



**Kauno technologijos universitetas**  
Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas

## **Doplerio reiškinių demonstracija**

P190B101 Fizika 1 probleminė užduotis 2

---

**Gytis Dokšas**  
**Mantvydas Gervė**  
**Dovydas Kaunietis**  
**Vilmantas Pieškus**  
**Deividas Simanavičius**  
Projekto autoriai

**IFF 9/2**  
Akademinė grupė

**Doc. Virgilijus Minialga**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2020**

## **Turiny**

Santrauka .....	3
Įvadas.....	4
1. Tvlakaraštis .....	5
2. Doplerio reiškinių pritaikymas .....	6
3. Fizikinių dėsnų taikomų problemos sprendimui aprašymas .....	10
4. Laboratoriniai darbai: fizikinių dėsnų iliustracija .....	12
5. Probleminio uždavinio rezultatai.....	20
Išvados.....	23
Literatūros sąrašas .....	24

## Santrauka

Probleminės užduoties tikslas – paaiškinti Doplerio efekto veikimą, pademonstruoti atitinkamus modelius, pristatyti panaudojimo sritis ir atsakyti į pagrindinius užduoties klausimus. Iš pradžių, pasinaudodami sukurta interaktyvia svetaine ir joje esančiais modeliais ir vaizdo įrašais paaiškinsime ir parodysime Doplerio reiškinį. Pirmame modelyje matysime judantį garso bangas skleidžiantį kūną. Keisdami jo judėjimo greitį parodysime susidariusį bangos frontą ir pateiksime Doplerio efekto fizikinį modelį. Antrame modelyje parodysime akustinio Doplerio reiškinio formulės pritaikymą pasinaudodami skleidžiamu garsu (naudojama formulė  $f = f_0 \frac{V + V_{\text{imtovo}}}{V - V_{\text{šaltinio}}}$ , kur  $f$  – gautasis dažnis,  $f_0$  – pradinis garso bangos dažnis,  $V$  – bangos greitis terpėje). Sukurtoje svetainėje parodysime vaizdo įrašą, kuriame kalbama apie Doplerio efektą. Toliau pateiksime atsakymus į tris pagrindinius probleminės užduoties klausimus:

1. Apibūdinkite kas tai yra Doplerio reiškinys?
2. Pateikite pavyzdžių kur šis reiškinys pritaikomas inžinerijoje ir moksle?
3. Kokioms bangoms pasireiškia šis reiškinys?

Pasinaudodami informaciniais šaltiniais nustatėme, kad Doplerio efektas – bangos dažnio ir ilgio kitimas, kai klausytojas arba šaltinis juda vienas kito atžvilgiu. Garso bangos dažnio kitimas priklauso nuo pradinio bangos dažnio, bangos šaltinio ir klausytojo greičio. Šis efektas yra naudojamas greičio matavime, astronomijoje, medicinoje. Kristianas Dopleris (angl. Christian Doppler) šį reiškinį nustatė garsui, bet netrukus šis efektas buvo pritaikytas ir šviesai.

## **Įvadas**

Atliekant užduotį „Doplerio reiškinių demonstracija“ pristatysime Doplerio efektą. Doplerio efektas yra svarbus, nes yra panaudojamas įvairiose srityse: aviacijoje, greičio matavime, astronomijoje. Doplerio efekto pristatymui naudosime išmaniąsias technologijas, t. y. kursime interaktyvią svetainę. Pasinaudodami svetainėje sukurtais modeliais ir parodytais bandymais paaiškinsime Doplerio reiškinių veikimą. Pateiksime pagrindines formules. Taip pat reikės internetiniuose informacijos šaltiniuose ieškoti informacijos ir atsakyti į tris pagrindinius uždavinio klausimus - apibūdinsime kas tai yra Doplerio reiškinys, pateiksime pavyzdžių kur šis reiškinys pritaikomas inžinerijoje ir moksle bei aptarsime, kokioms bangoms pasireiškia šis reiškinys.

## 1. Tvarkaraštis

Projekto atlikimo terminas: 2020-04-09

Problemos sprendimo etapai:

1. Išsiaiškinti kas yra Doplerio efektas.
2. Surasti kur Doplerio efektas panaudojamas moksle ir inžinerijoje.
3. Atlikti laboratorinius darbus.
4. Rasti įdomiausią ir tinkamiausią būdą pademonstruoti Doplerio reiškinių (nuotoliniu būdų).
5. Paruošti probleminės užduoties sprendimo pristatymą ir ataskaitą.

Grupės darbų atlikimo tvarkaraštis:

Projekto rengimo etapai	Laikotarpis(dienomis)																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1. Komandos formavimas																						
2. Problemų uždavinio aptarimas																						
3. Idėjų analizė, problemos sprendimų būdų aptarimas																						
4. Darbų pasiskirstymas																						
5. Teorinis pasirėngimas laboratoriams darbams ir problemos sprendimui atlikti																						
6. Laboratorinių darbų atlikimas																						
7. Problemų uždavinio sprendimas																						
8. Problemų uždavinio ataskaitos rengimas																						
9. Problemų uždavinio pristatymo rengimas																						
10. Problemų uždavinio sprendimo pristatymas																						

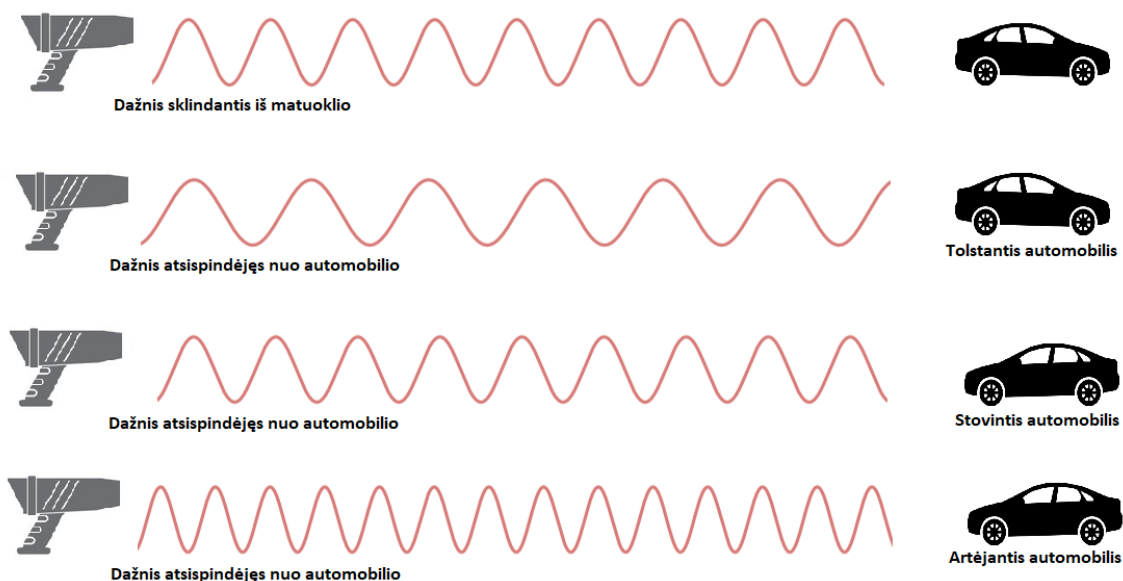
1 pav. Grupės darbų atlikimo tvarkaraštis

## 2. Doplerio reiškinių pritaikymas

### Doplerio greičio radaras

Doplerio greičio radaras – tai radaras, kuris naudojami Doplerio efektu, kad nuotoliniu būdu išgautų informaciją apie objekto greitį. Naudojamas policijos pareigūnų, matuoti automobilių greitį.

