

Badanie promieniowania termicznego

Natalia Bednarek

2022

Celem doświadczenia było zbadanie zależności mocy promieniowania od temperatury ciała oraz odległości od niego. Użyto w tym celu kostki Lesliego oraz lampy Stefana-Boltzmann. Dopasowywano zależności opisane przez prawo Stefana-Boltzmann. Pomiar mocy wydzielanej na każdej stronie kostki wykonywany był przez użycie detektora promieniowania termicznego. Posłużono się nim również do badania lampy. Temperaturę jej żarnika wyznaczono z zależności jej oporu od temperatury. Wszystkie modelowane zależności pasowały do zmierzonych danych.

1 Wstęp teoretyczny

Celem ćwiczenia jest zbadanie zależności promieniowania termicznego od temperatury ciała, jego rodzaju oraz odległości od niego. Promieniowanie termiczne jest sposobem przekazywania ciepła przez obiekt.

Związek pomiędzy całkowitą mocą wypromieniowywaną przez ciało a jego temperaturą opisuje prawo Stefana - Boltzmana wyrażone poprzez równanie (1):

$$J(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

$$J = \frac{P}{S} \quad (2)$$

J - strumień mocy wypromieniowywanej przez ciało, σ - stała Stefana - Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$), T - temperatura, P - moc promieniowania, S - powierzchnia, przez którą przechodzi strumień promieniowania.

Ciało doskonale czarne jest to ciało, którego współczynnik absorpcji wynosi 1, oznacza to, że całe promieniowanie padające na ciało jest przez nie pochłaniane. Jest ono również odnośnikiem dla względnej zdolności emisyjnej innych ciał opisanej wzorem (2):

$$\epsilon = \frac{J}{J'} \quad (3)$$

ϵ - względna zdolność emisyjna ciała, J - strumień mocy wypromieniowywanej przez badane ciało, J' - strumień mocy wypromieniowywany przez ciało doskonale czarne.

Dla ciał innych niż ciało doskonale czarne strumień mocy promieniowania źródła o danej temperaturze w zależności od odległości od niego wyraża się wzorem:

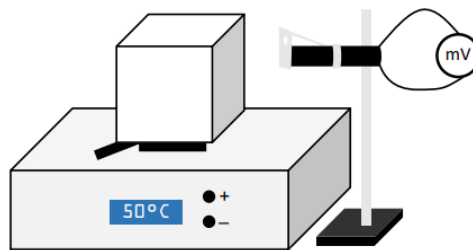
$$J = \frac{AS\sigma(T^4 - T_{ot}^4)}{4\pi r^2} \quad (4)$$

A - współczynnik absorpcji ciała, S - pole powierzchni ciała, T_{ot} - temperatura otoczenia, r - odległość od ciała.

Jest to zależność modelowa, do której dopasowywane będą dane z pomiarów.

2 Układ doświadczalny

W celu znalezienia zależności promieniowania termicznego od rodzaju powierzchni i temperatury użyto kostki Lesliego oraz detektora promieniowania termicznego. Detektor generuje napięcie proporcjonalne do mocy promieniowania padającej na niego. Zbudowano układ przedstawiony na rys. 1:

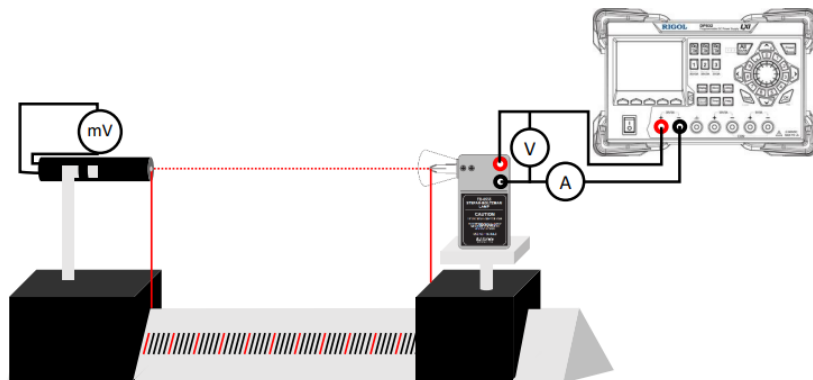


Rysunek 1: Układ pomiarowy wykorzystany do znalezienia zależności promieniowania termicznego od rodzaju powierzchni i temperatury. [1]

