

Z jaką prędkością porusza się foton

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



Z jaką prędkością porusza się foton

Czy to nie ciekawe?

Gdy zapalamy lampę, w pokoju natychmiast robi się jasno. Takie obserwacje były powodem, że wielu dawnych filozofów, jak Arystoteles, uważało, że światło rozchodzi się natychmiastowo, a jego prędkość nie może być skończona. Szczególnie niezwykły pogląd na światło miał Euklides. Sądził on, że nasze oczy wysyłają promienie, dzięki którym widzimy wszystko wokół nas (Rys. a.).



Rys. a. Mechanizm widzenia według Euklidesa

Dziś wiemy, że wrażenie natychmiastowości wynika z tego, że obserwujemy rozchodzenie się światła na stosunkowo małych odległościach. Dopiero kosmiczne odległości pozwalają stwierdzić, że światło rozchodzi się ze skończoną prędkością. Ze Słońca światło biegnie do Ziemi około 8 minut, a z najodleglejszych galaktyk nawet 13 miliardów lat.

Twoje cele

- Dowiesz się, czym jest foton i jaką niesie energię oraz pęd.
- Zrozumiesz, czym jest prędkość maksymalna.
- Dowiesz się, jak zdefiniowano metr, wykorzystując wartość prędkości światła.
- Przeanalizujesz wartość prędkości światła w próżni w różnych układach odniesienia.
- Poznasz historię pomiarów prędkości światła.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Foton, zwany także kwantem energii, jest porcją energii promieniowania elektromagnetycznego. Można go traktować, jako cząstkę o energii:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

i pędzie:

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda},$$

gdzie h jest stałą uniwersalną, zwaną stałą Plancka, ν – częstotliwością fali promieniowania, λ – długością fali, c – prędkością światła.

Jednak foton to bardzo szczególna cząstka. Może istnieć tylko w ruchu, poruszając się z prędkością światła. Oznacza to, że jego **masa spoczynkowa** jest równa zero i nie istnieje układ spoczynkowy dla fotonu.

Prędkość światła jest największą prędkością z jaką może być przekazywana energia i informacja. Z taką prędkością poruszają się tylko fotony. Inne cząstki, o masie spoczynkowej większej od zera, poruszają się wyłącznie z prędkościami mniejszymi od prędkości światła. Prędkość cząstek takich, jak elektron, czy proton, może dowolnie zbliżać się do prędkości światła, ale nigdy jej nie osiągnie.

Prędkość światła w próżni jest stałą uniwersalną równą dokładnie $c = 299\,792\,458$ m/s. Czy to nie dziwne, że w odróżnieniu od innych stałych, nie występują tu liczne cyfry po przecinku, które zwykle zaokrąglamy w zależności od tego, jakie chcemy osiągnąć przybliżenie? Dokładna wartość prędkości światła wynika po prostu z definicji metra przyjętej w 1983 roku. Zgodnie z tą definicją, **1 metr to odległość, jaką pokonuje światło w próżni w czasie $1/299\,792\,458$ s.**

W astronomii używa się jeszcze innej jednostki długości spoza układu SI związanej z prędkością światła. Jest to rok świetlny, zdefiniowany jako droga przebyta przez światło w ciągu roku. W definicji roku świetlnego użyto roku juliańskiego, którego długość to 365,25 dni. Analogicznie można posługiwać się jednostkami długości takimi, jak sekunda świetlna, minuta świetlna itp.

Prędkość fotonów w próżni nie zależy od częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego. Jest jednakowa dla wszystkich zakresów promieniowania – od promieniowania gamma do fal radiowych. Jednym z dowodów jest obserwacja gwiazd

rozbłyskowych. Fale radiowe i światło, wyemitowane podczas rozbłysku gwiazdy, docierają na Ziemię jednocześnie. Ich prędkość jest jednakowa z dokładnością do 10^{-7} .

