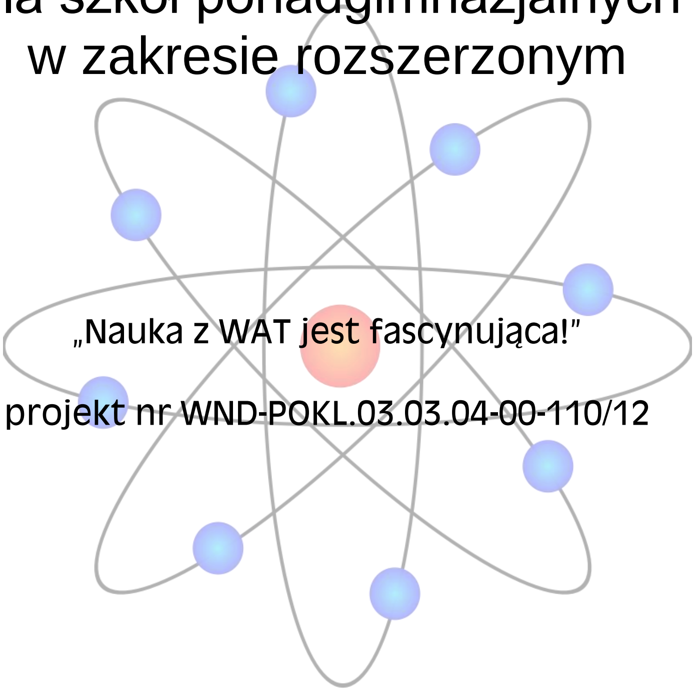
FIZYKA
scenariusze lekcji
dla szkół ponadgimnazjalnych w zakresie rozszerzonym



„Nauka z WAT jest fascynująca!”

projekt nr WND-POKL.03.03.04-00-110/12

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

scenariusz lekcji nr 1

Przedmiot: Fizyka
Dział programowy: Ruch harmoniczny i fale mechaniczne
Temat lekcji: Wyznaczanie przyspieszenia ziemskiego za pomocą wahadła matematycznego.
Klasa: 2
Scenariusz jest zgodny z podstawą programową.

Cele ogólne:

Celem ogólnym lekcji jest nabycie przez uczniów umiejętności planowania, wykonywania, opisu prostych eksperymentów fizycznych, analizy ich wyników z uwzględnieniem niepewności pomiarowych oraz uświadomienie roli eksperymentu, budowanie prostych modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk

Cele operacyjne:

Uczeń:

1. Rozwija biegłość wykonywania przekształceń algebraicznych.
2. Podaje wzór na okres drgań wahadła matematycznego i przekształca go, wyprowadzając z niego wzór na przyspieszenie ziemskie.
3. Buduje wahadło matematyczne.
4. Doskonali umiejętność projektowania przebiegu doświadczeń: projektuje przebieg doświadczenia wyznaczającego wartość przyspieszenia ziemskiego za pomocą wahadła matematycznego.
5. Przeprowadza niezbędne pomiary w celu wyznaczenia przyspieszenia ziemskiego.
6. Oblicza wartość przyspieszenia ziemskiego, wykorzystując wyniki pomiarów.
7. Przeprowadza analizę niepewności pomiarowej.
8. Poznaje różne metody analizowania niepewności pomiarowej.

Cele wychowawcze:

1. Nabywa umiejętności interpersonalne: współdziałania w zespole, podejmowania grupowych i indywidualnych decyzji.
2. Kształtuje umiejętność słuchania innych.
3. Rozwija dociekliwość poznawczą i badawczą.
4. W twórczy sposób rozwiązuje problemy.
5. Uczy się poprawnie posługiwać językiem fizyki.
6. Przygotowuje się do publicznych wystąpień.

Wykaz pomocy dydaktycznych:

- statyw;
- linijka lub taśma miernicza;
- stalowa nakrętka.;
- nierozciągliwa nić (sznurek) długości ok. 2m.;
- stoper.

Metody pracy:

- elementy wykładu;
- dyskusja;
- obserwacja;
- doświadczenie.

Formy pracy:

- praca w grupach

Przebieg lekcji:

1. Sprawdzenie pracy domowej.
2. Podanie tematu i celów lekcji.
3. Przebieg części głównej lekcji:
   a) Uczniowie na tablicy zapisują wzór na okres drgań wahadła matematycznego
      $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$
   b) Następnie przekształcają go do postaci:
      $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$
   c) Na podstawie analizy równania :
      $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$

   Uczniowie metodą burzy mózgów, dochodzą do zaprojektowania przebiegu doświadczenia pozwalającego wyznaczyć wartość przyspieszenia ziemskiego:

   - proponują, jak zbudować wahadło matematyczne (nierozciągliwa nić, na której zawieszamy nakrętkę);
   - projektują przebieg doświadczenia i określają, które wielkości i w jaki sposób zmierzyć, aby obliczyć wartość przyspieszenia ziemskiego;
   - podają propozycję instrukcji wykonania doświadczenia i opracowują tabelę do zapisywania wyników;
   - w grupach wykonują pomiary zgodnie z instrukcją doświadczenia;
   - pomiarów dokonują wszyscy uczniowie na zmianę;
   - zapisują wyniki pomiarów w tabeli;
   - obliczają wartość przyspieszenia ziemskiego.

   d) Uczniowie z pomocą nauczyciela przeprowadzają analizę niepewności pomiarowej.
   e) Uczniowie prezentują wyniki swojej pracy.
4. Podsumowanie lekcji:
   - podkreślenie znaczenia eksperymentów fizycznych;
   - zwrócenie uwagi na krytyczne spojrzenie otrzymywanych wyników;
   - zastanowienie się, w jaki sposób można zmniejszyć niepewność pomiarową Δg;
   - zadanie pracy domowej.

Instrukcja wykonania doświadczenia:

1. Wykorzystując stalową nakrętkę i długą, nierozciągliwą nić, zbuduj wahadło matematyczne.
2. Zawieś wahadło na statywie tak, aby mogło swobodnie wykonywać drgania.

3. Przymiarem metrowym zmierz długość nici l. Wynik zapisz w tabeli.
4. Odchyl wahadło o mały kąt (kilka stopni) i puść, aby wykonywało swobodne drgania. Za pomocą stopera zmierz czas trwania 10 drgnięć t. Wynik zapisz w tabeli.
5. Punkt 3. i 4. Powtórz 4 razy

   Tabela pomiarów.

