




Jak można wyjaśnić krótkofalową granicę widma promieniowania rentgenowskiego i jej zależność od napięcia zasilania lampy?

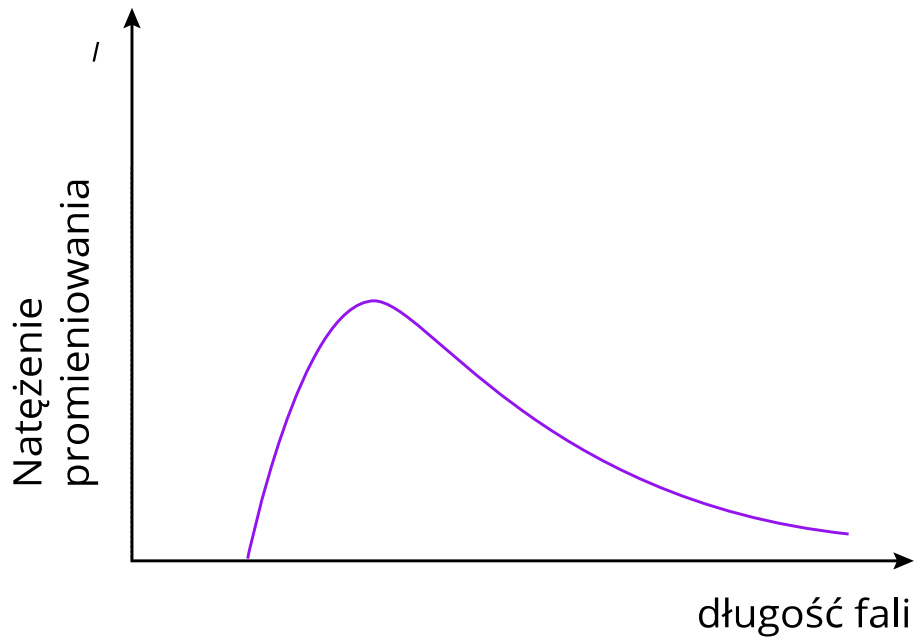
- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Film samouczek
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



Jak można wyjaśnić krótkofalową granicę widma promieniowania rentgenowskiego i jej zależność od napięcia zasilania lampy?

Czy to nie ciekawe?

Na rysunku przedstawione jest widmo ciągłe promieniowania rentgenowskiego. Nie ma ono ograniczeń od strony fal długich, ale od strony fal krótkich istnieje dokładnie określona granica. Jaka jest fizyczna interpretacja tego faktu? Z jakich praw fizycznych wynika istnienie tej granicy? Wyjaśnieniem zajmiemy się w tym e-materiale.



Rys. a. Widmo ciągłe promieniowania rentgenowskiego

Twoje cele

- dowiesz się, czym jest promieniowanie rentgenowskie i jakie parametry je opisują,
- poznasz budowę i zasadę działania lampy rentgenowskiej,
- przeanalizujesz kształt widma promieniowania rentgenowskiego,
- zrozumiesz, dlaczego widmo promieniowania rentgenowskiego ma granicę od strony fal krótkich.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Promieniowanie rentgenowskie to rodzaj fal elektromagnetycznych o długościach fal w zakresie od około 0,01 nm do 10 nm.

Promieniowanie elektromagnetyczne ma podwójną naturę: falową i korpuskularną. Oznacza to, że można je opisać jako zbiór cząstek – fotonów, poruszających się z prędkością światła $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, oraz jako falę, którą charakteryzują parametry falowe takie, jak:

- **długość fali** λ , czyli odległość między sąsiednimi punktami, w których pole elektryczne i magnetyczne mają taką samą fazę,
- **częstotliwość** ν , czyli liczba pełnych zmian pola magnetycznego i elektrycznego w ciągu jednej sekundy, wyrażona w hercach (Hz).

