

Zdjęcie 51 – krok po kroku

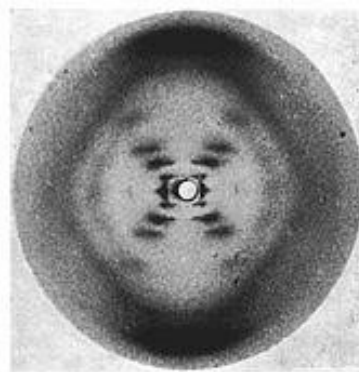


Wspierają nas:

„Biofizykiem jest ten, kto twierdzi, że tak jest i przyprowadzi dwóch świadków, którzy to potwierdzą.”

Trzy słowa wstępu

Mikroskopia nie jest jedynym narzędziem pozwalającym na badanie układów biologicznych. Zawodzi, jeżeli chcemy badać obiekty o rozmiarach białka, czy jeżeli chcemy się przyjrzeć strukturze DNA. W tym ćwiczeniu będziemy się starali przeprowadzić Was krok po kroku przez eksperyment, który ma na celu odtworzenie wyników uzyskanych przez Rosalind Franklin w 1953 r. (słynne „Zdjęcie 51”). To zdjęcie pozwoliło na wyznaczenie struktury DNA.



*„Zdjęcie 51” przedstawiające
wzór dyfrakcyjny po rozpraszaniu
promieni X na DNA, autorstwa
Rosalind Franklin*

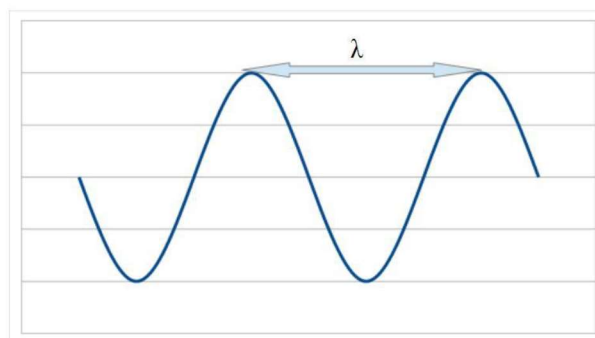
Trochę teorii

Aby zrozumieć, co dzieje się podczas tego eksperymentu, należy się przyjrzeć kilku zagadnieniom. Spokojnie, nie będziemy nadto przynudzać. Mamy nadzieję, że uda się wszystko wytłumaczyć „na palcach”.

Światło i jego natura

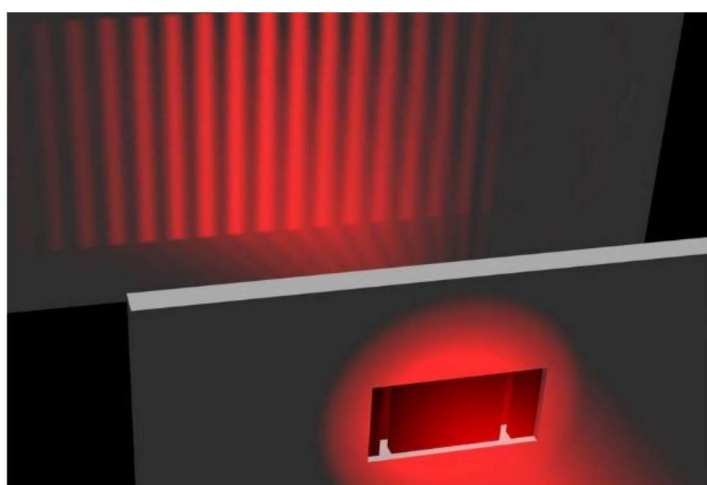
Pytania dla dociekliwych:

- Czym jest tęcza Maxwella?
- Czym jest dualizm korpuskularno-falowy?
- Jakie są różnice między mikroskopem optycznym i elektronowym?



Rysunek 1. Długość fali (λ)

Na samym początku trzeba powiedzieć, czym jest światło. Świat mechaniki kwantowej trochę komplikuje nam sprawę z racji swojej dziwnej natury. W tym świecie obiekty mogą być w wielu miejscach i wielu stanach na raz (bardzo polecamy trochę głębiej przyjrzeć się temu tematowi). Jednak w tym wypadku wystarczy nam (nieco przeterminowane) spojrzenie z perspektywy fizyki Newtonowskiej, czyli klasycznej. Światło ma naturę falową, a dokładnie jest falą elektromagnetyczną. Oznacza to ni mniej, ni więcej, że podlega prawom jednego z najważniejszych działów fizyki, czyli fizyce fal. Podlega ugięciom (dyfrakcji), polaryzacji, wzmacnianiu i wygaszaniu (interferencji). Może te pojęcia brzmią szumnie, ale zaraz postaramy się je trochę wyjaśnić. W zależności od długości fali elektromagnetycznej (rys. 1) możemy je podzielić na rodzaje światła. Każdy rodzaj światła jest w stanie przechodzić przez różnego rodzaju obiekty. Dla przykładu porównajmy światło widzialne, fale radiowe i promieniowanie X. Wszyscy bardzo dobrze wiemy, że światło widzialne (długość fali 380-750 nm) jest bardzo łatwo zablokować. Wystarczy kartka papieru, czy płachta materiału w postaci parasola. Z falami radiowymi już jest trudniej. Przyjrzyjmy się sygnałowi Wi-Fi. Gdy chodzisz po domu z telefonem, zazwyczaj w każdym zakamarku masz zasięg. Oznacza to, że sygnał **Wi-Fi (fala o długości 12,5cm!)** jest w stanie przechodzić przez betonowe ściany budynku, ale zatrzyma się na pojedynczej warstwie folii aluminiowej. Promieniowanie X ma z kolei długość fali równą około 0,01nm. Jest ono w stanie przejść przez znacznie więcej niż kartka papieru czy betonowa ściana. Aby je zatrzymać potrzebna jest gruba ołowiana płyta. Cechy fali światła zależą od jej długości, która jej najważniejszym parametrem opisującym promieniowanie.



