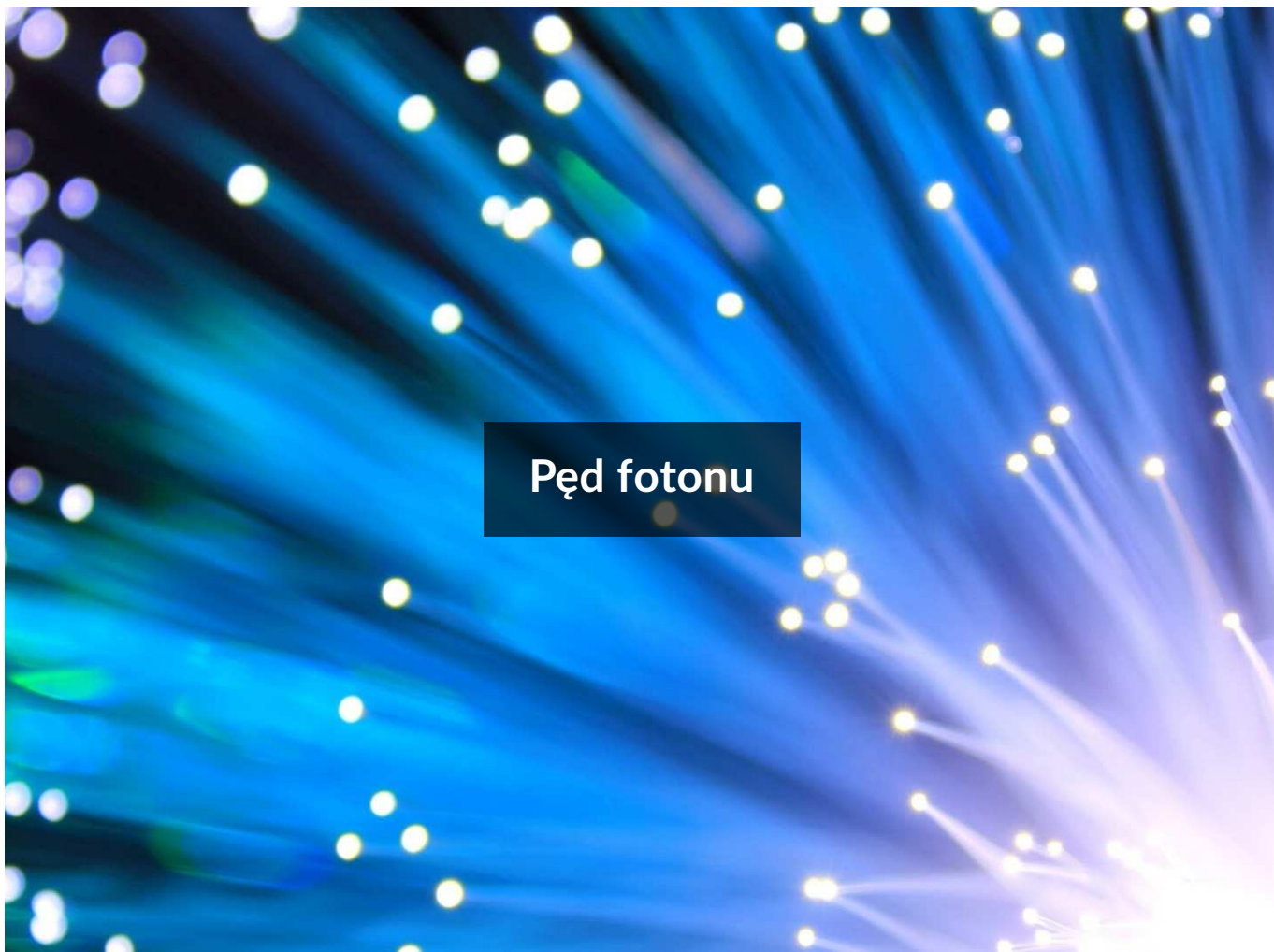


## Pęd fotonu

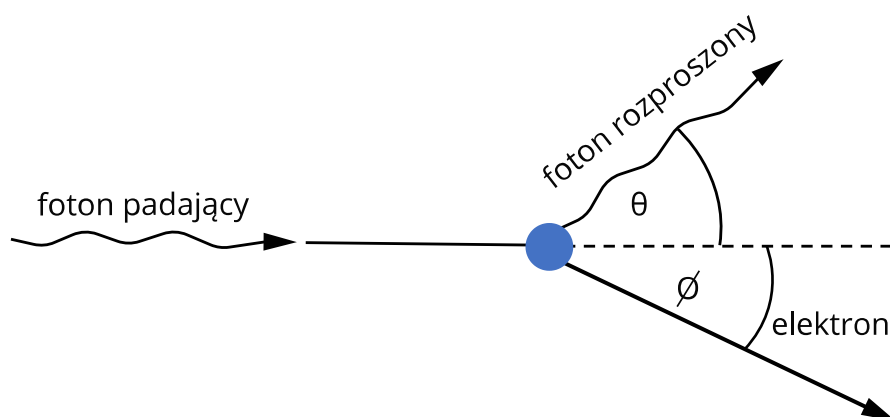
- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film samouczek
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



## Pęd fotonu

### Czy to nie ciekawe?

Wiemy, że promieniowanie elektromagnetyczne, jak światło, czy promieniowanie rentgenowskie, to fale elektromagnetyczne. W wielu zjawiskach ukazuje swą naturę falową, ale w innych przypadkach zachowuje się jak zbiór cząstek – fotonów. Popatrz na rysunek przedstawiający rozproszenie fotonu na elektronie. Przebiega ono podobnie, jak zderzenie kul bilardowych. Foton możemy traktować jako obiekt posiadający