



Niezależność prędkości światła w próżni od prędkości źródła i prędkości obserwatora

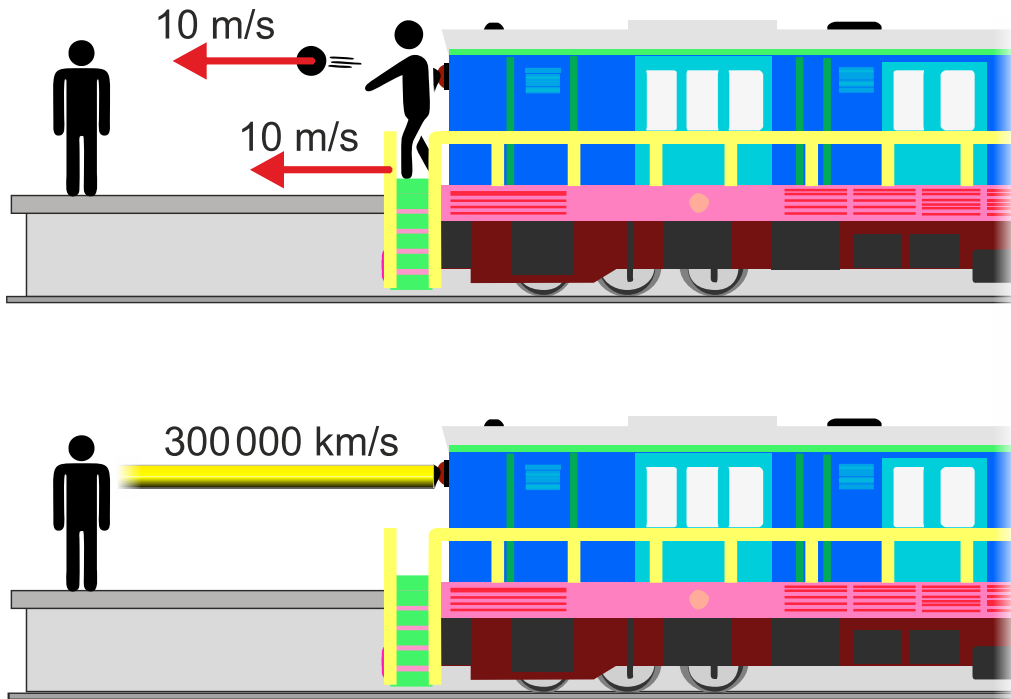
- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Film \(standardowy\)](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Niezależność prędkości światła w próżni od prędkości źródła i prędkości obserwatora

Czy to nie ciekawe?

Mechanika klasyczna jest oparta na trzech zasadach dynamiki sformułowanych przez Izaaka Newtona, a także na założeniu, że czas i przestrzeń są absolutne. Działa bardzo skutecznie w naszych codziennych doświadczeniach. Pozwala również z powodzeniem przewidywać szereg zjawisk, a także budować różnego typu maszyny i konstrukcje. Jednak na przełomie XIX i XX wieku na styku mechaniki, optyki i elektromagnetyzmu opracowanego przez Maxwella zaczęły nawarstwiać się sprzeczności i trudności interpretacyjne, których dynamika Newtona nie potrafiła wyjaśnić. Uczyniła to dopiero Szczególna Teoria Względności opracowana przez Alberta Einsteina w 1905 roku. Wśród wielu zaskakujących wniosków płynących z tej nowej teorii było stwierdzenie, że prędkość światła w próżni nie zależy od tego, czy źródło tego światła porusza się, czy też nie.



Rys. a. Piłka rzucona z poruszającego się pociągu zbliża się do obserwatora na peronie z prędkością będącą sumą prędkości piłki i pociągu. Światło z reflektora pociągu dociera do obserwatora na peronie zawsze z tą samą prędkością $c = 300\,000$ km/s.