Rysunek 2. Doświadczenie Younga. Zobrazowanie interferencji światła

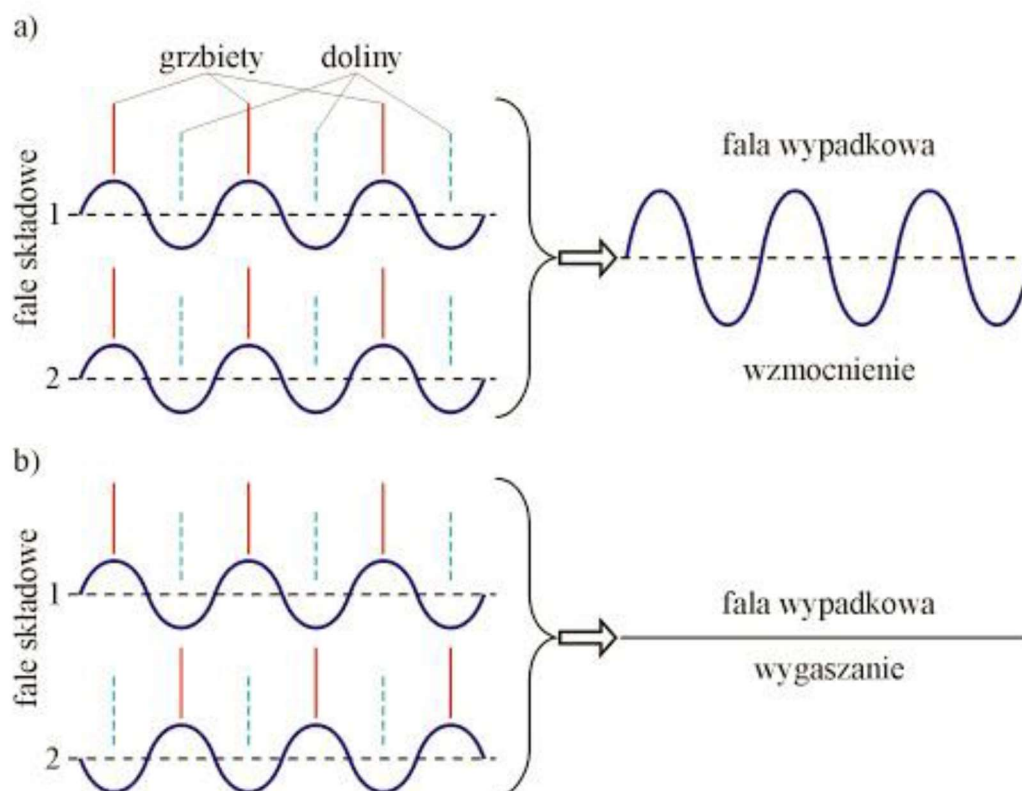
Dyfrakcja, interferencja i w końcu dyfraktometria

Pytania dla dociekliwych:

- Jak powstaje tęcza?
- Dlaczego do prześwietleń używa się promieniowania X, a nie fal radiowych? (Przecież fale radiowe są bezpieczniejsze i też przenikają przez tkanki)
- Na czym polega i co udowodniło doświadczenie Younga?
- Jak działa interferometr Michelsona i czym eksperyment LIGO?

Jeżeli przypomnisz sobie z biologii i fizyki temat mikroskopów, to może też przypomnisz sobie, że mikroskopy optyczne mają pewne ograniczenie. Mianowicie nie jesteśmy w stanie przekroczyć pewnej rozdzielczości z racji ściśle określonej długości fali, jaką ma światło z zakresu widzialnego. Oznacza to, że okiem uzbrojonym w zwykły mikroskop nie jesteśmy w stanie powiększyć obrazu więcej niż 1500x. Stosując kilka sztuczek (wykorzystanie światła spolaryzowanego, czy wkroczenie w obszar światła ultrafioletowego) jesteśmy w stanie przesunąć ten limit do 3500x. To nadal za mało, żeby przyrzeć się takim obiektom jak białka, DNA czy małe proste cząsteczki. Tymczasem wiemy, jak wygląda DNA, znamy struktury ponad 10.000 białek. Jak wobec tego uzyskaliśmy te informacje? Tu z pomocą przychodzi między innymi dyfrakcja. Jak już wcześniej wspominaliśmy, fale elektromagnetyczne ulegają interferencji i dyfrakcji. W bardzo dużym skrócie:

Dyfrakcja to uginanie się fali, czyli po prostu zmiana toru, po którym biegnie światło.