Układ składał się z kostki Lesliego oraz detektora promieniowania termicznego podłączonego do miernika uniwersalnego. Detektor był umieszczony jak najbliżej kostki, ale można było nią swobodnie obracać. Między pomiarami zasłanianio detektor osłoną z pianki styropianowej.

Zaczęto od zmierzenia promieniowania nienagrzanej kostki, czyli temperatury tła. Następne pomiary wykonywano poprzez ustawianie na kostce odpowiedniej temperatury od 50°C do 120°C. Zmieniało ją co 10°C. Kiedy kostka nagrzała się mierzono promieniowanie na każdej ze ścian. W kolejnym etapie pomiarów wykorzystano lampę Stefana - Boltzmanna do zmierzenia promieniowania termicznego w zależności od temperatury oraz odległości. Użyto układu przedstawionego na rys. 2:

Układ składał się z detektora promieniowania termicznego połączanego do miernika uniwersalnego oraz lampy Stefana - Boltzmanna podłączonej do zasilacza. Lampa umieszczona była na tej samej wysokości co detektor, odległość między nimi mierzona za pomocą miarki na szynie, na której umieszczony jest cały układ. Między pomiarami zasłanianio detektor osłoną z pianki styropianowej.

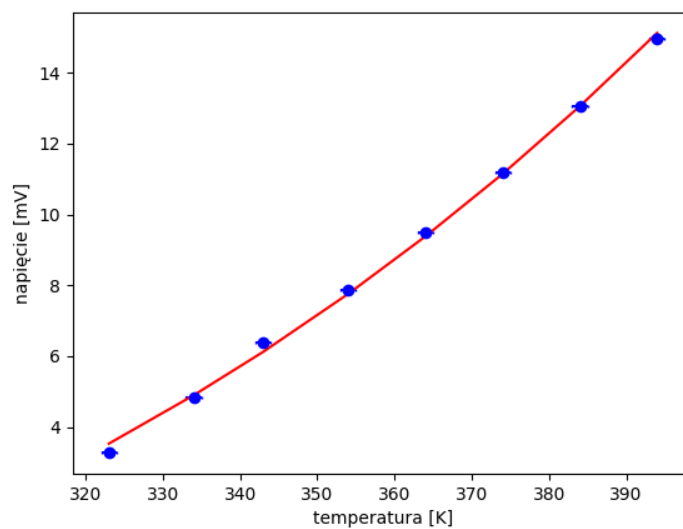


Rysunek 2: Układ pomiarowy wykorzystany do znalezienia zależności promieniowania termicznego od temperatury i odległości. [1]

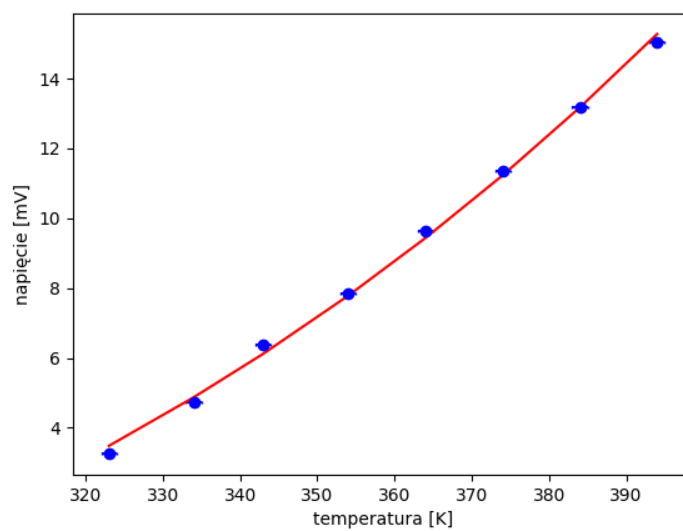
Zaczęto od dokonania pomiarów tła, w tym celu zmierzona promieniowanie termiczne w różnych odległościach od lampy. Następnie na zasilaczu ustawiano dane napięcia zasilające od 0,5V do 10V co około 0,5V. Mierzono odpowiadające natężenie i promieniowanie termiczne. Dla rozgrzanej żarówki przy napięciu 10V zmieniano odległość detektora od lampy od 6cm do 76cm co 5cm i mierzono promieniowanie.