Twoje cele

Pracując z tym e-materiałem:

- dowiesz się, dlaczego powstała Szczególna Teoria Względności Einsteina,
- poznasz różnice w założeniach mechaniki Newtona i Szczególnej Teorii Względności,
- zrozumiesz, dlaczego prędkość światła, zgodnie z dzisiejszym stanem wiedzy, nie zależy od prędkości źródła i obserwatora,
- zastosujesz zdobytą wiedzę w analizie zjawisk.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Klasyczna mechanika Newtona oparta była na założeniu, że czas i przestrzeń są absolutne. W dziele „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” (1687 r.) Newton napisał:

„...przestrzeń absolutna jest w swojej istocie absolutna względem wszystkiego zewnętrznego, jest zawsze jednakowa i nieruchoma...”

„...absolutny, rzeczywisty czas matematyczny jest rzeczą samą w sobie; w istocie w żaden sposób nie odnosi się do czegoś zewnętrznego, upływa równomiernie i inaczej nazywa się trwaniem...”

Z założeń Newtona wynika zatem, że upływ czasu i kształt przestrzeni nie zależą od materii i zjawisk, stanowią jedynie arenę, na której się wszystko rozgrywa.

Opracowane przez Newtona zasady dynamiki były spójne z wymyśloną pół wieku wcześniej przez Galileusza zasadą względności, którą można sformułować w następujący sposób:

Zasada względności Galileusza

Prawa mechaniki we wszystkich układach inercjalnych mają taką samą postać.

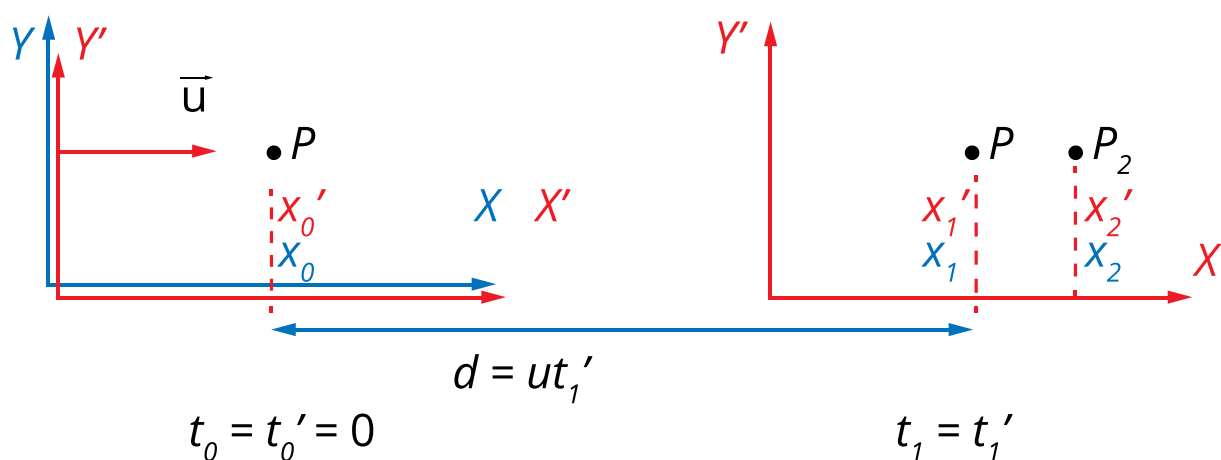
Warto dodać, że klasyczna mechanika zakładała możliwość osiągnięcia przez sygnały i ciała dowolnie dużych prędkości.

By zjawisko zachodzące w jednym układzie odniesienia można było opisać w innym układzie odniesienia potrzebne są zależności pomiędzy współrzędnymi czasowymi i przestrzennymi tego zjawiska w obu układach. Takie relacje dotyczące dwóch układów odniesienia poruszających się względem siebie ruchem jednostajnym, prostoliniowym z prędkością v nazywane są [transformacją Galileusza](#).