Rysunek 3. Interferencja konstruktywna i destruktywna

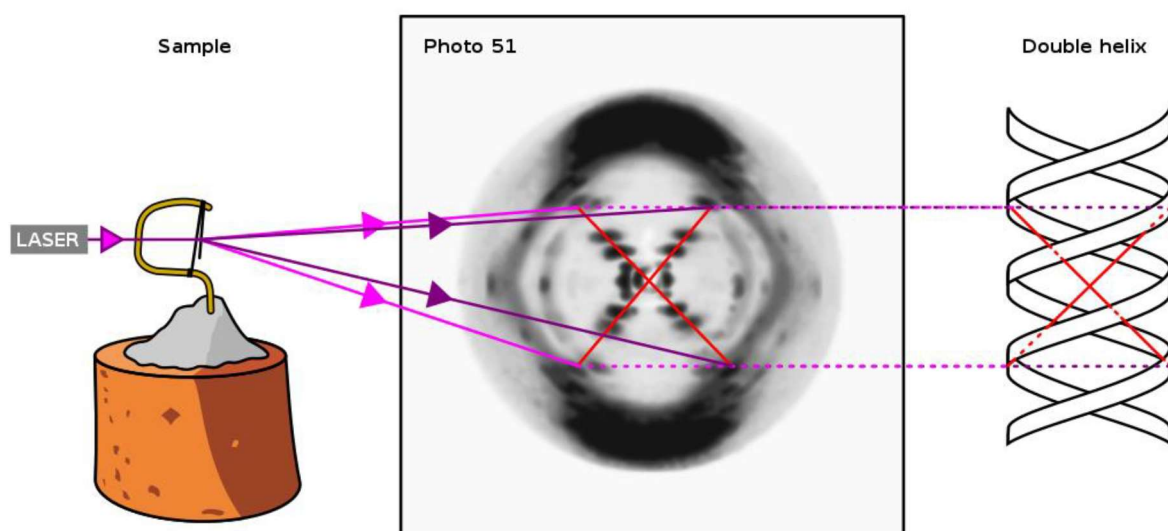
Interferencja to nakładanie się fali, co może prowadzić do jej wzmocnienia lub wygaszenia. Wyobraź sobie dwie równoległe biegnące fale. Trafiają one w pewnym momencie na szczelinę (rys.3). Nastąpi wtedy ugięcie obu tych fal. Nie jest trudno się domyślić, że przestaną one biec równoległe i w pewnej odległości za szczeliną się skrzyżują. To właśnie w miejscu skrzyżowania dojdzie do interferencji. W zależności od tego czy fazy tych fal, czyli czy wierzchołki fal się na siebie nałożą, czy będą ułożone na przemian, będziemy mieli wzmocnienie (interferencja konstruktywna) fali, lub jej wygaszenie (interferencja destruktywna). Wiemy, że światło ma naturę falową, więc jeżeli będziemy obserwować interferencję fal światła, to w miejscu wzmocnienia będziemy widzieć jasną plamkę, a w miejscu wygaszenia tego światła po prostu nie będzie i będziemy widzieli ciemniejszy obszar (rys. 2). Niezależnie od długości fali, będziemy mogli obserwować ten sam efekt (choć nie zawsze gołym okiem). Wiedząc to wszystko, można wreszcie skutecznie wyjaśnić jak działa dyfraktometria.

Przy mikroskopach optycznych mieliśmy ograniczenie w postaci długości fali, które nie pozwalało nam przekroczyć pewnego progu rozdzielczości. Tu należy zadać sobie pytanie: „A co jeżeli użyjemy fali o krótszej długości?”. Takie pytanie zadali sobie fizycy, kiedy napotkali barierę rozdzielczości dla mikroskopów optycznych. Okazało się, że to pytanie było strzałem w dziesiątkę. Kilka linijek temu mówiliśmy o tym, że każde promieniowanie ulega dyfrakcji i interferencji. Tu nasuwa się ważna obserwacja:

Im krótszą falę weźmiemy, tym na mniejszych obiektach jesteśmy w stanie dokonać jej dyfrakcji. Jeżeli użyjemy promieniowania X będziemy w stanie ugiąć je na tak małych obiektach jak jądra atomowe czy elektrony!

To otworzyło wrota do nowej ery w badaniach biologicznych. Dzięki temu, że jest możliwe rozpraszanie fal na jądrach atomowych, możemy patrzeć, jakie „cienie” rzucają grupy atomów ułożonych w białko czy DNA. Analizując prążki interferencyjne (rys. 3 i 4) uzyskane przez dyfrakcję promieniowania na obiektach biologicznych, uzyskujemy zakodowaną informację o ich strukturze. O tym jak odszyfrowywać takie informacje, opowiemy za chwilę.

**Już wystarczająco wynudziliśmy Cię teorią, więc czas na trochę zabawy i eksperymenty!
Używając dyfraktometrii wyznaczymy wymiary żarnika żarówki.**



Rysunek 4. Schemat przedstawiający doświadczenie przeprowadzone przez R. Franklin w 1953 r. Na środku widać prążki interferencyjne uzyskane przez rozproszenie promieniowania na DNA.

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f6/Experimental_setup_of_Photo_51.svg/1024px-Experimental_setup_of_Photo_51.svg.png

Co będzie potrzebne?

- wskaźnik laserowy (najlepiej zielony)
- żarówka (z żarnikiem, może być przepalona; żarówka LED się nie nadaje!)
- plastelina
- włos
- deska do krojenia
- papier toaletowy
- foliowy woreczek (na tyle duży żeby zmieścić żarówkę)
- młotek (lub coś, czym można rozbić żarówkę)
- pęseta lub coś o podobnym zastosowaniu
- coś, co może posłużyć jako statyw (np. drut)
- kartka papieru (gładka, A4)
- taśma klejąca
- czarny flamaster i ołówek.
- kątomierz i linijka
- okulary przeciwsłoneczne

UWAGA!

Podczas tego ćwiczenia będziesz korzystać z lasera! Pod żadnym pozorem nie patrz bezpośrednio na źródło światła ani nie świeć nikomu po oczach, gdyż grozi to uszkodzeniem lub utratą wzroku! Całe ćwiczenie powinno być wykonywane pod nadzorem osoby dorosłej.

W związku z tym, że pozyskiwanie czystego DNA w domowych warunkach jest bardzo trudne oraz z uwagi na fakt, że dyfraktometry są ekstremalnie drogimi i trudnymi w obsłudze urządzeniami, posłużymy się trochę przeskalowanym układem. Tanim i powszechnym źródłem uporządkowanego promieniowania są wskaźniki laserowe. Jednak, generują one falę o znacznie większej długości (laser czerwony: 655nm, laser zielony: 532nm). Przez to będziemy musieli również przeskalować nasz obiekt badań. Zamiast DNA użyjemy żarnika ze starej żarówki.

Zanim przystąpisz do wykonania eksperymentu przeczytaj dokładnie cały protokół!

