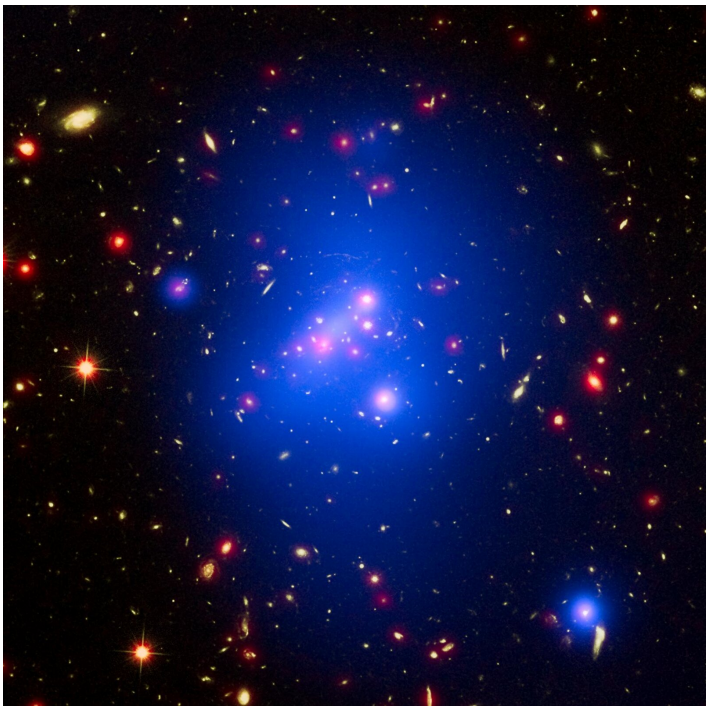
Na czym polega efekt Dopplera?

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Symulacja interaktywna
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela

Źródło: dostępny w internecie: https://pixabay.com/photos/speaker-membrane-audio-sound-bass-820005/ [dostęp 15.07.2022].

Czy to nie ciekawe ?

Gdy spacerując ulicą słyszymy dźwięk zbliżającej się karetki, staje się on dla nas coraz głośniejszy. Kiedy karetka się oddala – staje się coraz cichszy. W momencie, gdy karetka mija nas zachodzi jeszcze jedna zmiana – dźwięk zmniejsza swoją wysokość. Jest to skutek efektu Dopplera, zgodnie z którym odbierana częstotliwość fali zależy od prędkości źródła dźwięku względem odbiorcy.



Rys. a. Ten sam efekt Dopplera pozwala nam badać prędkości oddalających się od nas galaktyk. W tym wypadku nie zmienia się częstotliwość dźwięku, ale położenie linii w widmie danego obiektu.
Źródło: NASA/CXC/Univ of Missouri/M.Brodwin et al; NASA/STScI; JPL/CalTech.

Twoje cele

- poznasz efekt Dopplera,
- zrozumiesz, dlaczego częstotliwość dźwięku poruszających się obiektów zależy od tego, czy one się do nas zbliżają, czy oddalają,
- przeanalizujesz i zinterpretujesz wpływ ruchu źródła i obserwatora na częstotliwość odbieranej fali.

Przeczytaj

Warto przeczytać

1. Poruszające się źródło fali

Bardzo często mamy do czynienia z sytuacją, kiedy źródło fali porusza się w stosunku do obserwatora. Najczęściej spotykanym w życiu przykładem takich fal są fale dźwiękowe docierające do nas od poruszających się pojazdów. Źródłem tych fal mogą być samoloty lub ptaki - niektóre z ptaków potrafią rozwinąć prędkość powyżej 100 km/h. Innym typem fal, których źródło porusza się względem nas, są fale elektromagnetyczne. Atomy rozgrzanego do czerwoności żelaza drgają ruchem termicznym równocześnie świecąc. Źródło fali światła może być także obiektem makroskopowym, na przykład oddalającą się od Ziemi galaktyką.