Transformacja Galileusza

Spróbujmy przedstawić transformację Galileusza dla najprostszego przypadku, gdy osie współrzędnych w dwóch układach będą do siebie równoległe, a osie OX i OX' w tych układach wybierzemy tak, aby ruch względny układów odbywał się wzdłuż tych osi.

Rozważmy dwa układy inercjalne XOY i $X'O'Y'$. Dla uproszczenia rozważań uwzględnimy tylko dwa wymiary przestrzenne (Rys. 1.).



Rys.1. Dwa układy inercjalne XOY i $X'O'Y'$. Układ $X'O'Y'$ porusza się względem XOY z prędkością \vec{u} .

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

Niech w chwili początkowej $t = t' = 0$ osie układów się pokrywają, a układ $X'O'Y'$ porusza się względem układu XOY ze stałą prędkością \vec{u} zwróconą wzdłuż osi OX . Niech w układzie $X'O'Y'$ spoczywa punkt P mający współrzędną x_0 .

Zgodnie z założeniami mechaniki klasycznej czas jest absolutny i płynie tak samo w obu układach $t = t'$.

Po czasie t_1 układ $X'O'Y'$ przebędzie względem XOY odległość $d = ut_1$.

Współrzędna x' punktu nie zmienia się (wszak spoczywa on w układzie primowanym), zatem $x'_1 = x'_0$, natomiast jego współrzędna x_0 wzrośnie o d . Jak

widać zatem:

$$x'_1 = x_1 - ut_1.$$

Ponieważ współrzędne y i y' w obu układach są jednakowe, transformacja Galileusza pozwalająca na przejście z opisem zjawisk mechanicznych z układu XOY do X'O'Y' ma w tym przypadku postać:

$$\begin{aligned}t' &= t \\x'_1 &= x_1 - ut_1 \\y' &= y\end{aligned}$$

Jeżeli punkt P będzie poruszać się względem układu XOY z prędkością \vec{v} równoległą do osi OX i przemieści się do położenia P_2 , to wartość tej prędkości możemy zapisać:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t},$$

gdzie $\Delta x = x_2 - x_0$, a $\Delta t = t_1 - t_0$.

Względem układu X'O'Y' prędkość tego punktu wyniesie:

$$\begin{aligned}v' &= \frac{\Delta x'}{\Delta t} = \frac{x'_2 - x'_0}{\Delta t} = \frac{(x_2 - ut_1) - (x_0 - ut_0)}{\Delta t} = \\&= \frac{(x_2 - x_0) - u(t_1 - t_0)}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_0}{\Delta t} - \frac{u(t_1 - t_0)}{\Delta t} = v - u.\end{aligned}$$

Wzór ten jest zgodny z klasycznym wzorem opisującym składanie prędkości.

Jeżeli punkt P względem układu XOY będzie mieć przyspieszenie o wartości:

$$a = \frac{(v_2 - v_1)}{\Delta t}$$

zwrócone zgodnie z osią OX , to przyspieszenie względem $X'O'Y'$ wyniesie:

$$a' = \frac{(v_2' - v_1')}{\Delta t} = \frac{(v_2 - u) - (v_1 - u)}{\Delta t} = \frac{(v_2 - v_1)}{\Delta t} = a.$$

Zatem według transformacji Galileusza **przyspieszenie ciała nie zależy od wybranego inercjalnego układu odniesienia**. Czyli równanie opisujące II zasadę dynamiki:

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

ma dla danego ciała taką samą postać w każdym układzie inercjalnym.

Ponieważ klasyczna mechanika odnosiła duże sukcesy w wyjaśnianiu i przewidywaniu zjawisk fizycznych, rozmaite teorie fizyczne powstające licznie pod koniec XIX wieku próbowano opisać na sposób mechaniczny. Między innymi przyjmowano, że fale elektromagnetyczne, podobnie jak mechaniczne, powinny być rozprzestrzeniającymi się zaburzeniami hipotetycznego ośrodka nazywanego eterem.