Nr pomiaru	***l*** ***[m]***	***t*** ***[s]***	**T=t/10** ***[s]***
1			
2			
3			
4			
5			

   Objaśnienie oznaczeń:

   l - długość nici

   $t - czas\ trwania\ 10\ wahnięć\ wahadła$

   $T - okres\ drgań\ wahadła$

6. Oblicz wartość średnią długości nici oraz średni okres drgań wahadła matematycznego.

$$l_{śr} = \frac{\sum_{i=1}^{5} l_i}{5}$$

$$T_{śr} = \frac{\sum_{i=1}^{5} T_i}{5}$$

7. Korzystając ze wzoru:

$$g_{śr} = \frac{4\pi^2 l_{śr}}{T_{śr}^2}$$

   oblicz wartość średnią przyspieszenia ziemskiego.

Jak oszacować niepewności pomiarowe

Metoda uproszczona:

Ze względu na małą liczbę pomiarów założymy, że istotny wpływ mają tylko niepewności systematyczne. W przypadku 5 pomiarów stosowanie metod statystycznych wymaga znacznego rozszerzenia wiedzy uczniów.

Wielkości fizyczne mierzone bezpośrednio:

1. **$\Delta l_{śr}$ = 0,003m** - niepewność pomiarowa długości wahadła.

   Określając tę niepewność należy uwzględnić następujące czynniki:

   - najmniejszą podziałkę na przyrządzie pomiarowym – **0,001m;**

   - fakt, że przy pomiarze musimy ustalić początek i koniec wahadła;

- trudność z ustaleniem środka masy nakrętki

Możemy więc przyjąć, że niepewność pomiaru długości wahadła wynosi około **0,003m**

2. **Δt = 0,4s** - niepewność pomiaru 10 wahnięć.

   Niepewność pomiaru czasu 10 wahnięć, możemy ustalić na około **0,4s**.

   Mimo, że stoper mierzy czas z dokładnością **0,01s** to biorąc pod uwagę czas reakcji człowieka (około 0,2s) możemy przyjąć około **0,4s** za niepewność pomiaru wielkości **t**.

   Na taką wartość ma wpływ moment uruchomienia i moment wyłączenia stopera.

3. $\boldsymbol{\Delta T_{śr} = 0,04s}$ - niepewność pomiaru okresu drgań wahadła $T_{śr}$

   Przy ustalonych 10 wahnięciach mamy: $\Delta T_{śr} = \frac{\Delta t_{śr}}{10}$ czyli około **0,04s**

Wielkości fizyczne wyznaczane pośrednio:

$\Delta g_{śr}$ - niepewność pomiaru przyspieszenia ziemskiego g

Jest to niepewność wielkości wyznaczanej pośrednio na którą ma wpływ niepewność l i niepewność T.

Możemy podać uczniom gotową formułę na obliczanie niepewności względnej wielkości fizycznej **w**, która jest iloczynem **k** wielkości fizycznych **x_i** mierzonych bezpośrednio :

$$w = A \cdot x_1^{n_1} \cdot x_2^{n_k} \cdot \ldots \cdot x_k^{n_k}, \qquad \text{gdzie A} - \text{stała,} \quad n_i - potęga\ wielkości\ x_i$$

$$\frac{\Delta w}{w} = |n_1| \cdot \left|\frac{\Delta x_1}{x_1}\right| + |n_2| \cdot \left|\frac{\Delta x_2}{x_2}\right| + \cdots + |n_k| \cdot \left|\frac{\Delta x_k}{x_k}\right|$$

W naszym przypadku:

$$g_{śr} = \frac{4\pi^2 l_{śr}}{T_{śr}^2} = 4\pi^2 l_{śr} T_{śr}^{-2}$$

$$stąd \qquad \frac{\Delta g_{śr}}{g_{śr}} = 1 \cdot \frac{\triangle\, l_{śr}}{l_{śr}} + 2 \cdot \frac{\triangle\, T_{śr}}{T_{śr}}$$

$$czyli \qquad \Delta g_{śr} = g_{śr}\left(\frac{\triangle\, l_{śr}}{l_{śr}} + 2 \cdot \frac{\triangle\, T_{śr}}{T_{śr}}\right)$$

Możemy też wyprowadzić powyższy wzór metodą najmniej korzystnego przypadku:

Obliczamy wpływ Δl na Δg.

Największa możliwa wartość g $\qquad g_{max} = \frac{4\pi^2 (l_{śr}+\Delta l_{śr})}{T_{śr}^2}$

Najmniejsza możliwa wartość g $\qquad g_{min} = \frac{4\pi^2 (l_{śr}-\Delta l_{śr})}{T_{śr}^2}$

za miarę niepewności g przyjmiemy

$$\Delta g = \frac{g_{max} - g_{min}}{2} = \frac{\frac{4\pi^2(l_{śr}+\Delta l_{śr})}{T_{śr}^2} - \frac{4\pi^2(l_{śr}-\Delta l_{śr})}{T_{śr}^2}}{2} = \frac{4\pi^2 \Delta l_{śr}}{T_{śr}^2} = g_{śr}\frac{\Delta l_{śr}}{l_{śr}}$$

Obliczamy wpływ ΔT na Δg.

Największa możliwa wartość g $\qquad g_{max} = \frac{4\pi^2 l_{śr}}{(T_{śr}-\Delta T_{śr})^2}$

Najmniejsza możliwa wartość g $g_{min} = \frac{4\pi^2 l_{śr}}{(T_{śr}+\Delta T_{śr})^2}$

za miarę niepewności g przyjmiemy

$$\Delta g = \frac{g_{max}-g_{min}}{2} = \frac{\frac{4\pi^2 l_{śr}}{(T_{śr}-\Delta T_{śr})^2}-\frac{4\pi^2 l_{śr}}{(T_{śr}+\Delta T_{śr})^2}}{2} = \frac{4\pi^2 l_{śr}}{2}\left(\frac{1}{(T_{śr}-\Delta T_{śr})^2} - \frac{1}{(T_{śr}+\Delta T_{śr})^2}\right) =$$

$$\frac{4\pi^2 l_{śr}}{2}\frac{(T_{śr}+\Delta T_{śr})^2-(T_{śr}-\Delta T_{śr})^2}{(T_{śr}-\Delta T_{śr})^2(T_{śr}+\Delta T_{śr})^2} = \frac{4\pi^2 l_{śr}}{2}\frac{4T_{śr}\Delta T_{śr}}{\left(T_{śr}^2-\Delta T_{śr}^2\right)^2} \approx \frac{4\pi^2 l_{śr}}{2}\frac{4T_{śr}\Delta T_{śr}}{T_{śr}^4} = \frac{4\pi^2 l_{śr}}{T_{śr}^2}\frac{2\Delta T_{śr}}{T_{śr}} = g_{śr}\frac{2\Delta T_{śr}}{T_{śr}}$$

Niepewności się sumują stąd ostateczny wzór:

$$\Delta g = g_{śr}\left(\frac{2\Delta T_{śr}}{T_{śr}} + \frac{\Delta l_{śr}}{l_{śr}}\right)$$

Podsumowanie:

Należy zwrócić uwagę, że tak obliczona niepewność jest niepewnością maksymalną. Oczywiście podany powyżej sposób obliczania niepewności jest raczej oszacowanie niepewności. W szkole średniej myślę, że jest to metoda wystarczająca.