energię i pęd. W jakich jeszcze zjawiskach możemy zaobserwować istnienie fotonów, posiadających pęd, dowiesz się z tego e-materiału.



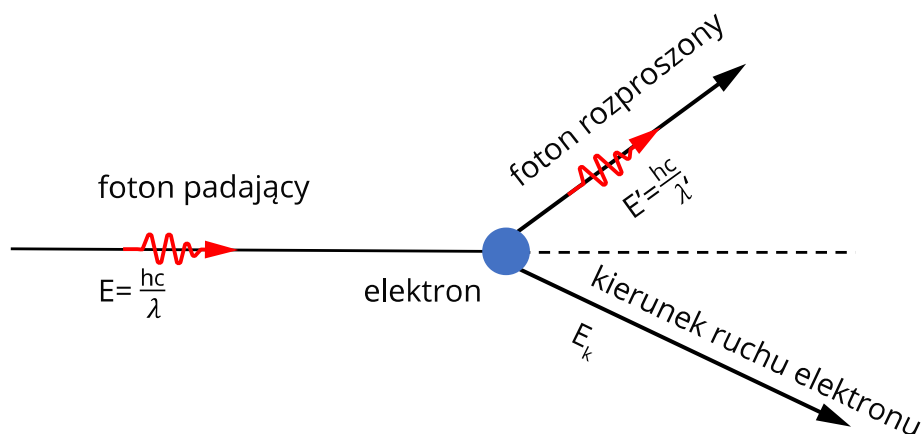
## Twoje cele

- Poznasz zjawiska, w których przejawia się korpuskularna natura promieniowania elektromagnetycznego.
- Zrozumiesz, że zjawisko Comptona, czyli rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego na elektronach, można opisać jako zderzenie dwóch cząstek: fotonu i elektronu.
- Poznasz wzory na energię i pęd fotonu.
- Przeanalizujesz zasadę zachowania pędu w zjawisku emisji i absorpcji fotonu przez atom.
- Przeanalizujesz mechanizm laserowego chłodzenia atomów.