Przygotowanie obiektu do badań

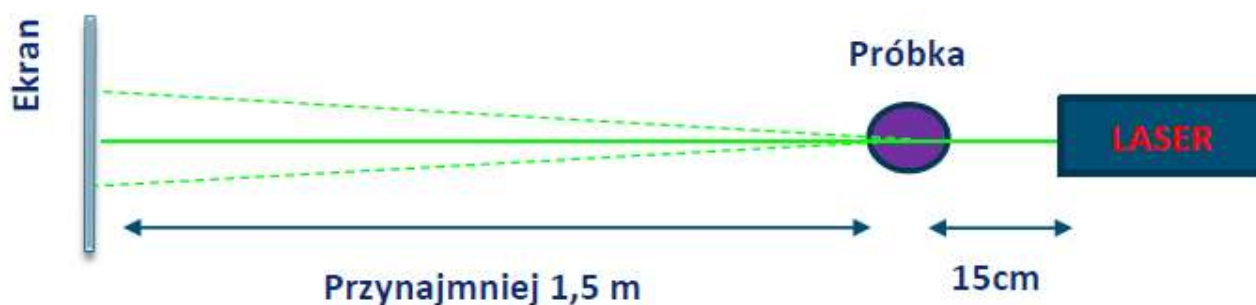
Jak już udało Ci się znaleźć żarówkę, należy wydobyć z jej wnętrza żarnik. Zadanie to nie jest łatwe i **grozi skaleczeniem**, więc należy przy tym zachować ostrożność. Żarówkę owiń grubszą warstwą papieru toaletowego i włóż do woreczka foliowego. Połóż ją na desce i przy użyciu młotka delikatnie rozbij opakowaną żarówkę. Po rozbiciu ostrożnie wyjmij zawiniątko i bardzo ostrożnie rozedrzyj papier.

UWAGA NA SZKŁO!

Przy użyciu pęsety rozgrzeb potłuczone szkło i delikatnie wyjmij wolframowy żarnik. Uwaga, jest kruchy i delikatny. Jeżeli się rozpadnie, to nic się nie stanie. Ważne żeby mieć fragment o długości ok. 1cm. Rozbitą żarówkę zawiń z powrotem w papier, włóż do woreczka i wyrzuć do śmieci zgodnie z zasadami segregacji, czyli do pojemnika na odpady zmieszane (szkło z żarówek nie nadaje się do recyklingu). Wyjęty żarnik odłóż w takie miejsce żeby go nie zgubić.

Budowanie układu eksperymentalnego

Przygotuj sobie przestrzeń do wykonania eksperymentu. Zrób porządek na blacie lub stole i jeśli to możliwe, ustaw je tak, jak na schemacie.



Pamiętaj, że im dalej postawisz laser od ekranu, tym będziesz mieć większy obraz dyfrakcyjny i tym większą rozdzielczość uzyskasz, ale trudniej będzie go przerysować w całości na kartkę.



Statyw "pojedynczy"

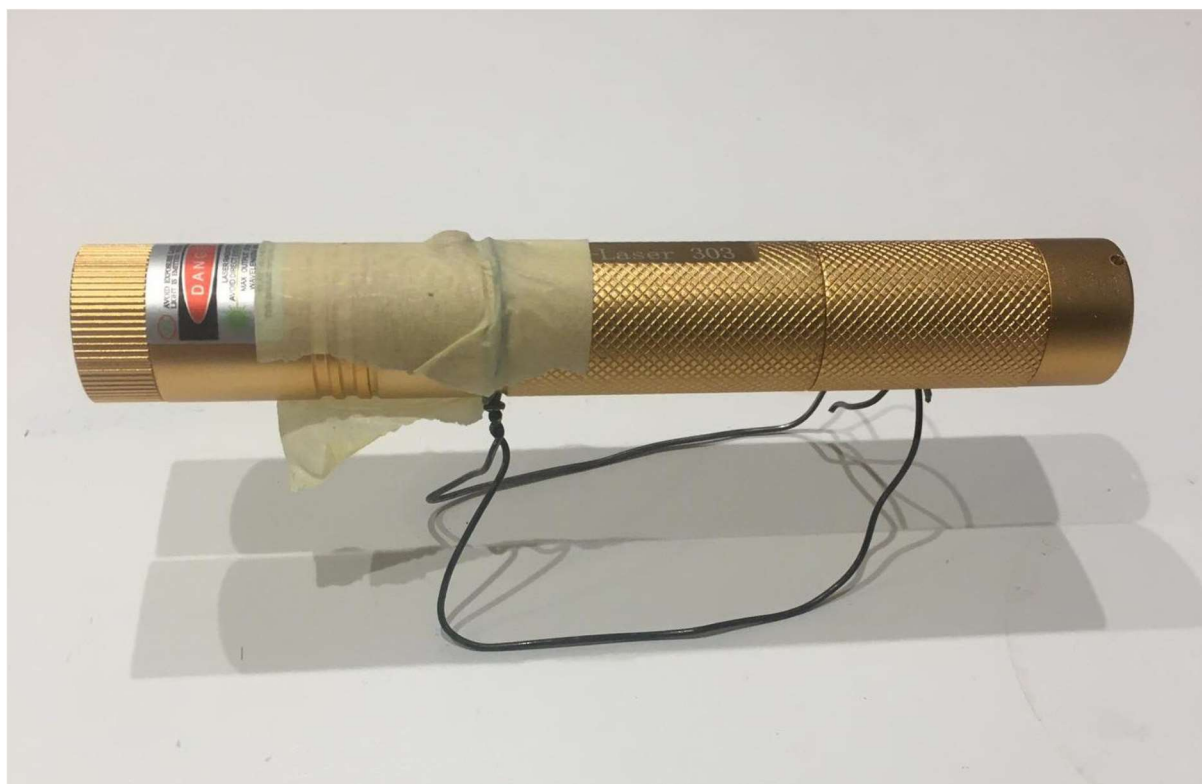


Statyw "podwójny"

Utnij dwa kawałki drutu, o długości ok. 10 cm i wygnij je w sposób pokazany na zdjęciach powyżej. Postaraj się, żeby końce podwójnego statywu były nieco wyżej niż koniec statywu pojedynczego. Na koniec „pojedynczego” statywu nabij małą kulkę z plasteliny. Teraz weź fragment (ok. 1cm) żarnika i delikatnie wetknij go pionowo w plastelinę. Na końce „podwójnego” statywu nabijamy 2 kulki z plasteliny i rozpinamy między nimi włos.