Ostatnim krokiem powinno omówienie formy zapisu wyniku w postaci $g = g_{śr} \pm \Delta g_{śr}$

Należy wyjaśnić uczniom, że:

- niepewność określamy z dokładnością do 2(lub1) cyfr znaczących
- zaokrąglenie niepewności dokonujemy zawsze „w górę" (to dość bezpieczna reguła)
- wielkość średnią zaokrąglamy do rzędu niepewności

Poniżej obraz arkusza kalkulacyjnego w którym dokonano przykładowych obliczeń niepewności pomiaru przyspieszenie ziemskiego bez upraszczania obliczeń. Materiał ten wykracza jednak poza zakres szkoły średniej gdyż:

- przy obliczeniu niepewności statystycznych zastosowano poprawkę dla rozkładu t-Studenta
- wyrażenie na obliczenie niepewności g wymaga znajomości pochodnych cząstkowych

Arkusz może posłużyć jako narzędzie służące do porównania niepewności statystycznych i systematycznych.

Wyniki pomiarów

Nr pomiaru	l [m]	t [s]	T=t/10 [s]
1	1,605	25,33	2,533
2	1,606	25,02	2,502
3	1,605	25,3	2,53
4	1,605	25,01	2,501
5	1,605	25,22	2,522

$l_{śr}$	$T_{śr}$
1,6052	2,5176
$\Delta l_{systematyczne}$	$\Delta T_{systematyczne}$
0,003	0,040
$\Delta l_{statystyczne}$	$\Delta T_{statystyczne}$
0,00020	0,00682
Poprawka dla rozkładu t-Studenta (poziom ufności 95%)	
$\Delta l_{statystyczne}$	$\Delta T_{statystyczne}$
0,00055528	0,018924379
Δl	ΔT
0,001818883	0,029857419

Obliczenia pomocnicze

$(l_i-l_{śr})^2$ [m]	$(T_i-T_{śr})^2$ [s]
4E-08	0,000237
6,4E-07	0,000243
4E-08	0,000154
4E-08	0,000276
4E-08	1,94E-05

Przyspieszenie ziemskie

$g_{śr}$ =	9,998052847
$\Delta g_{śr}$ =	0,237413806
Wynik ostateczny	
$g_{śr} \pm \Delta g_{śr}$ =	**(10,00 ± 0,24) m/s2**

scenariusz lekcji nr 2

Przedmiot: Fizyka
Dział programowy: Ruch harmoniczny i fale mechaniczne
Temat lekcji: Badanie zależności okresu drgań wahadła matematycznego od jego długości oraz wyznaczenie wartości przyspieszenia ziemskiego
Klasa: 2
Scenariusz jest zgodny z podstawą programową.

Cele ogólne:

Celem ogólnym lekcji jest nabycie przez uczniów umiejętności planowania, wykonywania, opisu prostych eksperymentów fizycznych, analizy ich wyników z uwzględnieniem niepewności pomiarowych oraz uświadomienie roli eksperymentu, budowanie prostych modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk.

Cele operacyjne:

Uczeń:

1. Rozwija biegłość wykonywania przekształceń algebraicznych.
2. Podaje wzór na okres drgań wahadła matematycznego i przekształca go, wyprowadzając z niego wzór wiążący okres drgań wahadła i długość wahadła.
3. Buduje wahadło matematyczne.
4. Doskonali umiejętność projektowania przebiegu doświadczeń: projektuje przebieg doświadczenia wyznaczającego wartość przyspieszenia ziemskiego za pomocą wahadła matematycznego.
5. Przeprowadza niezbędne pomiary w celu wyznaczenia zależności okresu drgań i długości wahadła.
6. Rozwija umiejętności sporządzania i analizowania wykresów.
7. Oblicza wartość przyspieszenia ziemskiego, wykorzystując wyniki pomiarów.
8. Przeprowadza analizę niepewności pomiarowej.
9. Poznaje różne metody analizowania niepewności pomiarowej.

Cele wychowawcze:

1. Nabywa umiejętności interpersonalne: współdziałania w zespole, podejmowania grupowych i indywidualnych decyzji.
2. Kształtuje umiejętność słuchania innych.
3. Rozwija dociekliwość poznawczą i badawczą.
4. W twórczy sposób rozwiązuje problemy.
5. Uczy się poprawnie posługiwać językiem fizyki.
6. Przygotowuje się do publicznych wystąpień.

Wykaz pomocy dydaktycznych:

- statyw;
- linijka lub taśma miernicza;
- stalowa nakrętka i nierozciągliwa nić (sznurek) długości ok. 2m.;

- stoper;
- papier milimetrowy.

Formy pracy:

- praca w grupach

Metody pracy:

- elementy wykładu;
- dyskusja;
- obserwacja;
- doświadczenie.

Przebieg lekcji:

1. Sprawdzenie pracy domowej.
2. Podanie tematu i celów lekcji.
3. Przebieg części głównej lekcji:
   a) Uczniowie na tablicy zapisują wzór na okres drgań wahadła matematycznego
   $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$
   b) Następnie przekształcają go do postaci:
   $T^2 = \frac{4\pi^2}{g} \cdot l$
   c) Na podstawie analizy równania $T^2(l)$ uczniowie powinni zauważyć, że jest to zależność liniowa typu $y = a \cdot x$ gdzie współczynnik $a = \frac{4\pi^2}{g}$. Wyznaczenie doświadczalne współczynnika **a** pozwala określić wartość przyspieszenia ziemskiego.