3 Analiza wyników pomiaru

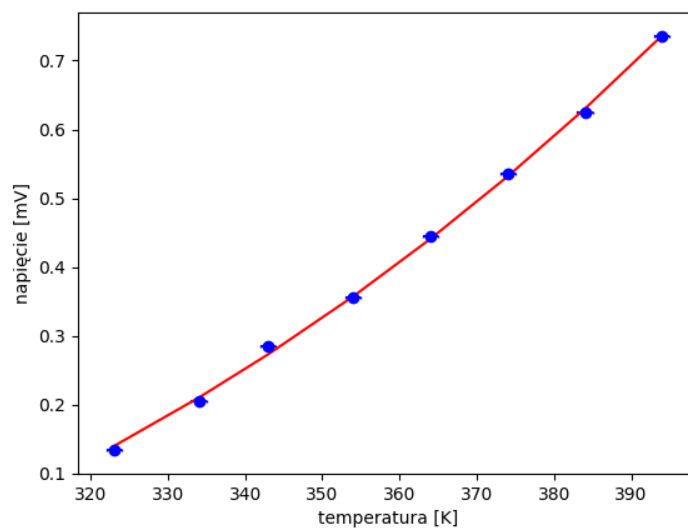
Wyniki pomiarów napięcia na detektorze w zależności od powierzchni i temperatury przedstawiono w sekcji Suplement w tabeli [2]. Dopasowano je do zależności (4), co przedstawiono na wykresach na rysunkach 3, 4, 5, 6. Za niepewność pomiaru temperatury uznano $u(T) = 1^{\circ}\text{C}$, a za niepewność napięcia uznano dokładność miernika czyli $u(U) = 0,01\text{mV}$. Zanim podstawiono dane do wykresu od wszystkich wyników odjęto zmierzone promieniowanie tła.



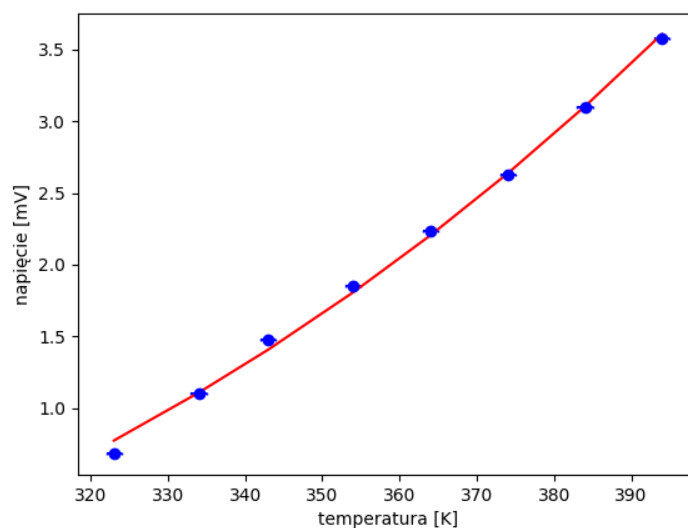
Rysunek 3: Wykres zależności napięcia zmierzonego na detektorze w zależności od temperatury kostki Lesliego dla powierzchni czarnej. Niebieskimi kropkami zaznaczono wyniki pomiarów, a czerwoną linią dopasowaną funkcję.