Teraz, przy pomocy drutu i/lub plasteliny zrób statyw na laser (np. taki, jak na zdjęciu). Na sam koniec przygotuj sobie ekran. Na środku kartki papieru, przy pomocy flamastra zrób czarną kropkę o średnicy 0,5-1cm.

Używając taśmy, przyklej kartkę do ściany lub np. do kartonu po mleku czy plastikowej butelki. Zgaś światło w pokoju lub ośłoń ekran od światła słonecznego.



Przykładowy statyw na laser

Teraz włącz laser i ustaw go tak, żeby jego światło padało na czarną kropkę na ekranie. To bardzo ważne! Jeżeli trącisz laser lub go przesuniesz, należy go ustawić ponownie.

Ten etap najlepiej wykonać w okularach przeciwsłonecznych.

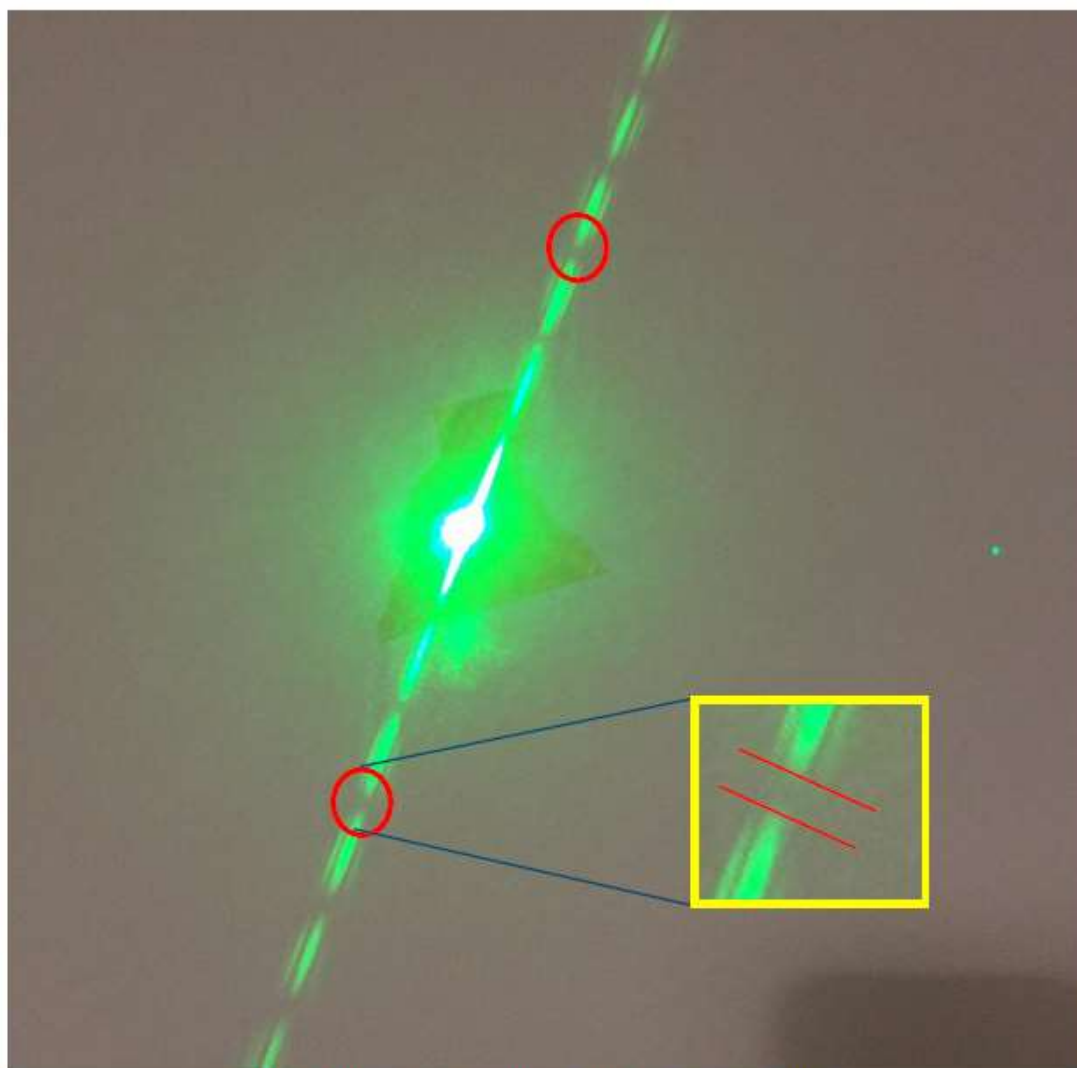
Żeby sobie ułatwić zadanie możesz przycisk włącznika zakleić taśmą tak, żeby wskaźnik pracował cały czas. Jednak grozi to szybszym rozładowaniem baterii we wskaźniku.

Wykonywanie pomiarów

UWAGA! Podczas ustawiania obiektów w wiązce lasera dochodzi do jej rozproszenia. Na czas ustawiania próbek załóż okulary przeciwsłoneczne!

Uruchom laser i wsuń w jego wiązkę włos rozpięty na „podwójnym” stojaku i zaznacz, w którym miejscu go umieścisz/aś. Najpewniej będziesz go musiał/a troszkę podoginać „góra/dół” tak, żeby włos znalazł się w wiązce.