Ograniczymy nasze rozważania do sytuacji, gdy:

1. mamy do czynienia z jednorodnym ośrodkiem materialnym, w którym fala porusza się z prędkością V,
2. obserwator nie porusza się względem ośrodka, w którym fala się rozchodzi,
3. źródło drga ruchem harmonicznym o okresie T, czyli z częstotliwością $f = \frac{1}{T}$, a jednocześnie porusza się postępowym ruchem jednostajnym względem ośrodka z prędkością v.

2. Fala na wodzie, wytworzona przez poruszające się źródło

Rozpocznijmy od obserwacji fal na wodzie, wytwarzanych przez źródło, które porusza się ruchem jednostajnym.

Doświadczenie

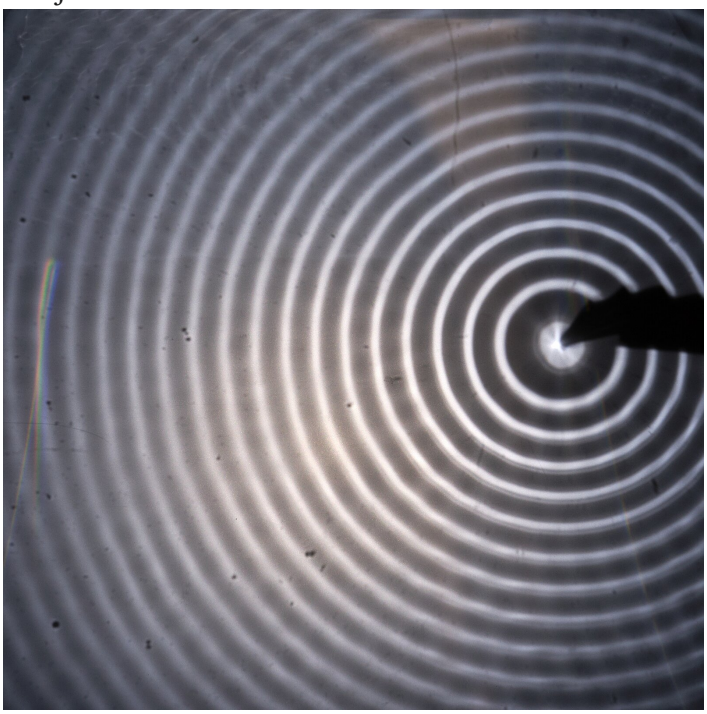
Do doświadczenia potrzebne będą: płaskie naczynie z wodą (na przykład „blacha” z piekarnika), oświetlone z góry punktową żarówką, sztywny pręcik, na przykład długopis.

Doświadczenie wykonaj następująco:

1. Wzbudź kołową falę harmoniczną, „stukając” rytmicznie w powierzchnię wody w jednym punkcie.
2. Następnie wzbudź falę, „stukając” rytmicznie w powierzchnię wody, ale przesuwając jednocześnie rękę z pręcikiem ruchem jednostajnym wzdłuż prostej.

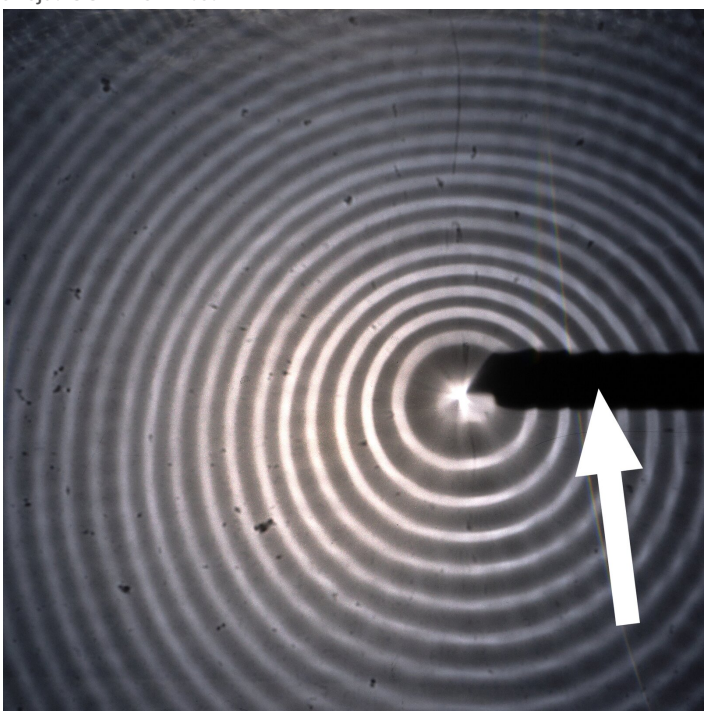
Porównaj fale powstające w obu przypadkach.