Jednym z problemów, które napotykało takie ujęcie fizyki było to, że te same zjawiska elektromagnetyczne należało tłumaczyć w inny sposób w różnych układach inercjalnych. Na przykład poruszający się ładunek elektryczny wytwarza pole magnetyczne. Jeżeli jednak wybierzemy układ odniesienia, w którym ładunek spoczywa, to w tym układzie pola magnetycznego być nie powinno. Zatem samo istnienie pola magnetycznego miałyby zależeć od wyboru układu odniesienia. W konsekwencji opis zjawisk elektromagnetycznych w różnych układach inercjalnych wymagał innej postaci praw elektrodynamiki odkrytych przez Maxwella.

Przełomowym etapem w rozwoju fizyki była próba wyznaczenia prędkości Ziemi względem eteru. Próbę tę podjął w 1881 roku Albert Michelson i powtórzył,

udoskonalając aparaturę z Abrahamem Morleyem. W doświadczeniu mierzono prędkość światła w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku ruchu Ziemi.

Wyniki doświadczenia pokazały, że prędkość światła w obu kierunkach była jednakowa, nie zależy ona zatem od prędkości Ziemi w przestrzeni. Można więc było wyciągnąć wniosek, że prędkość światła nie zależy od układu odniesienia, względem którego jest mierzona.

Próby wyjaśnienia wyników tego doświadczenia, a także stworzenia transformacji nie zmieniających postaci równań Maxwella przy zmianie układu inercjalnego, doprowadziły Hendrika Lorentza do układu równań nazywanych [transformacją Lorentza](#).

Transformacja ta dla przypadku przedstawionego na Rys. 1. ma postać:

$$t' = \frac{t - \frac{xu}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}; \quad x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}; \quad y' = y$$

a przy przejściu z układu $X'O'Y'$ do XOY (odwrotna transformacja Lorentza):

$$t = \frac{t' + \frac{xu}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}; \quad x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}; \quad y = y'$$

Jak widać równania te są bardziej skomplikowane niż transformacja Galileusza. Można jednak zauważyć, że dla prędkości $u \ll c$ transformacja ta przechodzi w transformację Galileusza. Wynika stąd, że gdy mamy do czynienia z niewielkimi prędkościami obiektów, zasady dynamiki Newtona pozostają słuszne.

Lorentz opisał matematycznie swoją transformację, by bronić słusznej wówczas teorii eteru (której był zresztą jednym z autorów). Dopiero Albert Einstein dostrzegł, że transformację Lorentza można wyprowadzić w zupełnie inny sposób, bez konieczności uwzględniania hipotetycznego eteru, przyjmując, że:

prędkość światła jest jednakowa we wszystkich inercjalnych układach odniesienia i nie zależy od ruchu źródła i obserwatora.

Założenie niezależności prędkości światła od układu inercjalnego pozwoliło rozszerzyć zasadę względności Galileusza również na zjawiska elektrodynamiczne i sformułować Einsteinowi ogólniejszą zasadę, zwaną dziś zasadą względności Einsteina. Zasada względności Einsteina mówi o tym, że:

prawa fizyki we wszystkich układach inercjalnych są takie same.

Zasada względności Einsteina i stałość prędkości światła stały się podstawą sformułowanej przez Einsteina Szczególnej Teorii Względności (STW). Istotną różnicą między STW a mechaniką Newtona jest założenie, że to nie czas i przestrzeń są absolutne, a raczej prędkość światła w próżni. Teoria ta zakładała, że we wszystkich układach inercjalnych prędkość światła w próżni jest taka sama we wszystkich kierunkach i nie zależy od prędkości źródła. Z założeń tych wynikają wszelkie konsekwencje STW, często sprzeczne z naszą intuicją. Między innymi:

- prędkość światła w próżni jest maksymalną prędkością, jaką mogą osiągnąć wszelkiego typu sygnały w przyrodzie i nie jest ona możliwa do osiągnięcia przez obiekty materialne,
- czas trwania zjawiska i rozmiary obiektu zależą od układu odniesienia, względem którego są one mierzone,
- równoczesność zdarzeń zależy od układu odniesienia.

