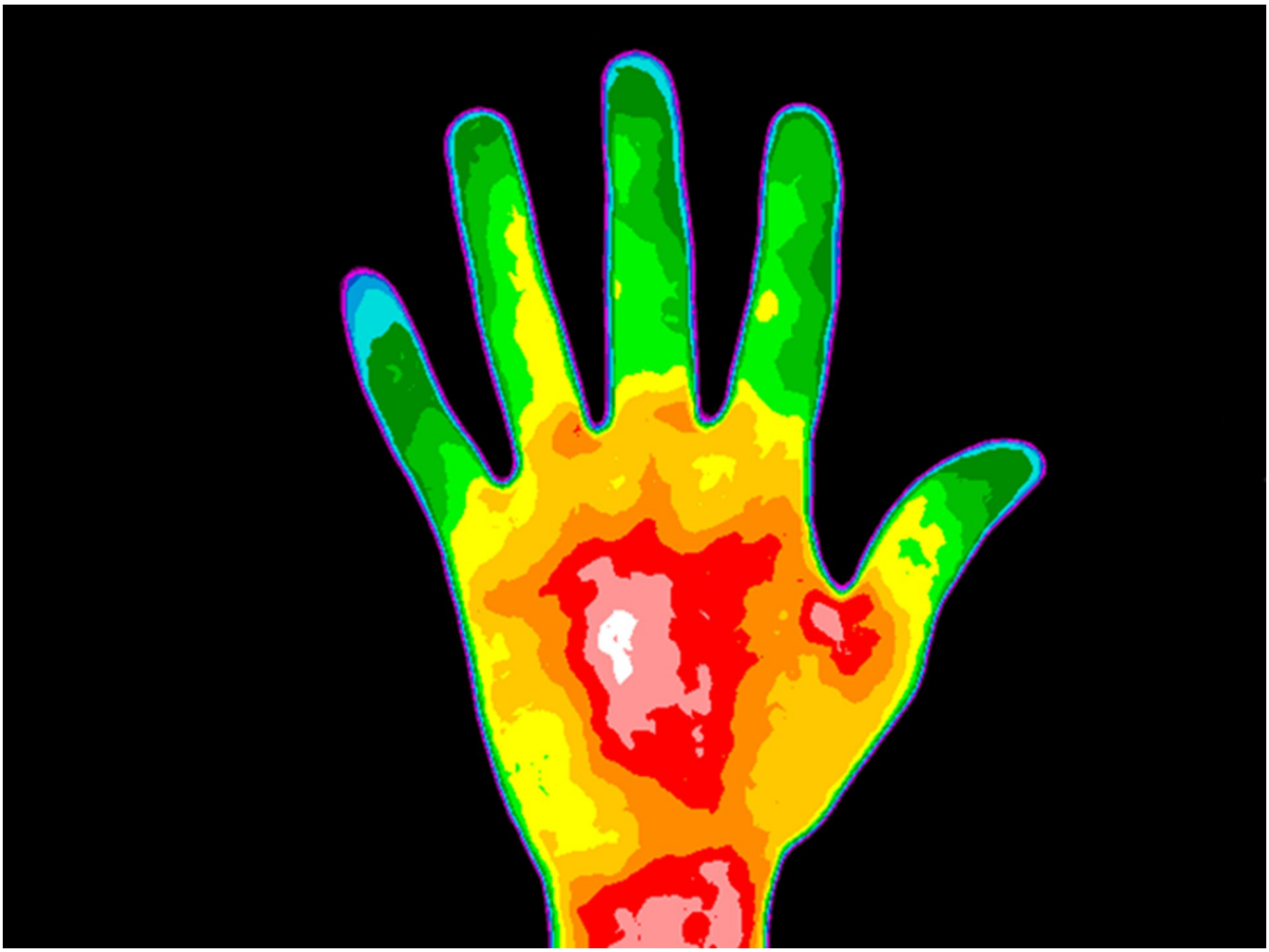
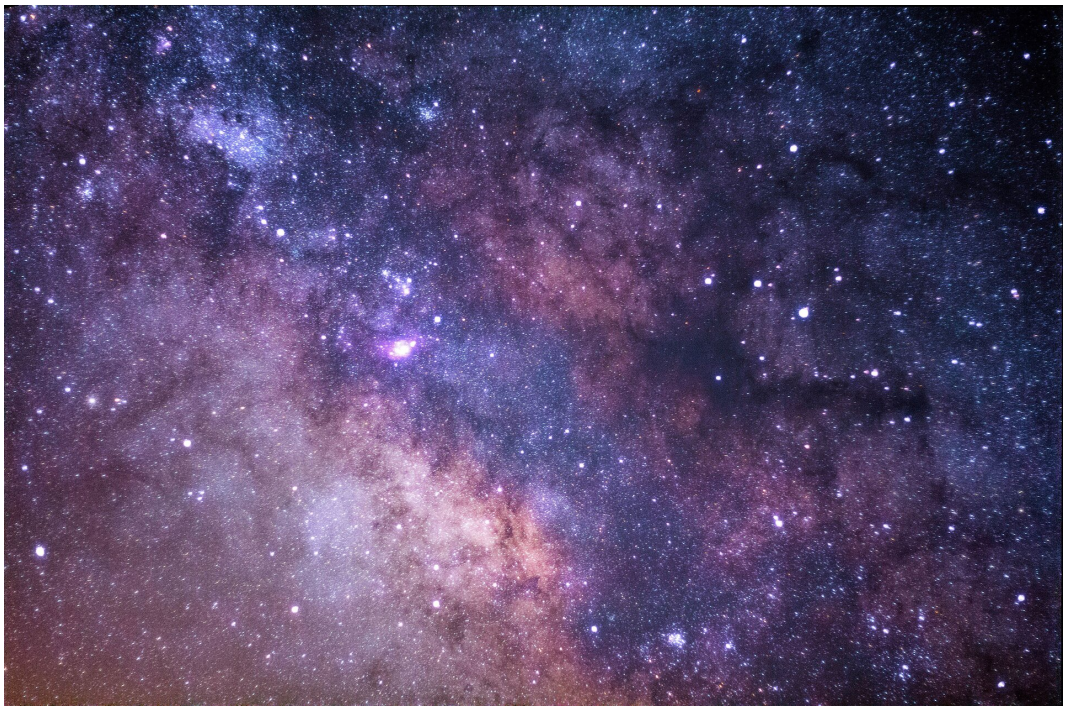