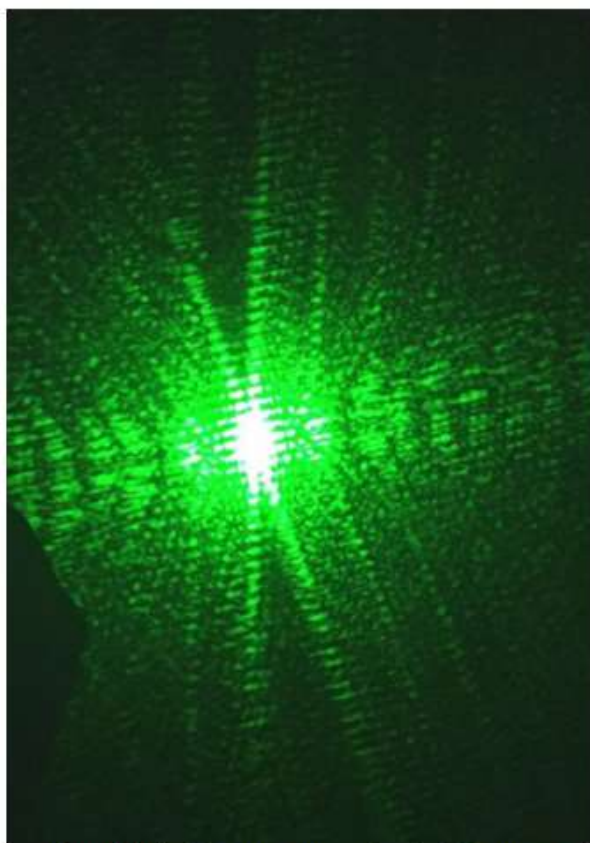
Zauważysz wtedy, że na ekranie zamiast pojedynczej kropki pojawi się przerywana linia (powinna wyglądać tak, jak na zdjęciu poniżej).



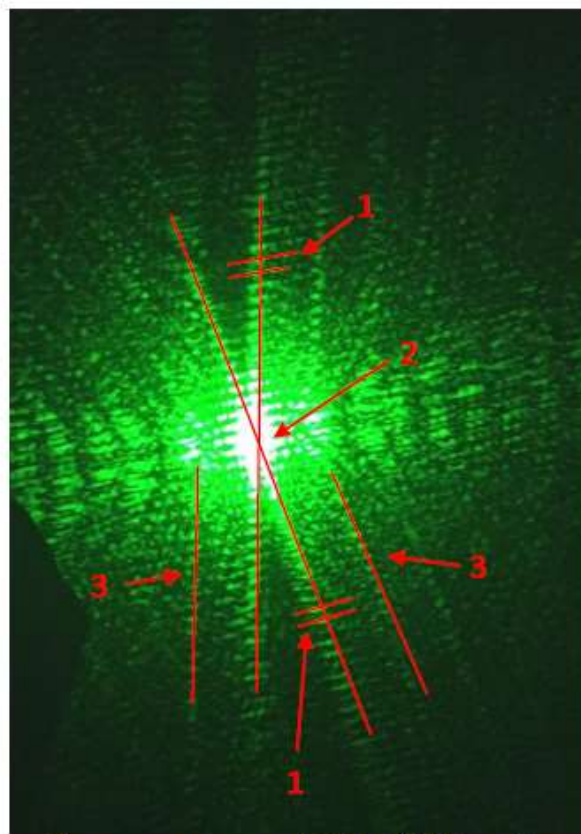
Obraz dyfrakcyjny po rozproszeniu wiązki lasera na włosie

Przy pomocy linijki zmierz jedną z przerw pomiędzy jasnymi liniami i zapisz wynik (zaznaczone na zdjęciu).

Następnie wysuń stojak z włosiem sprzed wiązki lasera i w jego miejsce wstaw pojedynczy stojak z kawałkiem żarnika. Też dopasuj go tak żeby żarnik znalazł się w wiązce lasera. Na ekranie pojawi się zupełnie inny obraz (powinien wyglądać tak, jak na zdjęciu poniżej).



Obraz dyfrakcyjny po rozproszeniu wiązki lasera na żarniku



Na czerwono zaznaczono linie (1, 2 i 3) które należy odrysować aby była możliwa analiza obrazu

Jeżeli obraz będzie wyglądał inaczej, spróbuj delikatnie poprzesuwać stojak lewo/prawo, góra/dół (cierpliwości).

