

## 36 - EFEKT FOTOELEKTRYCZNY ZEWNĘTRZNY

### Instrukcja do ćwiczeń wirtualnych w Laboratorium Fizyki I - teren południowy

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie stałej Plancka, pracy wyjścia z metalu oraz stwierdzenie, czy zależność napięcia hamowania od częstotliwości światła jest liniowa (czy spełnione jest równanie Einsteina).

### 1. PODSTAWY FIZYCZNE

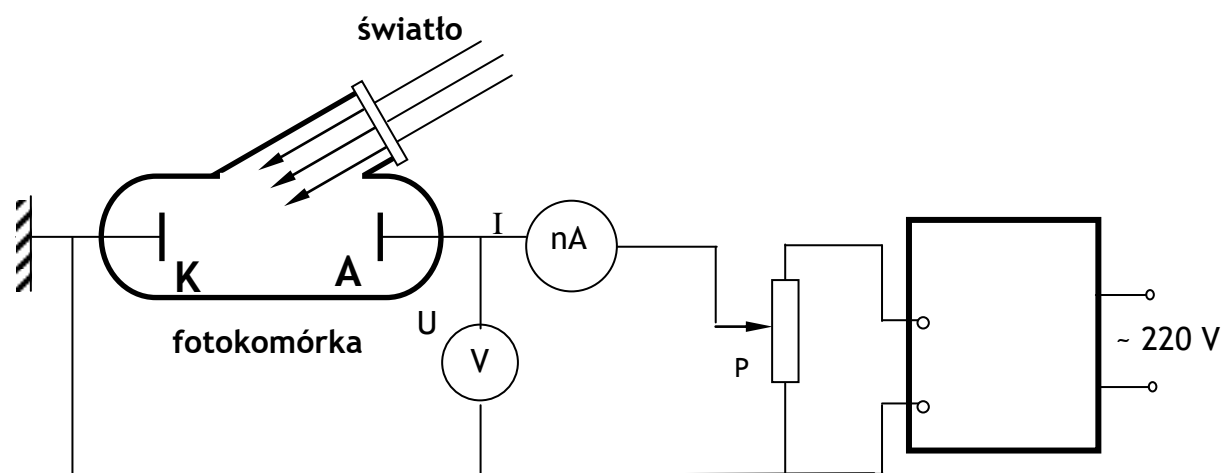
Efekt fotoelektryczny zewnętrzny jest jednym ze sposobów oddziaływania fali elektromagnetycznej, a więc i światła z materią. Zjawisko to polega na wybiciu elektronów z powierzchni metalu przez padającą wiązkę światła o odpowiedniej częstotliwości. Badanie tego zjawiska odegrało wielką rolę w procesie poznawania praw fizyki rządzących mikroświatem i znacznie przyczyniło się do powstania na początku XX w. fizyki kwantowej.

W 1887 r. H.G. Hertz, a w 1899 r. P. Leonard jako pierwsi wykazali, że promieniowanie świetlne powoduje emisję elektronów z metali i od tej pory zjawisko to - zwane później efektem fotoelektrycznym zewnętrznym - było szczegółowo badane nie tylko z powodu zastosowań, ale głównie z uwagi na jego cechy, których nie można było wytłumaczyć na gruncie fizyki klasycznej. Próby wyjaśnienia tego zjawiska wymagały zrewidowania poglądów na naturę światła traktowanego wyłącznie jako fala elektromagnetyczna.

#### 1.1 Opis zjawiska fotoelektrycznego

Jeden z prostszych sposobów badania zjawiska fotoelektrycznego opiera się na wykorzystaniu fotokomórki, czyli próżniowej bańki szklanej z dwoma elektrodami. Jedna z elektrod jest cienką warstwą metalu zwana czasami fotokatodą, natomiast druga elektroda zwana elektrodą zbierającą, lub anoda może mieć kształt cienkiego pierścienia z drutu.

Schemat układu pomiarowego do badania efektu fotoelektrycznego przedstawiony jest na rysunku 1.



**Rys. 1 Schemat układu pomiarowego do badania efektu fotoelektrycznego gdzie:**  
**K** - katoda, **A** - anoda, **P** - potencjometr, **U** - napięcie mierzone woltomierzem **V**,  
**I** - natężenie prądu mierzone nanoamperomierzem **nA**.