Słowniczek

układ odniesienia

(*ang.: reference frame*) punkt lub układ punktów w przestrzeni, względem którego określa się położenie lub zmianę położenia (ruch) danego ciała.

inercjalny układ odniesienia

(*ang.: inertial reference frame*) układ odniesienia, w którym każde ciało, niepodlegające zewnętrznemu oddziaływaniu z innymi ciałami, porusza się bez przyspieszenia (tzn. ruchem jednostajnym prostoliniowym) lub pozostaje w spoczynku.

transformacja Galileusza

(*ang.: Galileo transformation*) jest to transformacja współrzędnych przestrzennych i czasu z jednego układu odniesienia do innego, poruszającego się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem pierwszego. W transformacji tej czas i odległości pomiędzy dwoma dowolnymi punktami pozostają stałe, czyli są niezależne od układu odniesienia. Transformacja Galileusza jest zgodna z klasycznymi wyobrażeniami o czasie i przestrzeni. Transformacja zakłada, że prędkość oraz położenie są względne.

transformacja Lorentza

(*ang.: Lorentz transformation*) jest układem równań, które wyrażają związek pomiędzy zmiennymi przestrzennymi i czasowymi w różnych inercjalnych układach odniesienia. Pozwalają one wyznaczyć współrzędne czasoprzestrzenne ciała w dowolnym układzie inercjalnym, pod warunkiem, że znane są odpowiednie wielkości fizyczne w innym inercjalnym układzie odniesienia. Transformacja Lorentza nie zmienia postaci równań Maxwella, a dla prędkości dużo mniejszych od prędkości światła przechodzi w transformację Galileusza.

Film (standardowy)

Niezależność prędkości światła w próżni od prędkości źródła i prędkości obserwatora

Obejrzyj film - posłuchaj wywiadu z dr hab., prof. UW Andrzejem Draganem, a następnie wykonaj polecenia.



Film dostępny pod adresem [/preview/resource/R1Nxvb6MNagJJ](#)

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

Film zawiera nagranie wywiadu z dr. hab., prof. Uniwersytetu Warszawskiego Andrzejem Draganem dotyczącym niezależności prędkości światła od prędkości źródła i prędkości obserwatora.

Polecenie 1

Co znaczą słowa, że „przypadek prędkości światła jest ekstremalną formą niesumowania się prędkości”?

Polecenie 2

Podaj przykłady eksperymentalnych potwierdzeń Szczególnej Teorii Względności, które zostały wymienione podczas wywiadu.

Polecenie 3

Namów koleżankę lub kolegę do następującej zabawy. Odsłuchajcie ponownie wywiad i wynotujcie wszystkie słowa, zwroty, pojęcia, które jawią się Wam egzotyczne, niezrozumiałe albo wręcz nieznanne. Przeprowadźcie w klasie ankietę, w której każdy respondent wskaże dwa pojęcia, najbardziej (jego zdaniem) egzotyczne. Na podstawie wyników ustalcie listę trzech pojęć, których znaczenie przybliżycie klasowej (lub szkolnej) społeczności w wybranej przez Was formie: plakatu, wpisu na stronie internetowej czy kilkuminutowego fragmentu lekcji. Poproście o pomoc nauczyciela fizyki; możecie też zwrócić się o pomoc i poradę do wydziału fizyki wybranej uczelni, np. skorzystać z portalu „Zapytaj fizyka” Wydziału Fizyki UW (<https://zapytajfizyka.fuw.edu.pl/>).