Rysunek 4: Wykres zależności napięcia zmierzonego na detektorze w zależności od temperatury kostki Lesliego dla powierzchni białej. Niebieskimi kropkami zaznaczono wyniki pomiarów, a czerwoną linią dopasowaną funkcję.



Rysunek 5: Wykres zależności napięcia zmierzonego na detektorze w zależności od temperatury kostki Lesliego dla powierzchni lustrzanej. Niebieskimi kropkami zaznaczono wyniki pomiarów, a czerwoną linią dopasowaną funkcję.



Rysunek 6: Wykres zależności napięcia zmierzonego na detektorze w zależności od temperatury kostki Lesliego dla powierzchni matowej. Niebieskimi kropkami zaznaczono wyniki pomiarów, a czerwoną linią dopasowaną funkcję.

Tabela 1: Tabela przedstawia wartość obliczonych współczynników a dla poszczególnych powierzchni kostki.

rodzaj powierzchni	współczynnik a
czarna	$8.800 \cdot 10^{-10} \pm 0.150 \cdot 10^{-10}$
biała	$8.900 \cdot 10^{-10} \pm 0.170 \cdot 10^{-10}$
lustrzana	$0.450 \cdot 10^{-10} \pm 0.005 \cdot 10^{-10}$
matowa	$2.100 \cdot 10^{-10} \pm 0.043 \cdot 10^{-10}$

Dopasowane współczynniki funkcji $y = ax^4 + b$ przedstawiono w tabeli [1]. Zakładając, że współczynnik absorpcji dla powierzchni czarnej wynosi $A_{cz} = 0.95$ można wyznaczyć współczynniki absorpcji reszty powierzchni $A_{biel} = 0.9600 \pm 0.0200$, $A_{lus} = 0.0500 \pm 0.0005$, $A_{mat} = 0.2300 \pm 0.0050$. Dodatkowo zmierzono promieniowanie przechodzące przez szklaną płytkę. Wynik, przedstawiony w tabeli [2], może w granicy błędu być zaokrąglony do zera. Wynika to z faktu, że szkło pochłania promieniowanie podczerwone.

Kolejnym elementem była zależność napięcie żarówki Stefana-Boltzmannia od jej temperatury. Pomiary tej części przedstawiono w tabeli [4]. Od wyników odjęto promieniowanie tła, które mierzono, w różnych odległościach od żarówki. Wyniki przedstawiono w tabeli [3]. Na podstawie napięcia na żarówce i natężenia płynącego przez nią obliczono opór żarówki, a następnie jej temperaturę zgodnie ze wzorem z instrukcji [1]:

$$T = \frac{R - R_{ref}}{\alpha R_{ref}} + T_{ref} \quad (5)$$

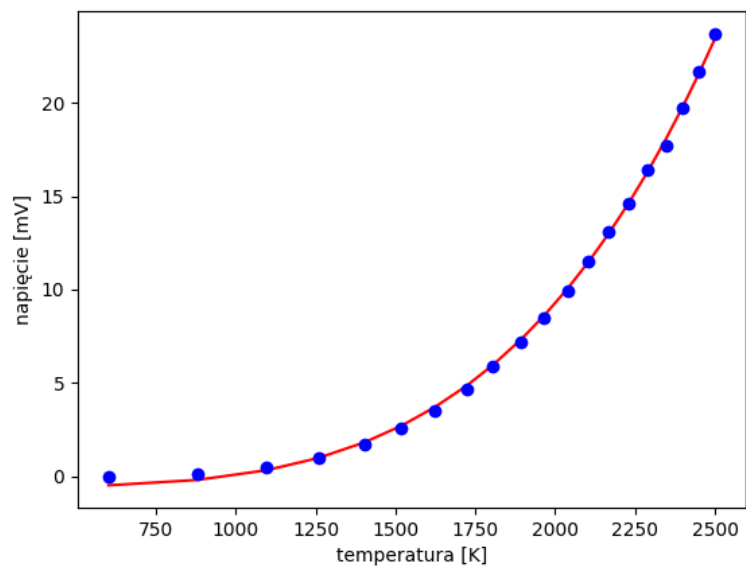
gdzie T - temperatura żarnika, $T_{ref} = 300K$, R - opór żarówki, $R_{ref} = 0.277\Omega$, $\alpha = 0.00407 \cdot \left(\frac{R}{R_{ref}}\right)^{0.11778}$.