Wyniki podobnego doświadczenia przedstawiają Fot. 1a i 1b. Fala pobudzana była nie ręką, ale odpowiednim urządzeniem mechanicznym. Na Rys. 1a źródło fali było nieruchome. Strzałka na Rys. 1b wskazuje kierunek ruchu źródła.



Rys. 1a. Fale na wodzie

Źródło: Maciej J. Mrowinski, licencja: CC BY-SA 4.0.



Rys. 1b. Fale na wodzie

Źródło: Maciej J. Mrowinski, licencja: CC BY-SA 4.0.

W doświadczeniu obserwujemy, że fala powstająca w przypadku ruchomego źródła jest inna niż w przypadku źródła nieruchomego:

1. W przypadku *a* grzbiety fal tworzą układ okręgów ze środkami w jednym punkcie, czyli w miejscu pobudzającego falę źródła. Dlatego długość fali λ (odległość między kolejnymi szczytami) jest jednakowa dla wszystkich kierunków.

2. W przypadku *b* grzbiety fal też tworzą układ okręgów. Tym razem jednak środki tych okręgów znajdują się w różnych punktach, ponieważ pobudzające powierzchnię wody źródło poruszało się. Długość fali nie jest jednakowa dla wszystkich kierunków. Najmniejsza jest w obszarze przed poruszającym się źródłem, nazwijmy ją λ_1. Największa – za poruszającym się źródłem: λ_2.

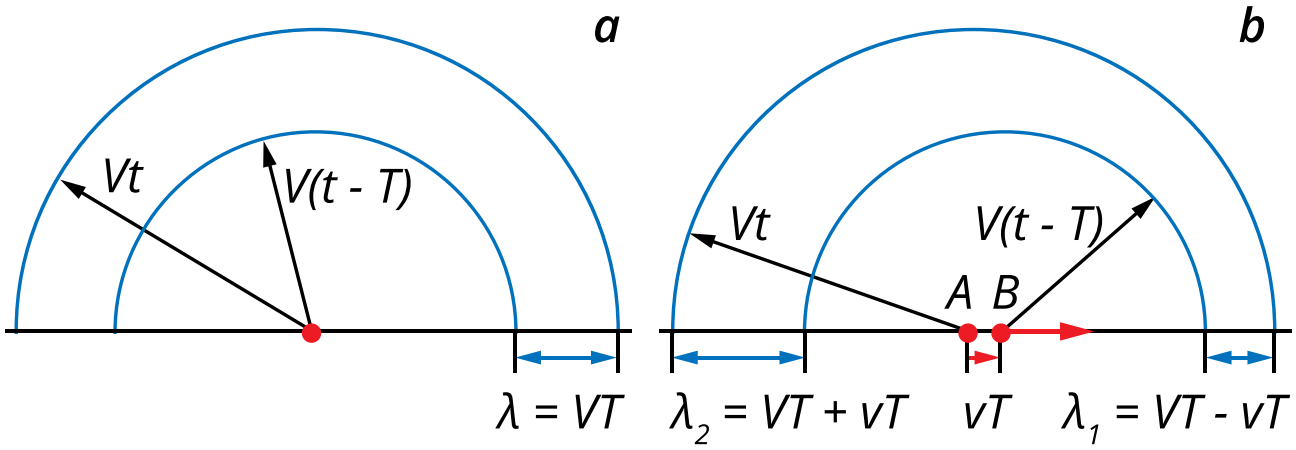
Wiąże się z tym efekt dodatkowy: częstotliwość rejestrowana przez obserwatora, zależna od długości odbieranej fali, w przypadku ruchomego źródła zależy od położenia obserwatora względem źródła. Największa jest na półprostej przed źródłem, nazwijmy ją f_1. Najmniejsza na półprostej za źródłem, nazwijmy ją f_2.