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



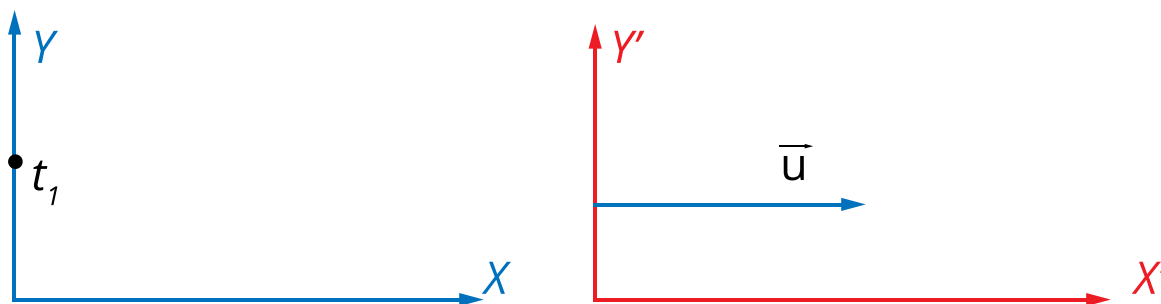
Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



Rozważmy dwa układy inercjalne XOY i $X'O'Y'$. Niech w chwili początkowej $t=t'=0$ osie układów się pokrywają, a układ $X'O'Y'$ porusza się ze stałą prędkością \vec{u} o wartości $0,5c$ zwróconą w prawo wzdłuż osi OX względem układu XOY .



Rys. Dwa układy inercjalne poruszające się względem siebie z prędkością \vec{u} .

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

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

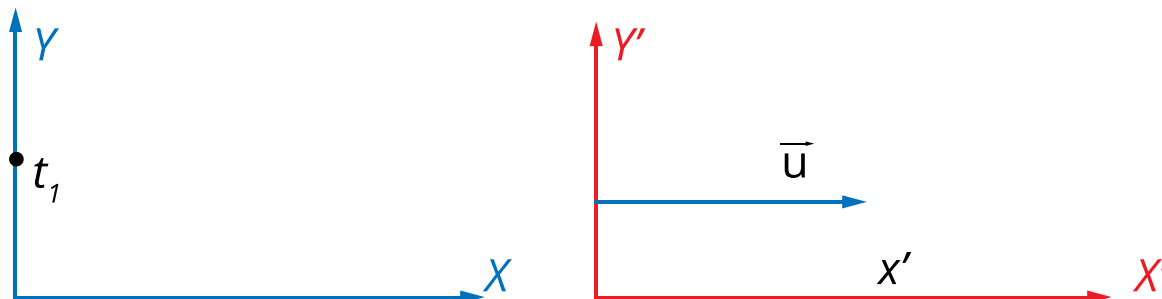
Niech w układzie XOY w chwili t_1 zachodzi zdarzenie w punkcie o współrzędnej $x_1=0$. Oblicz współrzędną czasową i przestrzenną x tego zdarzenia w układzie $X'O'Y'$ zgodnie z transformacją Galileusza i zgodnie z transformacją Lorentza.

Przy transformacji Lorentza wynik podaj z dokładnością do części tysięcznych.

Ćwiczenie 4



Rozważmy dwa układy inercjalne XOY i $X'O'Y'$. Niech w chwili początkowej $t=t'=0$ osie układów się pokrywają, a układ $X'O'Y'$ porusza się ze stałą prędkością \vec{u} o wartości $0,5c$ zwróconą w prawo wzdłuż osi OX względem układu XOY .



Rys. Dwa układy inercjalne poruszające się względem siebie z prędkością \vec{u} .

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

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

Niech w układzie $X'O'Y'$ w punkcie o współrzędnej $x_1'=0$ zachodzą dwa zdarzenia: jedno w chwili $t'=0$, drugie w chwili $t'=t_1'$. Jaki jest odstęp czasu między tymi zdarzeniami w układzie $X'O'Y'$, a jaki w układzie XOY ? Wynik podaj z dokładnością do czterech cyfr znaczących.