Długość i częstotliwość fali są wielkościami odwrotnie proporcjonalnymi:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

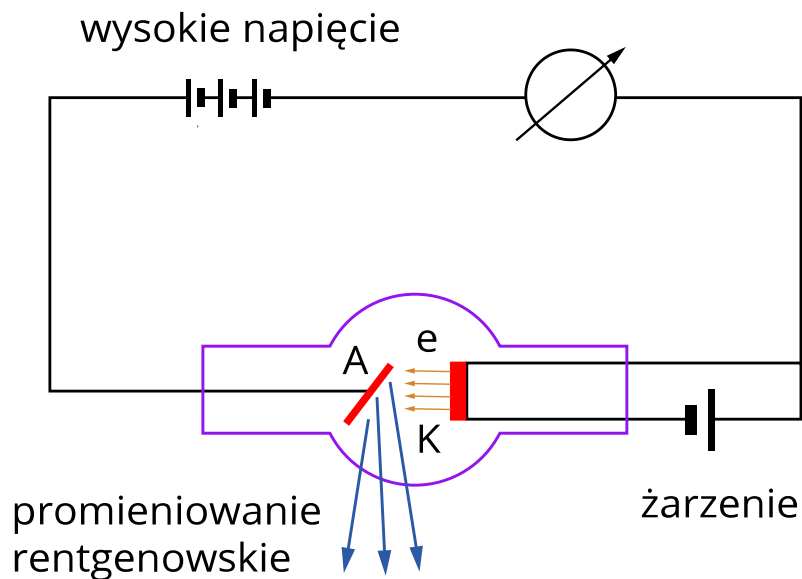
Natomiast energia fotonu jest wprost proporcjonalna do częstotliwości fali i wynosi:

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

gdzie $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J·s jest stałą Plancka, ν – częstotliwością fali, λ – długością fali.

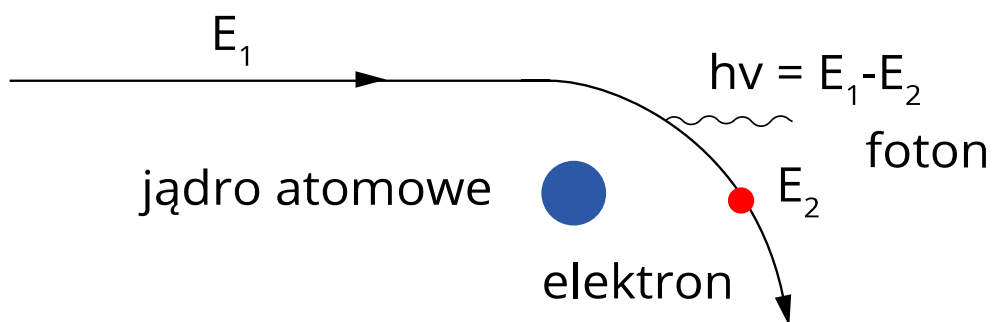
Korpuskularna natura promieniowania elektromagnetycznego przejawia się tym wyraźniej, im mniejsza jest długość fali promieniowania, a większa częstotliwość i energia fotonu. Promieniowanie rentgenowskie należy do promieniowania wysokoenergetycznego, które głównie przejawia naturę korpuskularną.

Promieniowanie rentgenowskie wytwarzane jest w lampach rentgenowskich. Zasada działania lampy polega na wykorzystaniu zjawiska emisji fali elektromagnetycznej przez naładowaną cząstkę poruszającą się z przyspieszeniem. Schemat budowy lampy rentgenowskiej pokazany jest na Rys. 1.