Zjawisko polegające na tym, że częstotliwość fali wytwarzanej przez poruszające się źródło jest na ogół inna niż częstotliwość fali wytwarzanej przez źródło nieruchome, nazywamy zjawiskiem Dopplera.

W praktyce najczęściej spotykamy efekt Dopplera dla fal dźwiękowych. Objawia się on następująco: jeżeli poruszające się z dostatecznie dużą prędkością *v* źródło dźwięku mija nieruchomego obserwatora, słyszy on wyraźnie obniżenie wysokości dźwięku.

3. Zmiana długości fali w zjawisku Dopplera

Wyobraźmy sobie, że źródło nie wysyła fali harmonicznej, ale co jeden okres *T* wysyła krótki impuls falowy. Przedstawiają to schematycznie Rys. 2., *a* dla źródła nieruchomego i *b* dla źródła poruszającego się.



Rys. 2. Ruchome i nieruchome źródło fal

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Porównując te rysunki widzimy, że odległość pomiędzy sygnałami, którą możemy utożsamić z długością fali harmonicznej, zależy od kierunku ruchu źródła względem naszej pozycji. Analizując tę sytuację możemy otrzymać wzór na zmianę długości fali na prostej, po której porusza się źródło.

3.1 Długość fali λ_1 w punktach leżących przed źródłem:

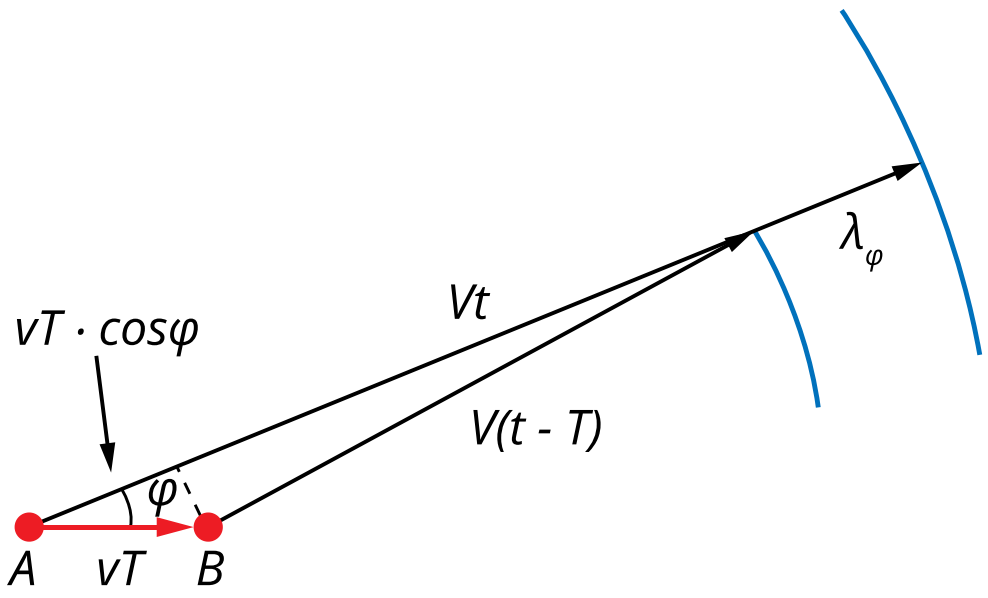
$$\lambda_1 = VT - vT = \lambda(1 - \frac{v}{V})$$

3.2 Długość fali λ_2 w punktach leżących przed źródłem:

$$\lambda_2 = VT + vT = \lambda(1 + \frac{v}{V})$$

3.3 Długość fali λ_φ w dowolnym punkcie.

Jeśli odbiorca nie znajduje się na prostej po której porusza się źródło, to zmiana długości fali zależy od kąta φ, jaki tworzy jego prędkość z odcinkiem łączącym położenia źródła i obserwatora.