Šis radaras siunčia numatyto dažnio mikrobangas į automobilį ir fiksuoja atspindėjusį mikrobangų dažnį. Kadangi mikrobangos atsispindi nuo judančio automobilio, jų dažnis pasikeičia.



2 pav. Dažnių skirtumas, objektui artėjant, tolstant bei nejudant.

Iš šio paveikslėlio matome, kaip skiriasi dažniai, automobiliui tolstant, artėjant bei stovint vietoj. Kadangi žinome jog bangos sklinda šviesos greičiu  $c$ , žinome greičio matuoklio pradinį dažnį  $f_0$ , kuris yra gamyklos nustatytas ir žinome atspindėjusį dažnį  $f_1$ , kurį nustato greičio matuoklis, galime apskaičiuoti matuojamo automobilio greitį.

Pirmiausiai mums reikia sužinoti dažnių pokytį:

$$\Delta f = f_1 - f_0 \quad (1)$$

Turint dažnių pokytį, galime rasti automobilio greitį:

$$v = \frac{\Delta f}{f_0} * \frac{c}{2} \quad (2)$$

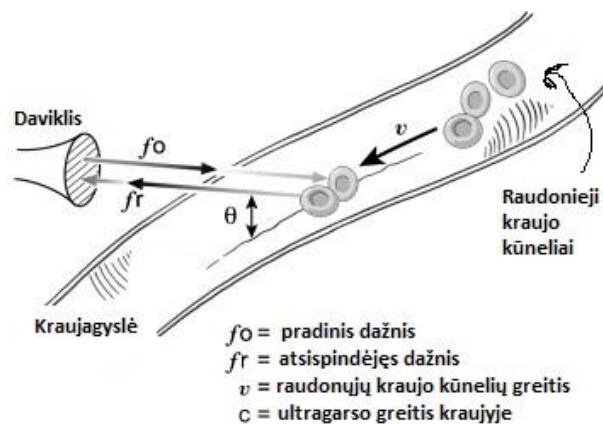
Doplerio greičio radaras, gali parodyti ne vien greitį, bet ir judėjimo kryptį (ar objektas tolsta ar artėja). Tai galime pamatyti iš dažnių pokyčio: jei pokytis teigiamas, tai objektas artėja, jei neigiamas – tolsta, jei vienodas – nejuda.

## Doplerio efektas echo kardiografijoje

Echo kardiograma – tai testas, kuris ultragarso bangų pagalba parodo formą bei dydį tiriamojo širdies.

Šio testo pagalba, daktarai gali pamatyti, kaip širdis vejoja kraują ir ieškoti neatitikimu širdyje.

Doplerio echo kardiograma stebi kraujo judėjimą kraujagyslėse.

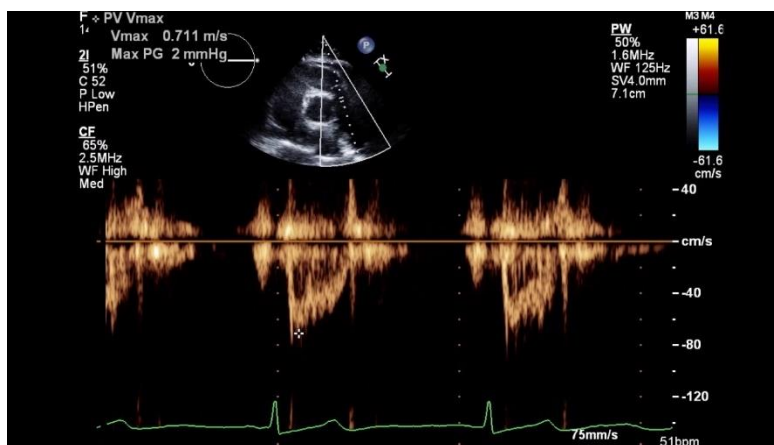


3 pav. Doplerio efektas kraujagyslėse

Daviklis siunčia ultragarsines bangas į kraujagislę ir fiksuoja atspindėjusių nuo kraujo kūnelių ultragarsinių bangų dažnius, kurie nėra vienodi pradiniui dažniui dėl Doplerio efekto. Žinant pradinį dažnį, užfiksuotą dažnį, kampą  $\theta$  bei ultragarso greitį kraujyje, galime apskaičiuoti kraujo tekėjimo greitį organizme (3). Palyginę pradinį su atspindėjusiu dažniu, galime nustatyti kraujo tekėjimo greitį.

$$\Delta f = f_r - f_o = 2f_o \frac{v \cos \theta}{c} \quad (3)$$

Gautus duomenis užfiksuoja kompiuteris ir sukuria kraujo tekėjimo greičio grafiką panašų į pateiktą žemiau.



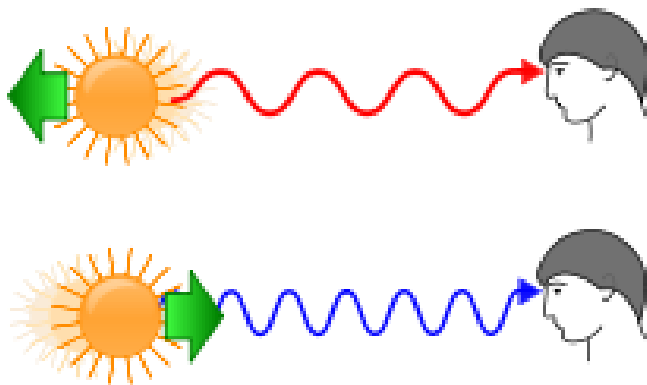
4 pav. Doplerio echo kardiografa

Šių grafikų pagalba, daktarai gali aptikti įvairias kraujagyslių ligas.

## Doplerio efektas astronomijoje

Doplerio raudonasis poslinkis – elektromagnetinės spinduliuotės dažnio sumažėjimas (bangos ilgio padidėjimas), kurio priežastis yra spinduliuotės šaltinio tolumas nuo stebėtojo.

Doplerio mėlynasis poslinkis – elektromagnetinės spinduliuotės dažnio padidėjimas (bangos ilgio sumažėjimas), kurio priežastis yra spinduliuotės šaltinio artėjimas prie stebėtojo.

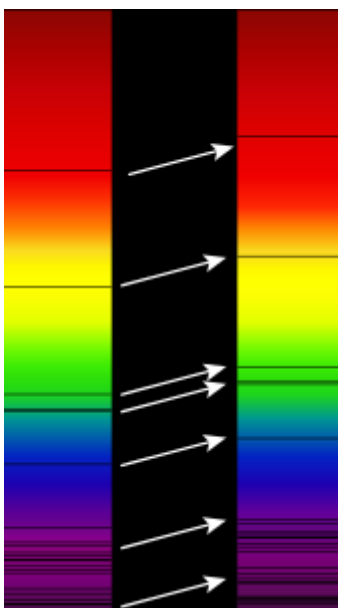


5 pav. Doplerio raudonasis poslinkis (aukščiau) ir mėlynas poslinkis (žemiau)

Astronomai užfiksuoja šviesos šaltinio (žvaigžės, spiečiaus, galaktikos) absorbcijos spektrą. Palyginę gautą spektrą su žinomu spektru, pvz. Saulės ar vandelinio ar helio spektru, surandamas spinduliuotės dažnio pokytis, pagal kurį nustatomas stebimo objekto reliatyvus stebėtojui greitis:

$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{f_0} . \quad (4)$$

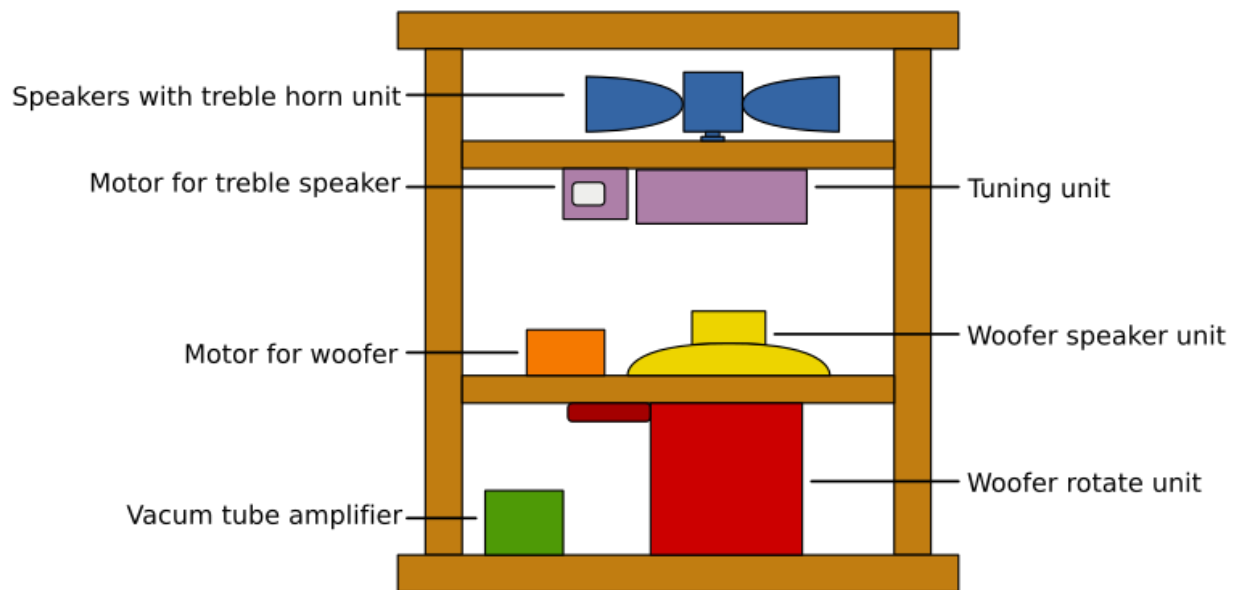
Pavyzdys, kaip vizualiai atrodo skirtumas tarp nepaslinkto ir raudonojo poslinkio paveikto spektro:



6 pav. Raudonasis poslinkis, lyginant tolimos galaktikos (dešinėje) spektrą su Saulės (kairėje) spektru.



## Doplerio efektas muzikoje



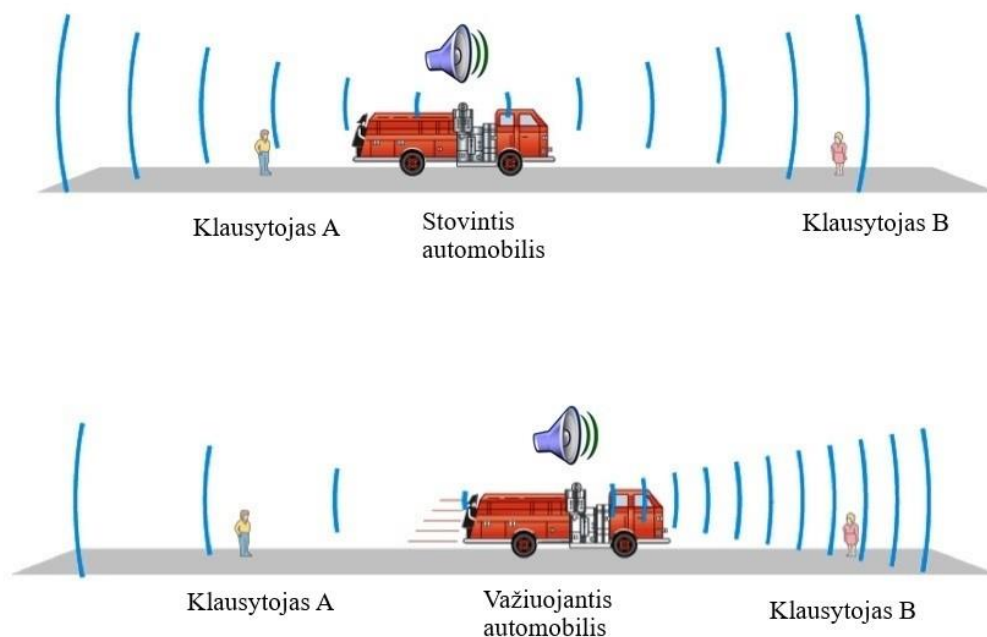
7 pav. *Leslie speaker* sandara

*Leslie speaker* skirtas modifikuoti į jį ateinantį garsą. Tai atlieka sukdamas garso šaltinį (5 pav. *Speakers with tremble horn unit*), iš šio šaltinio išėjęs garsas dėl Doplerio efekto įgyja drebančio/virpančio garso efektą, nes garso dažnis periodiškai yra padidinamas ir sumažinimas. Prietaisas turi kelis režimus, kurie keičia sukimosi greitį (įprastiniai greičiai: 0, 50 ir 400 apsisukimų per minutę) ir taip keičia virpėjimo stiprumą.

### 3. Fizikinių dėsnių taikomų problemos sprendimui aprašymas

#### I. Doplerio efektas

Kai link žmogaus važiuoja automobilis su kaukiančia sirena, žmogaus girdimas sirenos garso dažnis atrodo aukštesnis nei yra iš tikrųjų, o automobiliui žmogų pravažiavus ir nuo jo tolstant, žmogus girdi žemesnį sirenos skleidžiamo garso dažnį nei yra iš tiesų. Šis reiškinys yra vadinamas Doplerio efektu.



8 pav. Doplerio efektas

1842 m. Prahos universiteto profesorius Christian Doppler (1803–1853) teoriškai įrodė, kad bangų šaltiniui artėjant prie klausytojo (imtuvo), jo registruojamų bangų dažnis turi padidėti, o šaltiniui tolstant nuo klausytojo (imtuvo), turi sumažėti. (Karazija, 2017)









Akustinis Doplerio reiškinys užrašomas formule (5).

$$f = f_0 \frac{V + V_{\text{imtuvo}}}{V - V_{\text{šaltinio}}} \quad (5)$$

Kur  $f$  – pakitęs garso šaltinio dažnis,  $f_0$  – garso šaltinio dažnis,  $V$  – garso greitis terpėje,  $V_{\text{imtuvo}}$  – garso imtuvo judėjimo greitis,  $V_{\text{šaltinio}}$  – garso šaltinio judėjimo greitis. Ši formulė teisinga tuo atveju jei atstumas tarp imtuvo ir šaltinio mažėja, kitaip tariant imtuvas ir šaltinis artėja vienas prie kito. Priešingu atveju jei imtuvas ir šaltinis tolsta vienas nuo kito formulė (6) yra pertvarkoma.

$$f = f_0 \frac{V - V_{\text{imtuvo}}}{V + V_{\text{šaltinio}}} \quad (6)$$

Trupmenos skaitiklyje atsiranda minuso ženklas, o vardiklyje pliuso ženklas.