Zależność promieniowania termicznego od temperatury

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

Czy to nie ciekawe?

Gwiazdy są niewyobrażalnie odległe. Pomimo tego znamy wiele ich własności. Między innymi, potrafimy określić temperaturę ich powierzchni.



Wszystkie informacje o odległych gwiazdach otrzymujemy, analizując ich promieniowanie termiczne, które do nas dociera. W tym e-materiale dowiesz się, jak analizując zarejestrowane promieniowanie termiczne, można określić temperaturę ciała, z którego to promieniowanie pochodzi.

Twoje cele

- dowiesz się, czym jest promieniowanie termiczne,
- zrozumiesz przyczynę emisji promieniowania termicznego,
- zrozumiesz, dlaczego ciała mają różne barwy i czym jest ciało doskonale czarne,
- przeanalizujesz zależność kształtu widma promieniowania termicznego od temperatury,
- dowiesz się, jak wyznacza się temperatury odległych gwiazd.

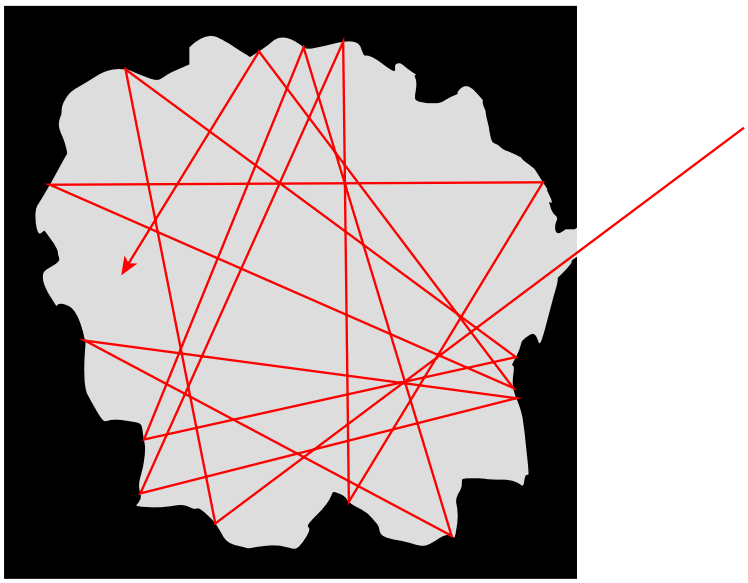
Przeczytaj

Warto przeczytać

Promieniowanie termiczne, zwane też promieniowaniem cieplnym, to fale elektromagnetyczne emitowane przez wszystkie ciała o temperaturach wyższych niż zero bezwzględne.