Foton w próżni porusza się zawsze ze stałą prędkością dla każdego obserwatora. Jeśli obiekt poruszający się z prędkością $v = 0,9c$ wyemituje foton w kierunku zgodnym z kierunkiem swojej prędkości (Rys. 1.), to foton będzie oddalał się od niego z prędkością c . Ale dla nieruchomego obserwatora prędkość fotonu również będzie równa c . Ten fakt, niezgodny z naszym codziennym doświadczeniem, jest podstawowym założeniem szczególnej teorii względności Alberta Einsteina. Dlaczego wydaje nam się to dziwne i przeczy naszym doświadczeniom? Po prostu, w codziennym życiu nie spotykamy się z prędkościami porównywalnymi z prędkością światła. Takie prędkości osiągalne są dla ciał o bardzo małej masie. Eksperymenty z cząstkami takimi, jak elektrony, protony, czy jądra atomowe, rozpędzane w [akceleratorach](#) do prędkości bliskich prędkości światła, potwierdzają stałość prędkości światła w każdym układzie odniesienia.



Rys. 1. Foton wysłany z rakiety lecącej z prędkością $v = 0,9c$ porusza się z prędkością c , zarówno względem rakiety, jak i nieruchomego obserwatora

Światło porusza się z maksymalną prędkością c tylko w próżni. W ośrodkach materialnych prędkość światła jest mniejsza niż w próżni. Dzieje się tak, ponieważ w ośrodkach materialnych dochodzi do oddziaływania przechodzącej fali elektromagnetycznej z ładunkami tworzącymi atomy ośrodka, wskutek czego ładunki te pobudzone są do drgań. W wyniku tych drgań powstają dodatkowe fale elektromagnetyczne, które nakładają się na falę przechodzącą. W efekcie powstaje sumaryczna fala poruszająca się wolniej niż fala w próżni. Prędkość fali w ośrodku materialnym wynosi:

$$v = \frac{c}{n},$$

gdzie c to prędkość światła w próżni, a n jest bezwzględny współczynnikiem załamania światła w ośrodku.

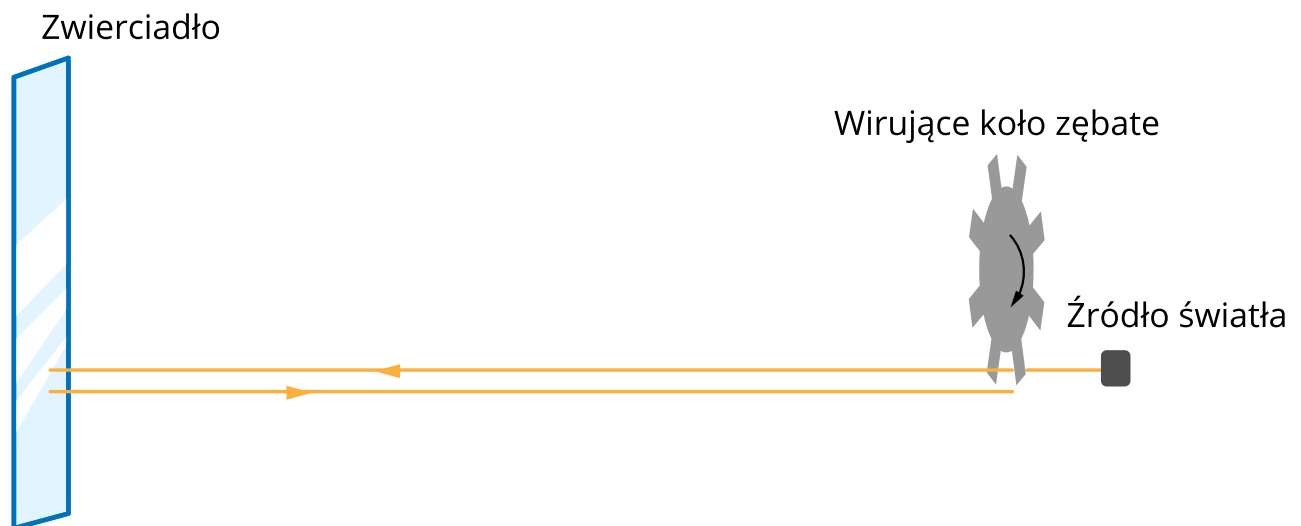
Bezwzględny współczynnik załamania przyjmuje wartości większe od 1. Na przykład, dla wody wynosi on 1,33, a dla powietrza 1,0003. Zauważmy, że współczynnik załamania światła zależy od częstotliwości fali, więc i prędkość fotonów w ośrodkach materialnych jest różna dla różnych częstotliwości.