# Przeczytaj

## Warto przeczytać

Badanie **rozpraszania promieniowania rentgenowskiego na elektronach** przyniosło przewrót w rozumieniu natury promieniowania elektromagnetycznego. Okazało się, że długość fali promieniowania rozproszonego zmienia się w zależności od kąta rozproszenia. Im większa jest zmiana kierunku ruchu promieniowania rozproszonego, tym większy jest przyrost długości fali. Nie można tego w żaden sposób wyjaśnić falową teorią promieniowania. Wyjaśnienie podał amerykański fizyk, Arthur Compton, który opisał rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego na elektronach jako zderzenie dwóch cząstek – fotonu i elektronu (Rys. 1.). W zderzeniu zachowane są całkowita energia i całkowity pęd. Zjawisko to znane jest obecnie jako **zjawisko Comptona**.



Rys. 1. Zjawisko Comptona – rozpraszanie fotonu na swobodnym elektronie jest zderzeniem dwóch cząstek, w którym zachowane są energia i pęd.

Compton potraktował promieniowanie rentgenowskie jako cząstki (fotony) o energii:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

oraz pędzie:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

gdzie  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J·s jest stałą Plancka,  $f$  – częstotliwością fali,  $\lambda$  – długością fali,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s – prędkością światła.

Foton uderzający w elektron przekazuje mu część swojej energii. Zderzenie przebiega podobnie, jak zderzenie dwóch kul bilardowych (Rys. 1.). Po zderzeniu elektron porusza się z energią kinetyczną  $E_k$ , a foton z mniejszą od początkowej energią i zmienia swój kierunek ruchu. Jeśli długość fali promieniowania padającego wynosi  $\lambda$ , a promieniowania rozproszonego  $\lambda'$ , to zasadę zachowania energii wyraża równanie:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + E_k$$

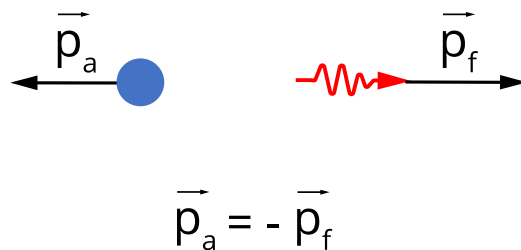
Energia fotonu rozproszonego jest mniejsza niż przed zderzeniem, dlatego długość fali jest większa ( $\lambda' > \lambda$ ). Zastosowanie zasady zachowania pędu i energii do tego zderzenia pozwala wyprowadzić wzór na długość fali rozproszonego promieniowania doskonale zgodny z doświadczeniem.

Emisja promieniowania elektromagnetycznego przez atom zachodzi wtedy, gdy atom znajduje się w **stanie wzbudzonym**. Oznacza to, że jeden z jego elektronów znalazł się na wyższym poziomie energetycznym. Powracając na poziom niższy, elektron zmniejsza swoją energię. Nadmiar energii emitowany jest w postaci fotonu o energii dokładnie równej różnicy energii między tymi poziomami.

W procesie tym zachowana jest całkowita energia, ale również całkowity pęd układu. Foton o długości fali  $\lambda$  unosi pęd o wartości:

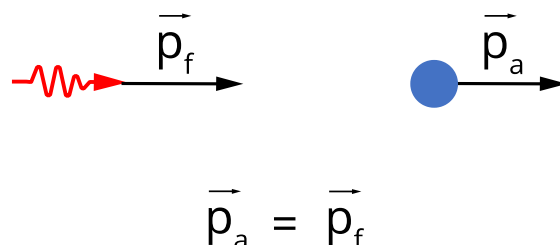
$$p_f = \frac{h}{\lambda}$$

Atom musi więc otrzymać pęd o tej samej wartości, ale przeciwnie skierowany, aby całkowity pęd wynosił zero, jak przed emisją fotonu (Rys. 2.).



Rys. 2. Podczas emisji fotonu atom otrzymuje pęd o tej samej wartości, ale przeciwnie skierowany do pędu fotonu.

Gdy atom absorbuje foton, przechodzi do stanu wzbudzonego. I w tym zjawisku musi być zachowany całkowity pęd. Przed absorpcją foton niósł pęd  $\vec{p}_f$ . Po absorpcji fotonu już nie ma, a jego pęd przejął atom (Rys. 3.).