Dopasowywano zależność $y = ax^4 + b$. Za niepewność wyznaczenia temperatury uznano $u(T) = 1K$. Wynik dopasowania przedstawiono na rys. (7).

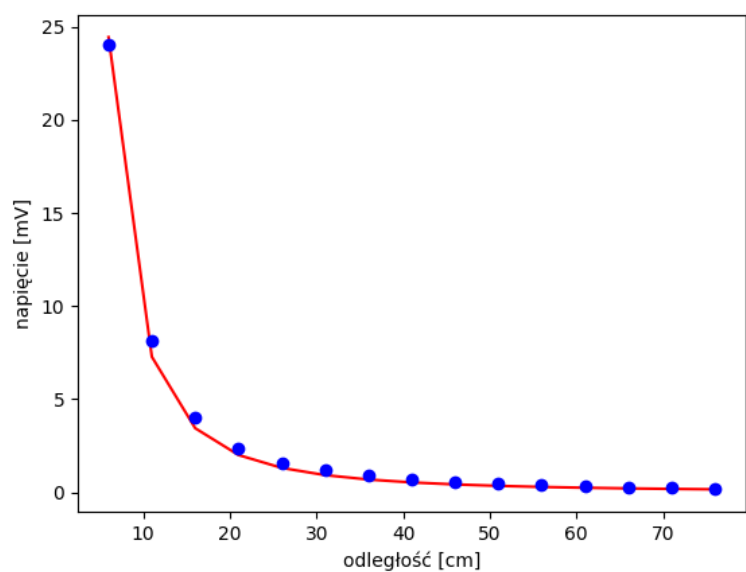
Jak widać prosta dobrze pasuje do danych. Wyznaczone współczynniki wynoszą $a = 6.00 \cdot 10^{-13} \pm 0.04 \cdot 10^{-13}$, $b = 0.60 \pm 0.08$.

Następnie Wykonano pomiary napięcia na detektorze w zależności od odległości od żarówki Stefana-Boltzmannia. Pomiary tej części przedstawiono w tabeli [5]. Za niepewność pomiaru odległości uznano dokładność podziałki $u(s) = 0.1cm$. Ponieważ pomiaru wykonywano trzykrotnie niepewność zmniejszyła się do $u(s) = 0.06cm$ Zgodnie ze wzorem (4) dopasowuję funkcję $y = \frac{a}{x^2}$. Wynik dopasowania przedstawiono na rys. (8).

Jak widać prosta dobrze pasuje do danych. Współczynnik dopasowania wynosi $a = 880 \pm 12$. Zmierzono również jak pomiar zmienia się kiedy pomiędzy żarówkę a detektor wprowadzimy płytkę szklaną. Jak widać w tabeli [5] szkło nie wpływa na pomiary aż tak jak poprzednio. Wynika to z tego, że szkło pochłania promieniowanie podczerwone dużo bardziej niż widzialne. Dodatkowo sama żarówka wykonana jest ze szkła.



Rysunek 7: Wykres zależności napięcia zmierzonego na detektorze w zależności od temperatury, do jakiej nagrzała się żarówka. Niebieskimi kropkami zaznaczono wyniki pomiarów, a czerwoną linią dopasowaną funkcję.



Rysunek 8: Wykres zależności napięcia zmierzonego na detektorze w zależności od odległości od żarówki. Niebieskimi kropkami zaznaczono wyniki pomiarów, a czerwoną linią dopasowaną funkcję.

