

### III OLIMPIADA FIZYCZNA (1953/1954). Stopień III, zadanie doświadczalne – D

**Źródło:** Komitet Główny Olimpiady Fizycznej;  
Stefan Czarnecki: *Olimpiady fizyczne I – IV*. PZWS, Warszawa 1956  
(str. 200 – 206)

**Nazwa zadania:** Badanie zależności oświetlenia światła od odległości oraz natężenia światła od grubości warstwy pochłaniającej

**Działy:** Optyka, fotometria

**Słowa kluczowe:** światło, wiązka, natężenie, oświetlenie, wzór Lamberta, prawo Lamberta-Beera, pochłanianie, absorpcja, osłabienie, przezroczystość, transmisja, prąd elektryczny, fotoprąd, celofan, fotoogniwo, źródło, doświadczenie, pomiar, grubość

#### Zadanie 4, doświadczalne – D, zawody III stopnia, III OF

Dane są: fotoogniwo, źródło światła (żarówka elektryczna), przyrząd do pomiaru natężenia prądu, linijka z podziałką centymetrową.

1. Wiedząc, że natężenie prądu fotoelektrycznego jest proporcjonalne do oświetlenia zbadaj, czy zależność pomiędzy oświetleniem a odległością od źródła światła, w warunkach przeprowadzanego doświadczenia, zgadza się z prawem odwrotnych kwadratów. Jeżeli stwierdzisz odstępstwa, postaraj się je wyjaśnić. Otrzymane wyniki przedstaw graficznie.
2. Umieszczając na drodze wiązki świetlnej warstwy celofanu różnej grubości zbadaj zależność natężenia światła przepuszczonego od grubości warstwy pochłaniającej. Znajdź proste związki arytmetyczne pomiędzy natężeniami światła przepuszczonego przez warstwy różnej grubości. Otrzymane wyniki przedstaw graficznie<sup>1</sup>.

#### Rozwiązanie:

1. Zgodnie ze znanym prawem fotometrii oświetlenie powierzchni przez źródło punktowe jest wprost proporcjonalne do natężenia źródła światła, a odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości. Pierwsza część zadania polegała na sprawdzeniu, w jakim stopniu prawo to jest prawdziwe w warunkach przeprowadzanego doświadczenia.

Doświadczenie polega na pomiarze natężenia fotoprądu przy rozmaitych odległościach warstwy światłoczułej od źródła światła (źródłem była żarówka samochodowa). Zgodnie z wyjaśnieniem w tekście zadania wskazania  $i$  przyrządu pomiarowego są proporcjonalne do oświetlenia  $E$ . Możemy więc napisać

$$i = \frac{A}{r^2} \quad (1)$$

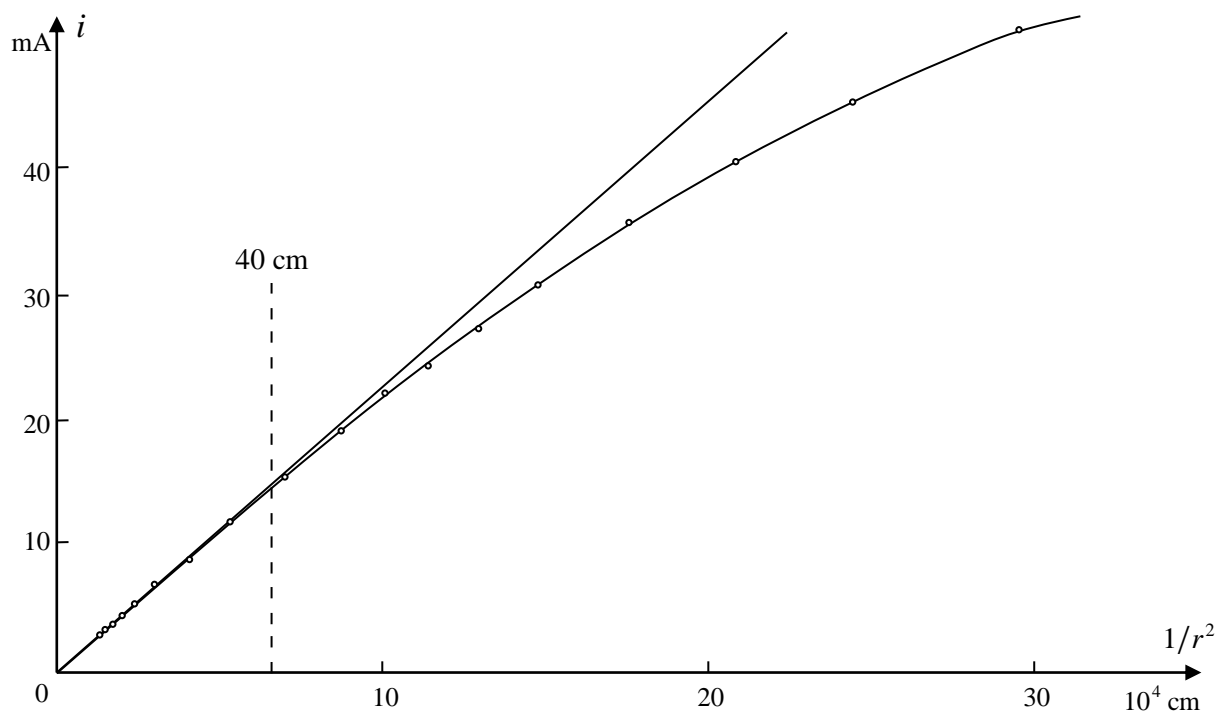
gdzie  $i$  jest prądem fotoelektrycznym,  $r$  – odległością włókna żarówki od warstwy światłoczułej fotoogniwa,  $A$  – stałym współczynnikiem.