Rys. 3. Podczas absorpcji fotonu atom otrzymuje pęd równy pędowi zaabsorbowanego fotonu.

Obliczmy prędkość, z jaką porusza się atom wodoru, gdy wyemituje foton o energii  $E = 10,2$  eV. Należy przyrównać wartość pędu fotonu  $\frac{h}{\lambda}$  i atomu  $mv$ , gdzie  $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg to masa atomu wodoru, a  $v$  – jego prędkość.

$$\frac{h}{\lambda} = mv$$

Mnożymy obie strony przez prędkość światła  $c$ :

$$\frac{hc}{\lambda} = mvc$$

Po lewej stronie mamy teraz energię fotonu  $E = \frac{hc}{\lambda}$ , więc

$$v = \frac{E}{mc}$$

Zanim wstawimy wartości liczbowe do wzoru, trzeba zamienić jednostkę energii fotonu z elektronowoltów na dżule:

$$E = 10,2 \text{ eV} = 10,2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,63 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

$$v = \frac{1,63 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 3,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Atom, na skutek odrzutu, po wyemitowaniu fotonu porusza się z prędkością 3,3 m/s - całkiem szybko, jeśli weźmiemy pod uwagę, że spowodował to niepozorny foton!

## Słowniczek

### elektronowolt (eV)

(ang. *electronvolt*) – jednostka energii spoza układu SI, używana w fizyce mikroświata. 1 eV to energia, jaką uzyskuje elektron przyspieszany w polu elektrycznym o różnicy potencjałów równej 1 wolt.  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

### stan wzbudzony

– (ang. *excited state*) – stan energetyczny atomu wyższy niż podstawowy, czyli taki, w którym elektron przeszedł na wyższą orbitę i zyskał energię dzięki absorpcji promieniowania albo zderzeniu z innym atomem.

# Film samouczek

---

## Pęd fotonu

Na poniższym filmie przedstawiono, w jaki sposób można wykorzystać pęd fotonu do laserowego chłodzenia atomów do temperatur bliskich zeru bezwzględemu.

## Trwa wczytywanie danych ..

### Polecenie 1

Gaz został poddany laserowemu schłodzeniu. Jego temperatura zmalała, zatem zmalała także jego energia wewnętrzna. Każdy atom wielokrotnie zmienił swój stan energetyczny wskutek licznych zderzeń z fotonami wiązki laserowej. Każdemu pochłonięciu fotonu towarzyszyło wzbudzenie ze stanu podstawowego o energii  $E_1$  do stanu o energii  $E_2$ . Po czasie rzędu mikrosekund lub mniej następowało przejście odwrotne, do stanu podstawowego, z emisją fotonu o energii  $E_2 - E_1$ .

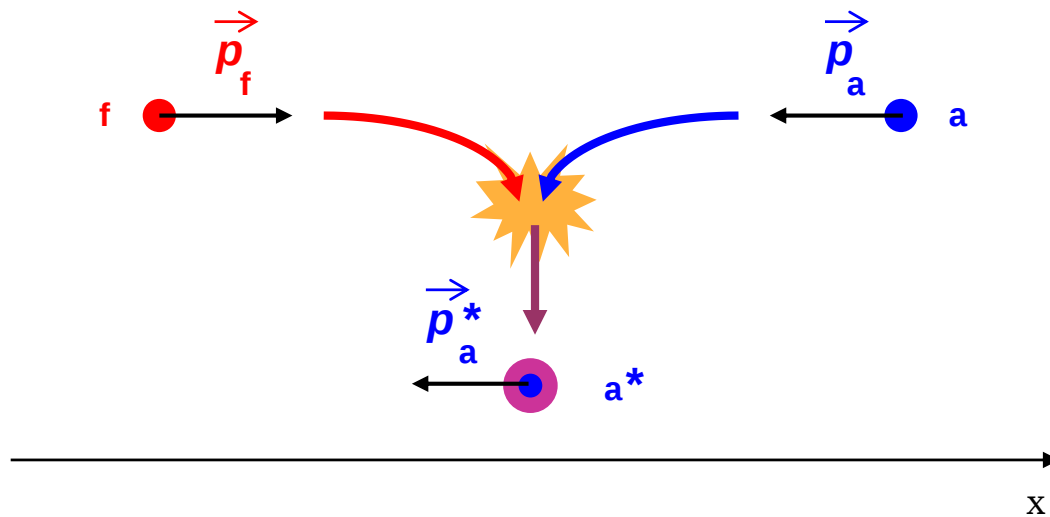
1. Uzupelnij powyższą wypowiedź, by stanowiła ona hipotezę, że w procesie laserowego chłodzenia naruszana jest zasada zachowania energii.
2. Przedstaw argumentację przemawiającą przeciwko tej hipotezie.