Rys. 3. Długość fali w dowolnym punkcie między źródłem i obserwatorem

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Przy oznaczeniu jak na Rys. 3, dla dużych odległości między obserwatorem i źródłem długość fali λ_φ jest równa:

$$\lambda_\varphi = VT - vT\cos\varphi = \lambda(1 - \frac{v\cos\varphi}{V})$$

Powyższy wzór dla kątów $\boldsymbol{\varphi} = 0^0$ oraz $\boldsymbol{\varphi} = 180^0$ przekształca się w odpowiednie wzory wyprowadzone wcześniej.

4. Zmiana częstotliwości w zjawisku Dopplera

Mówiliśmy, że efekt Dopplera zachodzi dla fal dźwiękowych. W tym wypadku wygodniej jednak nie operować długością fali λ, a raczej jej częstotliwością *f*.

Dla fal rozchodzących się z prędkością V zachodzi ogólny związek:

$$\lambda = VT = \frac{V}{f}.$$

Stosując tę równość dla wcześniej wyprowadzonych wzorów na długości fali, dostajemy związki łączące częstotliwości fali odbieranej przez odbiorcę z częstotliwością wytwarzaną przez źródło:

4.1 Na prostej, wzdłuż której porusza się źródło, przed źródłem:

$$f = f_1(1 - \frac{v}{V})$$

4.2 Na prostej, wzdłuż której porusza się źródło, za źródłem:

$$f = f_1(1 + \frac{v}{V})$$

4.3 Dla obserwatora nie znajdującego się na prostej, po której porusza się źródło:

$$f = f_\varphi(1 - \frac{v \cos \varphi}{V})$$

Słowniczek

efekt Dopplera

(*ang.: Doppler effect*) zjawisko fizyczne polegające na zmniejszeniu lub zwiększeniu częstotliwości odbieranej fali przez obserwatora wynikające z ruchu źródła fali.

Symulacja interaktywna

Na czym polega efekt Dopplera?

Jaki wpływ ma ruch źródła fali na układ jej grzbietów? Symulacja pozwoli Ci uzyskać różne obrazy, zależnie od tego, czy źródło spoczywa, porusza się jednostajnie czy ruchem przyspieszonym.
Sprawdzisz w praktyce, czy wyprowadzone wyrażenia na obserwowaną długość fali są stosowalne do animacji.
Obejrzysz proces powstawania tzw. stożka Macha - fali uderzeniowej powstającej przy przekraczaniu bariery dźwięku przez samoloty.

Wybierz:

a) Źródło nieruchome, by przekonać się, że grzbiety tworzą układ współśrodkowych okręgów. Wykorzystaj symulację, by określić prędkość fali, jej długość oraz częstotliwość.

b) Źródło poruszające się jednostajnie; nastawiaj różne prędkości. Przekonaj się, że grzbiety tworzą układ okręgów, które nie są współśrodkowe. Wykorzystaj symulację, by określić długość fali obserwowanej w punktach leżących wzdłuż kierunku ruchu źródła – zarówno przed źródłem jak i za nim.

c) Opcję zaawansowaną, w której źródło porusza się ruchem przyspieszonym; nastawiaj różne przyspieszenia. Przekonaj się, że gdy prędkość źródła przekroczy prędkość fali, to obraz tworzony przez grzbiety istotnie się zmienia. Rozpoznaj tzw. falę Macha.

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Polecenie 1

Przeprowadź symulację rozchodzenia się fali z nieruchomego źródła. Na podstawie jej wyników wyznacz prędkość rozchodzenia się fali $\boldsymbol{V}$ w ośrodku.

Polecenie 2

Przeprowadź symulację rozchodzenia się fali ze źródła poruszającego się ze stałą prędkością $\boldsymbol{v}$ wzdłuż osi OX. Na podstawie jej wyników zbadaj stosowalność wyrażeń wyprowadzonych w części „Przeczytaj” dla przypadków 3.1 i 3.2.

Przyjmij, że prędkość fali $\boldsymbol{V}$ w ośrodku jest taka sama, jak uzyskana w poprzednim poleceniu.

