


Ziemskie przykłady efektu Dopplera

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Symulacja interaktywna](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Ziemskie przykłady efektu Dopplera

Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com/photos/speaker-membrane-audio-sound-bass-820005/> [dostęp 3.05.2022].

Czy to nie ciekawe ?

Jednym z efektów ubocznych samolotów latających szybciej od prędkości dźwięku jest powstawanie gromu dźwiękowego. Taki samolot podczas lotu wyprzedza wytwarzane przez siebie fale dźwiękowe, które ulegają skumulowaniu za samolotem i w momencie dotarcia do odbiorcy brzmią jak wybuch lub grzmot. Jest to skrajny przypadek efektu Dopplera, w którym źródło fali jest szybsze od fali rozchodzącej się w ośrodku – samolot porusza się szybciej od dźwięku.

Twoje cele

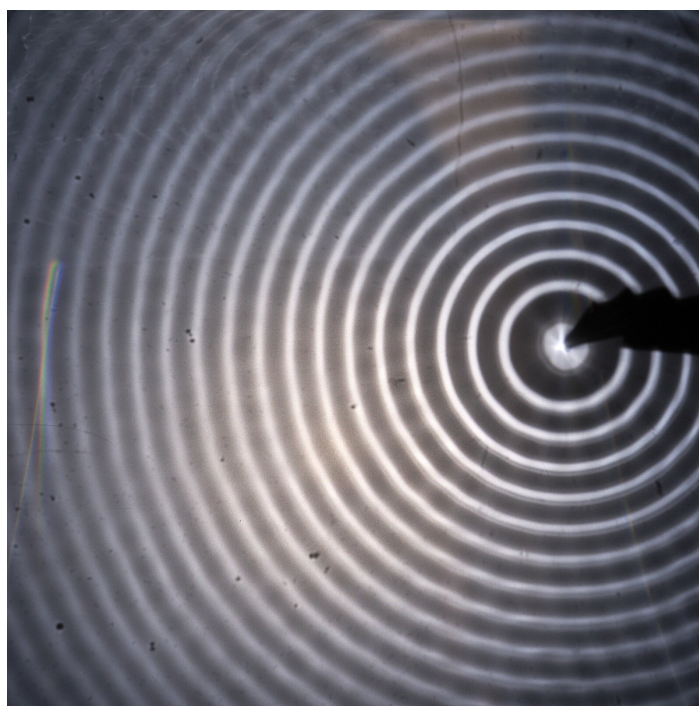
- dowiesz się, na czym polega efekt Dopplera,
- zrozumiesz, dlaczego linie widmowe atomów nie są nieskończenie cienkie,
- przeanalizujesz i zinterpretujesz sposób działania radaru drogowego,
- zastosujesz poznane zależności do rozwiązywania zadań.

Przeczytaj

Warto przeczytać

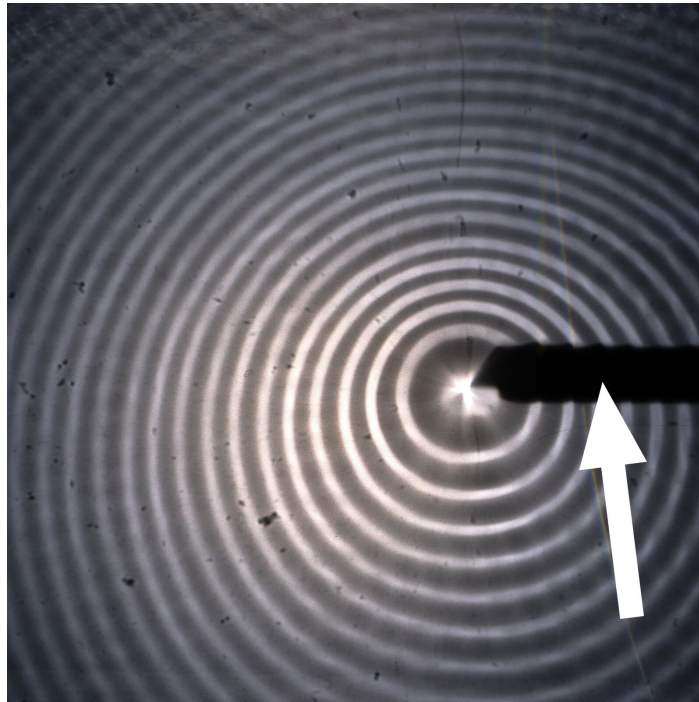
Efekt Dopplera – zmiana częstotliwości i długości fali

Efekt Dopplera polega na zmianie długości fali odbieranej przez obserwatora w wyniku ruchu źródła fal. Przeanalizujemy prostą falę mechaniczną – falę wytworzoną na powierzchni wody w wyniku uderzeń wykonywanych w regularnych odstępach czasu.