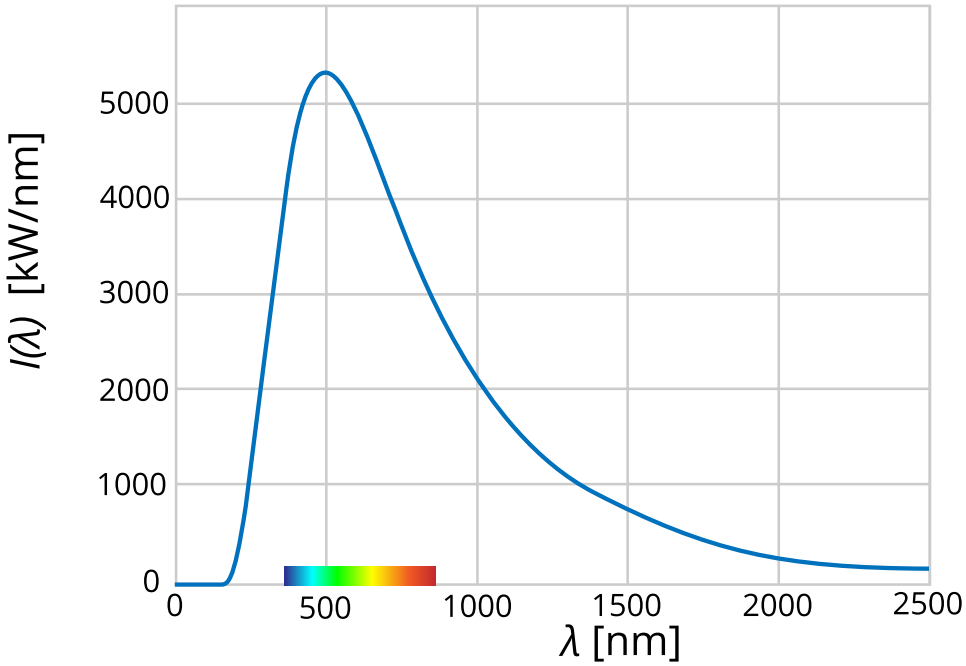
Emisja promieniowania termicznego jest skutkiem ruchu termicznego, czyli nieustającego, bezładnego ruchu molekuł, z których składa się każde ciało. Na skutek zderzeń i oddziaływań międzycząsteczkowych energia poszczególnych molekuł wciąż ulega zmianie. Doznają one przyspieszeń i oscylacji. Atomy składają się z dodatnio naładowanego jądra i elektronów o ujemnym ładunku. Gdy cząstka naładowana porusza się z przyspieszeniem, emituje falę elektromagnetyczną. Zmiany energii cząstek, emitujących promieniowanie, są przypadkowe. Dlatego długości wyemitowanych fal elektromagnetycznych również są przypadkowe i zawierają się w szerokim przedziale wartości. Z długością fali promieniowania związana jest jego energia. Im większa jest energia promieniowania, tym mniejsza długość fali. Światło widzialne to fale elektromagnetyczne o długościach od 400 nm (światło o barwie fioletowej) do 700 nm (światło czerwone). Światło białe jest mieszaniną światła o wszystkich długościach fal.

Każde ciało nie tylko emituje, ale także pochłania promieniowanie, które pada na jego powierzchnię. Jeśli jakieś ciało pochłania światło o barwach od pomarańczowego do fioletowego, a odbija światło czerwone, to oglądane w świetle białym, będzie mieć barwę czerwoną. Takie ciało emituje promieniowanie o takich samych długościach fal, jakie absorbuje. Ciało pochłaniające światło o wszystkich długościach fal jest odbierane przez nas jako czarne. Ciało doskonale czarne emituje więc wszystkie długości fal promieniowania. Oczywiście pojęcie ciała doskonale czarnego jest idealizacją, takie ciała nie istnieją. Założenie, że źródłem promieniowania cieplnego są ciała doskonale czarne, znacznie ułatwia opisy matematyczne, nie trzeba bowiem uwzględniać różnic w barwach ciał. Najpopularniejszym modelem ciała doskonale czarnego jest wnęka z niewielkim otworem. Promieniowanie wpadające przez otwór do wnęki ulega w niej wielokrotnym odbiciom, czyli jest niemal w 100% pochłaniane (patrz Rys. 1.). Nasze dalsze rozważania dotyczą promieniowania termicznego ciała doskonale czarnego.