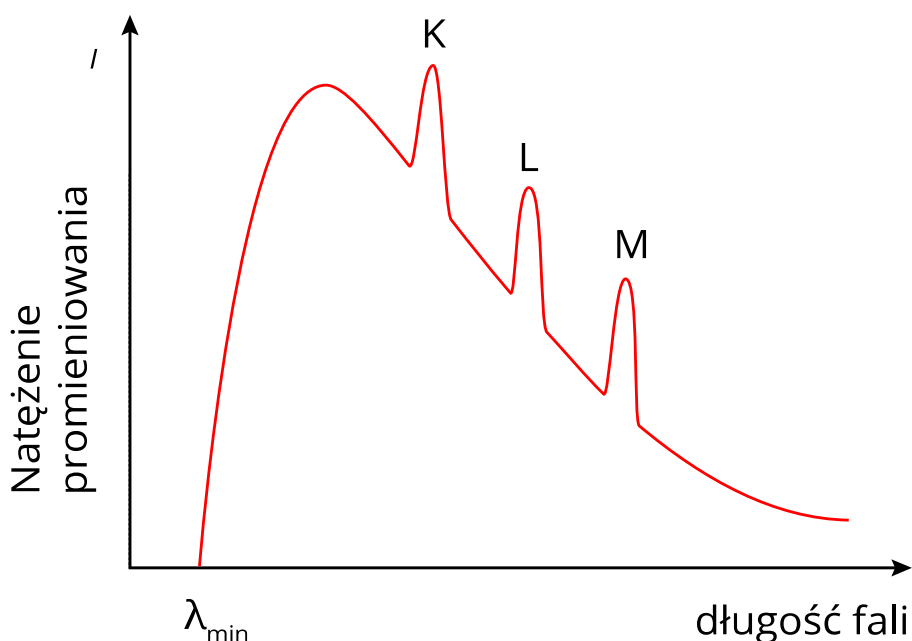
Rys. 1. Schemat lampy rentgenowskiej

Lampę stanowi bańka szklana, z której wypompowano powietrze. Wewnątrz znajdują się dwie elektrody: katoda K i anoda A. Elektrody połączone są ze źródłem wysokiego napięcia rzędu kilkudziesięciu tysięcy volt lub nawet większych. Dodatni biegun połączony jest z anodą, ujemny z katodą. Katodę stanowi włókno wolframowe, które w czasie pracy lampy rozżarzone jest wskutek przepływu prądu z dodatkowego źródła żarzenia. Elektrony emitowane są z rozżarzonej katody na skutek ruchów termicznych, a następnie przyspieszane do wielkich energii w polu elektrycznym pomiędzy anodą i katodą. Rozpędzone elektrony wpadają na anodę, gdzie są hamowane w polu elektrycznym jąder atomów. Gwałtownej zmianie energii kinetycznej elektronów towarzyszy emisja fotonów promieniowania rentgenowskiego, które unoszą energię kinetyczną straconą przez elektrony. Promieniowanie to nazywamy **promieniowaniem hamowania** (Rys. 2.).



Rys. 2. Powstawanie promieniowania hamowania. Energię utraconą przez elektron, $E_1 - E_2$, unosi powstały foton o częstotliwości ν

Typowe widmo promieniowania rentgenowskiego pokazuje Rys. 3. Jest to widmo ciągłe posiadające granicę od strony fal krótkich. Widoczne są także maksima, oznaczone literami K, L i M, których położenia zależne są od materiału anody.



Rys. 3. Przykładowy kształt widma promieniowania emitowanego z lampy rentgenowskiej

Za powstanie maksimów w widmie promieniowania rentgenowskiego odpowiada inny mechanizm emisji fotonów. Rozpędzone elektrony, wpadające na anodę, mogą wybijać elektrony z głębszych powłok elektronowych atomów anody. Na wolne miejsca przeskakują elektrony z wyższych powłok, czemu towarzyszy emisja fotonów o energii dokładnie równej różnicy między energiami poziomów energetycznych atomu. Jest to widmo liniowe, charakterystyczne dla atomów, wchodzących w skład anody. Emisję tego promieniowania nazywamy **fluorescencją rentgenowską**.

Nałożenie widma liniowego i widma ciągłego daje taki obraz, jaki widzimy na Rys. 3.

Jak wyjaśnić krótkofalową granicę widma rentgenowskiego? Odpowiedź jest prosta – istnienie tej granicy wynika z **zasady zachowania energii**.

Elektron przyspieszany napięciem U między katodą i anodą uzyskuje energię kinetyczną:

$$E_k = eU$$

gdzie $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C to ładunek elektronu.

Na anodzie następuje hamowanie elektronów, w wyniku czego energia ta ulega gwałtownemu zmniejszeniu. Utracona energia wysyłana jest w postaci fotonów promieniowania rentgenowskiego.

Zgodnie z zasadą zachowania energii, suma energii fotonu $\frac{hc}{\lambda}$ i elektronu po wyhamowaniu E'_k równa jest początkowej energii elektronu eU .

