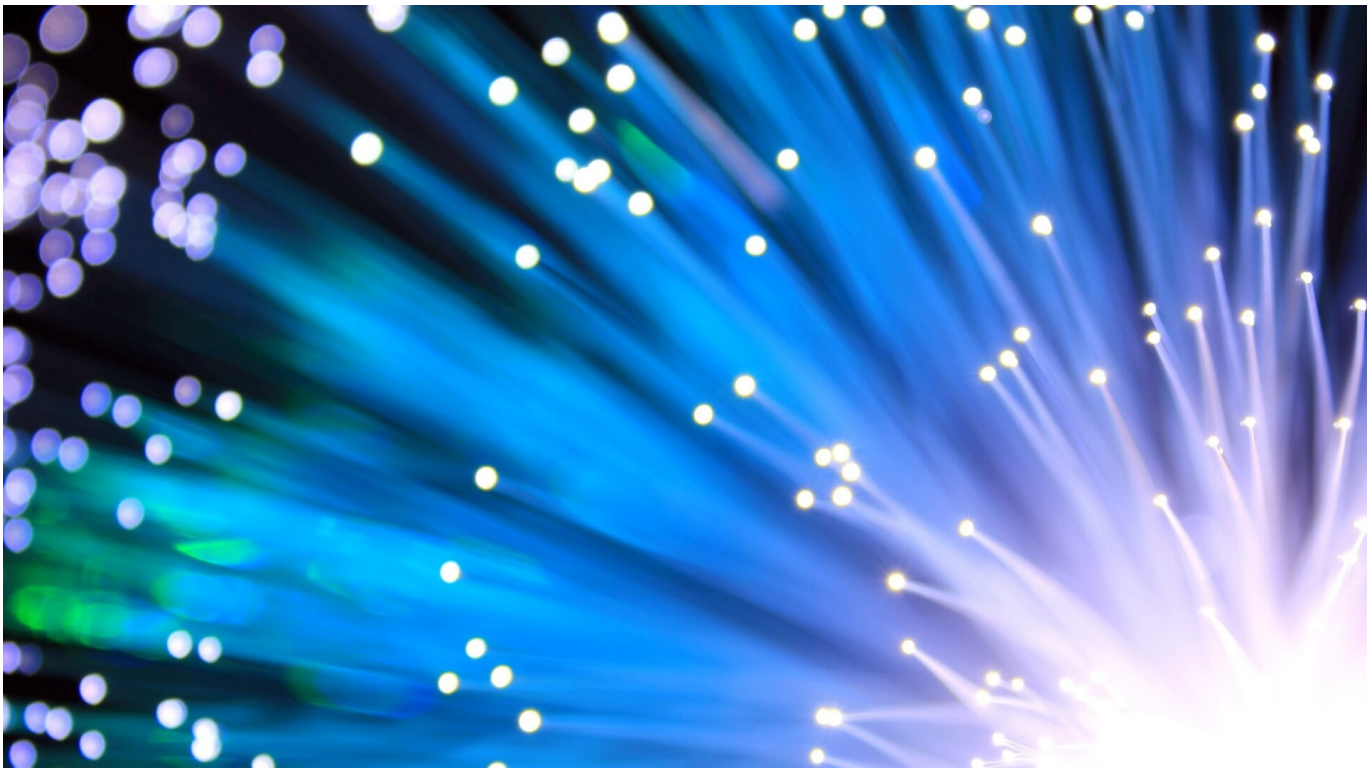