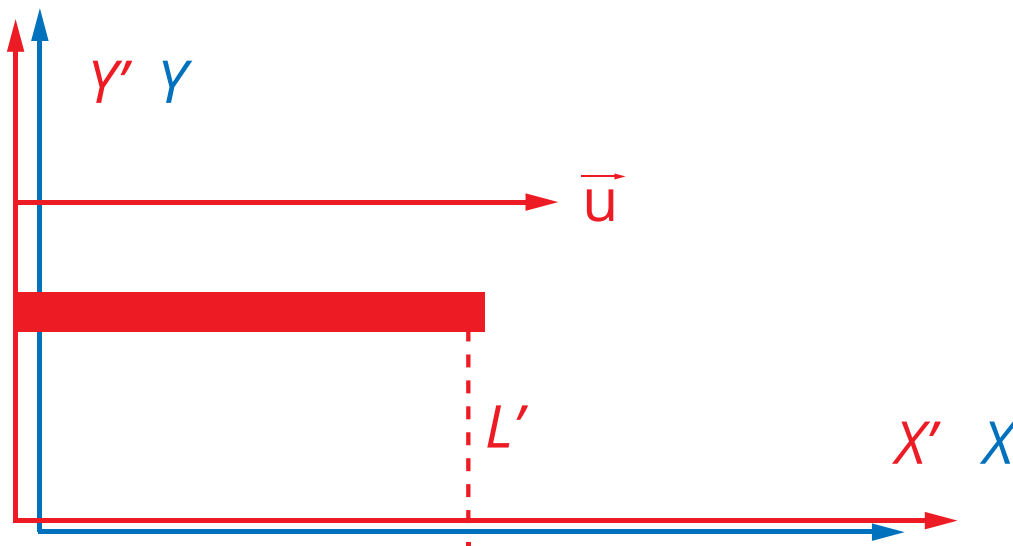
Ćwiczenie 5



Ćwiczenie 6



Rozważmy dwa układy inercjalne XOY i $X'O'Y'$. Niech w chwili początkowej $t=t'=0$ osie układów się pokrywają, a układ $X'O'Y'$ porusza się ze stałą prędkością \vec{u} , zwróconą w prawo wzdłuż osi OX względem układu XOY .



Rys. Dwa układy inercjalne poruszające się względem siebie z prędkością \vec{u} .

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

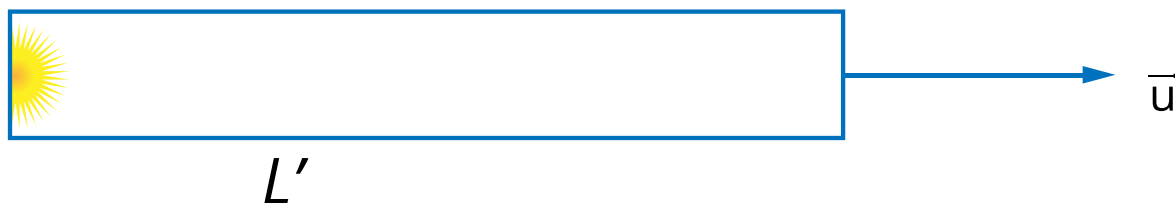
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

W układzie $X'O'Y'$ spoczywa pręt o długości L' równoległy do osi OX , a jego początek ma współrzędną $x'_0=0$. Oblicz współrzędne początku i końca pręta zmierzone w układzie XOY w chwili $t=0$.

Ćwiczenie 7



Wagon o długości L' porusza się względem Ziemi z prędkością \vec{u}



Rys. Wagon poruszający się względem Ziemi z prędkością u . W wagonie zostaje wyemitowany błysk światła ze źródła położonego na tylnej ścianie.