Z naszych rozważań wynika, że nie da się zrozumieć prędkości fotonu, bez jednoczesnego uwzględnienia jego charakteru korpuskularnego i falowego. W próżni foton, jako **cząstka** o zerowej masie spoczynkowej, porusza się z maksymalną prędkością c , natomiast zmniejszenia jego prędkości w ośrodkach materialnych nie sposób wytłumaczyć bez uwzględnienia jego **falowego** charakteru.

Jak uczonym udało się zmierzyć niewiarygodnie wielką wartość prędkości światła?

Większość uczonych od starożytności uważała, że światło rozchodzi się natychmiastowo. Jednymi z pierwszych, którzy podważyli ten pogląd, byli Galileusz (1564–1642) oraz duński astronom Ole Roemer (1644–1710). Roemer obserwując zaćmienia księżyca Jowisza ustalił, że moment ich pojawiania się zmienia się w zależności od położenia Ziemi na orbicie okołosłonecznej. Zinterpretował tę obserwację jako dowód na skończoną prędkość światła.

Pierwszego, zakończonego sukcesem, laboratoryjnego pomiaru prędkości światła dokonał Armand Fizeau (1819–1896) w 1849 roku za pomocą obracającego się koła zębatego umieszczonego na wierzchołku jednego wzgórza oraz zwierciadła umieszczonego na wierzchołku drugiego wzgórza oddalonego o 8633 m. Silne źródło światła zostało umieszczone za kołem w taki sposób, żeby zęby obracającego się koła przesłaniały wiązkę światła, tworząc następujące po sobie impulsy światła (Rys. 2.). Prędkość wirowania koła była dobrana tak, żeby powracające światło trafiło na ząb i nie docierało do obserwatora znajdującego się za kołem. Znając częstotliwość wirowania oraz wymiary koła, a także odległość do zwierciadła, Fizeau otrzymał prędkość światła równą 315 300 km/s. Jest to wartość różniącą się zaledwie o 5% od obecnie znanej wartości.



Rys. 2. Schemat doświadczenia Armanda Fizeau, w którym wyznaczona została prędkość światła

Rówieśnik Fizeau, Jean Foucault, zmierzył prędkość światła, stosując wirujące lustro. Uzyskał wartość $298\,000 \pm 500$ km/s, która różniła się tylko o 0,6% od obecnej wartości.

Udoskonalonej metody Foucaulta użył Albert Michelson, laureat Nagrody Nobla w 1907 roku, którą przyznano mu, między innymi, za dokładny pomiar prędkości światła. W 1880 uzyskał

wynik $299\,910 \pm 50$ km/s. W latach 1924 – 1926, dzięki aparaturze ustawionej na szczytach górskich odległych o 35 km, uzyskał wartość $299\,796 \pm 4$ km/s, bardzo zbliżoną do przyjmowanej obecnie.

Słowniczek

Akcelerator

(ang. *accelerator*) – urządzenie służące do przyspieszania naładowanych cząstek elementarnych lub jonów do prędkości bliskich prędkości światła w próżni.

Masa spoczynkowa

(ang. *rest mass*) – masa ciała mierzona w układzie odniesienia, w którym ciało spoczywa.

Nanosekunda

(ang. *nanosecond*) – jednostka czasu pochodna od sekundy. $1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ s}$.