$$eU = \frac{hc}{\lambda} + E'_k$$

E'_k – końcowa energia elektronu po wyhamowaniu, jest przypadkowa, zależna od tego, jak blisko jądra poruszał się elektron i jak zmienił się kierunek jego ruchu. Długości fal emitowanego promieniowania również są więc przypadkowe. To dlatego widmo promieniowania jest ciągłe. Energia fotonu nie może jednak przekroczyć początkowej energii elektronu eU . Foton o maksymalnej energii emitowany jest wtedy, gdy elektron straci całą energię w jednym procesie zderzenia. Maksymalna energia fotonu wynosi więc:

$$E_{max} = \frac{hc}{\lambda} = eU$$

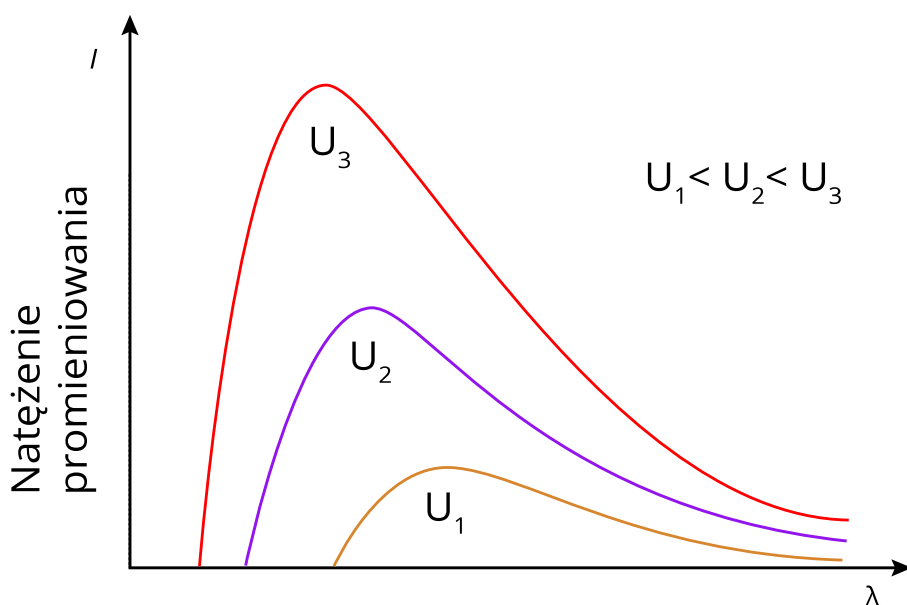
Maksymalnej energii fotonu odpowiada minimalna długość fali promieniowania, czyli krótkofalowa granica widma wynosi:

$$\lambda_{gr} = \frac{hc}{eU}$$

W powyższym wzorze występuje tylko jedna wielkość, która może się zmieniać – to napięcie U między anodą i katodą, przyspieszające elektrony. Pozostałe wielkości: h , c i e to stałe uniwersalne. Wynika stąd, że:

Krótkofalowa granica widma promieniowania rentgenowskiego zależy tylko od napięcia zasilającego lampę.

Jest to **zależność odwrotnie proporcjonalna**. Zwiększenie napięcia zasilającego lampę n razy spowoduje, że minimalna długość fali promieniowania rentgenowskiego zmniejszy się n -krotnie. Ilustracją tej zależności jest Rys. 4. przedstawiający widma promieniowania dla różnych napięć zasilających.

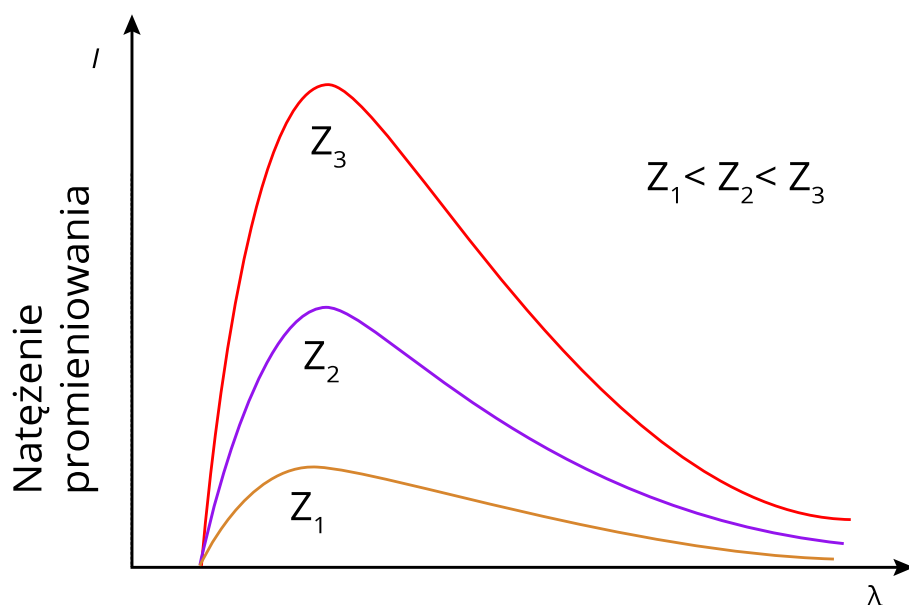


Rys. 4. Widmo ciągłe promieniowania rentgenowskiego dla różnych wartości napięcia zasilającego lampę