Dla sprawdzenia prawa odwrotnych kwadratów najlepiej jest opierając się na wynikach pomiarów  $i$  oraz  $r$  wykonać wykres w taki sposób, by otrzymać linię prostą. Można np. odkładać na osi rzędnych fotoprąd  $i$ , a na osi odciętych  $1/r^2$ .

Systematyczne odchylenia od linii prostej (nie licząc oczywiście przypadkowego rozrzutu punktów pomiarowych) wskażą odstępstwa od prawa odwrotnych kwadratów.

Poniżej tabelka (Tabela 1) i sporządzony na jej podstawie wykres (rys. 1) uzyskane przez jednego z zawodników.

<sup>1)</sup> Wykonanie zadania poprzedzone było krótką pogadanką, w której omówiono między innymi zagadnienie sporządzania wykresów w różnego rodzaju układach współrzędnych.



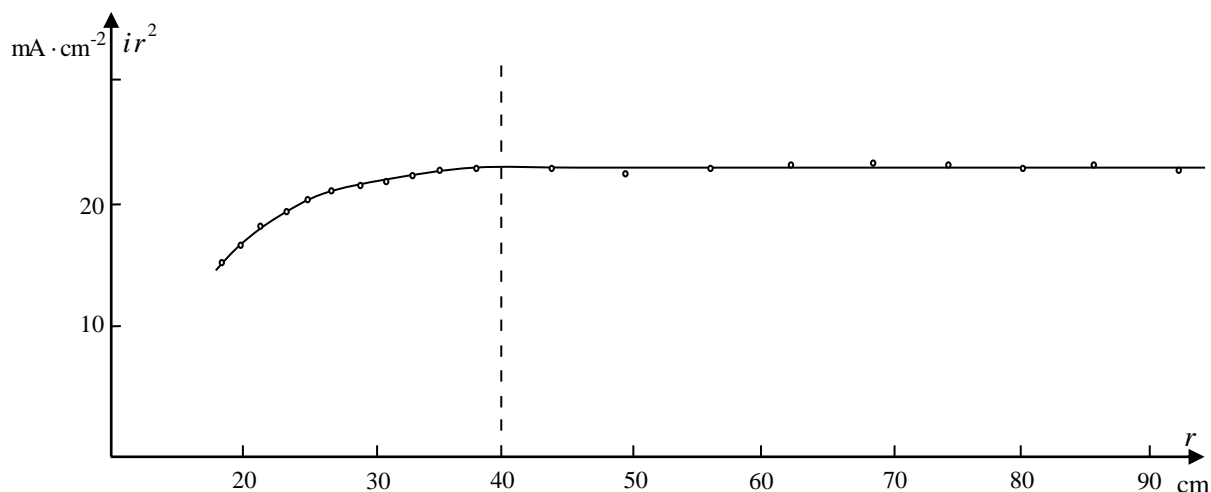
Rys. 1

Tabela 1

| $r$ | $1/r^2$                     | $i$  | $ir^2$                     |
|-----|-----------------------------|------|----------------------------|
| cm  | $10^4 \cdot \text{cm}^{-2}$ | mA   | mA $\cdot$ cm <sup>2</sup> |
| 18  | 30,9                        | 49,0 | 15,9                       |
| 20  | 25,0                        | 43,0 | 17,2                       |
| 22  | 20,7                        | 38,0 | 18,4                       |
| 24  | 17,3                        | 32,5 | 18,7                       |
| 26  | 14,8                        | 29,0 | 19,6                       |
| 28  | 12,8                        | 25,5 | 20,0                       |
| 30  | 11,1                        | 22,4 | 20,2                       |
| 32  | 9,8                         | 20,5 | 21,0                       |
| 34  | 8,6                         | 18,5 | 21,4                       |
| 38  | 6,9                         | 15,2 | 22,0                       |
| 44  | 5,2                         | 11,5 | 22,7                       |
| 50  | 4,0                         | 8,7  | 21,8                       |
| 56  | 3,1                         | 7,2  | 22,6                       |
| 62  | 2,6                         | 6,0  | 23,0                       |
| 68  | 2,2                         | 5,0  | 23,1                       |
| 74  | 1,8                         | 4,2  | 23,0                       |
| 80  | 1,6                         | 3,5  | 22,4                       |