### Wspólny tekst do poleceń 2 i 3.

Na schemacie pokazano czołowe zderzenie fotonu (oznaczonego symbolem „f”) o pędzie  $\vec{p}_f$  i energii  $E_f$  oraz atomu (oznaczonego symbolem „a”) o pędzie  $\vec{p}_a$  i energii kinetycznej  $E_a$ . Wskutek zderzenia atom przechodzi ze stanu energetycznego  $E_1$  do stanu wzbudzonego o energii  $E_2$ , zaś foton zostaje pochłonięty w całości. Po

zderzeniu wzbudzony atom (oznaczony symbolem „a<sup>\*</sup>”) ma pęd  $\vec{p}_a^*$  i energię kinetyczną  $E_a^*$ .

Wykonaj dwa polecenia związane z tym schematem.






Schematyczne przedstawienie zderzenia fotonu (f) z atomem (a), w wyniku którego powstaje wzbudzony atom (a<sup>\*</sup>).

Polecenie 2

Polecenie 3

# Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4



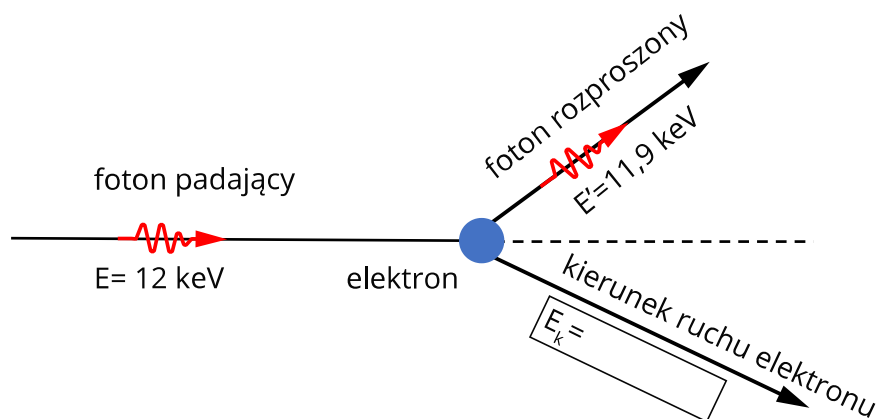
Ćwiczenie 5



Ćwiczenie 6



Na rysunku przedstawione jest rozpraszanie fotonu promieniowania rentgenowskiego na elektronie. Podane są wartości energii fotonu przed zderzeniem ( $E$ ) i po zderzeniu ( $E'$ ). Wpisz wartość energii kinetycznej uzyskanej przez elektron.



## Ćwiczenie 7



Na rysunku (a) foton o energii rezonansowej zbliża się do atomu i zostanie przez niego pochłonięty (b). Jakim wzorem wyraża się wartość przekazu pędu,  $\Delta p$ , otrzymanego przez atom? Uzupełnij wzór, który powinien pojawić się na rysunku.

$$E = h\nu$$



a)

$$\Delta p = \square$$



b)