Polecenie 3

Przygotuj prezentację na temat „Przekraczanie bariery dźwięku. Stożek Macha i jego powstawanie”. Niezbędne wiadomości wyszukaj w dostępnych źródłach. Wykorzystaj symulację do wykonania serii ilustracji dla potrzeb prezentacji. Z każdego otrzymanego obrazu utwórz zrzut z ekranu na swoim urządzeniu, uzupełnij odpowiednimi opisami i wkomponuj w swoją prezentację.

1. Zacznij od opcji „Ruch jednostajny źródła” by pokazać, że w kierunku ruchu źródła następuje zagęszczenie grzbietów fali. To zagęszczenie jest tym większe, im bardziej prędkość źródła zbliża się do prędkości fali.
2. W opcji „Ruch przyspieszony źródła” zwiększaj stopniowo przyspieszenie. W trakcie 50-sekundowej symulacji uzyskasz końcową prędkość źródła coraz bliższą prędkości fali. Opisz charakter ewolucji tego zagęszczenia; opisz także jego propagację w przestrzeni.
3. W opcji „Ruch przyspieszony źródła” nastawiaj przyspieszenia zapewniające przekroczenie przez źródło prędkości fali przed upływem czasu symulacji. Opisz powstający stożek Macha.

3.1 Czy jego pojawienie się ma związek z propagacją obszaru zagęszczenia grzbietów fali?

3.2 Co jest słyszane przez obserwatora na Ziemi jako huk związany z przekroczeniem bariery dźwięku?

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

Wskaż właściwe dokończenie zdania.
Jeśli źródło fal oddala się od nas, to częstotliwość fal odbieranych przez nas jest:

- taka sama, jak w przypadku, gdyby to źródło się zbliżało do nas
- niższa, niż częstotliwość fal wysyłanych z źródła
- taka sama, jak częstotliwość fal wysyłanych z źródła
- wyższa, niż częstotliwość fal wysyłanych z źródła

Ćwiczenie 2

Uzupełnij zdania.

Jeśli f jest częstotliwością wysyłaną przez nieruchome źródło, to

a) gdy źródło fal zbliża się do obserwatora, odbiera on fale o długości fali f_1 _____ f.

b) gdy źródło fal mija obserwatora, odbiera on falę o częstotliwości fali f_1 _____ f.

< > =

Ćwiczenie 3

Oblicz, jaka musi być prędkość poruszającego się źródła *v*, aby zmiana wysokości dźwięku odpowiadała jednemu półtonowi. Taka zmiana oznacza, że przy zbliżaniu się źródła stosunek częstotliwości musi być równy $\frac{f_1}{f} = \sqrt[12]{2}$.

Przyjmij, że $\sqrt[12]{2} \cong 1,0595$.

Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących. Prędkość dźwięku jest równa *V* = 340 m/s.

$v \approx$ [ ] $\frac{m}{s}$.

Ćwiczenie 4

Kiedy źródło dźwięku zbliżało się do obserwatora, zarejestrował on częstotliwość f_1 = 600 Hz, a kiedy oddalało się od niego, zarejestrował mniejszą częstotliwość f_2= 300 Hz. Ile wynosiła prędkość źródła *v*? Przyjmij prędkość dźwięku równą *V*=330 $\frac{m}{s}$.

v= [ ] $\frac{m}{s}$.

Ćwiczenie 5

Zaznacz zdania fałszywe:

- [ ] Efekt Dopplera jest znacznie silniejszy dla dźwięków o niskich częstotliwościach.
- [ ] Jeśli dwie osoby słyszą tę samą częstotliwość fali wychodzącej ze źródła, to źródło pozostaje w spoczynku.
- [ ] Jeśli źródło dźwięku porusza się po odcinku łączącym dwóch obserwatorów, to każdy z nich będzie odbierał inną częstotliwość dźwięku.

Ćwiczenie 6

Oblicz, jaką częstotliwość fali zmierzy obserwator stojący w odległości 50 metrów od źródła dźwięku o częstotliwości 700 Hz, jeśli źródło to minie obserwatora w odległości 25 metrów. Źródło porusza się z prędkością 42,5 $\frac{m}{s}$. Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi 340 $\frac{m}{s}$.