Rys. 1. Fala wytworzona na powierzchni wody w wyniku uderzeń wykonywanych w regularnych odstępach czasu

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



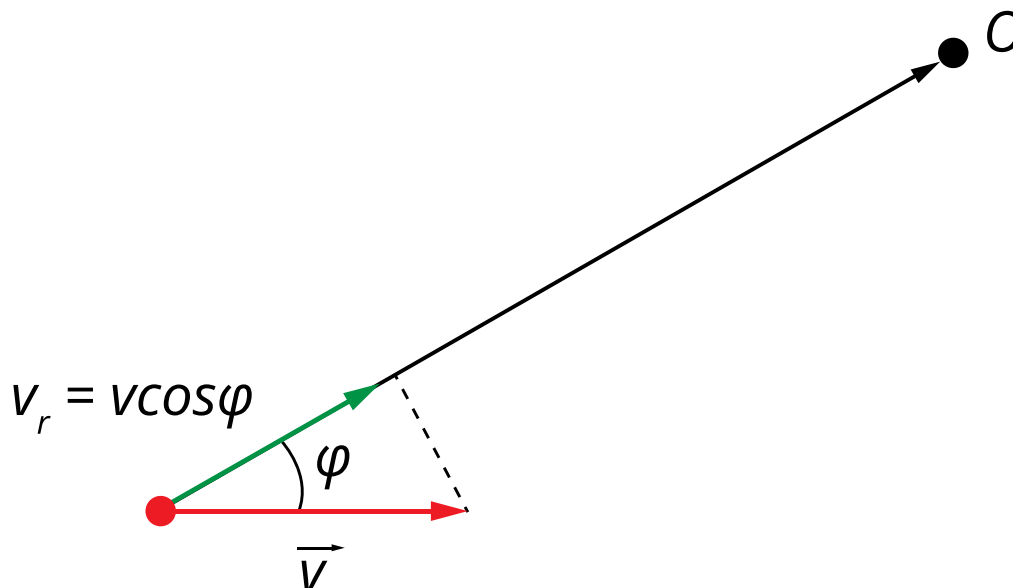
Rys. 2. Fala, która powstaje na powierzchni wody, gdy źródło porusza się ruchem jednostajnym w kierunku wskazanym strzałką

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

Rys. 1. przedstawia falę, która powstaje, kiedy źródło się nie porusza. Grzbiety fal tworzą układ okręgów ze środkami w jednym punkcie, czyli w miejscu pobudzającego falę źródła. Długość fali λ (odległość między grzbietami fali) jest jednakowa dla wszystkich kierunków.

Rys. 2. przedstawia falę, która powstaje, kiedy źródło porusza się ruchem jednostajnym w kierunku i ze zwrotem wskazanym strzałką. Grzbiety fal też tworzą układ okręgów. Tym razem jednak środki tych okręgów znajdują się w różnych punktach. Długość fali nie jest jednakowa dla wszystkich kierunków. Najmniejsza jest w obszarze przed poruszającym się źródłem, największa zaś za poruszającym się źródłem.

Przyjmijmy, że źródło dźwięku (czerwona kropka na Rys. 3.) porusza się z prędkością \vec{v} i przybliża się do obserwatora. Obserwator, który odbiera dźwięk, znajduje się w punkcie O.



Rys. 3. Źródło dźwięku (czerwona kropka) porusza się z prędkością \vec{v} w stronę obserwatora O. Wartość prędkości radialnej v_r zależy od kąta między wektorem prędkości a odcinkiem łączącym źródło z obserwatorem

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

Częstotliwość f_φ fali odbieranej przez obserwatora będzie zależeć od jego położenia poprzez kąt φ znajdujący się między wektorem prędkości a odcinkiem łączącym punkt O ze źródłem fali. Częstotliwość źródła f jest powiązana z częstotliwością f_φ wyrażeniem:

$$f = f_\varphi \left(1 - \frac{v_r}{V}\right)$$

gdzie V jest to prędkość rozchodzenia się fali, natomiast v_r jest to rzut prędkości źródła \vec{v} na odcinek łączący obserwatora ze źródłem (tzw. prędkość radialna).