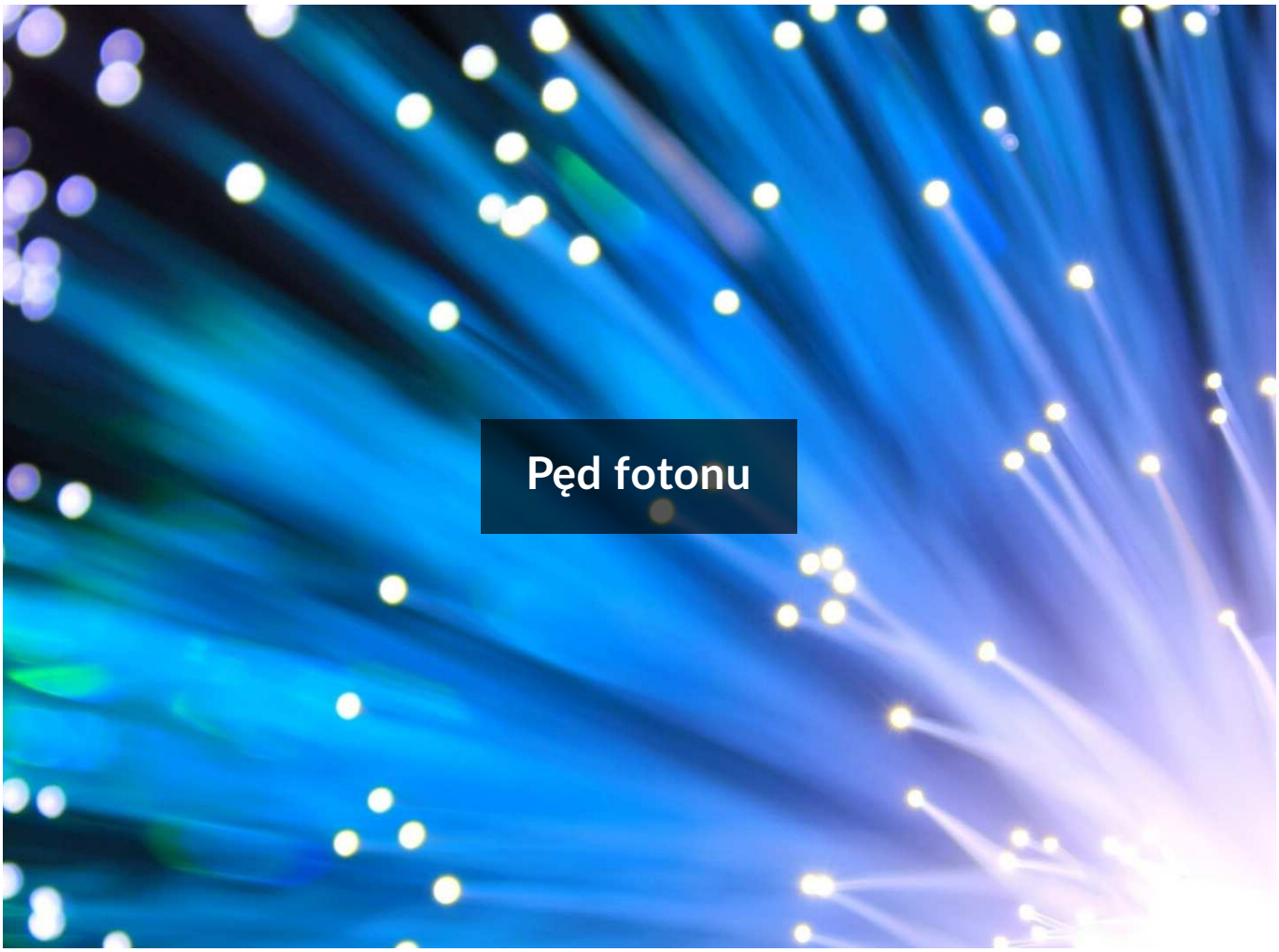