 Šaltinis	 Imtuvas	$f = f_0 \frac{V + V_{\text{imtuvo}}}{V - V_{\text{šaltinio}}}$
 Šaltinis	 Imtuvas	$f = f_0 \frac{V - V_{\text{imtuvo}}}{V + V_{\text{šaltinio}}}$
 Šaltinis	 Imtuvas	$f = f_0 \frac{V - V_{\text{imtuvo}}}{V - V_{\text{šaltinio}}}$
 Šaltinis	 Imtuvas	$f = f_0 \frac{V + V_{\text{imtuvo}}}{V + V_{\text{šaltinio}}}$

9 pav. Akustinio Doplerio reiškinių formulės kaita priklausomai nuo šaltinio ir imtuvo judėjimo krypties

Jei imtuvas bei garso šaltinis juda ne tiesiai vienas kito atžvilgiu, o tam tikru kampu (2 pav.), tuomet bangos dažnį galima matuoti šia formule (7).

$$f = f_0 \frac{V - V_{\text{imtuvo}} \cdot \cos \theta_1}{V + V_{\text{šaltinio}} \cdot \cos \theta_2} \quad (7)$$

Kaip ir praeitame pavyzdyje formulė (7) galioja, kai šaltinis ir imtuvas artėja vienas prie kito, priešingu atveju teisinga pertvarkyta formulė (8).

$$f = f_0 \frac{V + V_{\text{imtuvo}} \cdot \cos \theta_1}{V - V_{\text{šaltinio}} \cdot \cos \theta_2} \quad (8)$$



10 pav. Judėjimas kampu

## II. Kokioms bangoms pasireiškia Doplerio efektas?

Doplerio efektas pasireiškia garso, vandens ir taip pat elektromagnetinėms bangomis tuščioje/vakuuminėje erdvėje – ypač šviesos ir radijo bangoms (Young, Freedman, Ford, 2016). Pirmiausia 1842 m. Christian Doppler šį reiškinį nustatė ir apibrėžė garsui, bet netrukus šis efektas buvo apibendrintas ir šviesai. Reikia paminėti, kad Doppler išveda, kad visos žvaigždės esančios baltos, o jų spalva atsirandanti dėl judėjimo, nepasitvirtino. Pirmąjį linijos poslinkį žvaigždės spektre dėl Doppler efekto pavyko išmatuoti tik 1867 metais (Karazija, 2017).

#### 4. Laboratoriniai darbai: fizikinių dėsnių iliustracija

##### Garso greičio ore nustatymas bangų interferencijos metodu



11 pav. Laboratorinio darbo prietaisų schema.

**Darbo užduotis.** Taikant bangų interferencijos metodą, nustatyti garso greitį ore ir apskaičiuoti oro molinių šilumų  $C_p$  ir  $C_v$  santykį.

**Teorinio pasirengimo klausimai.** Stovinčiųjų bangų gavimas. Garso greitis ore. Molekulės laisvės laipsnių sąvoka. Izochorinė ir izobarinė molinės šilumos.

**Teorinė dalis.** Šiame darbe garso greitį išmatuosime gavę jo stovinčiąsias bangas. Tam viena kryptimi sklindančiai bangai

$$s_1 = s_m \cos(\omega t - kx) \quad (9)$$

interferuojant su priešpriešais sklindančia tokio pat dažnio ir amplitudės banga

$$s_2 = s_m \cos(\omega t + kx) \quad (10)$$

gaunama „stovinčioji banga“

$$s = s_1 + s_2 = 2s_m \cos kx \cos \omega t \quad (11)$$

čia  $s_m$  – sklindančios bangos amplitudė,  $\omega = 2\pi n$  – jos ciklinis dažnis,  $k = 2\pi/l$  – banginis skaičius. Lygtis – tai svyravimų lygtis, kurių amplitudė

$$s^* = 2s_m |\cos kx| \quad (12)$$

yra periodinė koordinatės  $x$  funkcija. Taškuose, kurių koordinatė  $x$  tenkina lygtį

$$kx = 0, p, 2p, 3p, \dots \quad (13)$$

nuokrypio amplitudė yra didžiausia ir lygi  $2s_m$ . Šie taškai vadinami stovinčiosios bangos nuokrypio *pūpsniais*. Taškuose, tenkinančiuose sąlygą

$$kx = \frac{\pi}{2}, 3\frac{\pi}{2}, 5\frac{\pi}{2} \pi \quad (14)$$

virpesių amplitudė lygi nuliui. Šie aplinkos taškai nevirpa ir juos vadiname stovinčiosios bangos nuokrypio mazgais.

Molinė šiluma, lygi šilumos kiekiui, kurį suteikus vienam moliui medžiagos jos temperatūra pakyla vienu laipsniu. Dujoms ji labai priklauso nuo jų molekulių sudėtingumo ir nuo proceso, kurio metu suteikiama šiluma, pobūdžio.

Molekulės sudėtingumas susietas su ją sudarančių atomų skaičiumi ir apibūdinamas molekulės laisvės laipsnių skaičiumi. Pastarasis lygus koordinacių skaičiui, reikalingam nusakyti molekulės padėtį erdvėje. Vienatomę molekulę galima laikyti materialiuoju tašku. Jos padėtį nusakome trimis koordinatėmis  $(x, y, z)$ , kurios kinta molekulei slenkant, todėl ji turi 3 slenkamojo judėjimo laisvės laipsnius.

Dviatomės kietojo ryšio molekulės erdvinė padėtis apibūdinama 5 koordinatėmis: trys jų  $(x, y, z)$  nusako molekulės masės centro padėtį ir du kampai  $(a, b)$  su koordinacių ašimis – jos ašies orientaciją. Pastaroji kinta molekulei sukantis, todėl tokia molekulė turi 3 slenkamojo ir 2 sukamojo judėjimo laisvės laipsnius. Kai ryšys tarp atomų yra tamprus, tai tokia molekulė turi dar vieną virpamojo judėjimo laisvės laipsnį. Triatome erdvine struktūra pasižyminti molekulė turi ne mažiau kaip 6 laisvės laipsnius.

Molekulinėje fizikoje įrodoma, kad kiekvienam laisvės laipsniui vidutiniškai tenka  $\frac{1}{2}kT$  kinetinės energijos (čia  $k$  Bolcmano konstanta). Tačiau virpėjimo laisvės laipsniui vidutiniškai dar tiek pat ( $\frac{1}{2}kT$ ) tenka potencinės energijos. Todėl molekulinės fizikos energetinėse lygtyse molekulės sudėtingumas apibūdinamas dydžiu

$$i = (3 + n_{suk} + 2n_{virp}) \quad (15)$$

čia 3 – molekulės slenkamojo,  $n_{suk}$  – sukamojo ir  $n_{virp}$  – virpamojo judėjimo laisvės laipsnių skaičius. Kai tarp atominis ryšys molekulėje yra kietas ( $n_{virp} = 0$ ), tuomet  $i$  lygus molekulės laisvės laipsnių skaičiui.

Dujoms ypač svarbi izochorinė (pastovaus tūrio) molinė šiluma  $C_v$  ir izobarinė (pastovaus slėgio) molinė šiluma  $C_p$ . Molekulinėje fizikoje parodoma, kad  $C_v = \frac{i}{2}R$ ,  $C_p = \frac{i+2}{2}R$ , todėl

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{2} \quad (16)$$

Oras, kaip ir visos dujos, pasižymi tik tūriniu tamprumu, todėl garso bangos yra išilginės. Jas sudaro periodiškai besikaitaliojantys oro sutankėjimai ir praretėjimai, kurie nuolat tolsta nuo garso šaltinio. Sutankėjimo vietose temperatūra pakyla, praretėjimo – sumažėja. Dėl mažo oro šilumos laidumo šie sutankėjimo ir praretėjimo procesai, galima sakyti, vyksta be šilumos mainų, t.y. adiabatiškai. Adiabatinį procesą aprašo Puasono lygtis  $pV^\gamma = \text{const}$  ir garso bangų greitį ore apibūdina adiabatinis tūrio tamprumo modulis  $K = \gamma p$ . Todėl garso greitis ore

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (17)$$

čia  $M @ 29,2 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$  – oro vieno molio masė,  $r$  – oro tankis;  $R$  – universalioji dujų konstanta.