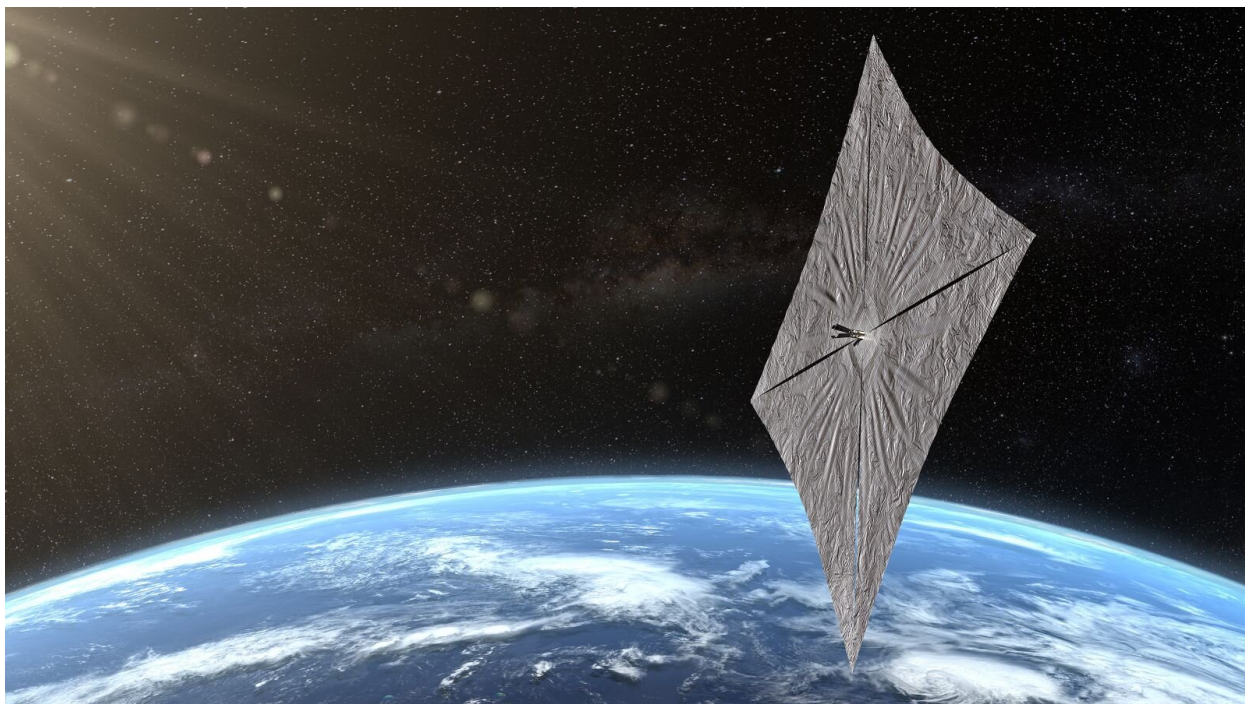
## Ćwiczenie 8



## Ćwiczenie 9



LightSail 2 jest jednym z pierwszych satelitów wykorzystujących do napędu żagiel słoneczny, czyli rozpostartą w przestrzeni konstrukcję pokrytą materiałem odbijającym światło słoneczne. Fotony docierające ze Słońca do żagla odbijają się od jego powierzchni (absorbpcja fotonów jest niewielka) i przekazują mu swój pęd.



### Definicja: Natężenie promieniowania świetlnego

jest to stosunek  $I$  przenoszonej przez światło energii  $E$  do czasu jej przenoszenia  $t$  i pola powierzchni  $S$ , prostopadłej do kierunku rozchodzenia się światła  $I = \frac{E}{St}$ .