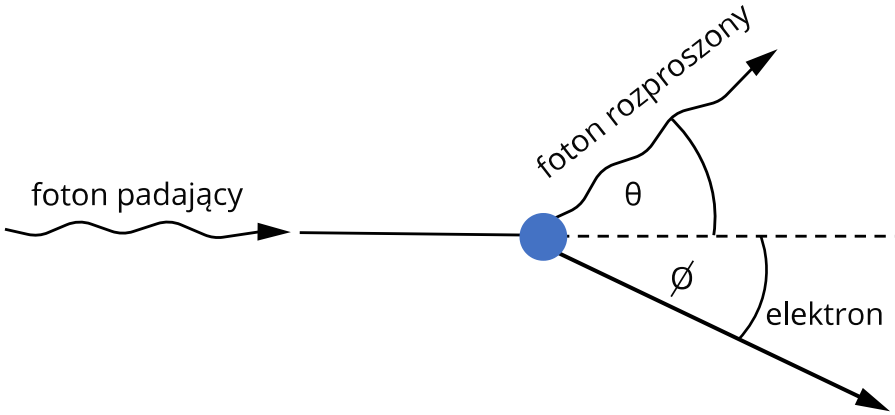
Pęd fotonu

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



Czy to nie ciekawe?

Wiemy, że promieniowanie elektromagnetyczne, jak światło, czy promieniowanie rentgenowskie, to fale elekromagnetyczne. 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.



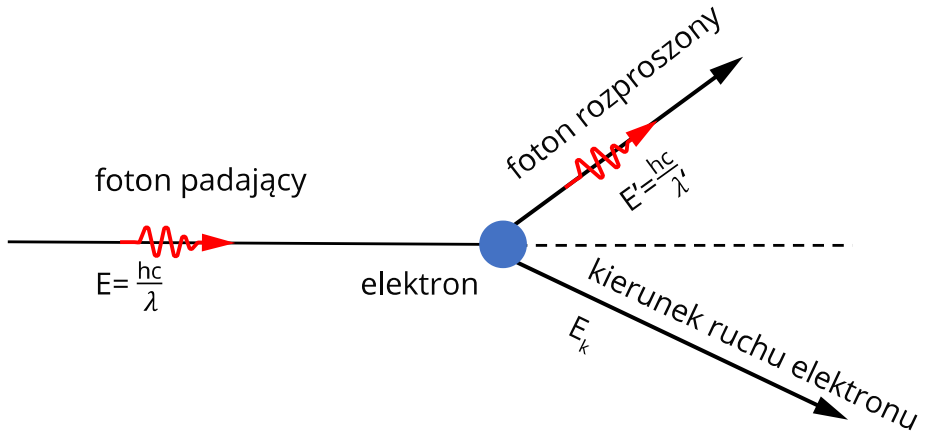
Twoje cele

- 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 · 10^{-34} J·s jest stałą Plancka, f – częstotliwością fali, λ – długością fali, c = 3 · 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 λ, a promieniowania rozproszonego λ', to zasadę zachowania energii wyraża równanie:

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

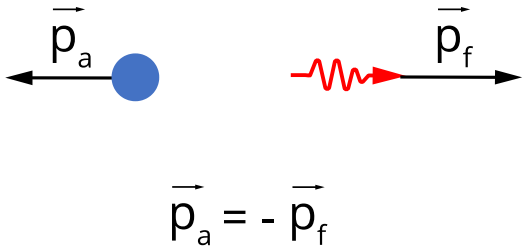
Energia fotonu rozproszonego jest mniejsza niż przed zderzeniem, dlatego długość fali jest większa ($\lambda' > \lambda$). Zastosowanie zasady zachowania pędu i energii do tego zderzenia pozwala wyprowadzić wzór na długość fali rozproszonego promieniowania doskonale zgodny z doświadczeniem.

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 λ unosi pęd o wartości:

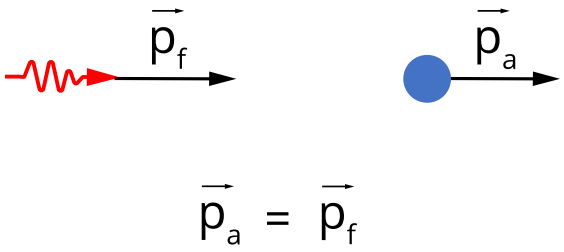
$$p_f = \frac{h}{\lambda}$$

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 absorbcją 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 eV = 1,602 · 10^{-19} 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 bezwzględnemu.