   Uczniowie metodą burzy mózgów, dochodzą do zaprojektowania przebiegu doświadczenia pozwalającego wyznaczyć wartość przyspieszenia ziemskiego:
   - proponują, jak zbudować wahadło matematyczne (nierozciągliwa nić, na której zawieszają nakrętkę);
   - projektują przebieg doświadczenia i określają, które wielkości i w jaki sposób zmierzyć, aby obliczyć wartość przyspieszenia ziemskiego;
   - podają propozycję instrukcji wykonania doświadczenia i opracowują tabelę do zapisywania wyników;
   - w grupach wykonują pomiary zgodnie z instrukcją doświadczenia;
   - pomiarów dokonują wszyscy uczniowie na zmianę;
   - zapisują wyniki pomiarów w tabeli;

   d) Uczniowie przeprowadzają z pomocą nauczyciela analizę niepewności pomiarowej.
   e) Sporządzają wykres $T^2(l)$ i na podstawie wykresu obliczają wartość przyspieszenia ziemskiego oraz niepewność otrzymanej wartości.
   f) Prezentują wyniki swojej pracy.
4. Podsumowanie lekcji:
   - podkreślenie znaczenia eksperymentów fizycznych;
   - zwrócenie uwagi na krytyczne spojrzenie otrzymywanych wyników;

- zastanowienie się, w jaki sposób można zmniejszyć niepewność pomiarową Δg;
- zadanie pracy domowej.

Instrukcja wykonania doświadczenia

1. Wykorzystując stalową nakrętkę i długą, nierozciągliwą nić, zbuduj wahadło matematyczne o początkowej długości około 2m.
2. Przymiarem metrowym zmierz długość nici. Wynik zapisz w tabeli.
3. Zawieś wahadło na statywie tak, aby mogło swobodnie wykonywać drgania. Odchyl wahadło o mały kąt (kilka stopni) i puść, aby wykonywało swobodne drgania.
4. Za pomocą stopera zmierz czas trwania 10 wahnięć. Wynik zapisz w tabeli.
5. Skróć wahadło o około 20 cm i powtórz czynności opisane w punktach 2–4.
6. Część doświadczalną kończysz po wykonaniu pomiarów dla 7 różnych długości wahadła.

Lp	**Długość wahadła l** **[m]**	**Czas t 10 wahnięć** **[s]**	**Okres drgań wahadła T=t/10** **[s]**	**Kwadrat okresu** T^2 **[s^2]**
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

Analiza niepewności pomiarowych

1. Niepewność pomiaru długości wahadła przyjmujemy jako 3-krotność najmniejszej podziałki na miarce. Podczas pomiaru odczytujemy początek i koniec wahadła oraz określamy środek masy nakrętki– każda z tych czynności może wnieść swój wkład w niepewność pomiaru l.

   Δl=0,003m
2. Niepewność czasu 10 wahnięć jest niepewnością systematyczną. Dokładność pomiaru czasu **t** stoperem wynosi 0,01s jednakże czas reakcji człowieka wynosi około 0,2s. Uwzględniając fakt włączenia i wyłączenia przy pomiarze czasu mamy

   Δt   = 0,4s
3. Niepewność okresu wahadła obliczymy ze wzoru:

   ΔT   = Δt/10 = 0,04s

4. Niepewność kwadratu średniej okresu obliczamy z wyrażenia: $\Delta \boldsymbol{T}^2 = \boldsymbol{T} * 2 * \Delta \boldsymbol{T}$

Możemy wyprowadzić powyższy wzór metodą najmniej korzystnego przypadku:

Obliczamy wpływ ΔT na ΔT^2

$T_{max}^2 = (T + \Delta T)^2 \qquad T_{min}^2 = (T - \Delta T)^2$

za miarę niepewności T^2 przyjmiemy

$$\Delta T^2 = \frac{T^2{}_{max} - T^2{}_{min}}{2} = \frac{(T+\Delta T)^2 - (T-\Delta T)^2}{2} = \frac{4T\Delta T}{2} = T^2 2\frac{\Delta T}{T} = 2T\Delta T$$

Wykres $T^2(l)$ i analiza wykresu

Wykres zależności kwadratu okresu od długości wahadła

1. Na osi poziomej odkładamy długość wahadła w metrach. Początek układu współrzędnych przesuwamy tak aby początek osi poziomej był np. w punkcie 0,8m
2. Na osi pionowej odkładamy kwadrat średniej okresu w s^2. Tutaj też przesuwamy początek układu współrzędnych.
3. Nanosimy punkty (l, T^2) oraz ich niepewności pomiarowe
4. Rysujemy prostą przechodzącą możliwie najbliżej punktów pomiarowych

Interpretacja teoretyczna otrzymanego wykresu

Okres drgań wahadła matematycznego wyraża się wzorem: $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

gdzie: l – długość wahadła, a g – przyspieszenie ziemskie.

Przekształcamy wzór: $T^2 = \frac{4\pi^2}{g}\, l$

i stwierdzamy, że kwadrat okresu drgań jest proporcjonalny do długości wahadła, a współczynnik kierunkowy prostej na wykresie $T^2(l)$ ma wartość:

$$a = \frac{4\pi^2}{g}$$

Wyznaczenie wartości oraz niepewności pomiaru współczynnika a:

Należy znaleźć największe i najmniejsze nachylenie prostej $T^2(l)$ tzn. musimy narysować dwie proste o możliwie największym i najmniejszym nachyleniu przechodzące przez większość prostokątów błędu.

Następnie obliczamy wsp. kierunkowe a_{max} oraz a_{min} odpowiadające narysowanym prostym.

dla punktów (l_{1max}, $T^2{}_{1max}$) oraz (l_{2max}, $T^2{}_{2max}$) prostej o największym nachyleniu:

$$a_{max} = \frac{T^2{}_{1max} - T^2{}_{2max}}{l_{1max} - l_{2max}}$$

dla punktów (l_{1min}, $T^2{}_{1min}$) oraz (l_{2min}, $T^2{}_{2min}$) prostej o najmniejszym nachyleniu:

$$a_{min} = \frac{T^2{}_{1min} - T^2{}_{2min}}{l_{1min} - l_{2min}}$$

Niepewność pomiarowa **a** będzie równa połowie różnicy między tymi wielkościami. $\Delta a = \frac{a_{max} - a_{min}}{2}$

Wartość średnią **a** obliczamy z wyrażenia: $a_{śr} = \frac{a_{max} + a_{min}}{2}$

Wyznaczenie wartości oraz niepewności pomiaru przyspieszenia g:

Wyznaczamy przyspieszenie ziemskie g: $g_{śr} = \frac{4\pi^2}{a_{śr}}$

Niepewność obliczamy ze wzoru: $\Delta g = g_{śr} * \frac{\Delta a}{a}$

scenariusz lekcji nr 3

Przedmiot: Fizyka
Dział programowy: Termodynamika
Temat lekcji: Wyznaczanie ciepła właściwego ciała.
Klasa: 2
Scenariusz jest zgodny z podstawą programową.