**Darbo aprašymas.** Laboratorinio darbo įrenginio principinė schema parodyta paveiksle. Ją sudaro tiesus stiklinis akustinis vamzdis, kurio viename gale įtaisytas garsiakalbis, o antrajame – mikrofonas. Jų membranos yra lygiagrečiose plokštumose. Mikrofonas prijungtas prie kompiuterio. Prie garsiakalbio prijungtas garsinių dažnių generatorius (GDG), todėl generuojamos akustinės bangos sklinda vamzdžiu.

1. Gerai susipažįstame su naudojamais įrenginiais, juos įjungiamo į elektros tinklą, paruošiamo darbui GDG bei kompiuterį  
Įjungus generatorių automatiškai pradedamas generuoti 1 kHz sinusinės formos signalas.
2. Bandymą pradėti nuo 1 kHz dažnio.
3. Strypą su pritvirtintu mikrofonom atitraukiame netoli dešiniojo akustinio vamzdelio galo.
4. Lėtai stumiame strypą su mikrofonom į kairę ir stebime virpesių amplitudę ekrane. Kai virpesių amplitudė bus didžiausia, mikrofonas bus stovinčios bangos pūpsnyje. Užsirašome jo padėtį milimetrais.
5. Toliau lėtai stumiame mikrofoną į kairę iki gretimo pūpsnio ir išmatuojame nuotolį tarp dviejų pūpsnių: tai bus  $li/2$ . Aprašytus veiksmus atliekame dar esant 1,5 kHz, 2 kHz ir 2,5 kHz dažniams.
6. Iš formulės  $v = li f_i$  apskaičiuojame greitį ore.
7. Kelvino skalėje užrašę oro temperatūrą, apskaičiuojame oro molinių šilumų  $C_p$  ir  $C_v$  santykį  $g$ .
8. Apskaičiuojame garso greičio bei molinių šilumų santykio vidutinės vertės ir jų standartinius nuokrypius, parodančius kiek vidutiniškai kiekvienas matavimas yra nukrypęs nuo vidutinės vertės.

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum(\bar{v} - v_i)^2}{n(n-1)}}, \quad S_\gamma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{\gamma} - \gamma_i)^2}{n(n-1)}} \quad (18)$$

9. Baigus darbą kompiuteris išjungiamas (kelias sekundes palaikius įjungimo/išjungimo mygtuką bei atsiradusiame dialogo lange pasirinkus „OK“).
10. Matavimo ir skaičiavimų rezultatus surašome į lentelę

$R = 8,314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1};$ $M = 29,2 \cdot 10^{-3} kg \cdot mol^{-1};$ $T = (273 + t)K$							
$f_i,$ Hz	$l_i,$ m	$v_i,$ m/s	$\lambda_{v\tilde{n}},$ m/s	$\gamma_i$	$< \gamma >$	$S_v,$ m/s	$S_t$
1000	0,344 0,346 0,342	344 346 342	344	1,411 1,428 1,395	1,411	0.00947454872	0,0054
1500	0.23 0.23 0.228 0.232	345 345 342 348	345	1.420 1.420 1.395 1.444	1.420	0.014253184	
2000	0.172 0.172 0.174 0.172	344 344 348 344	345	1.411 1.411 1.444 1.411	1.420	0.011671353	
2500	0.138 0.138 0.136 0.14	345 345 340 350	345	1.420 1.420 1.379 1.461	1.420	0.023755506	

**Išvada.** Taikant bangų interferencijos metodą, nustatėme garso greitį ore, apskaičiavome garso greičio bei molinių šilumų  $C_p$  ir  $C_v$  santykio vidutinės vertės ir jų standartinius nuokrypius, parodančius kiek vidutiniškai kiekvienas matavimas yra nukrypęs nuo vidutinės vertės.

## Elektromagnetinių bangų savybių tyrimas

**Darbo užduotis.** Taikant bangų interferencijos metodą, nustatyti šviesos greitį ir ištirti stovinčiosios elektromagnetinės bangos savybes.

**Teorinio pasirengimo klausimai.** Stovinčiųjų bangų gavimas. Šviesos greitis ore. Mechaninių ir elektromagnetinių bangų pranašumai.

**Teorinė dalis.** Šiame darbe šviesos greiti išmatuosime gavę jo stovinčiąsias bangas. Tam viena kryptimi sklindančiai bangai.

$$s_1 = s_m \cos(\omega t - kx) \quad (19)$$

interferuojant su priešpriešiais sklindančia tokio pat dažnio ir amplitudės banga

$$s_2 = s_m \cos(\omega t + kx) \quad (20)$$

Gaunama „stovinčioji banga“

$$s = s_1 + s_2 = 2s_m \cos kx \cos \omega t \quad (21)$$

čia  $s_m$  – sklindančios bangos amplitudė  $\omega = 2\pi\nu$  – jos ciklinis dažnis,  $k = 2\pi / \lambda$  – banginis skaičius.

lygtis – tai svyravimų lygtis, kurių amplitudė

$$s^* = 2s_m |\cos kx| \quad (22)$$

yra periodinė koordinatės  $x$  funkcija. Taškuose, kurių koordinatė  $x$  tenkina lygtį

$$kx = 0, p, 2p, 3p, \dots \quad (23)$$

nuokrypio amplitudė yra didžiausia ir lygi  $2s_m$ . Šie taškai vadinami stovinčiosios bangos nuokrypio pūpsniais. Taškuose, tenkinančiuose sąlygą

$$kx = \frac{\pi}{2}, 3\frac{\pi}{2}, 5\frac{\pi}{2}, \dots \quad (24)$$

virpesių amplitudė lygi nuliui. Šie aplinkos taškai nevirpa ir juos vadiname stovinčiosios bangos nuokrypio mazgais. Visas šis aprašytas modelis taikytinas tiek mechaninėms tiek elektromagnetinėms bangoms.

**Darbo aprašymas.** Laboratorinio darbo įrangą sudaro elektromagnetinių bangų generatorius pažymėtas TX (angl. transmitter), elektromagnetinių bangų imtuvas RX (angl. receiver), aliuminis atspindiklis, mobilus elektromagnetinio lauko detektorius. Naudojant šią įrangą galima suformuoti tinkamas sąlygas stovinčiai bangai stebėti ir jos savybėms tirti. Kai tarp siųstuvo ir imtuvo yra tam tikras nuotolis, terpėje tarp siųstuvo ir imtuvo gaunamos stovinčiosios bangos 1 pav. Svarbu, kad atstumas tarp dviejų gretimų pūpsnių (arba mazgų) lygus pusei sklindančiosios bangos ilgio ( $\lambda/2$ ). Tuo naudojamosi matuojant bangos ilgį. Gerai susipažįstame su naudojamais įrengimais, juos