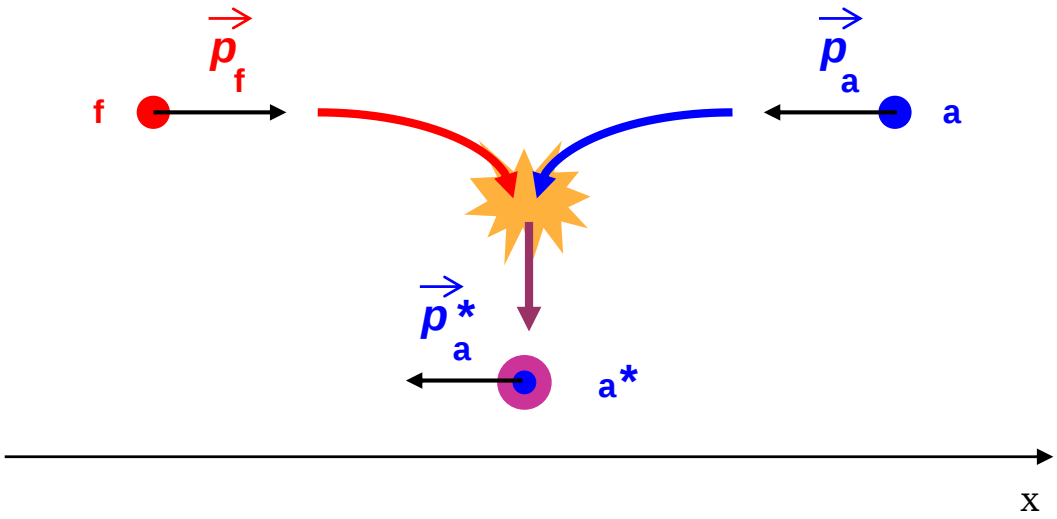
Polecenie 1

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. Uzupełnij 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*”) 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*).

Polecenie 2

Uzupełnij tekst, by uzyskać opis zderzenia fotonu z atomem, którego skutkiem jest wzbudzenie atomu.

Zderzenie takie jest [ ], gdyż energia [ ] wzbudzonego atomu jest [ ] energia [ ] [ ] przed zderzeniem.

W opisanym zderzeniu wartości pędów atomu, przed zderzeniem i po zderzeniu, spełniają relację: p_{a}^{*} [ ] p_{a}.

całkowita | taka sama jak | kinetyczna | łączna, fotonu i atomu, | większa niż | mniejsza niż | $=$ | kinetyczna | sprężyste | $<$ | niesprężyste | $>$ | całkowita | wewnętrzna | wewnętrzna | atomu

Polecenie 3

Zapisz równania opisujące zasadę zachowania energii oraz zasadę zachowania pędu w takim zderzeniu.
W tym drugim równaniu wykorzystaj współrzędne pędów wzdłuż kierunku zderzenia.

Zasada zachowania energii:

$E_{\mathrm{f}}+$ [ ] [ ] $=$ [ ] [ ]

Zasada zachowania pędu:

p_{fx} [ ] $=$ [ ]

$-p_{\mathrm{ax}}$ p^{*}_{ax} E_2 $+p_{\mathrm{ax}}$ E_1 $E_{\mathrm{a}}+$ $E^{*}_{\mathrm{a}}+$

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

Uzupełnij zdanie:

Pęd fotonu jest (wprost ☐ / odwrotnie ☐) proporcjonalny do częstotliwości fali, a (wprost ☐ / odwrotnie ☐) proporcjonalny do długości fali.

Ćwiczenie 2

Uzupełnij zdanie:

Odrzut atomu emitującego kwant światła wynika z zasady zachowania (energii ☐ / pędu ☐).

Ćwiczenie 3

Porównaj pędy fotonu promieniowania rentgenowskiego o długości fali 5 nm i fotonu promieniowania gamma o długości fali 0,05 nm. Uzupełnij zdania:

Większy pęd ma foton promieniowania [ ].

Stosunek pędu fotonu gamma do pędu fotonu rentgenowskiego wynosi [ ].

100 | 0,25 | 0,01 | rentgenowskiego | gamma | 2500

Ćwiczenie 4

Uzupełnij zdanie:

Podczas absorpcji fotonu atom otrzymuje pęd (zgodny z kierunkiem ☐ / przeciwny do kierunku ☐) ruchu zaabsorbowanego fotonu, a podczas emisji fotonu pęd przekazany atomowi ma kierunek (zgodny z kierunkiem ☐ / przeciwny do kierunku ☐) ruchu wyemitowanego fotonu.