Związek ten możemy też przedstawić przy pomocy długości fali λ wysyłanej przez źródło oraz długości fali λ_φ odbieranej w punkcie O korzystając z wyrażenia $f = \frac{V}{\lambda}$:

$$\lambda_\varphi = \lambda \left(1 - \frac{v_r}{V}\right)$$

Zjawisko Dopplera dla fal elektromagnetycznych

[Zjawisko Dopplera](#) najłatwiej zaobserwować dla fal mechanicznych. Najciekawsze są jednak jego konsekwencje dla fal elektromagnetycznych. Prędkość wszystkich fal elektromagnetycznych jest taka sama i nazywamy ją **prędkością światła** (ponieważ światło też jest falą elektromagnetyczną). Oznaczamy ją symbolem c , więc w naszych wzorach prędkość V musimy zastąpić poprzez c .

Dostajemy wtedy:

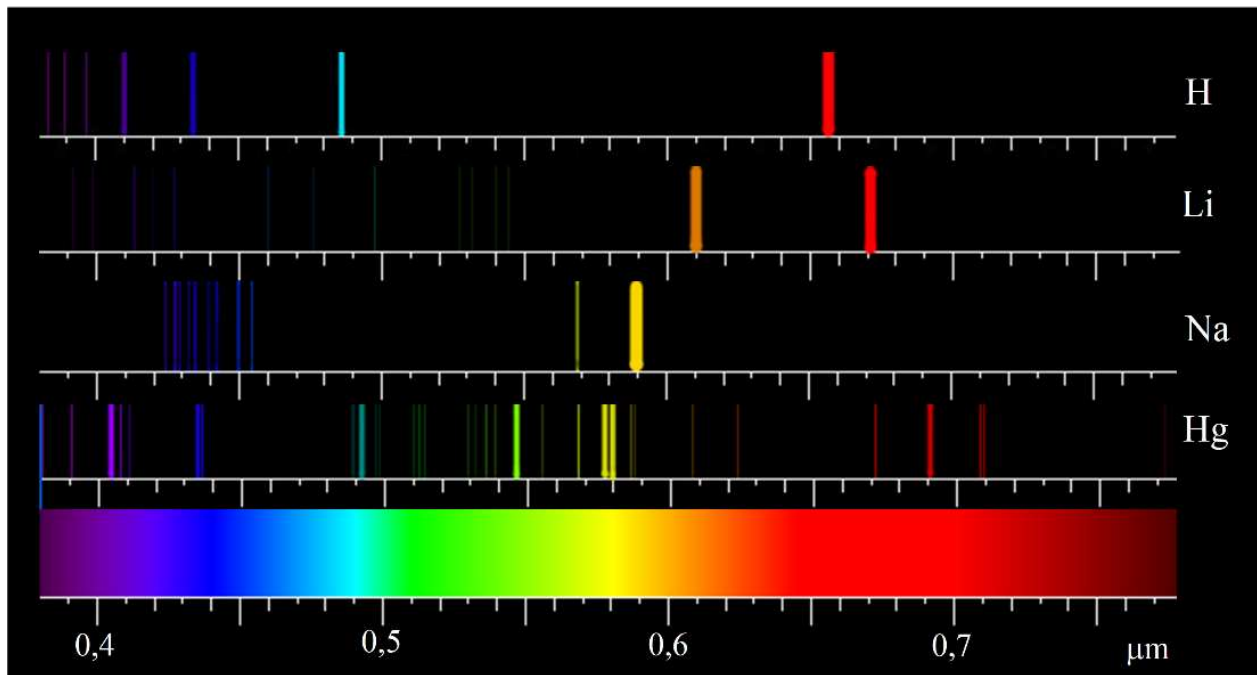
$$\lambda_{\varphi} = \lambda \left(1 - \frac{v_r}{c} \right)$$

$$f = f_{\varphi} \left(1 - \frac{v_r}{c} \right)$$

Otrzymane wzory nie są jednak zawsze prawdziwe: obowiązują w przypadku, kiedy prędkość źródła v ma wartość znacznie mniejszą od prędkości światła c . Gdy źródło fali porusza się z dużą prędkością, zaczynają ujawniać się dodatkowe efekty (tzw. efekty relatywistyczne), których tutaj nie uwzględnimy.