Cele ogólne:

Celem ogólnym lekcji jest nabycie przez uczniów umiejętności planowania, wykonywania, opisu prostych eksperymentów fizycznych, analizy ich wyników z uwzględnieniem niepewności pomiarowych oraz uświadomienie roli eksperymentu, budowanie prostych modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk.

Cele operacyjne:

Uczeń:

1. Zna wzór na ciepło właściwe, umie zapisać równanie bilansu cieplnego.
2. Umie zastosować metodę bilansu cieplnego do wyznaczenia ciepła właściwego ciała stałego.
3. Doskonali biegłość wykonywania przekształceń algebraicznych.
4. Doskonali umiejętność projektowania przebiegu doświadczeń: projektuje przebieg doświadczenia wyznaczającego wartość ciepła właściwego ciała stałego.
5. Przeprowadza niezbędne pomiary w celu wyznaczenia wartości ciepła właściwego ciała stałego.
6. Oblicza wartość ciepła właściwego ciała stałego, wykorzystując wyniki pomiarów.
7. Przeprowadza analizę niepewności pomiarowej.

Cele wychowawcze:

Nabywa umiejętności interpersonalne: współdziałania w zespole, podejmowania grupowych i indywidualnych decyzji.

1. Kształtuje umiejętność słuchania innych.
2. Rozwija dociekliwość poznawczą i badawczą.
3. W twórczy sposób rozwiązuje problemy.
4. Uczy się poprawnie posługiwać językiem fizyki.
5. Przygotowuje się do publicznych wystąpień.

Wykaz pomocy dydaktycznych:

- aluminiowy kalorymetr;
- stalowe nakrętki, do których przywiązujemy nitkę o długości ok. 20- 30 cm;
- naczynie z wodą;
- grzałka elektryczna, czajnik elektryczny lub palnik;
- waga;
- termometr laboratoryjny.

Metody pracy:

- elementy wykładu;
- dyskusja;
- obserwacja;
- doświadczenie.

Formy pracy:

- praca w grupach

Przebieg lekcji:

1. Sprawdzenie pracy domowej.
2. Podanie tematu i celów lekcji.
3. Przebieg części głównej lekcji:
   a) uczniowie przypominają definicję ciepła właściwego i zapisują wzór:
   $c_w = \frac{Q}{m\Delta T}$
   b) uczniowie wyjaśniają, na czym polega zasada bilansu cieplnego i zapisują równanie bilansu cieplnego:
   ciepło oddane= ciepłu pobranemu
   $Q_{od} = Q_{pobr}$
   c) uczniowie metodą burzy mózgów, dochodzą do zaprojektowania doświadczenia pozwalającego wyznaczyć ciepło właściwe ciała stałego (stalowych nakrętek) :
   - projektują przebieg doświadczenia i określają, które wielkości i w jaki sposób zmierzyć, aby obliczyć wartość ciepła właściwego stalowej nakrętki;
   - podają propozycję instrukcji wykonania doświadczenia i opracowują tabelę do zapisywania wyników;
   - w grupach wykonują pomiary zgodnie z instrukcją doświadczenia;
   - do pomiarów zaangażowani są wszyscy uczniowie na zmianę;
   - zapisują wyniki pomiarów w tabeli;
   - obliczają wartość ciepła właściwego stalowych nakrętek.

   d) Uczniowie z pomocą nauczyciela przeprowadzają analizę niepewności pomiarowej.
   e) Uczniowie prezentują wyniki swojej pracy.
4. Podsumowanie lekcji:
   - podkreślenie znaczenia eksperymentów fizycznych;
   - zwrócenie uwagi na krytyczne spojrzenie otrzymywanych wyników;
   - zastanowienie się, w jaki sposób można zmniejszyć niepewność pomiarową
   - zadanie pracy domowej.

Instrukcja wykonania doświadczenia: wyznaczanie wartości ciepła właściwego;

1. Nakrętki zwiąż nitką i zostaw jeden jej koniec tak długi, aby można było za pomocą nitki wyjąć nakrętki z czajnika.
2. Za pomocą wagi zmierz masę stalowych nakrętek m_n. Wynik pomiaru zapisz w tabeli.
3. Zapisz w tabeli niepewność pomiarową masy nakrętki- czyli masa najmniejszego odważnika użytego do pomiaru Δm_n.

4. Za pomocą wagi zmierz masę kalorymetru (wewnętrznego naczynia) m_k. Wynik zapisz w tabeli.
5. Zapisz w tabeli niepewność pomiarową masy kalorymetru- czyli masa najmniejszego odważnika użytego do pomiaru Δm_k.
6. Do kalorymetru wlej ok. 250 ml wody (ok. szklankę) i za pomocą wagi zmierz masę wody wraz z kalorymetrem. Wynik zapisz w tabeli m_{kw}.
7. Zapisz w tabeli niepewność pomiarową masy wody wraz z kalorymetrem- czyli masa najmniejszego odważnika użytego do pomiaru Δm_{kw} .
8. Oblicz masę wody m_w i wynik zapisz w tabeli.
9. Za pomocą termometru laboratoryjnego zmierz początkową temperaturę wody w kalorymetrze T_o. Wynik wyrażony w skali Kelwina zapisz w tabeli.
10. Zapisz w tabeli niepewność pomiarową temperatury- czyli wartość elementarnej podziałki termometru ΔT.
11. Do czajnika elektrycznego z wodą(lub innego naczynia z wodą) włóż stalowe nakrętki i podgrzej, doprowadzając do wrzenia.
12. W tabeli zapisz temperaturę nakrętki (100^oC= 373 K).
13. Chwytając za nitkę szybko przełóż nakrętkę do kalorymetru.
14. Obserwuj wskazania termometru, a po ustaleniu się temperatury równowagi zapisz ją w tabeli (w skali Kelwina).
15. Sporządź bilans cieplny:

    Ciepło oddają stalowe nakrętki:

    $Q_{od}= m_n \cdot c_{ws} \cdot (373{,}15K-T_k)$

    Ciepło pobierają: aluminiowy kalorymetr i znajdująca się w nim woda

    $Q_{pobr}= m_w \cdot c_w \cdot (T_k-T_o)+m_k \cdot c_k \cdot (T_k-T_o)$

16. Na podstawie bilansu cieplnego, wyprowadź wzór na ciepło właściwe stali i oblicz jego wartość:

$$\boldsymbol{c_{ws}}=\frac{m_w c_w (T_k-T_o)+m_k c_k (T_k-T_o)}{m_n(373{,}15K-T_k)}=\frac{(m_w c_w+m_k c_k)(T_k-T_o)}{m_n(373{,}15K-T_k)}$$

Tabela pomiarów:

m_n [kg]	Δm_n [kg]	m_k [kg]	Δm_k [kg]	m_{kw} [kg]	Δm_{kw} [kg]	m_w [kg]	Δm_w [kg]	T_o [K]	ΔT_o [K]	T_k [K]	ΔT_k [K]

Analiza niepewności pomiarowej:

1. Niepewności pomiaru masy nakrętek- m_n, masy kalorymetru-m_k, masy kalorymetru z wodą-m_{kw} ustalamy jako masę najmniejszego odważnika na wadze.