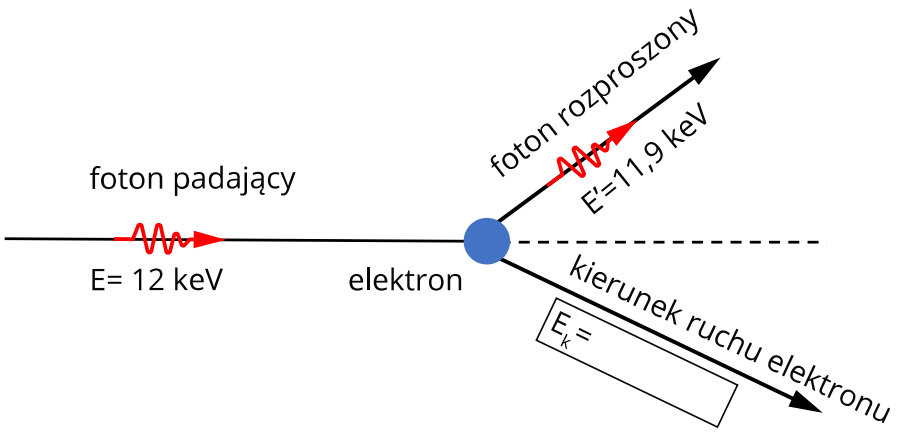
Ćwiczenie 5

Atom wodoru emituje foton o energii E = 1, 89 eV. Oblicz wartość pędu, jaki zyskał atom po emisji fotonu.

p = 10 ☐ kg·m/s.

Ćwiczenie 6

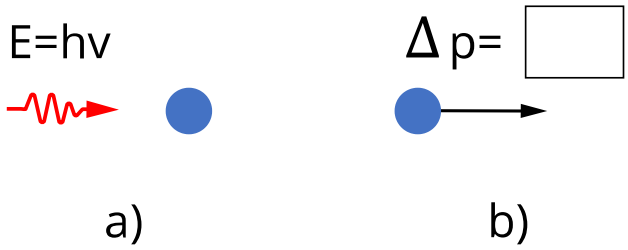
Na rysunku przedstawione jest rozpraszanie fotonu promieniowania rentgenowskiego na elektronie. Podane są wartości energii fotonu przed zderzeniem (E) i po zderzeniu (E'). Wpisz wartość energii kinetycznej uzyskanej przez elektron.



Odpowiedź: Energia kinetyczna uzyskana przez elektron wynosi ☐ keV

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, Δp, otrzymanego przez atom? Uzupełnij wzór, który powienien pojawić się na rysunku.



Odpowiedź: Δp = (⋅)/

W mnożeniu wstaw najpierw stałą a potem wielkość fizyczną.