Widzimy na Rys. 4., że zwiększenie napięcia między anodą i katodą nie tylko przesunął krótkofalową granicę widma ku mniejszym wartościom długości fali, ale także zwiększa

natężenie promieniowania. Natężenie promieniowania jest miarą liczby fotonów wyemitowanych w jednostce czasu. Elektron przyspieszony większym napięciem ma większą energię i podczas jego hamowania wyemitowanych zostanie średnio więcej fotonów.

Natężenie promieniowania zależne jest także od liczby atomowej Z materiału anody – wzrasta ze wzrostem liczby atomowej materiału tarczy (Rys. 5.). Liczba atomowa to liczba protonów w jądrze atomowym. Jądro atomowe ma więc ładunek $+Ze$. Jądro o większym ładunku wytwarza silniejsze pole elektryczne i proces hamowania elektronów przebiega gwałtowniej, dlatego emitowanych jest więcej fotonów. Jednak nie wpływa to na zmianę wartości częstotliwości granicznej promieniowania rentgenowskiego, która zależy jedynie od napięcia zasilającego lampę.



Rys. 5. Widmo ciągłe promieniowania rentgenowskiego dla różnych wartości liczby atomowej materiału anody

Słowniczek

Elektronowolt (eV)

(ang. *electronvolt*) – jednostka energii spoza układu SI używana w fizyce mikroświata. 1 eV to energia, jaką uzyskuje elektron przyspieszony w polu elektrycznym o różnicy potencjałów równej 1 volt. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Nanometr (nm)

(ang. *nanometer*) – jednostka długości: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$.

Fluorescencja rentgenowska

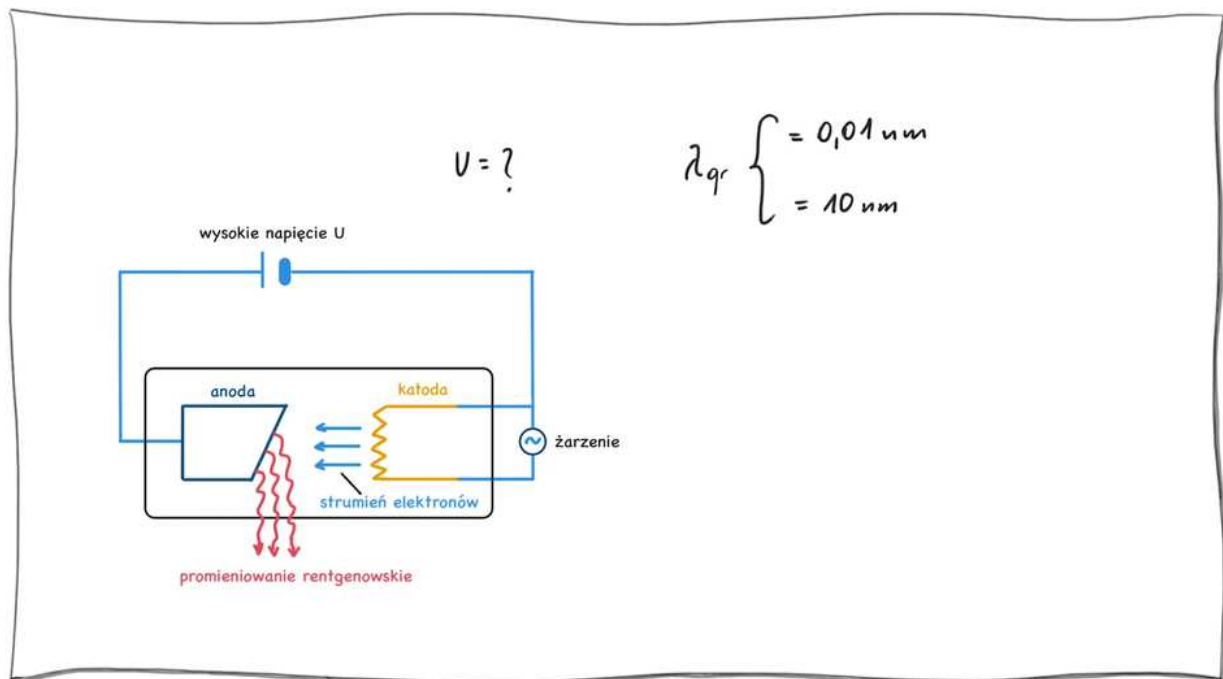
(ang. *X-ray fluorescence*) jest wytwarzana między innymi przez jonizację wewnętrznej powłoki atomu. Jeśli nastąpi jonizacja powłoki wewnętrznej, tj. zostaje wybity elektron, wtedy ten otwór jest wypełniany przez elektron z wyższej powłoki energetycznej.