   $\Delta m_n = \Delta m_k = \Delta m_{kw} = 0{,}001kg$
2. Niepewność pomiaru masy wody w kalorymetrze-m_w obliczamy ze wzoru $m_w = m_{kw} - m_k$ stąd niepewność pomiaru masy wody wynosi:

   $\Delta m_w = \Delta m_k + \Delta m_{kw} = 0{,}002kg$
3. Niepewność pomiaru temperatury początkowej T_o i końcowej T_k jest równa najmniejszej podziałce termometru:

   $\Delta T_o = \Delta T_k = 1^oC = 1K$
4. Niepewność pomiaru ciepła właściwego stali c_{ws} jest niepewnością wielkości wyznaczanej pośrednio. Możemy zastosować metodę najmniej korzystnego przypadku.

$$\Delta c_{ws} = \frac{c_{ws-max} - c_{ws-min}}{2}$$

gdzie

$$c_{ws-max} = \frac{\left((m_w+\Delta m_w)c_w+(m_k+\Delta m_k)c_k\right)\left((T_k+\Delta T_k)-(T_o-\Delta T_o)\right)}{(m_n-\Delta m_n)\left(373{,}15-(T_k+\Delta T_k)\right)}$$

$$c_{ws-min} = \frac{\left((m_w-\Delta m_w)c_w+(m_k-\Delta m_k)c_k\right)\left((T_k-\Delta T_k)-(T_o+\Delta T_o)\right)}{(m_n+\Delta m_n)\left(373{,}15-(T_k-\Delta T_k)\right)}$$

Poniżej obraz arkusza kalkulacyjnego który można wykorzystać na lekcji jako narzędzie przyspieszające obliczenia rachunkowe. Nauczyciel może np. udostępnić komputer w pracowni jako centrum obliczeniowe.

m_n [kg]	Δm_n [kg]	m_k [kg]	Δm_k [kg]	m_{kw} [kg]	Δm_{kw} [kg]	m_w [kg]	Δm_w [kg]	T_o [K]	ΔT_o [K]	T_k [K]	ΔT_k [K]
0,15	**0,001**	**0,1**	**0,001**	**0,35**	**0,001**	**0,25**	**0,002**	**283**	**1**	**287**	**1**

c_w =	4189,9	J/kgK
c_k =	900	J/kgK

Obliczenia:

c_{ws} =	352,0913
c_{ws-max} =	542,3141
c_{ws-min} =	171,4628
Δc_{ws} =	185,4257

scenariusz lekcji nr 4

Przedmiot: **Fizyka**
Dział programowy: **Fale elektromagnetyczne i optyka**
Temat lekcji: **Wyznaczanie długości fal świetlnych za pomocą siatki dyfrakcyjnej.**
Klasa: **3**

Scenariusz jest zgodny z podstawą programową.

Cele ogólne:

Celem ogólnym lekcji jest nabycie przez uczniów umiejętności planowania, wykonywania, opisu prostych eksperymentów fizycznych, analizy ich wyników z uwzględnieniem niepewności pomiarowych oraz uświadomienie roli eksperymentu, budowanie prostych modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk.

Cele operacyjne:

Uczeń:

1. Zna przebieg doświadczenia Younga.
2. Zna wzór na siatkę dyfrakcyjną i przekształca go w celu wyznaczenia długości światła widzialnego.
3. Doskonali umiejętność projektowania przebiegu doświadczeń: projektuje przebieg doświadczenia wyznaczającego długość fal światła widzialnego za pomocą siatki dyfrakcyjnej.
4. Przeprowadza niezbędne pomiary w celu wyznaczenia długości światła.
5. Oblicza wartość długości fal świetlnych, wykorzystując wyniki pomiarów.
6. Przeprowadza analizę niepewności pomiarowej.

Cele wychowawcze:

1. Nabywa umiejętności interpersonalne: współdziałania w zespole, podejmowania grupowych i indywidualnych decyzji.
2. Kształtuje umiejętność słuchania innych.
3. Rozwija dociekliwość poznawczą i badawczą.
4. W twórczy sposób rozwiązuje problemy.
5. Uczy się poprawnie posługiwać językiem fizyki.
6. Przygotowuje się do publicznych wystąpień.

Wykaz pomocy dydaktycznych:

- siatka dyfrakcyjna o znanej stałej siatki;
- wskaźnik laserowy (czerwony, zielony);
- ekran ;
- ława optyczna;
- linijka.

Metody pracy:

- elementy wykładu;
- dyskusja;
- obserwacja;
- doświadczenie.

Formy pracy:

- praca w grupach

Przebieg lekcji:

1. Sprawdzenie pracy domowej.
2. Podanie tematu i celów lekcji.
3. Przebieg części głównej lekcji:
   a) Uczniowie na tablicy zapisują wzór na siatkę dyfrakcyjną:
      $n \cdot \lambda = d \cdot sin\alpha$
   b) Następnie przekształcają go do postaci:
      $\lambda = \frac{d \cdot sin\alpha}{n}$
   c) Na podstawie analizy równania :
      $\lambda = \frac{d \cdot sin\alpha}{n}$

   uczniowie metodą burzy mózgów, dochodzą do zaprojektowania przebiegu doświadczenia pozwalającego wyznaczyć wartość długości światła:

   - Proponują, w jaki sposób wyznaczyć sinus kąta ugięcia prążka wybranego rzędu:
     - zmierzyć odległość siatki dyfrakcyjnej od ekranu;
     - zmierzyć odległość wybranego prążka n-tego rzędu od prążka 0 rzędu;
     - sinus kąta ugięcia można wyznaczyć ze wzoru:

     $sin\ \alpha = \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}$

     gdzie l- oznacza odległość siatki dyfrakcyjnej od ekranu,
     x- odległość wybranego prążka od prążka 0 rzędu

   - podają propozycję instrukcji wykonania doświadczenia i opracowują tabelę do zapisywania wyników;
   - w grupach wykonują pomiary zgodnie z instrukcją doświadczenia;
   - pomiarów dokonują wszyscy uczniowie na zmianę;
   - zapisują wyniki pomiarów w tabeli;
   - obliczają wartość długości fali światła lasera.

   d) Uczniowie przeprowadzają analizę niepewności pomiarowej.
   e) Uczniowie prezentują wyniki swojej pracy.
4. Podsumowanie lekcji:
   - podkreślenie znaczenia eksperymentów fizycznych;
   - zwrócenie uwagi na krytyczne spojrzenie otrzymywanych wyników;
   - zadanie pracy domowej.