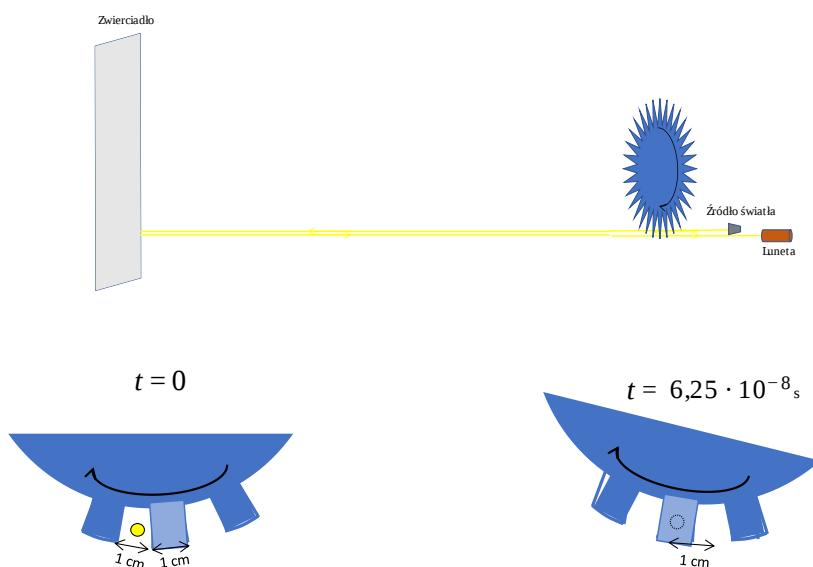
Grafika interaktywna

Z jaką prędkości porusza się foton?

Obejrzyj grafikę interaktywną, która wyjaśnia, w jaki sposób Armand Fizeau dokonał pierwszego laboratoryjnego pomiaru prędkości światła. Kliknij w grafikę poniżej.

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

Polecenie 1






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

Do lunety światło przestało docierać przy częstotliwości obrotów koła $f = 10^3$ Hz. Szerokość zębów koła równa jest szerokości szczelin między zębami i wynosi $d = 1$ cm. Obwód koła równy jest $L = 157$ cm. Ile czasu trwa obrót koła, po którym szczelina zostanie zastąpiona przez sąsiedni ząb?

Polecenie 2

Odległość od koła do zwierciadła wynosi $x = 1$ km. Oblicz prędkość światła wyznaczoną w tym doświadczeniu.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



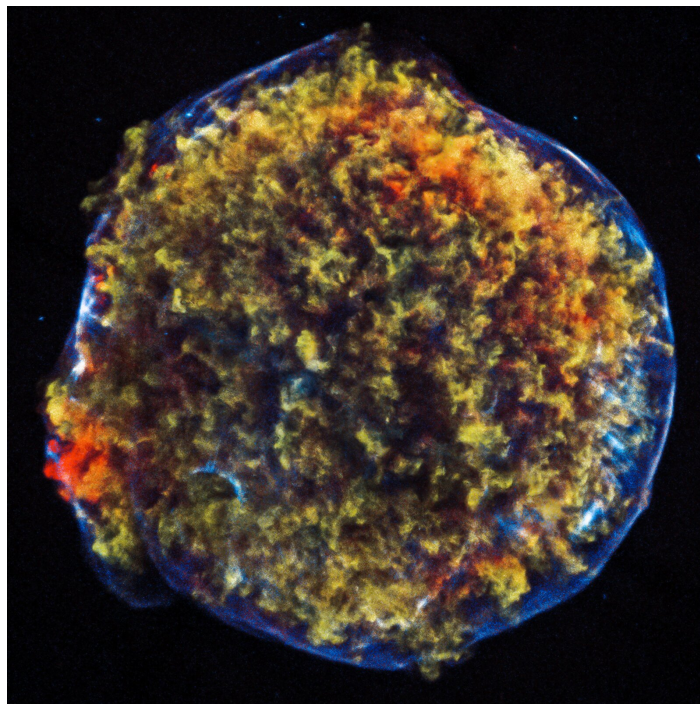
Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4



W listopadzie 1572 r. pojawiła się w gwiazdozbiore Kasjopei nowa gwiazda o takiej jasności, że widoczna była za dnia. Opisał ją duński astronom Tycho Brahe w pracy „Stella Nova”. Był to wybuch supernowej. Materia z wybuchu utworzyła kulę gazu i pyłu o średnicy 20 lat świetlnych (zdjęcie poniżej). Oblicz średnicę kuli w kilometrach z dokładnością do 3 cyfr znaczących.