Oblicz maksymalne przyspieszenie, jakie satelita LightSail mógłby osiągnąć wiedząc, że w odległości około 1 jednostki astronomicznej od Słońca natężenie promieniowania słonecznego wynosi ok.  $1370 \text{ W/m}^2$ , satelita LightSail ma łączną masę  $5,0 \text{ kg}$  i żagle o łącznej powierzchni  $32 \text{ m}^2$ . Jaką prędkość mógłby rozwinąć ten satelita w ciągu roku? Wyniki podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

# Dla nauczyciela

---

<b>Imię i nazwisko autora:</b>	Krystyna Wosińska
<b>Przedmiot:</b>	Fizyka
<b>Temat zajęć:</b>	<b>Pęd fotonu</b>
<b>Grupa docelowa:</b>	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
<b>Podstawa programowa:</b>	<p><b>Cele kształcenia – wymagania ogólne:</b></p> <p>I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.</p> <p><b>Zakres rozszerzony</b></p> <p><b>Treści nauczania – wymagania szczegółowe:</b></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>6) posługuje się pojęciem pędu fotonu; stosuje zasadę zachowania energii i zasadę zachowania pędu do opisu emisji i absorpcji przez swobodne atomy; opisuje odrzut atomu emitującego kwant światła.</p>
<b>Kształtowane kompetencje kluczowe:</b>	<p><b>Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji,</li><li>• kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii,</li><li>• kompetencje cyfrowe,</li><li>• kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.</li></ul>

<b>Cele operacyjne:</b>	<p>Uczeń:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>wymieni zjawiska, w których przejawia się korpuskularna natura promieniowania elektromagnetycznego;</li> <li>wyjaśni, że zjawisko Comptona, czyli rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego na elektronach, można opisać jako zderzenie dwóch cząstek: fotonu i elektronu;</li> <li> poda wzory na energię i pęd fotonu;</li> <li>przeanalizuje zasadę zachowania pędu w zjawisku emisji i absorpcji fotonu przez atom;</li> <li>przeanalizuje mechanizm laserowego chłodzenia atomów.</li> </ol>
<b>Strategie nauczania:</b>	strategia eksperymentalno-obszernyjna (dostrzeganie i definiowanie problemów)
<b>Metody nauczania:</b>	wykład informacyjny, pokaz multimedialny, analiza pomysłów
<b>Formy zajęć:</b>	praca w grupach, praca indywidualna
<b>Środki dydaktyczne:</b>	komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia
<b>Materiały pomocnicze:</b>	e-materiał: „Emisja i absorpcja promieniowania przez swobodne atomy”, „Natura korpuskularna promieniowania elektromagnetycznego”
<b>PRZEBIEG LEKCJI</b>	
<b>Faza wprowadzająca:</b>	
Wprowadzenie, zgodnie z treścią w części pierwszej „Czy to nie ciekawe?”. Odwołanie do wiedzy uczniów o fotonach.	
<b>Faza realizacyjna:</b>	
Nauczyciel opowiada o historii odkrycia fotonu, jako obiektu posiadającego pęd, przedstawiając jakościowo zjawisko Comptona. Podaje wzory na energię i pęd fotonu. Następnie nauczyciel inicjuje dyskusję, w której uczniowie wyjaśniają, na czym polega emisja i absorpcja fotonu przez atom. Uczniowie, z pomocą nauczyciela, przypominają zasadę zachowania pędu. Uczniowie w grupach analizują tę zasadę w zjawiskach emisji i absorpcji fotonu przez atom i obliczają, jaki pęd (wartość i kierunek) przekazany jest atomowi podczas emisji i absorpcji. Uczniowie oglądają film samouczek i w grupach odpowiadają na zadane w nim pytanie. Następnie uczniowie dyskutują nad wnioskami, do których doszli.	
<b>Faza podsumowująca:</b>	

Uczniowie rozwiązują zadania 4 i 5 z zestawu ćwiczeń, aby sprawdzić stopień przyswojenia materiału.

Uczniowie, pod kierunkiem nauczyciela, podsumowują wiadomości zdobyte na lekcji. Odnoszą się także do postawionych sobie celów lekcji i ustalają, które osiągnęli, a które wymagają jeszcze pracy, jakiej i kiedy. W razie potrzeby nauczyciel dostarcza im informację zwrotną kształtującą.

**Praca domowa:**

Obowiązkowo - zadania od 1 do 3 z zestawu ćwiczeń. Do wyboru - jedno z pozostałych zadań.

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

Film samouczek może też być wykorzystany przez uczniów po lekcji, do powtórzenia i utrwalenia materiału.