Instrukcja wykonania doświadczenia: wyznaczanie długości światła lasera za pomocą siatki dyfrakcyjnej:

1. Zmontuj na ławie optycznej układ pomiarowy: wskaźnik laserowy, siatkę dyfrakcyjną i ekran (siatka dyfrakcyjna powinna znajdować się pomiędzy wskaźnikiem, a ekranem).
2. Zmierz na ławie optycznej odległość siatki dyfrakcyjnej od ekranu. Wynik pomiaru zapisz w tabeli.
3. Włącz wskaźnik laserowy.
4. Zmierz za pomocą linijki odległość między prążkami tego samego rzędu leżącymi po obydwu stronach 0 prążka. Wynik x_{11} zapisz w tabeli.

Stała siatki	Barwa światła laserowego	*l –odległość siatka-ekran [m]*	*Δl [m]*	x_{11} *[m]*	Δx_{11} *[m]*	$x=\frac{x_{11}}{2}$ *[m]*	*Δx [m]*

5. Korzystając ze wzorów:

$\sin\alpha=\frac{x}{\sqrt{l^2+x^2}}$ *oraz* $\lambda=\frac{d\cdot\sin\alpha}{n}$ oblicz długość światła wskaźnika laserowego.

$$\lambda=\frac{d\cdot\frac{x}{\sqrt{l^2+x^2}}}{n}=\frac{d\cdot x}{n\sqrt{l^2+x^2}}$$

Analiza niepewności pomiarowej.

1. Niepewność pomiaru odległości siatka – ekran:
   Δl = 2 x najmniejsza podziałka na przyrządzie pomiarowym
   Przyjmuję, że na niepewność ma wpływ określenie początku i końca mierzonego odcinka.
2. Niepewność pomiaru odległości między prążkami:
   Δx_{11} = 2 x najmniejsza podziałka na przyrządzie pomiarowym
   Przyjmuję, że na niepewność ma wpływ określenie początku i końca mierzonego odcinka.
3. Niepewność pomiaru odległości między prążkiem rzędu 0 i wybranym (np.1):
   $\Delta x = \Delta x_{11} / 2$ = najmniejsza podziałka na przyrządzie pomiarowym
   Wybrany przez nas sposób pomiaru pozwala 2-krotnie zmniejszyć niepewność pomiarową
4. Niepewność długości światła wskaźnika jest niepewnością pomiaru pośredniego
   Przekształcimy wzór do postaci:
   $$\bar{\lambda}=\frac{d\cdot\frac{x}{\sqrt{l^2+x^2}}}{n}=\frac{d\cdot x}{n\sqrt{l^2+x^2}}=\frac{d}{n\sqrt{\frac{l^2}{x^2}+1}}$$
   Zastosujemy **metodą najmniej korzystnego przypadku:**

$$\lambda_{max} = \frac{d}{n\sqrt{\frac{(l-\Delta l)^2}{(x+\Delta x)^2}+1}} \qquad \lambda_{min} = \frac{d}{n\sqrt{\frac{(l+\Delta l)^2}{(x-\Delta x)^2}+1}}$$

niepewność pomiaru Δλ wyliczymy następująco:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{2}$$

5. Ostatnim krokiem powinno omówienie formy zapisu wyniku w postaci $\lambda = \bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$

   Należy wyjaśnić uczniom, że:

   a. niepewność określamy z dokładnością do 2(lub1) cyfr znaczących
   b. zaokrąglenie niepewności dokonujemy zawsze „w górę” (to dość bezpieczna reguła)
   c. obliczoną długość światła zaokrąglamy do rzędu niepewności

scenariusz lekcji nr 5

Przedmiot: **Fizyka**
Dział programowy: **Fale elektromagnetyczne i optyka**
Temat lekcji: **Wyznaczanie gęstości ścieżek na płycie CD (DVD).**
Klasa: **3**

Scenariusz jest zgodny z podstawą programową.

Cele ogólne:

Celem ogólnym lekcji jest nabycie przez uczniów umiejętności planowania, wykonywania, opisu prostych eksperymentów fizycznych, analizy ich wyników z uwzględnieniem niepewności pomiarowych oraz uświadomienie roli eksperymentu, budowanie prostych modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk.

Cele operacyjne:

Uczeń:

1. Zna wzór na siatkę dyfrakcyjną i przekształca go w celu wyznaczenia odległości między ścieżkami na płycie CD (DVD).
2. Doskonali umiejętność projektowania przebiegu doświadczeń: projektuje przebieg doświadczenia wyznaczającego gęstość ścieżek na płycie CD (DVD).
3. Przeprowadza niezbędne pomiary w celu wyznaczenia gęstości ścieżek.
4. Oblicza wartość odległości między ścieżkami na płycie CD (DVD), wykorzystując wyniki pomiarów.
5. Przeprowadza analizę niepewności pomiarowej.

Cele wychowawcze:

1. Nabywa umiejętności interpersonalne: współdziałania w zespole, podejmowania grupowych i indywidualnych decyzji.
2. Kształtuje umiejętność słuchania innych.
3. Rozwija dociekliwość poznawczą i badawczą.
4. W twórczy sposób rozwiązuje problemy.
5. Uczy się poprawnie posługiwać językiem fizyki.
6. Przygotowuje się do publicznych wystąpień.

Wykaz pomocy dydaktycznych:

- płyta CD (DVD);
- wskaźnik laserowy ;
- ława optyczna;
- ekran.

Formy pracy:

- praca w grupach

Metody pracy:

- elementy wykładu;
- dyskusja;
- praca w grupie;
- obserwacja;
- doświadczenie.