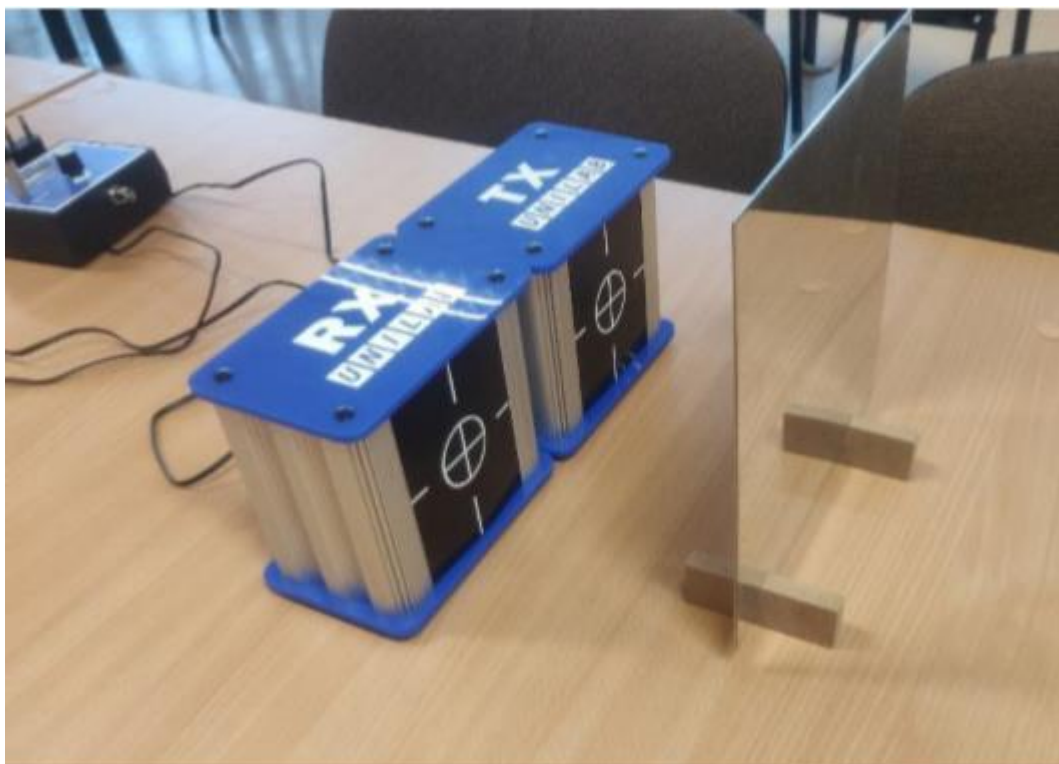


įjungiamo į elektros tinklą. Prieš pradėdant darbą įsitikinkite, kad ant imtuvo esanti garso reguliavimo rankenėlė yra nustatyta į mažiausią padėtį, o ant siųstuvo esantis moduliacijos šaltinio jungiklis įjungtas į vidinį generatorių (viršutinė padėtis).

### **Darbo eiga.**

#### **Stovinčiosios bangos tyrimas keičiant bangos sklaidimo terpės matmenis**

1. Įranga išdėstyti taip kaip parodyta 1 pav. Tokiu būdu suformuojama terpė elektromagnetinei stovinčiajai bangai susidaryti.



12 pav. Elektromagnetinių bangų generatorius, imtuvas, aliuminis atspindiklis, mikrofonas

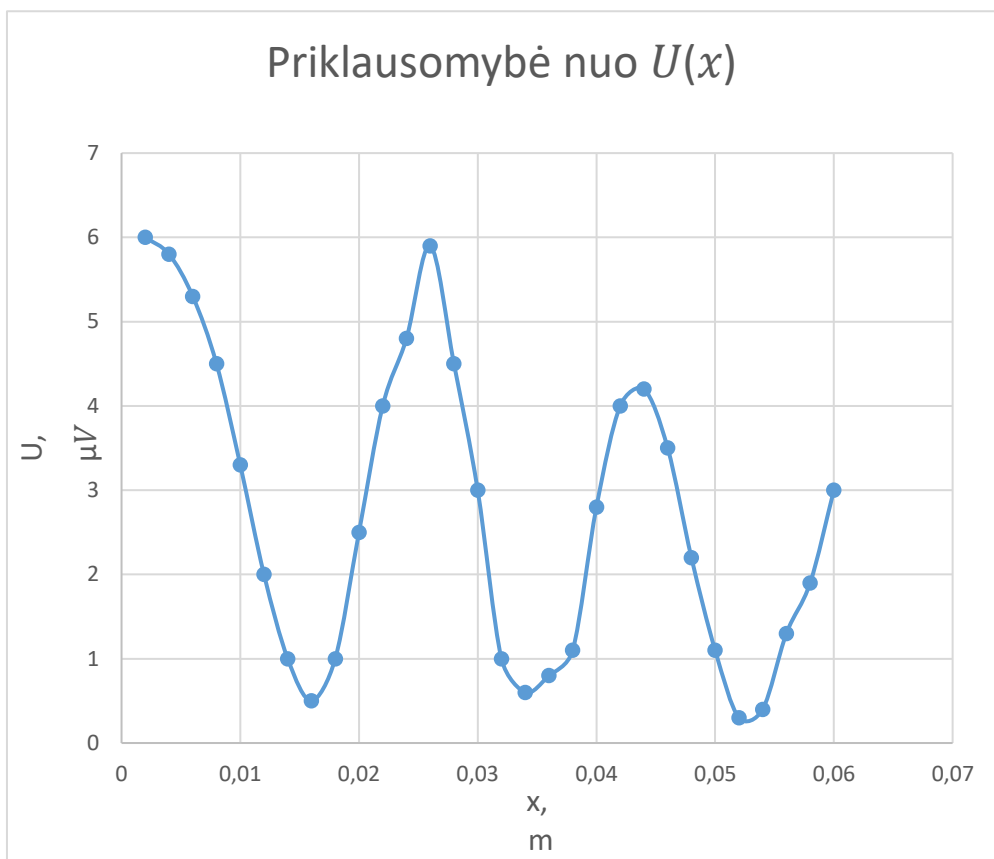
2. Užsidėjus ausines ir LABAI NEDAUG padidinus garso lygį ant imtuvo esančia rankenėle rasti atspindiklio padėtį, kuriai esant girdimas aukšto dažnio (1kHz) tonas. Lėtai keičiame atspindiklio atstumą nuo imtuvo ir siųstuvo. Klausome kaip keičiasi garso amplitudė. Kai girdima didžiausia amplitudė – imtuvas kurį reikia pastumti atspindiklį, tarp gretimų didžiausių amplitudžių taškų bus lygi  $\lambda/2$ . Išmatuokite atstumą tarp ne mažiau 3 stovinčiosios bangos pūsnių ir užrašykite rezultatą į lentelę. Lentelėje  $n$  – pūsnių skaičius įskaitant pirmąjį. Apskaičiuokite vidutinį bangos ilgį ir gauta šviesos greitį, žinant jog generatoriaus dažnis – 10,5GHz. Eksperimentą pakartokite dar 3 kartus artinant ar tolinant atspindiklį. Apskaičiuokite vidutinę šviesos greičio vertę.