Rys. 1. Wnęka z otworem i wpadające z zewnątrz promieniowanie - model ciała doskonale czarnego.

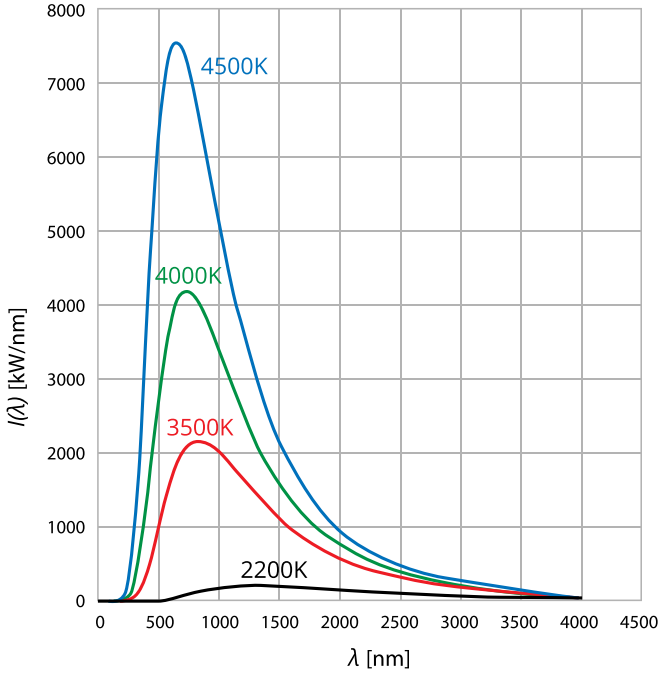
Widmo promieniowania termicznego, czyli zależność jego intensywności od długości fali, jest widmem ciągłym (Rys. 2.). Na osi pionowej zaznaczona jest energia promieniowania przypadająca na przedział długości fali $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$, wyemitowana w jednostce czasu, na osi poziomej długość fali promieniowania λ z zaznaczonym zakresem długości fal światła widzialnego. Promieniowanie termiczne zawiera nie tylko światło widzialne, ale też fale o długościach mniejszych od zakresu światła widzialnego – jest to promieniowanie nadfioletowe – na wykresie to obszar na lewo od światła fioletowego. Z drugiej strony zakresu światła widzialnego, na prawo od światła czerwonego, mamy promieniowanie podczerwone, o długościach fal większych od światła widzialnego.



Rys. 2. Krzywa rozkładu widmowego promieniowania termicznego – zależność natężenia promieniowania od długości fali

Widzimy, że przypadku przedstawionym na Rys. 2., maksymalne natężenie promieniowania przypada na światło o barwie niebieskiej. Znacznie mniej promieniowania wysyłane jest jako światło czerwone i fioletowe. Udział światła o różnych barwach decyduje o tym, jaką barwę świecącego ciała odbierze nasze oko.

Wiemy z doświadczenia, że rozgrzane ciało, na przykład metalowy przedmiot podgrzewany palnikiem, najpierw świeci na czerwono, a w miarę jak temperatura ciała wzrasta, barwa światła zmienia się w pomarańczową, potem w żółtą, a w końcu białą. Spowodowane jest to tym, że wraz ze zmianą temperatury zmienia się dominująca długość fali promieniowania. Popatrz na Rys. 3. Przedstawiono na nim widma promieniowania termicznego wysyłanego przez ciała o różnych temperaturach. W temperaturze 4500 K maksimum promieniowania przypada na zakres długość fali od około 480 nm do 700 nm. To mieszanina wszystkich barw od niebieskiej do czerwonej. Nasze oczy odbierają światło o takim zakresie długości fali jako światło białe. W temperaturze 3500 K maksimum emisji przypadające powyżej 650 nm oznacza, że dominuje barwa czerwona, ale udział innych barw światła powoduje, że światło takiego ciała nadal widzimy jako białe, choć o nieco cieplejszym odcieniu. Natomiast, gdy promieniowanie emitowane jest przez ciało o temperaturze 2200 K, znaczna część jego promieniowania nie jest widoczna dla naszych oczu, bo maksimum intensywności przypada powyżej 1000 nm nanometrów, a zakres widzialny to promieniowanie o długości fali od 400 do 700 nm. Jednak takie ciało emituje dość promieniowania w zakresie widzialnym, abyśmy postrzegali je jako świecące pomarańczowym światłem. Główna część promieniowania stanowi w tym przypadku promieniowanie podczerwone, które przenosi energię cieplną. Gdy zbliżymy się do tak nagrzanego ciała, na przykład kominka, to na skórze odczujemy ciepło spowodowane absorbowaniem promieniowania podczerwonego.



