, prvi sloj s N_1=52 namotaja, drugi N_2=50 i treći N_3=50 namotaja pri čemu je ukupna duljina zavojnice l_{z1}=56 mm. Svaki sloj predstavlja zasebnu zavojnicu koje sam spojio paralelno čime postižem bolja magnetska svojstva unutar zavojnice kada njome prolazi struja, smanjujem ukupni otpor kako bi za pokus elektromagnetske indukcije rezultat bio vidljiviji na galvanometru.

Drugu zavojnicu (Z2, „crvenu“) sam omotao izoliranom bakrenom žicom $Ø_2$=0.8 mm, u dva sloja, N_1=75 namotaja, drugi N_2=72 namotaja pri čemu je ukupna duljina zavojnice l_{z2}=56 mm.

5.3. Tablice za pokus 3.1.

U tablicama su unošeni rezultati mjerenja kako bi se vidjele očekivane vrijednosti koje bismo izvođenjem pokusa trebali dobiti.

	$10T_1$	T_1	$10T_2$	T_2	$10T_3$	T_3	T_{SR}
Θ_1=5°	9,33	0,933	9,28	0,928	9,32	0,932	0,931
Θ_2=10°	9,45	0.945	9,40	0,940	0,937	0,937	0,941
Θ_3=15°	9,50	0,950	9,44	0,944	9,45	0,945	0,946

	$10T_1$	T_1	$10T_2$	T_2	$10T_3$	T_3	T_{SR}
m_1	9,45	0,945	9,40	0,940	0,937	0,937	0,941
m_2	9,46	0,946	9,52	0,952	9,51	0,951	0,950
m_3	9,66	0,966	9,65	0,965	9,70	0,970	0,967

	$10T_1$	T_1	$10T_2$	T_2	$10T_3$	T_3	T_{SR}
L_1	9,45	0,945	9,40	0,940	0,937	0,937	0,941
L_2	11,23	1,123	11,35	1,135	11,33	1,133	1,130
L_3	13,15	1,315	13,15	1,315	13,07	1,307	1,312

Napomena: pri mjerenju gdje se mijenja masa utega, kada kombiniramo uteg od 25g i 50g, moramo paziti da ne objesimo jedan uteg na drugi budući da se tada centar mase pomiče prema dolje, te s time zapravo „produljujemo“ nit i dobivamo pogrešna mjerenja.

6. Literatura

[1] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., URL: https://www.enciklopedija.hr/impresum.aspx

[2] Demonstracijski pokus u nastavi fizike, stručni rad, Antonio Svedružić, 2006., URL: https://hrcak.srce.hr/file/55093

[3] University Physics With Modern Physics 15th Edition, Hugh D. Young

[4] Valovi i zvuk intro, ss prva tehnička Tesla ZG, 2016., URL: http://www.ss-prva-tehnicka-tesla-zg.skole.hr/uploads/media/vecernja/upload26012016/Valovi_i_zvuk_intro.pdf

[5] URL: https://hr.spot-the-difference.info/difference-between-left-hand-rule

[6] Experimental Researches in Electricity, Faraday, Michael. 1844.

[7] Arthur William Poyser (1892) Magnetism and electricity: A manual for students in advanced classes, Longmans, Green, & Co., New York, p.285, fig.248

[8] Skripta – Metodika nastave fizike 2, doc. dr. sc. Maja Planinić