Zdjęcie SN 1572 w promieniowaniu rentgenowskim wykonane przez Teleskop kosmiczny Chandra (NASA's Chandra X-ray Observatory Celebrates 15th Anniversary)

Ćwiczenie 5



Ćwiczenie 6



Ćwiczenie 7



Ćwiczenie 8



Pierwszą próbę pomiaru prędkości światła podjął Galileusz. W tym celu ustawił dwie osoby na odległych wzgórzach z zakrytymi latarniami. Gdy jedna z nich odświecała swoją latarnię, druga miała natychmiast zareagować tym samym. Pomiar czasu między odświeceniem latarni i ujrzaniem światła z drugiego wzgórza, miał umożliwić obliczenie prędkości światła. Jednak próba była nieudana. Galileusz stwierdził tylko, że prędkość światła jest nieco większa niż 30 km/s (pomylił się więc 10 000 razy!). Wyjaśnij przyczynę niepowodzenia Galileusza, wiedząc, że minimalny czas reakcji człowieka wynosi około 0,2 s. Przyjmij odległość między wzgórzami równą 3 km (taki zasięg mają współczesne silne latarki).

≈

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Krystyna Wosińska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Z jaką prędkością porusza się foton?
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>XI. Fizyka atomowa. Uczeń:</p> <p>2) opisuje dualizm korpuskularno-falowy światła; stosuje pojęcie fotonu oraz jego energii.</p>
Kształtowane kompetencje kluczowe:	<p>Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:</p> <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. określa, czym jest foton i jaką niesie energię oraz pęd, 2. wyjaśnia, czym jest prędkość maksymalna, 3. stosuje definicję metra, wykorzystującą wartość prędkości światła, 4. analizuje wartość prędkości światła w próżni w różnych układach odniesienia, 5. zna historię pomiarów prędkości światła.
Strategie nauczania:	strategia eksperymentalno-obszernyjna (dostrzeganie i definiowanie problemów)
Metody nauczania:	wykład informacyjny, pokaz multimedialny, analiza pomysłów
Formy zajęć:	praca w grupach, praca indywidualna
Środki dydaktyczne:	komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia
Materiały pomocnicze:	e-materiał: „Natura korpuskularna promieniowania elektromagnetycznego”
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
<p>Wprowadzenie zgodnie z treścią w części pierwszej „Czy to nie ciekawe?” Odwołanie do wiedzy uczniów o dualizmie korpuskularno-falowym.</p>	
Faza realizacyjna:	
<p>Nauczyciel wprowadza pojęcie fotonu jako kwantu energii, podając wzory na energię i pęd fotonu. Wyjaśnia, że wszystkie ciała można podzielić na bezmasowe, jak fotony, które poruszają się z prędkością światła c, oraz ciała o masie spoczynkowej większej od zera, których prędkości są zawsze mniejsze od c. Uczniowie rozważają, czy prędkość fotonu w próżni oraz w ośrodkach materialnych zależy od częstotliwości fali, dochodząc do wniosku, że w próżni nie zależy i zawsze wynosi c, a w ośrodkach materialnych jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika załamania światła, zależnego od częstotliwości fali. Nauczyciel wyjaśnia, że prędkość światła w próżni, jako stała uniwersalna, jest jednakowa w każdym układzie odniesienia i fakt ten jest podstawowym założeniem szczególnej teorii względności. Następnie krótko opowiada o historii pomiarów prędkości światła. Uczniowie oglądają grafikę interaktywną, a następnie w grupach rozwiązują zadanie tam zawarte.</p>	
Faza podsumowująca:	

Aby sprawdzić stopień przyswojenia materiału, uczniowie w grupach rozwiązują zadanie 8 z zestawu ćwiczeń, a następnie dyskutują odpowiedź na forum klasy.

Praca domowa:

Obowiązkowo zadania 1 – 3 z zestawu ćwiczeń. Do wyboru jedno z pozostałych zadań.

**Wskazówki metodyczne
opisujące różne zastosowania
danego multimedium**

Multimedium bazowe może też być wykorzystane przez uczniów po lekcji do powtórzenia i utrwalenia materiału.
Zadania z zestawu ćwiczeń można potraktować jako zadania domowe lub niektóre z nich rozwiązać na lekcji.