$v_i$ , GHz	$\Delta x$ , m	n	$\lambda = \frac{2\Delta x}{n-1}$ , m	c, m/s	$\langle c \rangle$ , m/s
10,5	0.015	2	0.0300	0.315	0.305
	0.029	3	0.0290	0.305	0.304
	0.044	4	0.0293	0.308	0.304
	0.058	5	0.0290	0.305	0.303
	0.073	6	0.0292	0.307	0.303
	0.087	7	0.0290	0.305	0.302
	0.100	8	0.0286	0.300	0.301
	0.115	9	0.0288	0.302	0.301
	0.129	10	0.0287	0.301	0.301

### Stovinčiosios bangos intensyvumo pasiskirstymo tyrimas

- Įranga išdėstyti taip, kad tarp imtuvo ir siųstuvo būtų apie 20cm.
- Lėtai tolinkite imtuvą nuo siųstuvo ir klausydamiesi ausinėse raskite pirmąją imtuvo padėtį kurioje aiškiai girdimas stovinčiosios bangos pūpsnis.
- Atspindiklį pastatykite tarp imtuvo ir siųstuvo, 5 sveikus pusbangius nuo imtuvo centro. Tokių būdu išlaikomos sąlygos stovinčiajai bangai susidaryti. Pusbangės vertę naudokite gautą praeito eksperimento metu. Imtuvą galite išjungti.
- Pastatykite mobilių elektromagnetinio lauko detektorius tarp siųstuvo ir atspindiklio taip, kad jo skalėje būtų rodoma didžiausia vertė. Detektorius įjungiamas pasukus jo stiprinimo rankenėlę didėjimo kryptimi. Stiprinimo rankenėlės padėtį eksperimentui parinkti taip, kad esant didžiausiai elektromagnetinio lauko stiprio vertei rodyklė tilptų į skalę.
- Keičiant detektoriaus padėtį kas 2mm (artinant link imtuvo) pasižymime jo parodymus lentelėje. Eksperimentą tęsiame tol kol gauname bent 30 eksperimentinių taškų. Rezultatus rašome lentelėje.
- Išjungiamo įrangą. Detektorius išjungiamas jo stiprinimo rankenėlę pasukus mažėjimo kryptimi iki galo.
- Brėžiame priklausomybę  $U(x)$

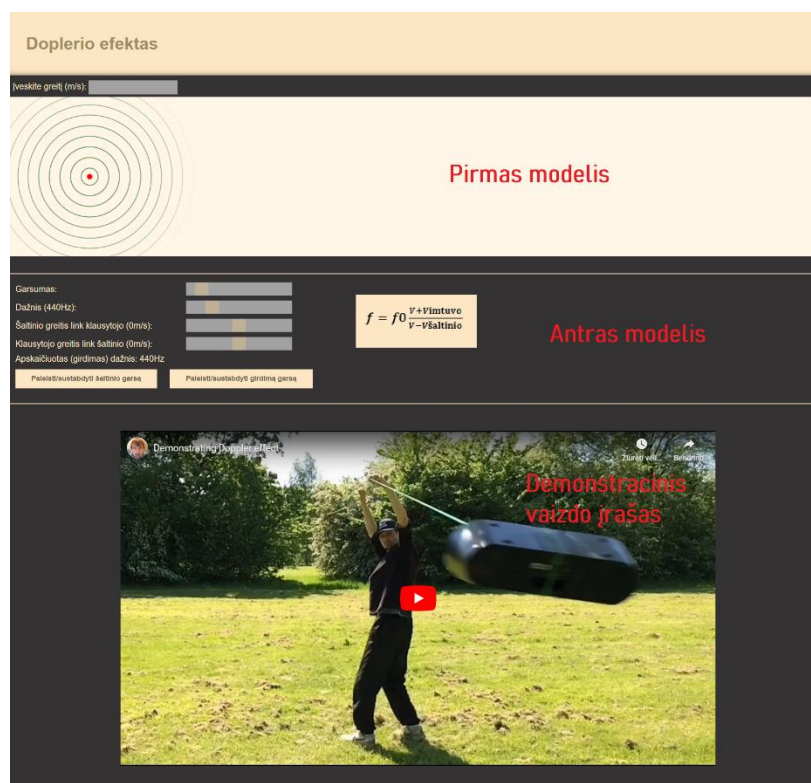
U, $\mu V$	x, m
6	0.002
5.8	0.004
5.3	0.006
4.5	0.008
3.3	0.01
2	0.012
1	0.014
0.5	0.016
1	0.018
2.5	0.02
4	0.022
4.8	0.024
5.9	0.026
4.5	0.028
3	0.03
1	0.032
0.6	0.034
0.8	0.036
1.1	0.038
2.8	0.04
4	0.042
4.2	0.044
3.5	0.046
2.2	0.048
1.1	0.05
0.3	0.052
0.4	0.054
1.3	0.056
1.9	0.058
3	0.06



13 pav. Bandymo grafikas

## 5. Probleminio uždavinio rezultatai

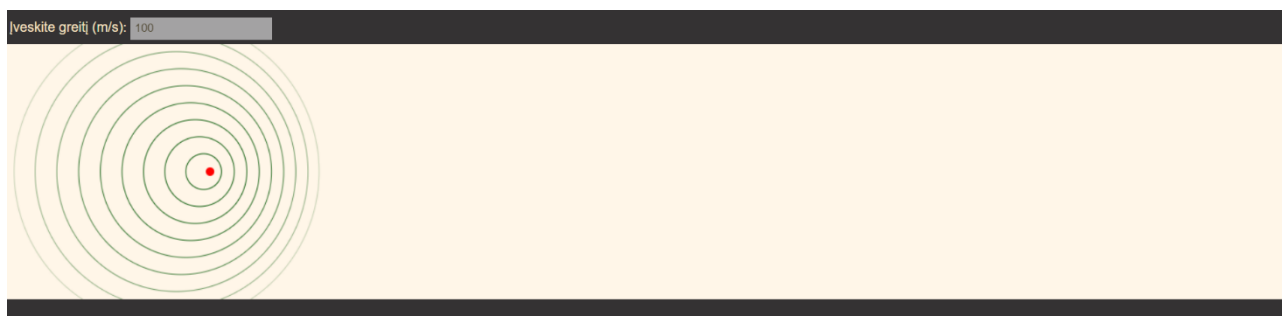
Siekdami parodyti Doplerio reiškinių veikimą sukūrėme interaktyvią svetainę su modeliais (nuoroda į svetainę: <https://dzytizz.github.io/doppler-effect/>).



14 pav. Interaktyvi svetainė

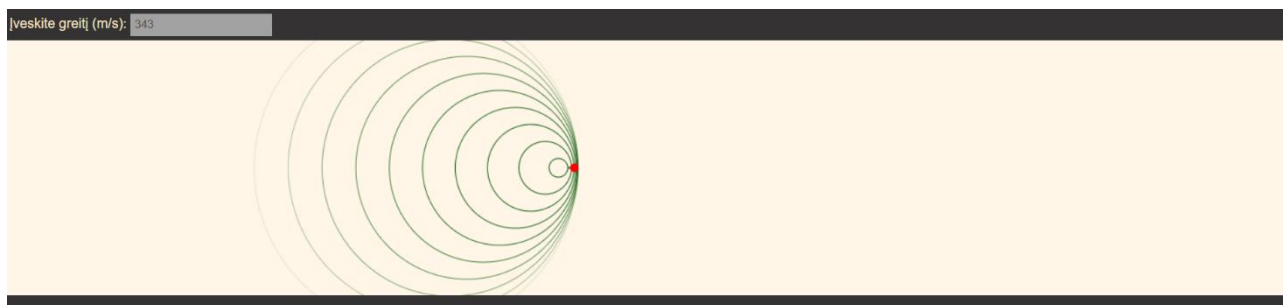
Svetainę sudaro 3 dalys: pirmas modelis, vaizduojantis pasirinktu greičiu judantį bangų šaltinį, antras modelis, apskaičiuojantis ir demonstruojantis klausytojo garso dažnį, kai garso šaltinis ir klausytojas juda pasirinktu greičiu ir demonstracinis vaizdo įrašas (nuoroda: [https://www.youtube.com/watch?v=jTmFSTzeBMw&feature=emb\\_title](https://www.youtube.com/watch?v=jTmFSTzeBMw&feature=emb_title)), kuriame klausytojas nejuda, tačiau juda garso šaltinis, prištas prie virvės.