ν c m h

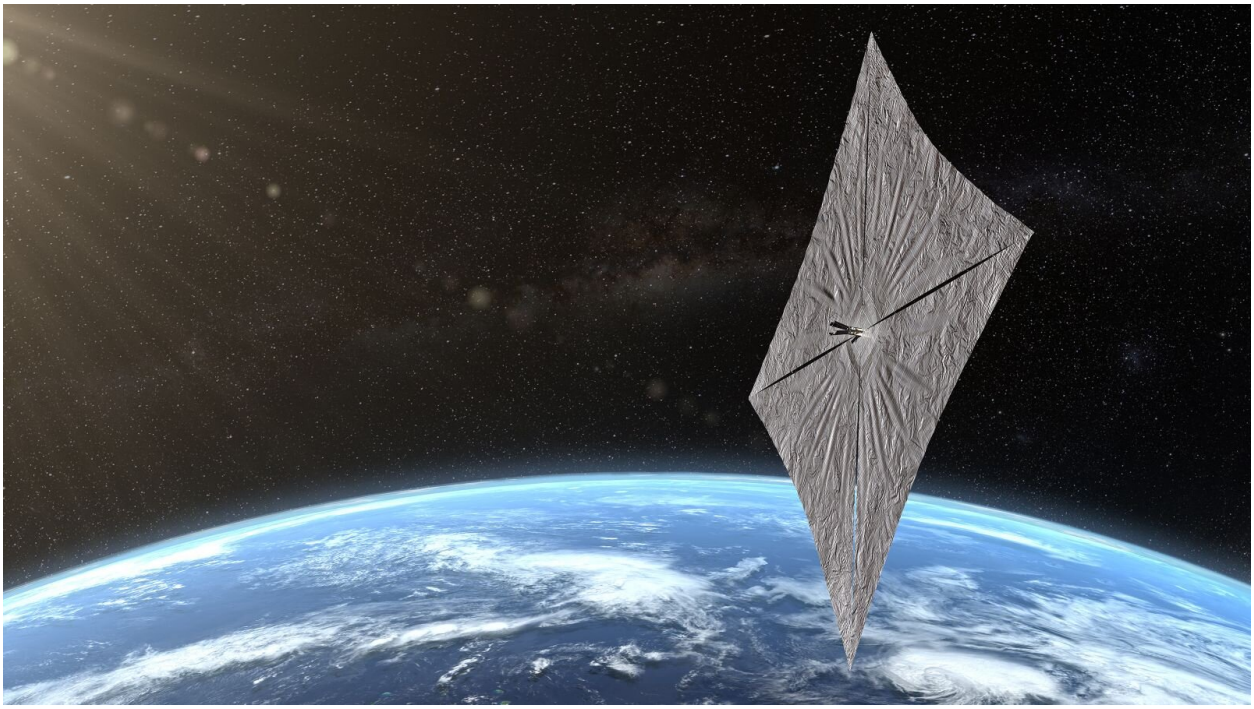
Ćwiczenie 8

Atom zaabsorbował foton, wskutek czego przeszedł do stanu wzbudzonego, a następnie powrócił do stanu podstawowego, emitując foton o takiej samej energii i pędzie. Podczas absorpcji atom otrzymał pęd równy pędowi fotonu, a podczas emisji pęd przekazany atomowi ma taką samą wartość, ale kierunek przeciwny do kierunku ruchu wyemitowanego fotonu. Czy pęd atomu zmienił się, czy pozostał taki sam, jak przed absorpcją fotonu? Odpowiedź uzasadnij.

Odpowiedź: Pęd atomu z dużym prawdopodobieństwem zmienił się ☐ / nie zmienił się ☐ .

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 (absorbcja 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 W/m^2, satelita LightSail ma łączną masę 5,0 kg i żagle o łącznej powierzchni 32 m^2. Jaką prędkość mógłby rozwinąć ten satelita w ciągu roku? Wyniki podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

a = [ ] $\cdot 10^{-5}$ m/s^2,

v_{rok} = [ ] km/s.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Krystyna Wosińska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Pęd fotonu**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne:** I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości. **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. XI. Fizyka atomowa. Uczeń: 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.
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. wymieni zjawiska, w których przejawia się korpuskularna natura promieniowania elektromagnetycznego; 2. wyjaśni, że zjawisko Comptona, czyli rozpraszanie promieniowania rentgenowskiego na elektronach, można opisać jako zderzenie dwóch cząstek: fotonu i elektronu; 3. poda wzory na energię i pęd fotonu; 4. przeanalizuje zasadę zachowania pędu w zjawisku emisji i absorpcji fotonu przez atom; 5. przeanalizuje mechanizm laserowego chłodzenia atomów.
Strategie nauczania:	strategia eksperymentalno-obserwacyjna (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: „Emisja i absorpcja promieniowania przez swobodne atomy", „Natura korpuskularna promieniowania elektromagnetycznego"
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Wprowadzenie, zgodnie z treścią w części pierwszej „Czy to nie ciekawe?". Odwołanie do wiedzy uczniów o fotonach.	
Faza realizacyjna:	
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.	
Faza podsumowująca:	

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.