Dopplerowskie poszerzenie linii widmowych

Pojedyncze atomy, podobnie jak i związki chemiczne, świecą (promieniują) promieniowaniem elektromagnetycznym o bardzo konkretnej długości fali. Promieniowanie to jest związane ze zmianą energii elektronów w tych atomach. W widmie świecącego gazu atomowego obserwujemy wąskie linie. Przykłady takich widm dla kilku atomów przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Widma liniowe różnych pierwiastków

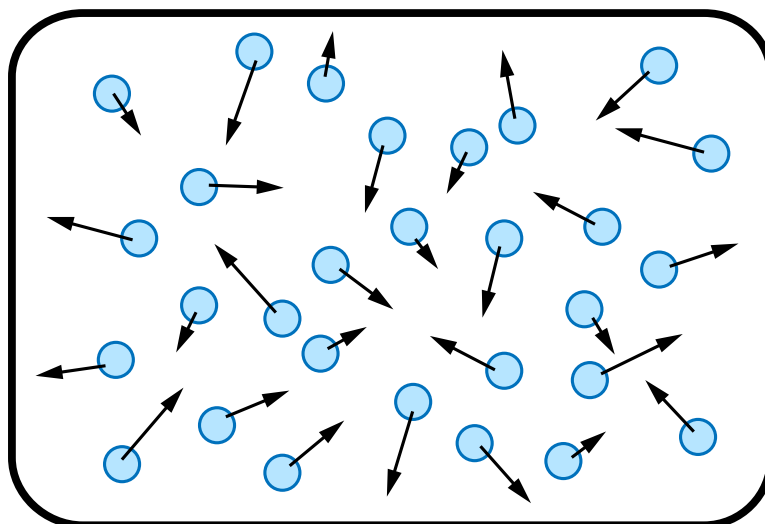
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Linie te nie są jednak nieskończenie wąskie. Jednym z powodów tego faktu jest efekt Dopplera. Atomy gazu nie spoczywają, ale poruszają się we wszystkich kierunkach ruchami termicznymi (Rys. 5.). Powoduje to, że w widmie obserwuje się bardzo wiele bliskich sobie, ale różnych długości fali. Długość fali od atomów zbliżających się do obserwatora jest mniejsza, a od oddalających się – większa. W efekcie zamiast uzyskiwać za każdym razem tę samą długość fali, dostajemy jej różne, ale zbliżone do siebie wartości. Mówimy wtedy o poszerzeniu linii widmowej. Poszerzenie to zależy od prędkości atomów, a te rosną wraz z wzrostem temperatury. Omawiany efekt ma znacznie większe znaczenie dla atmosfer gwiazd, w których temperatury są rzędu milionów kelwinów. Średnia prędkość kwadratowa v_{kw} cząsteczek rośnie wraz z temperaturą T zgodnie z wzorem:

$$v_{\text{kw}} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

gdzie k_B oznacza stałą Boltzmann, a m masę atomu.



Rys. 5. Atomy gazu poruszają się we wszystkich kierunkach, ich prędkość rośnie ze wzrostem temperatury gazu