Atsidarius svetainę pirmajame modelyje matomas nejudantis bangų šaltinis. Į teksto laukelį įvedus pasirinktą greitį, šaltinis pradeda judėti:



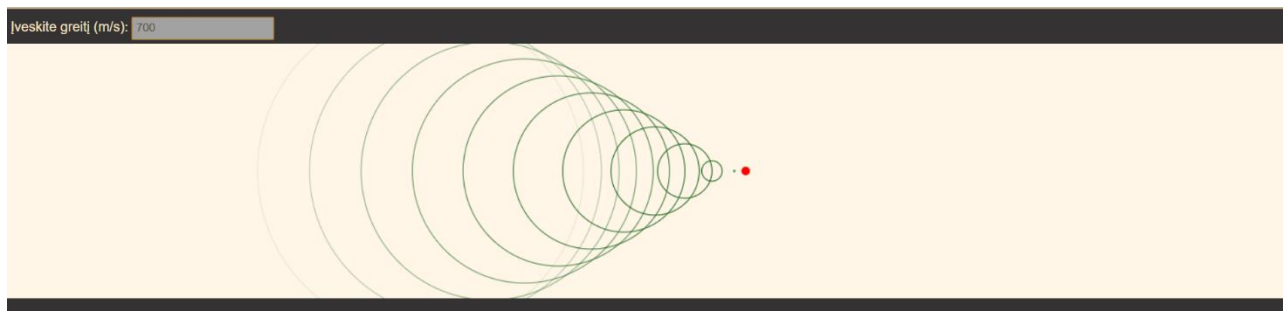
15 pav. Garso bangų šaltinis, judantis 100m/s greičiu.

Modelyje matoma, kad šaltinis juda į kairę pusę. Padidėję tarpai tarp bangas vaizduojančių linijų reiškia, kad šaltinio priekyje (judėjimo krypties link) linijos yra tankesnės, t. y. dažnis padidėja, o šaltinio gale (priešinga judėjimo kryptčiai) tankis pamažėja – dažnis žemesnis. Padidinus judėjimo greitį iki vidutinio garso greičio ore, matoma, kad šaltinio greitis sutampa su bangos fronto greičiu:



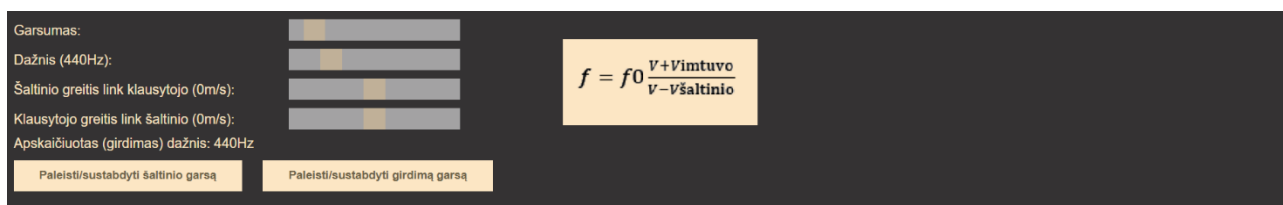
16 pav. Garso bangų šaltinis, judantis 343m/s greičiu.

Kai garso bangų šaltinis juda didesniu nei garso greičiu, garso bangų šaltinis juda greičiau nei jo sukuriama garso bangos, todėl pastebimas smūginės bangos modelis:

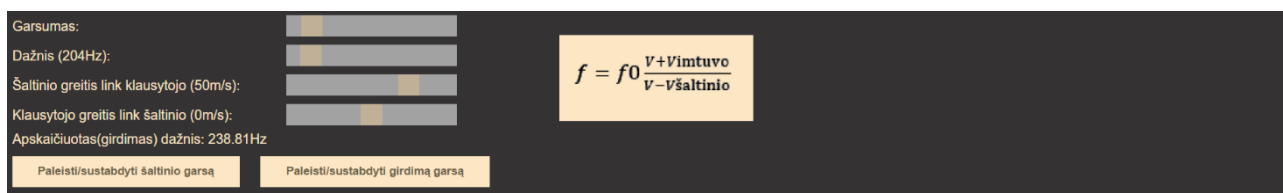


17 pav. Smūginės bangos modelis, kai garso šaltinis juda 700m/s greičiu.

Antrame modelyje apskaičiuojamas ir girdimas klausytojo garso dažnis, kai garso šaltinis arba klausytojas juda pasirinktu greičiu.



18 pav. Antras modelis. Kai šaltinio greitis ir klausytojo greitis lygus 0, garso dažnis nepakinta.



19 pav. Kai šaltinio greitis link klausytojo didėja, didėja ir garso bangos dažnis.

Garsumas:   
 Dažnis (204Hz):   
 Šaltinio greitis link klausytojo (0m/s):   
 Klausytojo greitis link šaltinio (100m/s):   
 Apskaičiuotas(girdimas) dažnis: 263.48Hz

$$f = f_0 \frac{v + v_{\text{imtuvo}}}{v - v_{\text{šaltinio}}}$$

Paleisti/sustabdyti šaltinio garsą      Paleisti/sustabdyti girdimą garsą

20 pav. Kai klausytojo greitis link šaltinio didėja, didėja ir girdimos garso bangos dažnis.

Trečioje svetainės dalyje matomas vaizdo įrašas, paaiškinantis ir parodantis Doplerio efekto pasireiškimą gyvai. Vaizdo įrašė garso šaltinis (kolonėlė) pririšama prie virvės ir sukama. Kai garso šaltinis juda link klausytojo (šiuo atveju kameros) garso dažnis didėja, kai tolsta, mažėja. Tai Doplerio efektas.

## **Išvados**

Nustatėme, kad Doplerio efektas – bangos dažnio ir ilgio kitimas, kai klausytojas arba šaltinis juda vienas kito atžvilgiu. Reiškinys yra plačiai naudojamas mokslo ir inžinerijos pasaulyje. Doplerio reiškinys pritaikomas radaruose, greičio matuokliuose, naudojamas kardiogramai atlikti. Darbo metu nustatėme, kad Doplerio reiškinys galioja garso ir elektromagnetinėms bangomis. Gautieji laboratorinių darbų rezultatai atitiko lauktuosius, todėl priėjome išvados, kad laboratoriniai darbai atlikti teisingai. Pagrindinę užduotį įvykdėme sukūrę interaktyvią svetainę ir patalpinome ją internete, kad būtų lengvai ir viešai prieinama. Taigi problemą išsprendėme pilnai. Grupė įgavo naujų žinių apie Doplerio reiškinį ir jo pritaikymo būdus. Patobulinome savo bendradarbiavimo, darbų planavimo ir darbo grupėje įgūdžius.

### Literatūros sąrašas

1. KARAZIJA Romualdas. *Fizikos istorija*. Pataisytas ir papildytas elektroninis leidimas – Vilnius: Vilniaus universiteto Fizikos fakultetas, 2017.
2. YOUNG Hugh, FREEDMAN Roger, FORD A. Lewis, University Physics with Modern Physics Technology Update: Pearson New International Edition, 2016
3. JAKUČIONIS, Algimantas. Radionavigacinės sistemos ir įranga. *Vilnius: Technika*, 2007, 28: 73-74.
4. <http://www.astro.ucla.edu/~wright/doppler.htm> [žiūrėta 2020-04-08]