Różnica energii jest uwalniana jako promienie fluorescencyjne promieniowania rentgenowskiego i jest charakterystyczna dla danego pierwiastka.

Film samouczek

Jak można wyjaśnić krótkofalową granicę widma promieniowania rentgenowskiego i jej zależność od napięcia zasilania lampy?

Obejrzyj film samouczek, w którym na konkretnych przykładach zastosujemy związek między krótkofalową granicą widma promieniowania rentgenowskiego i napięciem zasilania lampy.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1RWd4oHSs5j8>




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

Zapoznaj się z audiodeskrypcją samouczka.

Polecenie 1

Rozstrzygnij, do jakiego zakresu fal elektromagnetycznych należy promieniowanie emitowane przez lampę zasilaną napięciem 123,75 V. Porównaj natężenie takiego promieniowania z natężeniem promieniowania emitowanego przez lampę zasilaną napięciem 123,75 kV.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Ćwiczenie 2



Ćwiczenie 3



Ćwiczenie 4



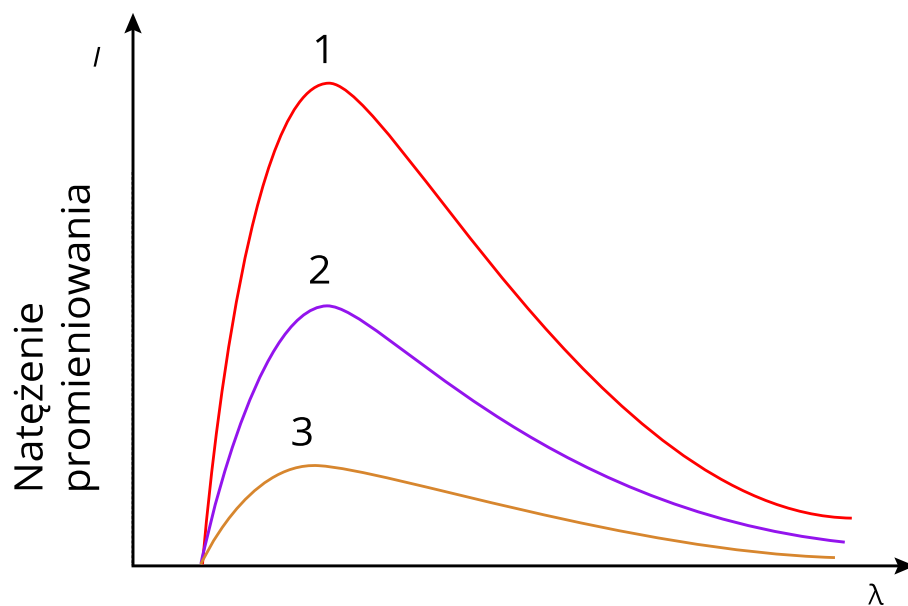
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ćwiczenie 5