| 86  | 1,3                         | 3,1  | 22,9                       |
| 94  | 1,1                         | 2,5  | 22,1                       |

Z wykresu widać, że prawo odwrotnych kwadratów jest dobrze zachowane dla  $r$  większego od około 40 cm. Poniżej tej odległości występuje wyraźne odchylenie.

W celu sprawdzenia prawa odwrotnych kwadratów można postąpić również inaczej. Zauważmy mianowicie, że iloczyn  $ir^2$  według prawa odwrotnych kwadratów powinien mieć wartość stałą. Wykonajmy zatem wykres zależności  $ir^2$  od  $r$  (rys. 2). Gdyby prawo odwrotnych kwadratów było spełnione, wykres ten miałby postać linii prostej równoległej do osi odciętych. Jak widać, mamy i tutaj (rys. 2) wyraźne odstępstwo dla  $r < 40$  cm.



Rys. 2

Przyczyną tego jest fakt, że dla  $r$  mniejszego od 40 cm nie można uważać żarówki samochodowej za źródło punktowe. Inną przyczyną jest milczące założenie, że na powierzchni światłoczułą promienie świetlne padają normalnie. Założenie takie jest usprawiedliwione tylko przy dostatecznie dużej odległości od źródła w porównaniu z wymiarami fotoogniwa. Dla małych wartości  $r$  kąt padania promieni na warstwę fotoczułą dalej od jej środka odbiega dość znacznie od  $0^\circ$ .

2. Dla wykonania drugiej części zadania doświadczalnego zawodnicy otrzymali jednakowej grubości arkusiki o wymiarach 8 cm × 10 cm zabarwionego na żółto celofanu oraz umieszczoną na statywie ramkę z dwiema szybkami szklanymi. Pomiedzy szybkami można było umieszczać rozmaite ilości celofanów.

Ramkę należało umieścić pomiędzy żarówką a fotoogniwem prostopadle do biegnącej wiązki światła a następnie zmieniając liczbę celofanów pomiędzy szybkami mierzyć natężenia prądu fotoelektrycznego.

Przy starannym przeprowadzeniu doświadczenia stwierdzić można, że każdy arkusik osłabia wiązkę przezeń przechodzącą w tym samym stosunku – Tabela 2.

Tabela 2

|                             |      |      |      |      |      |   |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|---|
| Ilość arkusików             | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6 |
| Natężenia fotoprądu, mA     | 31   | 21   | 14,5 | 10   | 7    | 5 |
| Stosunek sąsiednich natężeń | 1,48 | 1,45 | 1,45 | 1,43 | 1,40 |   |