Przebieg lekcji:

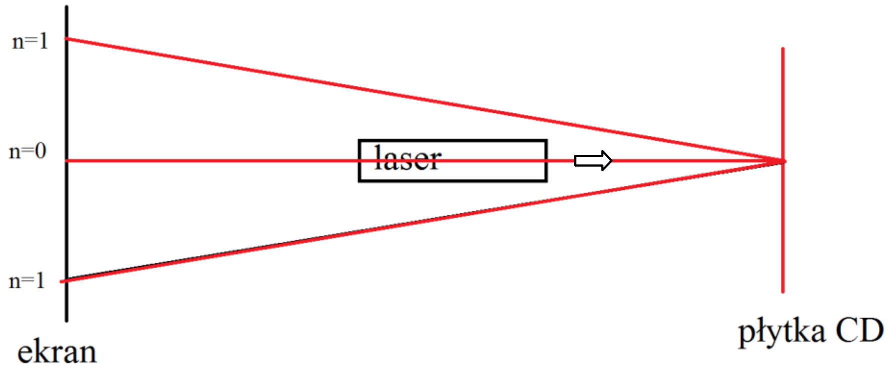
1. Sprawdzenie pracy domowej.
2. Podanie tematu i celów lekcji.
3. Przebieg części głównej lekcji:
   a) Uczniowie na tablicy zapisują wzór na siatkę dyfrakcyjną:
   $n \cdot \lambda = d \cdot sin\alpha$
   b) Następnie przekształcają go do postaci:
   $d = \frac{n \cdot \lambda}{sin\alpha}$
   c) Na podstawie analizy równania :
   $d = \frac{n \cdot \lambda}{sin\alpha}$

   uczniowie metodą burzy mózgów, dochodzą do zaprojektowania przebiegu doświadczenia pozwalającego wyznaczyć odległość między ścieżkami na płycie CD (DVD):
   - Proponują, w jaki sposób wyznaczyć sinus kąta ugięcia prążka wybranego rzędu:
     - zmierzyć odległość siatki dyfrakcyjnej od ekranu;
     - zmierzyć odległość wybranego prążka n-tego rzędu od prążka 0 rzędu;
     - sinus kąta ugięcia można wyznaczyć ze wzoru:
     $sin\ \alpha = \frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}$
     gdzie l- oznacza odległość siatki dyfrakcyjnej od ekranu,
     x- odległość wybranego prążka od prążka 0 rzędu
   - podają propozycję instrukcji wykonania doświadczenia i opracowują tabelę do zapisywania wyników;
   - w grupach wykonują pomiary zgodnie z instrukcją doświadczenia;
   - pomiarów dokonują wszyscy uczniowie na zmianę;
   - zapisują wyniki pomiarów w tabeli;
   - obliczają odległość między ścieżkami na płycie CD (DVD).

   d) Uczniowie przeprowadzają analizę niepewności pomiarowej.
   e) Uczniowie prezentują wyniki swojej pracy.
5. Podsumowanie lekcji:
   - podkreślenie znaczenia eksperymentów fizycznych;
   - zwrócenie uwagi na krytyczne spojrzenie otrzymywanych wyników;
   - podkreślenie powiązania osiągnięć fizyki z wykorzystaniem ich w technice i życiu codziennym;
   - zadanie pracy domowej.

Instrukcja wykonania doświadczenia: wyznaczanie długości światła lasera za pomocą siatki dyfrakcyjnej:

6. Odczytaj z opisu wskaźnika laserowego, długość fali świetlnej. Odczyt zapisz w tabeli.
7. Zmontuj na ławie optycznej układ pomiarowy: wskaźnik laserowy, płytę CD (DVD).



8. Włącz wskaźnik laserowy.
9. Zmierz na ławie optycznej odległość płyty CD od ekranu. Wyniki pomiaru zapisz w tabeli.
10. Odczytaj wartość niepewności pomiarowej pomiaru długości na ławie optycznej Δl. Wartość zapisz w tabeli.
11. Zmierz za pomocą linijki odległość między prążkami tego samego rzędu leżącymi po obydwu stronach prążka 0. Wynik x_{nn} zapisz w tabeli.
12. Odczytaj wartość niepewności pomiarowej linijki Δx. Wartość zapisz w tabeli.

λ – długość światła lasera [nm]	Δλ (jeśli podana)	*l –odległość CD-ekran [m]*	*Δl [m]*	X_{nn} *[m]*	Δx_{nn} *[m]*	$x=\frac{x_{nn}}{2}$ *[m]*	*Δx [m]*

13. Oblicz odległość między ścieżkami na płycie CD korzystając ze wzorów:

$$\sin\alpha=\frac{x}{\sqrt{l^2+x^2}} \quad i \quad d=\frac{n\cdot\lambda}{\sin\alpha}$$

otrzymana zależność pozwoli obliczyć d :

$$d=\frac{n\cdot\lambda}{\frac{x}{\sqrt{l^2+x^2}}}=\frac{n\cdot\lambda\cdot\sqrt{l^2+x^2}}{x}$$

Analiza niepewności pomiarowej.

1. Niepewność pomiaru odległości CD – ekran:
   Δl = 2 x najmniejsza podziałka na przyrządzie pomiarowym
   Przyjmuję, że na niepewność ma wpływ określenie początku i końca mierzonego odcinka.

2. Niepewność pomiaru odległości między prążkami:
   Δx_{nn} = 2 x najmniejsza podziałka na przyrządzie pomiarowym
   Przyjmuję, że na niepewność ma wpływ określenie początku i końca mierzonego odcinka.

3. Niepewność pomiaru odległości między prążkiem rzędu 0 i wybranym (np.1):
   $\Delta x = \Delta x_{nn} / 2$ = najmniejsza podziałka na przyrządzie pomiarowym
   Wybrany przez nas sposób pomiaru pozwala 2-krotnie zmniejszyć niepewność pomiarową

4. Niepewność odległości między ścieżkami jest niepewnością pomiaru pośredniego
   Przekształcimy wzór do postaci:

$$\bar{d} = \frac{n \cdot \lambda}{\frac{x}{\sqrt{l^2 + x^2}}} = \frac{n \cdot \lambda \cdot \sqrt{l^2 + x^2}}{x} = n \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{l^2}{x^2} + 1}$$

   Zastosujemy **metodą najmniej korzystnego przypadku:**

$$d_{max} = n \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(l + \Delta l)^2}{(x - \Delta x)^2} + 1} \qquad d_{min} = n \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{(l - \Delta l)^2}{(x + \Delta x)^2} + 1}$$

   niepewność pomiaru Δd wyliczymy następująco:

$$\Delta d = \frac{d_{max} - d_{min}}{2}$$

5. Ostatnim krokiem powinno omówienie formy zapisu wyniku w postaci $d = \bar{d} \pm \Delta d$
   Należy wyjaśnić uczniom, że:
   a. niepewność określamy z dokładnością do 2(lub1) cyfr znaczących
   b. zaokrąglenie niepewności dokonujemy zawsze „w górę” (to dość bezpieczna reguła)
   c. obliczoną odległość d zaokrąglamy do rzędu niepewności