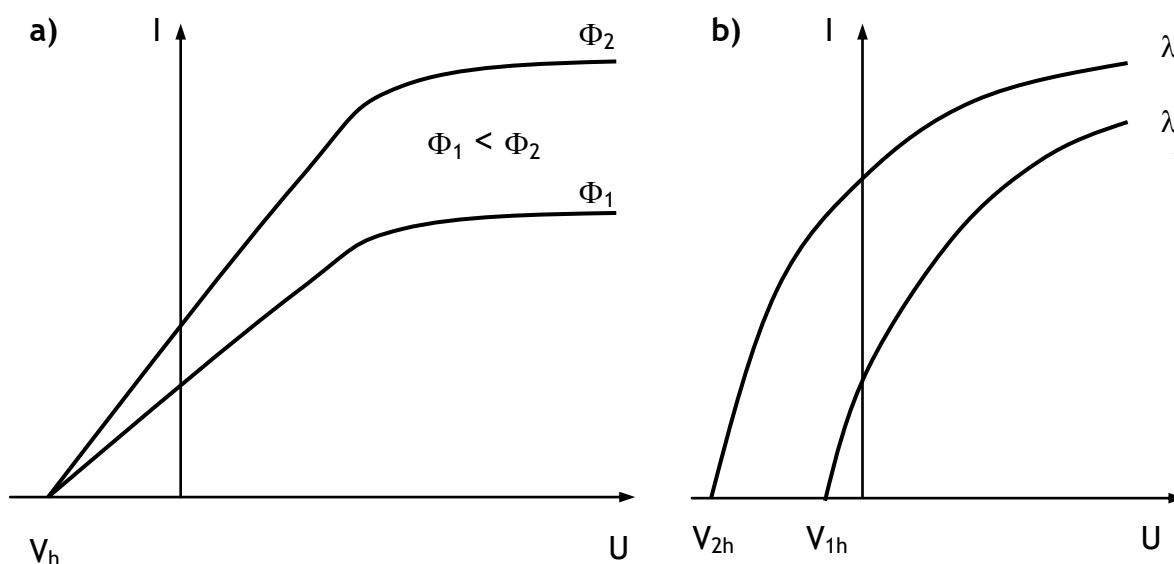
Szkło fotokomórki FK powinno swobodnie przepuszczać światło (w zakresie widzialnym i nadfiolecie), którego natężenie oraz częstotliwość może być zmieniana. Obwód elektryczny pozwala na przyłożenie między elektrody napięcia  $U$  regulowanego za pomocą potencjometru  $P$ , oraz na mierzenie natężenia prądu  $I$  przepływającego między nimi.

Światło o danej i znanej długości fali - czyli **światło monochromatyczne** - można uzyskać na kilka sposobów. Do niedawna najczęściej wykorzystywanym urządzeniem do uzyskiwania światła monochromatycznego były **monochromatory**. Ich działanie polega na wyodrębnieniu z wiązki **światła białego** (światła zawierającego wszystkie długości fal z zakresu widzialnego np. żarówki) fali o jednej długości wskutek załamania (monochromatory pryzmatyczne) lub odbicia światła od siatki dyfrakcyjnej (monochromatory odbiciowe). Obecnie

coraz częściej (i tak jest w realnym laboratorium) źródłami światła są zestawy diod LED, które mogą emitować światło o właściwie każdej długości z zakresu widzialnego, nadfioletu i podczerwieni.

Po przyłożeniu do anody potencjału dodatniego względem fotokatody i przy braku oświetlenia fotokatody nie obserwuje się przepływu prądu. Pojawia się on natychmiast gdy oświetlimy fotokatodę światłem o dostatecznie dużej częstotliwości. Zwiększając dodatni potencjał anody obserwuje się początkowo liniowe narastanie natężenia prądu, ale od pewnej wartości napięcia  $U$  osiąga się stan nasycenia i natężenie prądu nie ulega już zmianie.