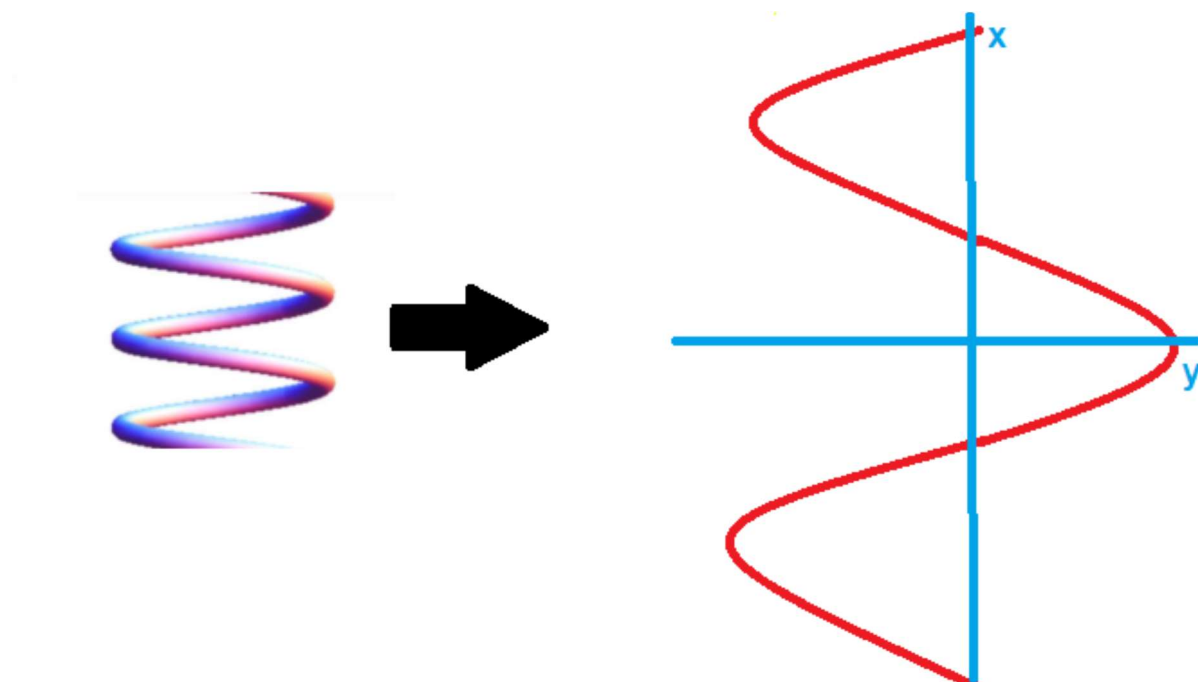
Weź ołówek i odrysuj elementy obrazu zaznaczone na zdjęciu obok. Możesz sobie pomóc linijką. Nie muszą być bardzo dokładne, najważniejsza jest zgodność w położeniu. Po przerysowaniu linii można wyłączyć laser i rozmontować układ.

Teraz przyszedł czas na analizę danych zebranych podczas eksperymentu!

Co i dlaczego zobaczyłeś/aś na ekranie - analiza danych

We wstępie teoretycznym staraliśmy się wyjaśnić, na czym polega dyfrakcja i interferencja, którą obserwowałeś/aś na ekranie, w momencie, gdy umieszczałeś/aś próbki w świetle lasera. Fale świetlne będą się załamywać w różny sposób w zależności od tego, jaki kształt stanie na drodze lasera i w jaki sposób zostanie ustawiony. Przyjrzyj się jeszcze raz zdjęciom wzorów dyfrakcyjnych powyżej. Dla pojedynczego włosa mieliśmy tylko jedną przerywaną linię (ewentualne szumy po bokach są efektem niedoskonałości budowy wskaźnika i/lub mało dokładnym ustawieniem próbki w promieniu lasera). Te

przerwy są wynikami zjawiska interferencji, czyli wygaszenia i wzmocnienia fali świetlnej, która ugięła się na brzegu włosa. Długości tych wygaszeń i wzmocnień są proporcjonalne do grubości włosa. Teraz spójrzmy na obraz dyfrakcyjny, który dostałeś/aś po rozproszeniu światła na żarniku. Otrzymałeś/aś wzór przypominający $> X <$. Dlaczego tak się dzieje? Tu z odpowiedzią przychodzi podstawowa metoda używana w fizyce, czyli upraszczanie badanych układów. Przyjrzyjmy się dokładnie sprężynie. Jeżeli ustawisz ją prostopadłe do siebie to zauważysz, że gdybyś chciał/a ją odrysować to uzyskasz kształt bardzo przypominający wykres funkcji sinus lub cosinus (rys. 5), albo po prostu falę.

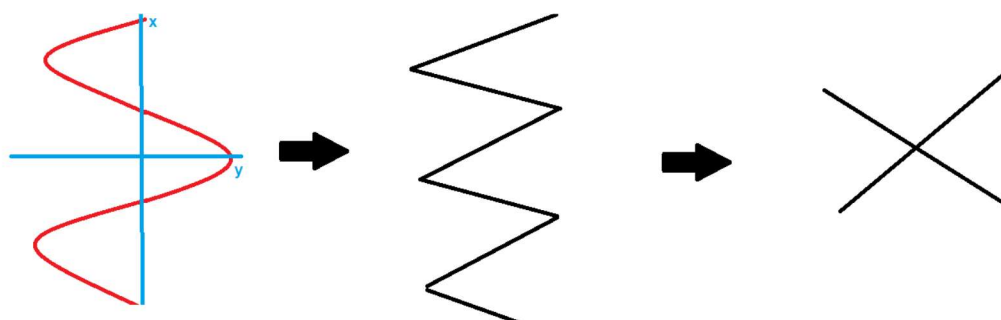


Rysunek 5. Porównanie sprężyny do funkcji cosinus

W związku z tym, że fizycy są leniwi i lubią sobie upraszczać życie, to spróbujmy teraz jeszcze bardziej uprościć nasz problem. Jeżeli się przyjrzymy wykresowi funkcji sinus to z całkiem niezłą dokładnością jesteśmy go w stanie przybliżyć do czegoś, co będzie przypominać $\wedge\wedge\wedge$ (rys. 5). Teraz przypomnij sobie, jak wyglądał obraz dyfrakcyjny dla pojedynczej linii, czyli włosa. Była to jedna przerywana prosta. Jakbyśmy umieścili w wiązce dwie skrzyżowane linie, to otrzymalibyśmy dwie skrzyżowane linie na obrazie dyfrakcyjnym. Dokładnie to stało się w momencie umieszczenia sprężyny w wiązce lasera. Ponieważ nasz obiekt jesteśmy w stanie sprowadzić do skrzyżowanych linii (rys. 6), to teraz pojawia się dodatkowe pytanie: Skąd się wzięły dodatkowe linie rozchodzące się od środkowego X ?

Odpowiedź jest prostsza, niż mogłoby się zdawać. Sprężyna, tak jak wykres sinusa, składa się z wielu powtórzeń tego samego kształtu. Te dodatkowe linie >> << po bokach X to nic innego jak rozproszenia z kolejnych skrętów sprężyny! Wiedząc to wszystko, możemy spróbować wyliczyć wymiary badanego żarnika.