Rys. 3. Krzywe rozkładu widmowego promieniowania termicznego dla różnych temperatur ciała emitującego promieniowanie

Maksimum krzywej rozkładu widmowego promieniowania przesuwa się wraz ze wzrostem temperatury w kierunku mniejszych długości fal. Długość fali odpowiadająca maksimum promieniowania, λ_{max}, jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury bezwzględnej ciała:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T},$$

gdzie $b = 2,898 \cdot 10^{-3}\ K \cdot m$ jest współczynnikiem proporcjonalności. Wzór ten nosi nazwę prawa przesunięć Wiena.

Analiza wykresów na Rys. 3. pozwala na wyciągnięcie jeszcze innego wniosku. Widzimy, że krzywe dla wyższych temperatur leżą coraz wyżej. Oznacza to, że ze wzrostem temperatury ciała, zwiększa się całkowita energia promieniowania. Zależność ta jest bardzo silna. Energia promieniowania jest wprost proporcjonalna do T^4. Zależność energii promieniowania od temperatury, zwana prawem Stefana – Boltzmanna, ma następującą postać:

$$E = \sigma \cdot T^4,$$

gdzie E jest energią wypromieniowaną z jednostkowej powierzchni ciała i w jednostkowym czasie, T – temperaturą w skali Kelvina, a σ jest stałą proporcjonalności, która wynosi: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$.

Znajomość krzywej rozkładu widmowego pozwala na wyznaczenie temperatury odległego obiektu świecącego. Jeżeli wyznaczymy długość fali odpowiadającej maksimum krzywej, λ_{max}, to po przekształceniu wzoru Wiena, otrzymamy wartość temperatury obiektu:

$$T = \frac{b}{\lambda_{max}}.$$

W ten sposób, nie opuszczając Ziemi, wyznacza się temperaturę Słońca oraz innych gwiazd. Okazuje się, że nasze Słońce promieniuje w ten sposób, że krzywa rozkładu widmowego odpowiada temperaturze około 5800 K – jest to przeciętna temperatura powierzchni Słońca.

Jeśli znamy odległość do gwiazdy, możemy z analizy promieniowania termicznego obliczyć jej średnicę. Natężenie promieniowania maleje wraz z odległością, ale znając odległość, można obliczyć całkowitą energię wypromieniowaną z gwiazdy. Wystarczy teraz podzielić całkowitą energię przez energię wypromieniowaną przez jednostkową powierzchnię, otrzymaną z prawa Stefana – Boltzmanna, aby otrzymać powierzchnię tarczy gwiazdy, z której dociera do nas promieniowanie.

Słowniczek

absorbcja

(ang. *absorption*) – pochłanianie.

fale elektromagnetyczne

(ang. *electromagnetic waves*) - rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego.

natężenie promieniowania

(ang. *intensity of radiation*) – energia promieniowania emitowana w czasie 1 sekundy przez 1 m^2 powierzchni ciała.

podczerwień

(ang. *infrared radiation*) – promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fal większych niż dla światła widzialnego.

nadfiolet

(ang. *ultraviolet*) – promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fal mniejszych niż dla światła widzialnego.

Grafika interaktywna

Zależność promieniowania termicznego od temperatury.

Grafika zawiera wykres widma promieniowania termicznego. Zmień suwakiem wartość temperatury i zaobserwuj, jak zmienia się kształt widma (położenie maksimum oraz pole pod wykresem odpowiadające całkowitej energii promieniowania).

Polecenie 1

Odczytaj z wykresu, ile wynosi długość fali promieniowania termicznego, odpowiadająca maksimum wypromieniowanej energii dla ciała o temperaturze 1000 K.

- ◯ 2400 nm
- ◯ 3900 nm
- ◯ 2900 nm
- ◯ 3400 nm

Polecenie 2

Uzupełnij zdanie.