Jeśli przy tych samych warunkach oświetlenia fotokatody zmienimy polaryzację potencjału na anodzie na ujemną, to idąc od zerowej wartości napięcia aż do coraz bardziej ujemnych, obserwuje się praktycznie liniowy zanik natężenia prądu, tak że przy pewnej charakterystycznej wartości  $V_h$  zwanej **potencjałem hamowania** będzie ono równe zero (rys.2a). Powtarzając taką charakterystykę prądowo – napięciową przy większym natężeniu światła ( $\Phi_2 > \Phi_1$ ) zaobserwujemy szybszy wzrost natężenia prądu w miarę wzrostu napięcia między anodą a katodą oraz wzrost natężenia prądu nasycenia, lecz nie zaobserwujemy zmiany potencjału hamowania. Można wykonać też innego typu pomiary w których utrzymywane jest stałe natężenie światła  $\Phi$ , a zmienna jego częstotliwość przy pewnym dodatnim potencjale anody (rys.2b). Wtedy okazuje się, że w miarę obniżania częstotliwości prąd fotoelektryczny maleje, aby zniknąć przy pewnej wartości charakterystycznej dla danego materiału fotokatody. Ta charakterystyczna częstotliwość, to tak zwana **częstotliwość progowa**  $\nu_0$ . Odpowiadająca jej długość fali zwana jest progową długością fali  $\lambda_0$  ( $\lambda = c/\nu_0$ ). Dla światła o długości fali większej niż  $\lambda_0$  (częstotliwości mniejszej niż  $\nu_0$ ) elektrony nie są emitowane.



**Rys. 2 Charakterystyki prądowo-napięciowe fotokomórki:**

**a) dla dwóch różnych natężeń światła  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  (gdzie  $V_h$  jest potencjałem hamującym)**

**b) dla dwóch różnych długości fal padających na fotokatodę.**

Część energii, którą wybity z fotokatody elektron otrzymał od światła musi zostać zużyta na wykonanie tzw. pracy wyjścia  $W$ , a reszta może zamienić się w energię kinetyczną. Maksymalna energia kinetyczna  $E_{max}$  jest równa pracy pola elektrycznego (między anodą i katodą) potrzebnej do całkowitego zahamowania elektronu w fotokomórce, a więc:

$$E_{max} = e \cdot V_h$$

gdzie  $e$  oznacza ładunek elektronu.

Podsumowując wyniki badań możemy wyróżnić trzy zasadnicze cechy efektu fotoelektrycznego:

1. **Potencjał hamujący**, a co zatem idzie maksymalna energia kinetyczna fotoelektronów  $E_{max}$ . **nie zależy od natężenia światła**. Patrz rys.2a.
2. **Dla każdej fotokatody istnieje charakterystyczna częstotliwość graniczna  $\nu_0$**  (zależna od materiału fotokatody). Dla **częstotliwości mniejszych od  $\nu_0$  efekt fotoelektryczny nie występuje**, niezależnie od tego jak silne jest natężenie światła.
3. Ponadto nie występuje **opóźnienie** w czasie pomiędzy padaniem światła na fotokatodę a pojawieniem się fotoprądu nawet dla małych natężeń światła.

## **1.2 Interpretacja efektu fotoelektrycznego**

Próba zinterpretowania efektu fotoelektrycznego na gruncie falowej teorii światła nie jest możliwa, gdyż według tej teorii **energia fali zależy od natężenia światła (czyli od kwadratu amplitudy fali)**. W tej sytuacji nie jest zrozumiała zależność maksymalnej energii kinetycznej fotoelektronów od natężenia światła, jak również występowanie częstotliwości granicznej, gdyż dla dostatecznie dużego natężenia światła efekt fotoelektryczny powinien zawsze wystąpić. Podobnie niezrozumiałą (z punktu widzenia teorii falowej) jest brak mierzalnego opóźnienia w czasie między padaniem światła na powierzchnię fotokatody a emisją fotoelektronu, gdyż wydaje się, że elektron powinien przez pewien czas magazynować energię z wiązki światła dopóki nie zbierze dostatecznej ilości potrzebnej do wyrwania się z materiału.

Zgodną z wynikami eksperymentalnymi interpretację zjawiska fotoelektrycznego podał dopiero w roku 1905 **Albert Einstein proponując tzw. fotonową teorię zjawiska fotoelektrycznego**. Według tej teorii należy traktować światło jak strumień cząstek (**fotonów**). Każdy foton posiada energię  $h\nu$ , gdzie  $h$  – stała Plancka,  $\nu$  – częstotliwość światła. Przy takim założeniu efekt fotoelektryczny jest zjawiskiem zderzenia dwóch cząstek: fotonu z elektronem uwięzionym w metalu. Dla takiego zderzenia Einstein napisał zasadę zachowania energii w postaci:

$$h \cdot \nu = W + E_{max}.$$

gdzie  $h\nu$  – jest **energiją fotonu** padającego na fotokatodę,  $W$  – **pracą wyjścia**, natomiast  $E_{max}$  – jest **maksymalną energiją kinetyczną elektronu** jaką może on uzyskać po wyrwaniu się z fotokatody. W większości przypadków na skutek strat wewnątrz metalu, będzie on miał energię mniejszą od  $E_{max}$ .