Ponieważ stosunki sąsiednich natężeń można w granicach niepewności pomiarowych uważać za stałe, zatem

$$\frac{I_n}{I_{n+1}} = \text{const}, \quad (2)$$

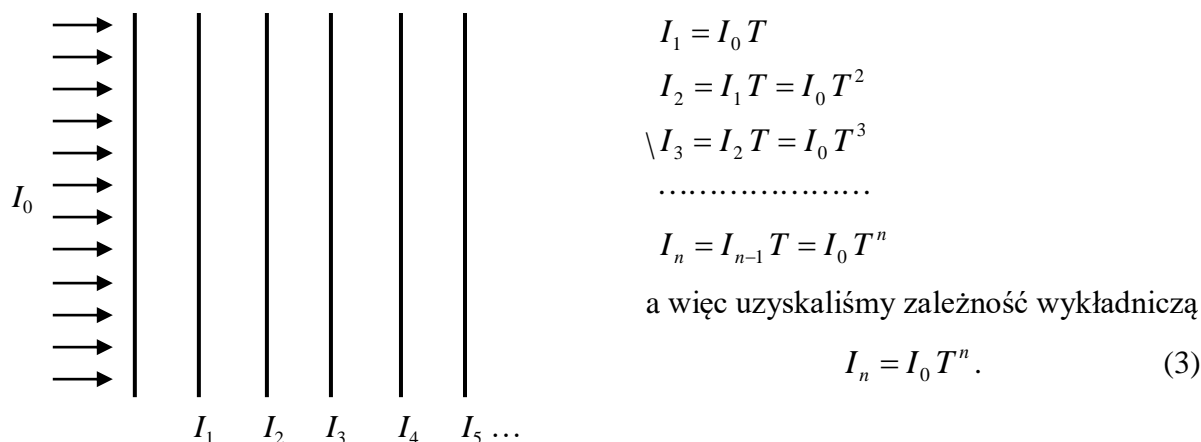
gdzie  $I_n$  oznacza natężenie wiązki światła po przejściu  $n$  warstw celofanu.

Wyobraźmy sobie wiązkę światła o natężeniu  $I_0$  padającą na szereg jednakowej grubości warstw substancji pochłaniającej, np. na arkusiki celofanu, jak to ma miejsce w naszym przy-

padku (rys. 3). Obserwacja daje

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_3}{I_2} = \dots = \frac{I_{n+1}}{I_n} = T,$$

gdzie  $T$  oznacza stałą liczbę i nosi nazwę przezroczystości lub transmisji. Mamy stąd:



Rys. 3

Natężenie promieniowania przepuszczonego zmienia się więc w stosunku geometrycznym, gdy grubość warstwy pochłaniającej rośnie w stosunku arytmetycznym.

Jeżeli grubość jednego celofanu uważać będziemy za grubość jednostkową, to zamiast o liczbie warstw  $n$  możemy mówić o grubości warstwy pochłaniającej  $l$ . Wtedy znalezioną wartość możemy przedstawić jako

$$I = I_0 T^l. \quad (3')$$

Widać stąd, że wyniki obserwacji możemy przedstawić w sposób dogodny za pomocą linii prostej. Istotnie, przekształcając i logarytmując

$$\log \frac{I}{I_0} = l \log T$$

otrzymujemy zależność liniową  $\log \frac{I}{I_0}$  od  $l$  (rys. 4).

Otrzymane prawo pochłaniania, które nosi nazwę prawa Lamberta-Beera przedstawia się zazwyczaj w innej formie, a mianowicie za pomocą funkcji wykładniczej o podstawie  $e$  ( $e \approx 2,718$  – podstawa logarytmów naturalnych). Poszukajmy do jakiej potęgi należy podnieść  $e$ , by otrzymać  $T^l$ . W tym celu napiszmy

$$e^x = T^l.$$

Biorąc logarytmy naturalne obu stron znajdziemy łatwo

$$x = l \ln T.$$

Wzór (3') przyjmie zatem postać

$$I = I_0 e^{l \ln T}. \quad (3'')$$

Zamiast jednostkowej przezroczystości  $T$  częściej się mówi o pochłanianiu (absorbpcja) przez jednakową grubość warstwy pochłaniającej  $a$ , przy czym