Maksimum to leży [ ].

w zakresie fal widzialnych | w zakresie fal radiowych | w podczerwieni | w nadfiolecie

Polecenie 3

Oblicz, ile będzie wynosiła długość fali λ_{max}, odpowiadającej maksimum wykresu, gdy temperatura zwiększy się do 8000 K, a następnie sprawdź na wykresie, czy twoje obliczenia są prawidłowe. Jak zmienił się zakres promieniowania elektromagnetycznego? Wynik podaj z dokładnością do czterech cyfr znaczących.

λ_{max} = [ ] nm.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

Uzupełnij zdanie:

Ciało doskonale czarne (odbija / pochłania) promieniowanie o wszystkich długościach fal.

Ćwiczenie 2

Uzupełnij zdanie:

Farba niebieska (pochłania / odbija) światło niebieskie, a (pochłania / odbija) światło czerwone.

Ćwiczenie 3

Wybierz prawdziwe stwierdzenie:

- Temperaturę powierzchni odległych gwiazd możemy określić, wykorzystując zależność długość fali odpowiadającej maksimum krzywej widma promieniowania termicznego gwiazdy od temperatury.
- Temperaturę powierzchni odległych gwiazd możemy określić, wykorzystując zależność całkowitej energii promieniowania od temperatury.

Ćwiczenie 4

Długość fali odpowiadającej maksimum wykresu widma promieniowania termicznego w temperaturze 1000 K wynosi λ_1. Jak zmieni się długość fali λ_2, odpowiadającej maksimum wykresu, gdy temperatura zwiększy się do 8000 K.

Odp.: $\lambda_2 = \lambda_1 \cdot$ [ ].

0,2 | 0,125 | 2 | 0,25 | 4 | 8 | 0,5

Ćwiczenie 5

Temperatura ciała zmniejszyła się od T_1 = 9000 K do T_2 = 3000 K. Jak zmieniła się całkowita energia wypromieniowana przez to ciało?

Odp.: Energia [ ] się [ ] razy.

6000 | zmniejszyła | 81 | zwiększyła | 27 | 9 | 3

Ćwiczenie 6

Widmo promieniowania gwiazdy ma maksimum dla długości fali λ_{max} = 420 nm. Oblicz temperaturę jej powierzchni. Współczynnik proporcjonalności we wzorze wyrażającym prawo przesunięć Wiena wynosi $b = 2,898 \cdot 10^{-3}\ K \cdot m$. Wynik podaj z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Odpowiedź: T = [ ] K