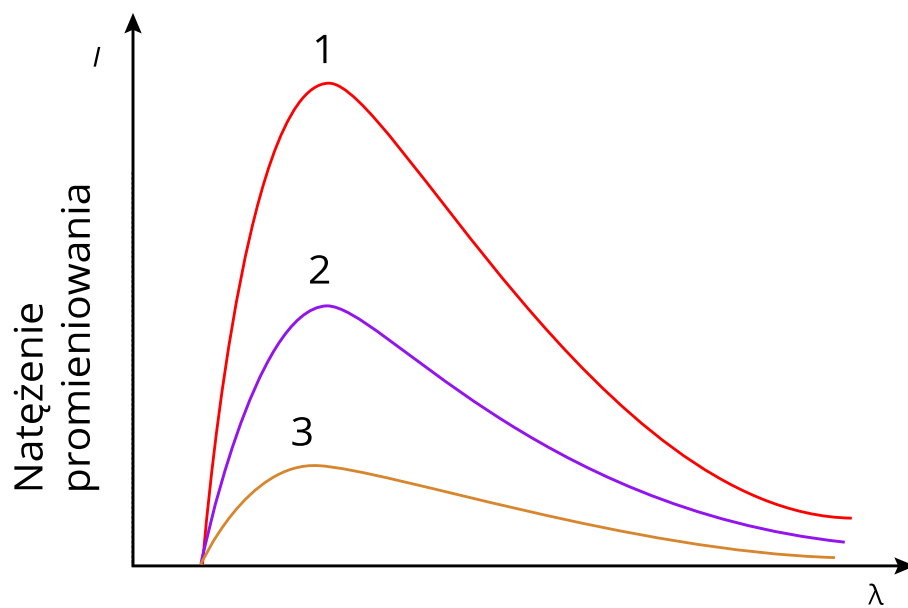
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ćwiczenie 6



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

Ćwiczenie 7



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

Ćwiczenie 8



Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Krystyna Wosińska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Jak można wyjaśnić krótkofalową granicę widma promieniowania rentgenowskiego i jej zależność od napięcia zasilania lampy?
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>7) wyodrębnia z tekstów, tabel, diagramów lub wykresów, rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach.</p> <p>XI. Fizyka atomowa. Uczeń:</p> <p>3) opisuje powstawanie promieniowania rentgenowskiego jako promieniowania hamowania; oblicza krótkofalową granicę widma promieniowania rentgenowskiego.</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. omówi, czym jest promieniowanie rentgenowskie i jakie parametry je opisują; 2. przedstawi budowę i wyjaśni zasadę działania lampy rentgenowskiej; 3. przeanalizuje kształt widma promieniowania rentgenowskiego; 4. wyjaśni, dlaczego widmo promieniowania rentgenowskiego ma granicę od strony fal krótkich.
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-materiały: „Promieniowanie rentgenowskie – charakterystyka”, „Promieniowanie rentgenowskie – zastosowanie”, „W jaki sposób powstaje promieniowanie rentgenowskie”, „Budowa lampy rentgenowskiej”
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
<p>Wprowadzenie zgodnie z treścią w części pierwszej „Czy to nie ciekawe?”.</p> <p>Odwołanie do wiedzy uczniów o promieniowaniu elektromagnetycznym.</p> <p>Przypomnienie wzorów na energię fotonu i związek między długością i częstotliwością fali.</p>	
Faza realizacyjna:	

Nauczyciel wyjaśnia, czym jest promieniowanie rentgenowskie, podając zakres długości fal promieniowania. Wyświetla schemat lampy rentgenowskiej i tłumaczy, jak emitowane jest promieniowanie rentgenowskie. Wyjaśnia, czym jest promieniowanie hamowania, podkreślając, że następuje kreacja fotonu kosztem energii kinetycznej elektronu. Następnie wyświetla przykładowe widmo promieniowania rentgenowskiego. Tłumaczy, dlaczego widmo jest ciągłe, zwracając uwagę na przypadkowość energii fotonów promieniowania hamowania. Następnie zadaje pytanie o największą możliwą energię fotonu i uczniowie w dyskusji ustalają, czym jest krótkofalowa granica widma. Nauczyciel podkreśla, że jest ona manifestacją zasady zachowania energii. Uczniowie w grupach z pomocą nauczyciela wyprowadzają wzór na graniczną długość fali widma promieniowania rentgenowskiego.

Uczniowie oglądają film samouczek i wykonują połączone z nim polecenie.

Faza podsumowująca:

Uczniowie w grupach rozwiązują zadania 7 i 8 z zestawu ćwiczeń i następnie dyskutują wyniki na forum klasy.

Praca domowa:

Zadania z zestawu ćwiczeń: 1- 3 obowiązkowo, 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.