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

Wyznaczanie prędkości pojazdów

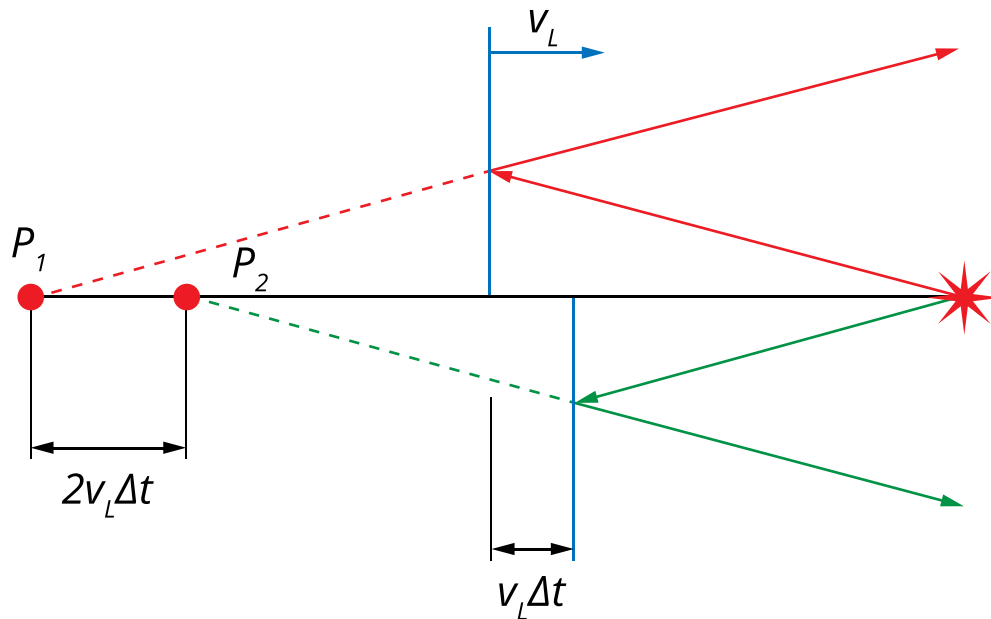
Bez porównania lepiej znanym przykładem zastosowania [zjawiska Dopplera](#) jest wyznaczanie prędkości pojazdów, czyli tak zwany radar dopplerowski. Podstawa działania takiego urządzenia jest następująca: jeżeli na poruszającą się płaszczyznę padnie fala elektromagnetyczna o częstotliwości f , fala odbita będzie miała częstotliwość zmienioną:

- podwyższoną, kiedy płaszczyzna odbijająca zbliża się do źródła;
- obniżoną, kiedy płaszczyzna odbijająca oddala się od źródła.

Urządzeń działających w ten sposób używają policjanci oraz fotoradary do pomiarów prędkości.

Dokładny opis tego zjawiska przekracza nasze możliwości. Możemy jednak uzyskać poprawny wynik, posługując się opisem przybliżonym. Jeżeli lustro zbliża się do źródła fali z prędkością v_L , obraz źródła w lustrze – w ramach optyki geometrycznej – zbliża

się do źródła z prędkością $2v_L$. Ilustruje to Rys. 6., na którym przedstawione są dwa promienie światła padające na płaskie lustro. W lustrze przedmiot obserwujemy na przedłużeniu promienia odbitego w punkcie P_1 . Porusza się ono z prędkością v_L w stronę obserwatora. Pomiedzy wysłaniem dwóch promieni światła minął czas Δt , podczas którego lustro przesunęło się o odległość $v_L\Delta t$, jednak obraz przedmiotu przesunął się o dwukrotność tej odległości, od punktu P_1 do punktu P_2 , więc obraz zbliża się do obserwatora z prędkością $2v_L$.



Rys. 6. Schemat uproszczonej zasady działania fotoradaru. W kierunku pojazdu (tu lustra) zostaje wysłana fala elektromagnetyczna. Jeżeli lustro zbliża się do źródła fali z prędkością v_L , to obraz źródła w lustrze – w ramach optyki geometrycznej – zbliża się do źródła z prędkością $2v_L$, czyli po czasie Δt przesunie się od punktu P_1 do P_2

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Tę prędkość możemy wykorzystać we wcześniej podanych wzorach. W sytuacji przedstawionej na Rys. 3. kąt φ jest równy zero stopni – lustro porusza się prosto na miejsce, z którego wysyłamy falę. Cosinus zera stopni równy jest 1. Zatem zmiana częstotliwości fali:

$$\Delta f = f_\varphi - f$$

$$\Delta f = f_\varphi - f_\varphi \left(1 - \frac{2v_L}{c}\right) = f_\varphi \frac{2v_L}{c}$$

gdzie f_φ jest częstotliwością fali odbieranej przez radar, natomiast c to prędkość fali, która w naszym przypadku jest równa prędkości światła. Oznacza to, że mierząc zmianę częstotliwości wysłanej fali możemy zmierzyć prędkość samochodu v_L ze wzoru