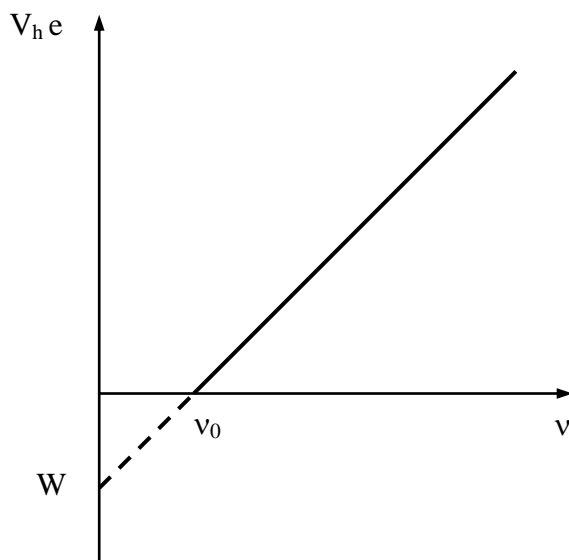
Korpuskularna teoria światła jest w stanie wytłumaczyć wszystkie zasadnicze cechy zjawiska fotoelektrycznego. A więc:

1. **Niezależność  $E_{max}$  od natężenia światła** wynika z tego, że zwiększając natężenie zwiększamy tylko liczbę fotonów a nie ich energię, natomiast energia  $E_{max}$  zależy tylko od energii pojedynczego fotonu  $h\nu$ .
2. **Istnienie częstości granicznej** wynika natomiast z faktu, że najmniejsza energia fotonu potrzebna do wywołania efektu fotoelektrycznego musi być co najmniej równa pracy wyjścia, czyli  $h\nu_0 \geq W$ , a fotony o mniejszej energii nie są w stanie wybić elektronu z danego materiału.
3. **Brak opóźnienia w czasie** wynika natomiast z teorii fotonowej, ponieważ potrzebna energia jest dostarczona w postaci skończonych porcji.

Jeśli przepiszemy równanie Einsteina podstawiając za  $E_{\max}$  wielkość  $eV_h$ , to otrzymamy:

$$V_h \cdot e = h \cdot \nu - W$$

Tak więc teoria Einsteina przewiduje liniowy związek między potencjałem hamowania  $V_h$  a częstotliwością padającego światła  $\nu$  co jest całkowicie zgodne z doświadczeniem (rys.3).



**Rys. 3. Zależność potencjału hamowania  $V_h$  od częstotliwości  $\nu$  padającego światła. ( $\nu_0$  jest częstotliwością graniczną charakterystyczną dla konkretnego materiału fotokatody a  $W$  - pracą wyjścia).**

Prosta  $y = ax + b$ , gdzie  $y = V_h e$ ,  $x = \nu$ ,  $a=h$ ,  $b=W$  przedstawiona na rys.3 pozwala wyznaczyć wartość stałej Plancka  $h$  oraz pracę wyjścia  $W$ . Właśnie wyznaczenie stałej Plancka jest jednym z celów tego ćwiczenia.