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

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

Oblicz czas, po którym błysk dotrze do przedniej ściany, zmierzony w układzie wagonu i w układzie Ziemi. Możesz skorzystać ze wzoru opisującego długość obiektu mierzoną w układzie odniesienia, względem którego się porusza z prędkością u :

$$L = L' \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}$$

Ćwiczenie 8



Ćwiczenie 9



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

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

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Jarosław Krakowski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Prędkość światła w różnych układach odniesienia
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	<p>Cele kształcenia – wymagania ogólne</p> <p>II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.</p> <p>Zakres rozszerzony</p> <p>Treści nauczania – wymagania szczegółowe</p> <p>I. Wymagania przekrojowe. Uczeń:</p> <p>4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem;</p> <p>19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu.</p> <p>II. Mechanika. Uczeń:</p> <p>19) stosuje zasadę równoważności układów inercjalnych (zasadę względności Galileusza).</p> <p>XII. Elementy fizyki relatywistycznej i fizyka jądrowa. Uczeń: 1) wskazuje niezależność prędkości światła w próżni od prędkości źródła i prędkości obserwatora, opisuje względność równoczesności.</p>

Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: <ul style="list-style-type: none"> • 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, dlaczego i jak powstała Szczególna Teoria Względności (STW) Einsteina; 2. wymieni różnice w założeniach mechaniki Newtona i Szczególnej Teorii Względności; 3. wyjaśni, dlaczego prędkość światła, zgodnie z dzisiejszym stanem wiedzy, nie zależy od prędkości źródła i obserwatora; 4. zastosuje zdobytą wiedzę w analizie zjawisk.
Strategie nauczania	IBSE (Inquiry-Based Science Education - nauczanie/uczenie się przedmiotów przyrodniczych przez odkrywanie/dociekanie naukowe)
Metody nauczania	wykład problemowy, burza mózgów
Formy zajęć:	praca zespołowa, praca w grupach
Środki dydaktyczne:	rzutnik, ekran, Internet, zestawy zadań

Materiały pomocnicze:	aplikacje ilustrujące konsekwencje niezależności prędkości światła od układu odniesienia i transformacji Lorentza np.: [https://www.edukator.pl/site/applet/?id=1004] (https://www.edukator.pl/site/applet/?id=1004); https://www.edukator.pl/site/applet/?id=253
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
<p>Nauczyciel zadaje pytanie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Jakie są założenia mechaniki Newtona? Oczekiwana odpowiedź: czas i przestrzeń są absolutne, spełnione są zasady dynamiki. • Co to jest inercjalny układ odniesienia? Oczekiwana odpowiedź: Układ, względem którego ciała nie zmieniają prędkości bez działania siły lub spełniona jest I zasada dynamiki Newtona. 	
Faza realizacyjna:	
<p>Uczniowie z pomocą nauczyciela analizują zasadę względności Galileusza i transformację Galileusza.</p> <p>Nauczyciel podaje przypadki, w których transformacja Galileusza „nie działa” - na przykład: istnienie pola magnetycznego zależy od układu odniesienia, różne sposoby wyjaśnienia zjawiska indukcji w zależności od wyboru układu odniesienia. Nauczyciel omawia doświadczenia Michelsona- Morleya.</p> <p>Nauczyciel przedstawia transformację Lorentza i przyczynę jej powstania.</p> <p>Nauczyciel przedstawia, jak doszło do sformułowania STW i jej podstawowe założenia.</p> <p>Uczniowie analizują przykładowe wnioski wynikające z transformacji Lorentza.</p>	
Faza podsumowująca:	
<p>Uczniowie, w grupach, rozwiązują zadania 3, 4, 5, 9 z zestawu ćwiczeń.</p> <p>Nauczyciel pełni rolę doradcy, obserwuje i kontroluje pracę uczniów. Poprzez analizę wypowiedzi uczniów nauczyciel określa, w jakim stopniu osiągnięte zostały wyznaczone cele.</p>	
Praca domowa:	

Uczniowie rozwiązują zadania 1, 2, 6, 7, 8 z zestawu ćwiczeń.

**Wskazówki
metodyczne
opisujące różne
zastosowania
danego
multimedium**

Film może być wykorzystany przy powtarzaniu wiadomości i na innych lekcjach na temat Szczególnej Teorii Względności.