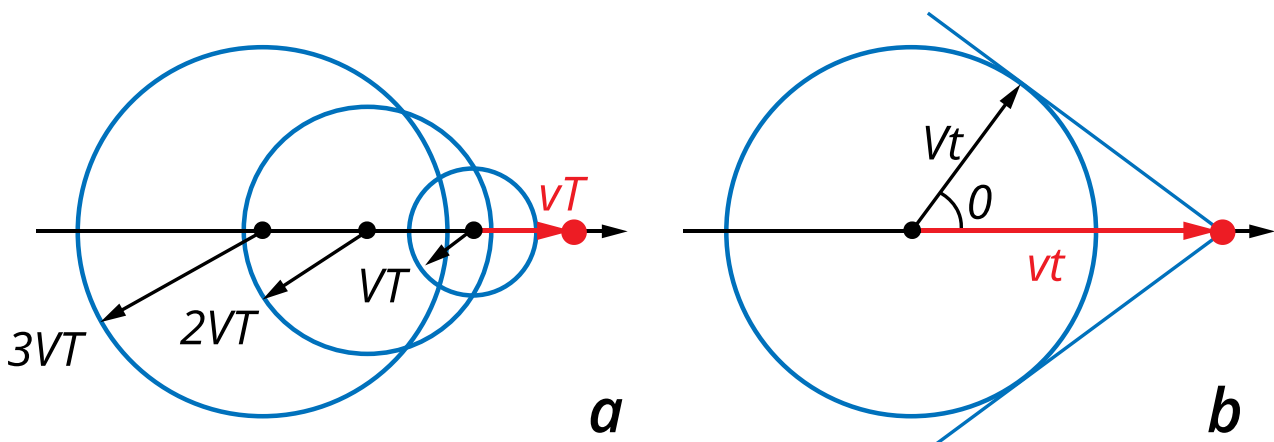
$$v_L = \frac{\Delta f}{f_\varphi} \frac{c}{2}$$

W przypadku, gdy mierzymy prędkość samochodu pod pewnym kątem φ wzory te przyjmują następującą postać:

$$\Delta f = f_\varphi \frac{2v_L \cos \varphi}{c}, \quad v_L = \frac{\Delta f}{f_\varphi} \frac{c}{2 \cos \varphi}$$

Prędkość naddźwiękowa

Efekt Dopplera ma bardzo duże znaczenie dla źródeł poruszających się szybciej od dźwięku. Grzbiety kilku kolejnych fal dźwiękowych emitowanych przez źródło poruszające się szybciej od dźwięku przedstawiono na Rys. 7a.



Rys. 7. Źródło porusza się szybciej niż fala dźwiękowa: a) grzbiety kilku kolejnych fal dźwiękowych, b) stożek Macha, w którym mieszczą się wszystkie fale dźwiękowe wysyłane przez źródło

Za poruszającym się źródłem wszystkie wytworzone fale dźwiękowe mieszczą się w stożku, nazywanym stożkiem Macha. Został on zaznaczony na Rys. 7b. Do powierzchni tego stożka wszystkie fale docierają w tym samym momencie. To zjawisko nazywamy [gromem dźwiękowym](#) i odbieramy je jako głośny huk. Jednym z samolotów pasażerskich mogących rozwinąć prędkość naddźwiękową był Concorde. Ze względu na zjawisko gromu dźwiękowego nie mógł on jednak rozwijać naddźwiękowych prędkości nad terenem zabudowanym. Przekraczał on prędkość dźwięku podczas lotów transatlantyckich z Ameryki Północnej do Europy nad oceanem.

Sytuacja graniczna, w której samolot leci z prędkością dźwięku, jest bardzo niebezpieczna. Powstające wtedy fale mają bardzo dużą amplitudę i mogą doprowadzić do samozniszczenia samolotu.

Słowniczek

efekt Dopplera

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

grom dźwiękowy

(*ang.: sonic boom*) efekt dźwiękowy polegający na skumulowaniu się fal dźwiękowych wytwarzanych za obiektem poruszającym się z prędkością większą od prędkości dźwięku.