Wynik zaokrąglij do pełnych Hz.

$f_\varphi \cong$ [ ] Hz.

Ćwiczenie 7

Wybierz właściwe dokończenie zdania.
Efekt Dopplera nie zmienia:

- okresu fali
- prędkości fali
- częstotliwości fali

Ćwiczenie 8

Różnica pomiędzy mierzoną przez obserwatora długością fali dźwiękowej na prostej, wzdłuż której porusza się źródło fal, a długością fal emitowanych ze źródła wynosi 4 cm. Oblicz prędkość, z jaką poruszało się źródło, jeśli wytwarzało ono falę o długości 2,6 m. Prędkość dźwięku wynosi 340 $\frac{m}{s}$. Wynik podaj z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

$v \cong$ _____ $\frac{m}{s}$.

Dla nauczyciela

Konspekt (scenariusz) lekcji

Imię i nazwisko autora:	Jerzy Ginter i Michał Kurek
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Efekt Dopplera**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. III. Planowanie i przeprowadzanie obserwacji lub doświadczeń oraz wnioskowanie na podstawie ich wyników. **Zakres podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. IX. Fale i optyka. Uczeń: 4) analizuje efekt Dopplera dla fal w przypadku, gdy źródło lub obserwator poruszają się znacznie wolniej niż fala; podaje przykłady występowania tego zjawiska. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. X. Fale i optyka. Uczeń: 13) analizuje efekt Dopplera dla fal w przypadku, gdy źródło lub obserwator poruszają się znacznie wolniej niż fala; podaje przykłady występowania tego zjawiska.

Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:** • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. zdefiniuje efekt Dopplera, 2. wyjaśni, dlaczego częstotliwość dźwięku poruszających się obiektów zależy od tego, czy one się do nas zbliżają, czy oddalają, 3. przeanalizuje i zinterpretuje wpływ ruchu źródła i obserwatora na częstotliwość odbieranej fali.
Strategie nauczania:	Strategia eksperymentalno-obserwacyjna - dostrzeganie i definiowanie problemów oraz odkrywanie rzeczywistości poprzez eksperymenty.
Metody nauczania:	- pogadanka, - wykład informacyjny.
Formy zajęć:	- praca indywidualna.
Środki dydaktyczne:	głośniki i laptop z nagraniem dotyczącym efektu Dopplera
Materiały pomocnicze:	e-materiał „Na czym polega efekt Dopplera?”
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel uruchamia na komputerze nagrania dźwięków, w których słychać zmianę częstotliwości w wyniku ruchu źródła dźwięku. Następnie pyta uczniów, czy i kiedy spotkali się z czymś takim w życiu codziennym. Nauczyciel wspólnie z uczniami ustalają cele lekcji.	
Faza realizacyjna:	

Nauczyciel w formie wykładu przekazuje uczniom informacje na temat efektu Dopplera i jego codziennych przykładach (np. ultrasonografia dopplerowska, pomiar prędkości pojazdów, meteorologiczny radar dopplerowski). Wyjaśnia, dlaczego następuje zmiana długości i częstotliwości fali w zjawisku Dopplera. Wyprowadza wzory na długość i częstotliwość fali odbieranej przez obserwatora w czasie ruchu źródła.	
Faza podsumowująca:	
W ramach utrwalenia zdobytych wiadomości i zrozumienia efektu Dopplera uczniowie rozwiązują zadania: 1, 3 i 4 z zestawu ćwiczeń e-materiału. Nauczyciel pełni rolę doradcy, obserwuje i kontroluje pracę uczniów. Uczniowie odnoszą się do postawionych sobie celów lekcji, ustalają które osiągnęli, a które wymagają jeszcze pracy, jakiej i kiedy. W razie potrzeby nauczyciel dostarcza im informację zwrotną kształtującą.	
Praca domowa:	
W ramach pracy domowej uczniowie rozwiązują zadania: 2, 7 i 8 z zestawu ćwiczeń e-materiału.	
Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:	Przy pomocy symulacji można przedstawić mechanizm powstawania stożka Macha.