### **1.3. Dualizm korpuskularno – falowy**

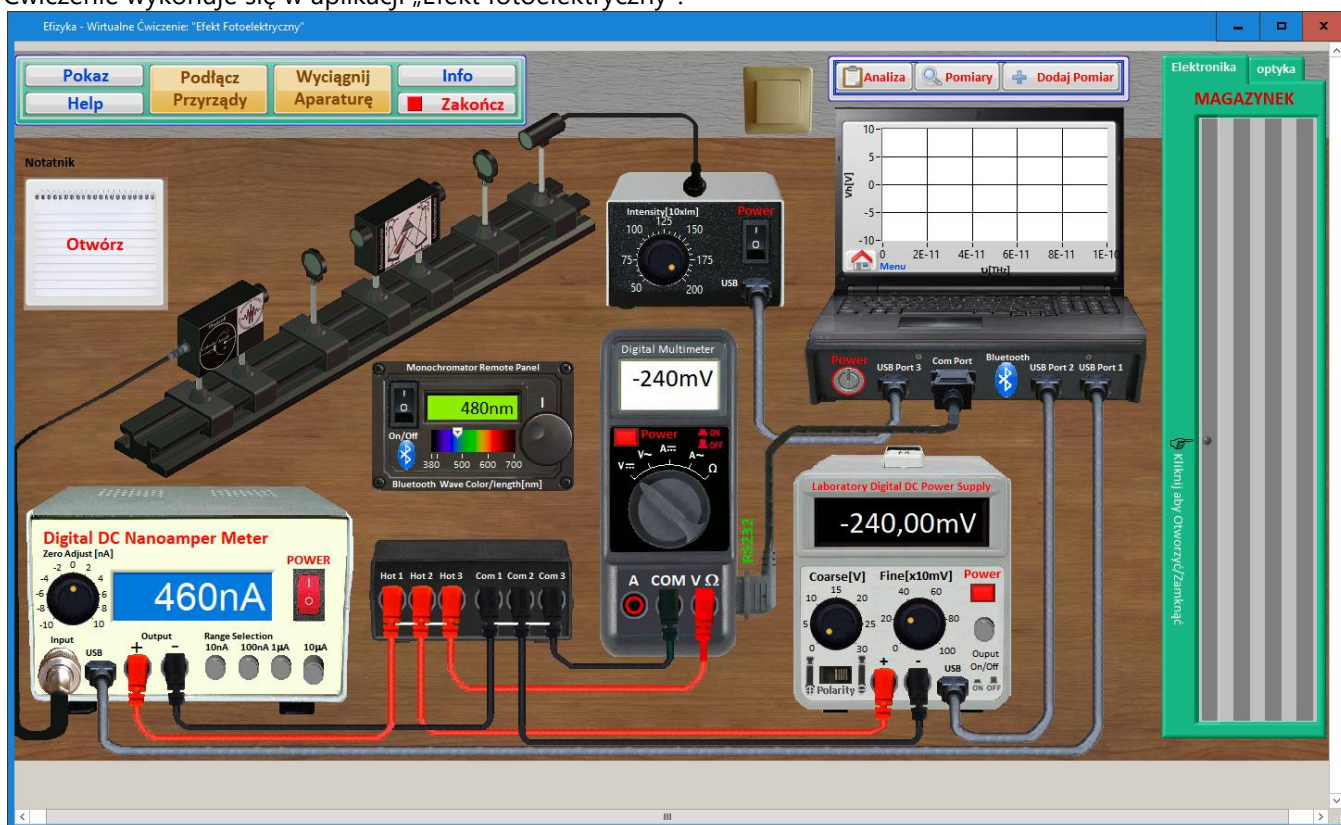
Sukces teorii korpuskularnej światła w wytłumaczeniu zjawiska fotoelektrycznego rodzi fundamentalne pytanie, **czym jest światło: falą, czy też strumieniem cząstek – fotonów?** Wiemy, że światło, jak każda fala ulega dyfrakcji i interferencji, a z drugiej strony takie zjawiska jak efekt fotoelektryczny, efekt Comptona czy też efekt tworzenia par elektron – pozyton potwierdzają teorię korpuskularną. W tej sytuacji należy przyjąć, że światło posiada cechy zarówno falowe jak i korpuskularne, a jego natura jest złożeniem tych cech powodując, że w pewnych warunkach zachowuje się ono jak fala, a w innych jak cząstka (foton) o energii  $E = h\nu$  i pędzie  $p = h/\lambda$ .

Podobnie dwoistą naturę mają cząsteczki materialne, o czym mówi teoria de Broglie'a, w myśl której cząstce o pędzie  $p$  należy przypisać pewną falę o długości  $\lambda = h/p$ , gdzie  $h$  – stała Plancka. Słuszność tej hipotezy potwierdziły doświadczenia, w których pokazano, że cząstki materialne (np. elektrony) mogą ulegać dyfrakcji, a więc zachowują się jak fala.

W ostatnich latach dzięki zbudowaniu źródeł światła o bardzo dużej energii (lasery o bardzo dużej mocy) okazało się, że efekt fotoelektryczny z użyciem takiego światła nie może być ściśle opisany przez równanie Einsteina. Jest to spowodowane możliwością wystąpienia reakcji wielofotonowych. Innymi słowy, przy tak dużej gęstości fotonów pojawia się możliwość jednoczesnego oddziaływania elektronu z wieloma fotonami i absorbowanie ich energii.

## 2. OPIS WYKONANIA ĆWICZENIA

Ćwiczenie wykonuje się w aplikacji „Efekt fotoelektryczny”.