Symulacja interaktywna

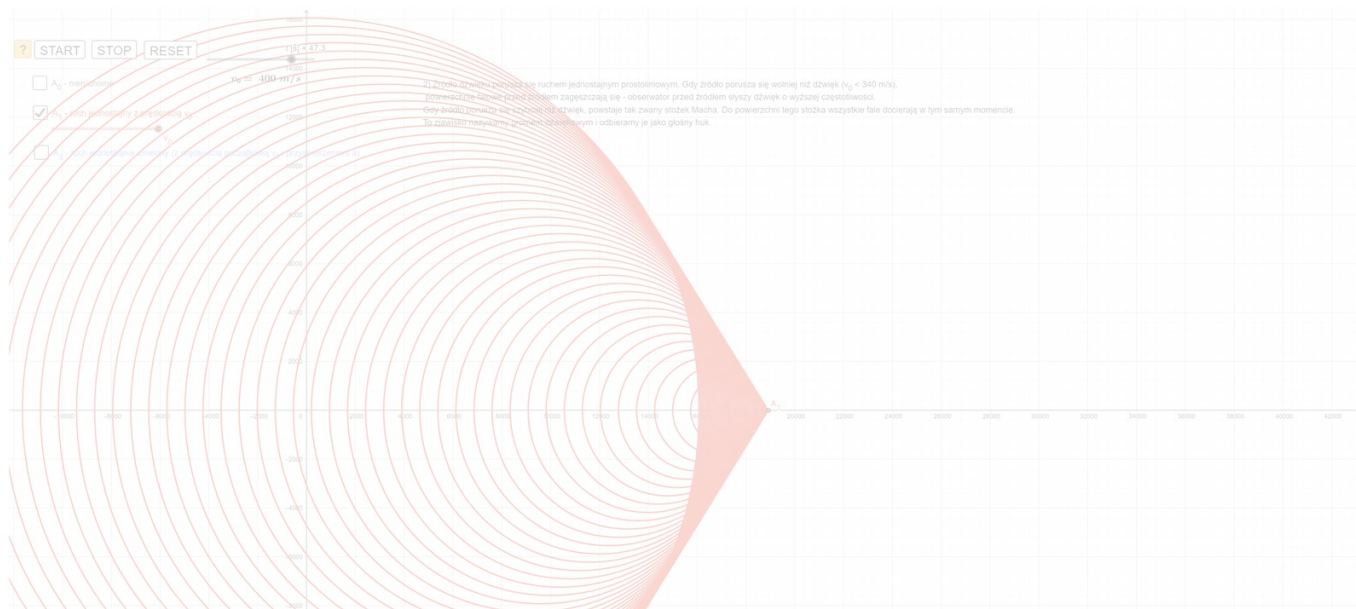
Ziemskie przykłady efektu Dopplera

Symulacja przedstawia schemat rozchodzenia się fal dźwiękowych w powietrzu, gdy źródło dźwięku:

- spoczywa,
- porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym,
- porusza się ruchem jednostajnie zmiennym.

Możesz zmieniać wartość prędkości w ruchu jednostajnym oraz wartość prędkości początkowej i przyspieszenia w ruchu jednostajnie zmiennym.

Możesz też obserwować różnice w rozchodzeniu się fal przez porównanie wyników symulacji w przypadkach, gdy źródło porusza się i spoczywa.



Zasób interaktywny dostępny pod adresem <https://zpe.gov.pl/a/D17bbfhV3>

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

Polecenie 2

Zapoznaj się z symulacją. Zwróć uwagę, że przy prędkościach bliskich prędkości dźwięku kolejne fale dźwiękowe kumulują się wzdłuż dwóch prostych. Po przekroczeniu prędkości dźwięku powstałby z nich stożek Macha. Jak myślisz, co się stanie z falami dźwiękowymi, które samolot dogoni, gdy przekroczy prędkość dźwięku?

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4



Ćwiczenie 5



Ćwiczenie 6



Ćwiczenie 7



Ćwiczenie 8



Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Jerzy Ginter i Michał Kurek
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Przykłady występowania efektu Dopplera
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony
Podstawa programowa:	<p>Cele kształcenia – wymagania ogólne</p> <p>I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.</p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.</p> <p>IV. Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych, w tym tekstów popularnonaukowych.</p> <p>Zakres podstawowy</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;</p> <p>15) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu;</p> <p>16) przedstawia własnymi słowami główne tezy tekstu popularnonaukowego z dziedziny fizyki lub astronomii.</p>

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;

18) przedstawia własnymi słowami główne tezy tekstu popularnonaukowego z dziedziny fizyki lub astronomii;

19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.