$$a = \frac{1}{T}. \quad (4)$$

Prawo możemy wyrazić zatem nieco inaczej

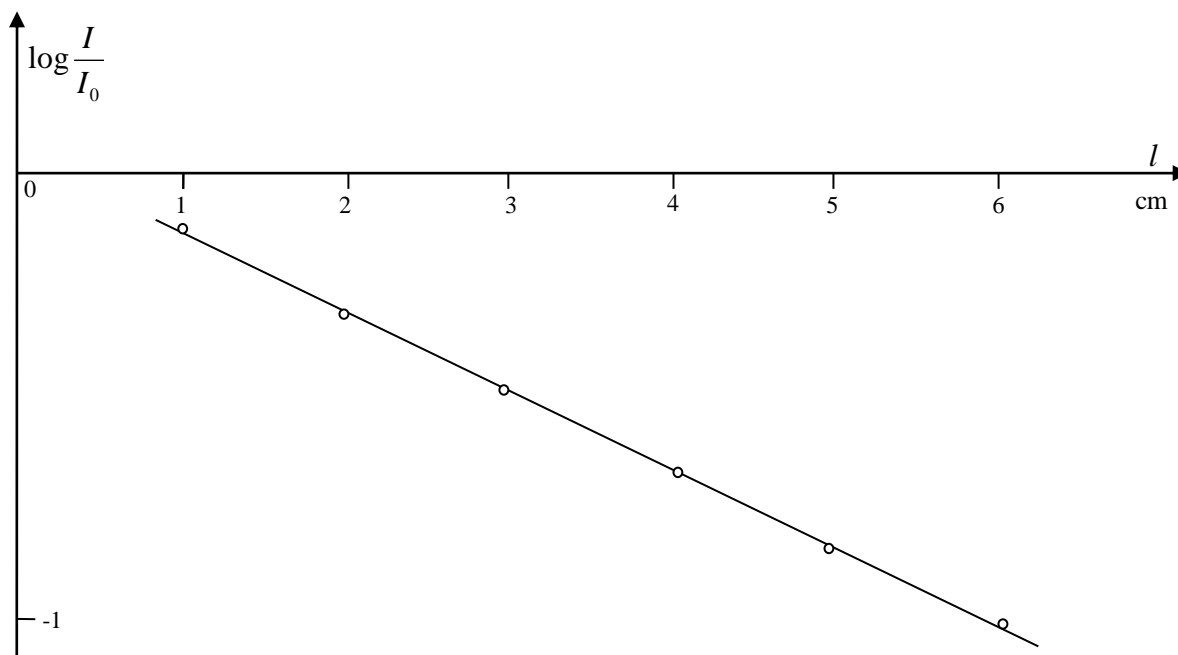
$$I = I_0 e^{\left(\ln \frac{1}{a}\right)l}$$

czyli

$$I = I_0 e^{-(\ln a)l}.$$

Wyrażenie w wykładniku potęgi  $\ln a$  nosi właśnie nazwę współczynnika absorpcji  $k$ . Ostatecznie prawo Lamberta-Beera możemy wyrazić wzorem

$$I = I_0 e^{-kl}. \quad (5)$$



Rys. 4

Najtrudniejszym dla zawodników okazało się dostrzeżenie, że stosunek natężeń  $I_n/I_{n+1}$  jest wielkością stałą. Powodem tego były dość znaczne odchylenia pomiarów powstałe z czterech zasadniczych przyczyn. Pierwszą z nich była prawdopodobnie nie zupełnie identyczna grubość poszczególnych arkusików celofanu, a drugą – nierównomierność rozłożenia barwnika. Te dwie przyczyny jednak mogły dać tylko przypadkowy rozrzut wyników, tymczasem we wszystkich pracach występowały odchylenia systematyczne polegające na tym, że stosunek natężeń  $I_n/I_{n+1}$  wyraźnie malał ze wzrostem liczby celofanów. Widać to z przytoczonej tabelki. Przyczyną tego jest fakt, że na powierzchni każdego arkusika (jak i na szybach) światło ulega częściowemu odbiciu, przy czym mogą występować nawet odbicia wielokrotne. Wysoce prawdopodobne jest również rozpraszanie światła na tych powierzchniach oraz absorpcja samych szybek szklanych.

Z tych względów większość zawodników nie dostrzegła właściwej regularności a doszukiwała się zależności bardziej skomplikowanej. Niektórzy z nich znaleźli różne wzory empiryczne przedstawiające, w większym lub mniejszym stopniu dokładnie, pozorną, zniekształconą przez wpływy uboczne, zależność natężenia wiązki światła od ilości arkusików celofanu.

*Zadanie to uzyskało średnią 3,2 punktu. Najlepszą ocenę uzyskał jedyny zawodnik lubelski (5 punktów); średnia okręgu krakowskiego wynosiła 7 punktów a warszawskiego – 3 punkty.*