4 Podsumowanie

Modelowane zależności wykazały, że promieniowanie ciał zależy od temperatury w czwartej potęgze. Dopasowywane funkcje zgadzały się zarówno dla wszystkich rodzajów badanych ciał jak i dla żarówki Stefana-Boltzmann. Dodatkowo udało się potwierdzić zależność mocy promieniowania od odległości od ciała zgodnie z tym samym wzorem.

Niepewności otrzymanych wyników wynikają głównie z błędu eksperymentatora oraz niedokładności przyrządów pomiarowych.

Literatura

- [1] Badanie promieniowania termicznego A. Drabińska, lipiec 2021 r.
- [2] Dokumentacja języka Python - <https://docs.python.org/pl/3.8/tutorial/index.html>(20.03.2022)
- [3] Dokumentacja biblioteki Matplotlib - <https://matplotlib.org/>(20.03.2022)

5 Suplement

Tabela 2: Tabela przedstawia wartość napięcia wytwarzanego na detektorze w zależności od temperatury kostki i rodzaju powierzchni mierzonej. Ostatni pomiar dokonano dla powierzchni czarnej przez szklaną płytkę.

temperatura [$^{\circ}C$]	Biała [mV]	Czarna [mV]	Lustrzana [mV]	Matowa [mV]
tło	0,04	0,03	0,01	0,02
50	3,28	3,30	0,16	0,71
61	4,74	4,85	0,23	1,13
70	6,39	6,40	0,31	1,50
81	7,88	7,88	0,38	1,88
91	9,65	9,53	0,47	2,26
101	11,38	11,20	0,56	2,65
111	13,20	13,09	0,65	3,12
121	15,06	14,97	0,76	3,60
121 + szkło	-	-0.01	-	-

Tabela 3: Tabela przedstawia wartość napięcia wytwarzanego na detektorze w zależności od odległości od nie-nagrzanej żarówki.

L [cm]	U [mV]
6	-0,05
16	-0,08
26	-0,06
36	0,00
46	0,06
56	0,14
66	0,10
76	0,09

Tabela 4: Tabela przedstawia wartość napięcia wytwarzanego na detektorze w zależności od napięcia i natężenia na żarówce wraz z obliczoną temperaturą żarówki.

U [V]	I [A]	T [K]	U [mV]
0,51	0,78	602,11	-0,01
1,01	0,97	879,99	0,13
1,51	1,11	1096,70	0,47
2,01	1,25	1259,72	1,00
2,51	1,37	1404,21	1,70
3,00	1,49	1519,32	2,56
3,51	1,61	1623,92	3,52
4,00	1,71	1722,72	4,67
4,50	1,82	1804,86	5,90
5,00	1,91	1893,68	7,17
5,50	2,01	1965,66	8,50
6,00	2,10	2038,62	9,93
6,50	2,19	2105,23	11,51
7,00	2,28	2166,30	13,10
7,50	2,36	2230,46	14,66
8,00	2,44	2290,16	16,41
8,50	2,52	2345,85	17,77
9,00	2,60	2397,94	19,77
9,50	2,68	2446,76	21,73
10,00	2,75	2500,30	23,76

Tabela 5: Tabela przedstawia wartość napięcia wytwarzanego na detektorze w zależności od odległości od żarówki. Wykonano trzy serie pomiarowe. Dwukrotnie badano promieniowanie przechodzące przez szklaną płytkę.

s [cm]	U [mV]	U [mV]	U [mV]
6	23,93	24,10	24,12
6 + szkło	17,00	17,50	-
11	8,23	8,22	8,13
16	3,98	4,06	4,04
21	2,37	2,42	2,42
26	1,60	1,62	1,62
31	1,16	1,23	1,19
36	0,90	0,87	0,92
41	0,69	0,69	0,74
46	0,60	0,56	0,60
51	0,53	0,45	0,51
56	0,44	0,41	0,38
61	0,37	0,33	0,36
66	0,30	0,27	0,31
71	0,27	0,26	0,27
76	0,26	0,19	0,24