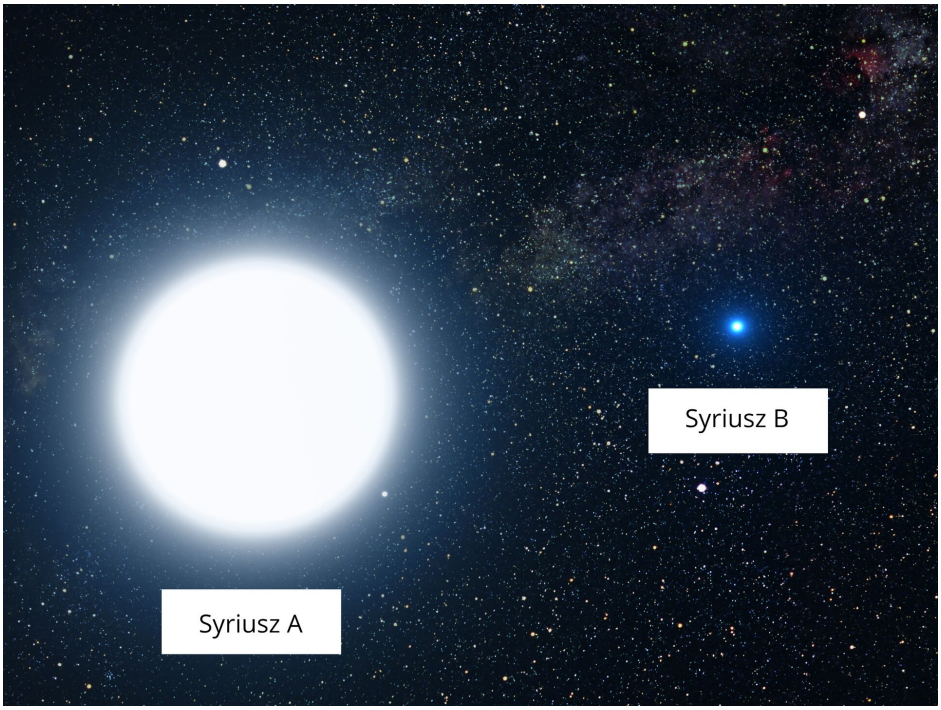
Ćwiczenie 7

Temperatura powierzchni gwiazdy wynosi 10000 K. Całkowita energia, wypromieniowana w czasie 1 sekundy z powierzchni gwiazdy wynosi $E_{całk} = 3,5 \cdot 10^{30}\ W$. Oblicz promień tej gwiazdy z dokładnością do dwóch cyfr znaczących. Współczynnik proporcjonalności we wzorze wyrażającym prawo Stefana – Boltzmanna: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$. Zwróć uwagę, że dociera do nas promieniowanie emitowane z tej części powierzchni gwiazdy, która jest dla nas widoczna.

R = [ ] ·10 [ ] m.

Ćwiczenie 8

Syriusz A jest młodą gwiazdą o promieniu 1,75 razy większym niż promień Słońca i o temperaturze powierzchni 9880 K, a jego towarzysz, Syriusz B, jest białym karłem o promieniu równym 0,0084 promienia Słońca i o temperaturze powierzchni 24800 K. Syriusz A jest najjaśniejszą gwiazdą nieba półkuli południowej, a Syriusz B widoczny jest tylko przez teleskop. Oblicz stosunek całkowitych energii promieniowania obu gwiazd. Wynik podaj z dokładnością do jednej cyfry znaczącej.



Źródło: NASA, ESA and G. Bacon (STScI) / Public domain

$\frac{E_A}{E_B} =$ _____.

Dla nauczyciela

Konspekt (scenariusz) lekcji

Imię i nazwisko autora:	Krystyna Wosińska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Zależność promieniowania termicznego od temperatury**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. **Zakres podstawowy** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 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. X. Fizyka atomowa. Uczeń: 1) analizuje na wybranych przykładach promieniowanie termiczne ciał i jego zależność od temperatury. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 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. XI. Fizyka atomowa. Uczeń: 1) analizuje na wybranych przykładach promieniowanie termiczne ciał i jego zależność od temperatury.
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. określi, czym jest promieniowanie termiczne, 2. wyjaśni przyczynę emisji promieniowania termicznego, 3. wyjaśni, dlaczego ciała mają różne barwy i czym jest ciało doskonale czarne, 4. przeanalizuje zależność kształtu widma promieniowania termicznego od temperatury, 5. poda sposób wyznaczania temperatury odległych gwiazd.
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: **„Co to jest promieniowanie termiczne ciał”, „Widmo promieniowania cieplnego”**
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
- Wprowadzenie zgodnie z treścią w części pierwszej „Czy to nie ciekawe?”. - Odwołanie do wiedzy uczniów o barwach światła widzialnego.	
Faza realizacyjna:	
Nauczyciel w krótkim wykładzie tłumaczy, czym jest promieniowanie termiczne, powiązując jego emisję z ruchem termicznym cząsteczek ciała. Następnie wyjaśnia, że ciało emituje promieniowanie o takich samych długościach fal, jakie absorbuje i wprowadza pojęcie ciała doskonale czarnego. Uczniowie analizują wykresy widma promieniowania dla różnych temperatur i zgłaszają pomysły, na czym polegają różnice między nimi. Nawiązując do tez uczniów, nauczyciel podaje prawo przesunięć Wiena i prawo Stefana – Boltzmanna. Korzystając z tych praw, uczniowie w grupach rozwiązują zadania 7 i 8 z zestawu ćwiczeń.	
Faza podsumowująca:	

Uczniowie korzystając z grafiki interaktywnej, badają zależność promieniowania termicznego od temperatury i w grupach rozwiązują zadanie 4, powiązane z multimedium bazowym. Uczniowie odnoszą się do postawionych sobie celów lekcji, ustalają, które osiągnęli, a które wymagają jeszcze pracy, jakiej i kiedy. W razie potrzeby nauczyciel dostarcza im informację zwrotną kształtującą.	
Praca domowa:	
Zadania z zestawu ćwiczeń, 1 - 3 obowiązkowo, do wyboru 1 pozostałych zadań w celu utrwalenia wiadomości zdobytych na lekcji.	
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.