**Wygląd stołu laboratoryjnego ze wszystkimi urządzeniami podłączonymi i włączonymi oraz z uruchomionym programem do wyznaczania stałej Plancka.**

### 2.1 Wyznaczenie stałej Plancka

Procedura pomiarowa:

1. Włączyć wszystkie urządzenia wchodzące w skład układu pomiarowego, włączyć komunikację Bluetooth i wyłączyć oświetlenie zewnętrzne.
2. Włączyć program oznaczony jako „Planck h” z menu wirtualnego laptopa.
3. Ustawić pokrętkę multimetru na pomiar napięcia stałego.
4. Ustawić przełącznik polaryzacji napięcia zasilacza na napięcie ujemne.
5. Włączyć wyjście zasilacza.
6. Ustawić maksymalne natężenie światła dla zapewnienia jak największej dokładności pomiaru.
7. Ustawić długość fali.
  - a. 1, 4, 7,... osoba w zespole wykonuje pomiary dla  $\lambda = 380 + i \cdot 30$  ( $i = 0$  do 7) [nm]
  - b. 2, 5, 8,... osoba w zespole wykonuje pomiary dla  $\lambda = 390 + i \cdot 30$  ( $i = 0$  do 7) [nm]
  - c. 3, 6, 9,... osoba w zespole wykonuje pomiary dla  $\lambda = 400 + i \cdot 30$  ( $i = 0$  do 7) [nm]
8. Ustawić napięcie zasilacza na wartość, przy której prąd mierzony przez cyfrowy nanoamperomierz (Digital DC Nanoamper Meter) **na zakresie podany przez prowadzącego ćwiczenie** osiąga wartość zero - poszukiwanie tego napięcia należy rozpocząć od napięcia ujemnego bliskiego zera przy którym płynie prąd, a następnie powoli zwiększać napięcie ujemne aż do pojawienia się zera na nanoamperomierzu.
9. Zapisać punkt pomiarowy, klikając przycisk „Dodaj Pomiar”.
10. Kroki 7-9 należy powtarzać aż do uzyskania maksymalnej długości fali określonej w punkcie 7.
11. Wyniki pomiarów wyeksportować do arkusza kalkulacyjnego lub innego programu wykorzystywanego do obliczeń numerycznych.

### 3. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Urządzenia pomiarowe:

**Monochromator: dokładność ustawienia długości fali 5 nm**

**Multimetr do pomiaru napięcia hamowania: zakres 2 V, c1=5%, c2=0,2%**

1. Po wykonaniu pomiarów w założonym zakresie długości fal należy wyniki pomiarów wyeksportować do arkusza excela (najeżdżać kursorem myszy na ekran laptopa i kliknąć prawym klawiszem - wówczas pojawi się opcja eksportu). Zamienić długość fali na częstotliwość (wykorzystać tablicową wartość prędkości światła).

Zgodnie z równaniem Einsteina

$$V_h \cdot e = h \cdot \nu - W$$

tak więc, jeśli na osi Y odłożymy  $V_h \cdot e$ , a na osi X  $\nu$  (częstotliwość), to prosta  $y = ax + b$ , gdzie  $y = V_h e$ ,  $x = \nu$ ,  $a=h$ ,  $b=W$  pozwala wyznaczyć wartość stałej Plancka  $h$  oraz pracę wyjścia  $W$ .

2. Przed przystąpieniem do tworzenia wykresu należy wyznaczyć niepewności  $x_i$  i  $y_i$  dla wszystkich punktów korzystając z podanych dokładności urządzeń pomiarowych.
3. Wykonać wykres (punkty pomiarowe wraz z odcinkami niepewności) i dopasowanie liniowe. Na podstawie wyników dopasowania określić **stałą Plancka  $h$**  i jej niepewność typu A. Określić również **pracę wyjścia  $W$**  i jej **niepewność typu A**.
4. **Niepewność typu B stałej Plancka** obliczyć na podstawie jednego punktu pomiarowego zakładając, że niepewność pracy wyjścia  $W$  jest równa zero.
5. **Niepewność typu B pracy wyjścia** obliczyć na podstawie jednego punktu pomiarowego zakładając, że niepewność stałej Plancka  $h$  jest równa zero.
6. Wyniki końcowe zapisać z niepewnością standardową i rozszerzoną. Porównać z wartością tablicową. Czy można określić materiał z którego wykonano katodę? Jeśli tak, to określić ten materiał.
7. Sprawdzić hipotezę liniowości uzyskanej zależności wykonując test  $\chi^2$  dla poziomu istotności 0,05.

Tablicowe wartości niektórych stałych fizycznych:

**$c = 299792458 \text{ m/s}$**

**$e = 1,60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$**

**$h = 6,6260755 \times 10^{-34} \text{ Js}$**