IX. 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:	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. omówi, na czym polega efekt Dopplera; 2. wyjaśni, dlaczego linie widmowe atomów nie są nieskończenie cienkie; 3. przeanalizuje i zinterpretuje sposób działania radaru drogowego; 4. zastosuje poznane zależności do rozwiązywania zadań.
Strategie nauczania:	<p>Metoda projektu (Project-Based Education) - efektem końcowym powinien być produkt. Według założeń tej metody chęć realizacji projektu oraz jego tematyka powinna pochodzić od ucznia, a formy pracy oraz harmonogram działań w projekcie powinny zostać wypracowane w ramach dyskusji uczniowie-nauczyciel. Podczas realizacji projektu uczniowie samodzielnie zdobywają wiedzę - poszukują, analizują, rozwiązują problemy, uczą się przez działanie, dążąc do osiągnięcia końcowego efektu - produktu. Rola nauczyciela powinna się ograniczać do konsultacji i wsparcia, ewentualnie nadzorowania pracy ucznia.</p>
Metody nauczania:	<ul style="list-style-type: none"> - pokaz multimedialny, - pogadanka.
Formy zajęć:	<ul style="list-style-type: none"> - praca w grupach, - praca indywidualna.
Środki dydaktyczne:	<p>projektor multimedialny</p>
Materiały pomocnicze:	<p>brak</p>
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	

Na poprzedniej lekcji nauczyciel prosi o przygotowanie prezentacji na temat ziemskich zastosowań efektu Dopplera przez ochotników.

Nauczyciel zadaje proste pytania dotyczące efektu Dopplera, a zadaniem uczniów jest na nie odpowiadać. Wraz z kolejnymi odpowiedziami poziom trudności pytań powinien rosnać.

Przykładowe pytania i oczekiwane odpowiedzi:

- Na czym polega efekt Dopplera? Odp. Efekt Dopplera polega na zmniejszeniu lub zwiększeniu częstotliwości odbieranej fali przez obserwatora wynikające z ruchu źródła fali lub/i obserwatora.
- Jak zmienia się częstotliwość dźwięku odbieranego przez obserwatora, gdy źródło dźwięku zbliża się do niego z prędkością mniejszą od prędkości dźwięku? Odp. Obserwator słyszy dźwięk wyższy od dźwięku wysyłanego przez źródło.
- Co to jest grom dźwiękowy? Odp. Jest to efekt dźwiękowy polegający na skumulowaniu się fal dźwiękowych wytwarzanych za obiektem poruszającym się z prędkością większą od prędkości dźwięku.

Nauczyciel pokazuje animację efektu Dopplera w przypadku, gdy źródło dźwięku porusza się ruchem jednostajnym z prędkością mniejszą oraz większą niż prędkość dźwięku.

Faza realizacyjna:

Nauczyciel pokazuje animację efektu Dopplera w przypadku, gdy źródło dźwięku porusza się ruchem jednostajnym z prędkością mniejszą oraz większą niż prędkość dźwięku. Zachęca uczniów do obejrzenia w domu animacji w przypadku, gdy źródło porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym.

Grupa uczniów/jeden uczeń przedstawia wcześniej przygotowaną 15-minutową prezentację multimedialną (z wykorzystaniem dowolnego programu do prezentacji np. PowerPoint, OpenOffice Impress) na temat występowania efektu Dopplera w otaczającym świecie i jego wykorzystywaniu przez człowieka.

Faza podsumowująca:

Nauczyciel na tablicy zapisuje przykłady, które zostały podane na lekcji. Uczniowie krótko przypominają, na czym polegało wykorzystanie efektu Dopplera w nich. W ramach utrwalenia zdobytych wiadomości i zrozumienia efektu Dopplera uczniowie rozwiązują zadania: 1, 3, 4 i 5 z zestawu ćwiczeń e-materiału. Nauczyciel pełni rolę doradcy, obserwuje i kontroluje pracę uczniów. Poprzez analizę wypowiedzi uczniów, podczas rozwiązywania zadań, nauczyciel określa, w jakim stopniu osiągnięte zostały wyznaczone cele.

Praca domowa:

W ramach pracy domowej uczniowie rozwiązują zadania: 2, 6, 7 i 8 z zestawu ćwiczeń e-materiału.

**Wskazówki
metodyczne
opisujące
różne
zastosowania
danego
multimedium:**

Multimedium można wykorzystać jako materiał objaśniający efekt Dopplera.