Pewnie zadajesz sobie pytanie, po co najpierw sprawdzaliśmy, jaki obraz uzyskamy dla włosa. Dyfraktometria jest metodą porównawczą do wzorca. W naszym przypadku obiektem o znanych wymiarach (grubości) jest włos. Średnia grubość ludzkiego włosa wynosi około 0,07mm i tej wartości będziemy używać, jako referencyjnej. Posłuży nam ona do kalibracji Twojego dyfraktometru.



Rysunek 6. Uproszczenie problemu.

Na tym etapie będą Ci potrzebne:

Kartka, długopis, kalkulator, linijka, kątomierz i wyniki z eksperymentu.

Kalibracja układu i wyznaczenie grubości drutu

Należy zacząć od wyznaczenia proporcji, aby uzyskać informację o tym, jaki jest punkt referencyjny. Pozwoli to skalibrować układ pomiarowy.

0,07mm - zmierzona długość przerwy z pierwszego obrazu (dla włosa)

g - zmierzona długość przerwy „1” z drugiego obrazu

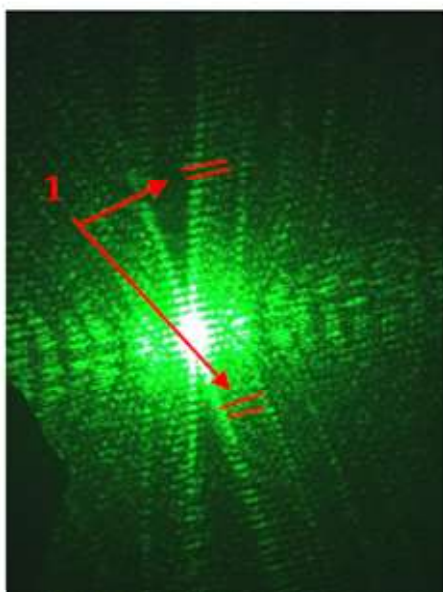
$$g = \frac{0,07 \cdot \text{zmierzona długość przerwy „1” z drugiego obrazu}}{\text{zmierzona długość przerwy z pierwszego obrazu (dla włosa)}} [mm]$$

Wyznaczona wartość g daje nam informacje o dwóch rzeczach:

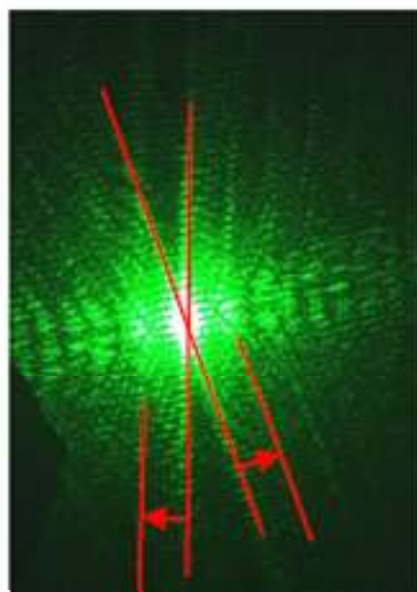
1. O tym jak się ma 0,07mm do odległości na naszych obrazach dyfrakcyjnych.

2. Jaką grubość ma drucik wolframowy, z którego jest zrobiony żarnik (wg Wikipedii, drut wolframowy używany do produkcji żarników ma grubość 0,046mm. Podczas naszych pomiarów uzyskaliśmy grubość równą 0,052mm. Jeżeli twoje wyniki są zbliżone, to wszystko idzie dobrze. Jeżeli nie, to albo został popełniony błąd na etapie pomiarów, albo używasz jakiegoś innego typu żarówki).

Teraz nasz układ jest już skalibrowany i można wyznaczyć pozostałe parametry sprężyny, takie jak skok (czyli odległość między kolejnymi skrętami) czy średnica.



Rys. 7. Należy zmierzyć jeden z cieni czyli jedną z zaznaczonych odległości dw.



Rysunek 8. Odległość, którą należy zmierzyć.

Wyznaczenie skoku sprężyny.

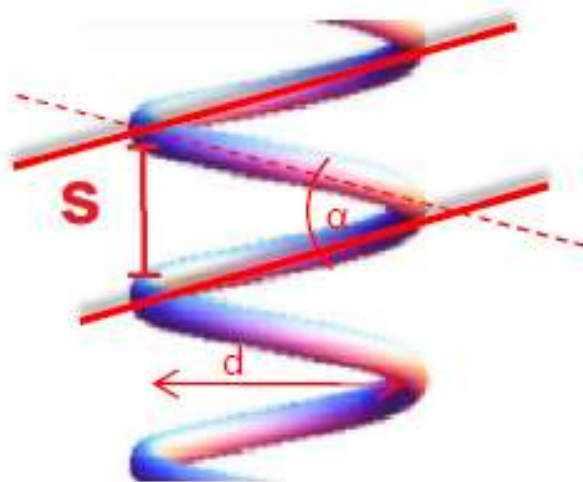
Na kartce, która była naszym ekranem, poza zaznaczeniem długości przerwy orysowałeś/aś środkowy X oraz jedną z dodatkowych linii po bokach. Zmierz odległość między jednym z ramion X (jak zaznaczone na rysunku 8). Następnie, jak w poprzednim kroku, wstaw ten wynik do odpowiedniej proporcji:

0,07mm - zmierzona długość przerwy z pierwszego obrazu (dla włosa)

s - zmierzona między ramieniem X a jedną z dodatkowych linii

$$S = \frac{0,07 * \text{zmierzona między ramieniem X a jedną z dodatkowych linii}}{\text{zmierzona długość przerwy z pierwszego obrazu (dla włosa)}} [mm]$$

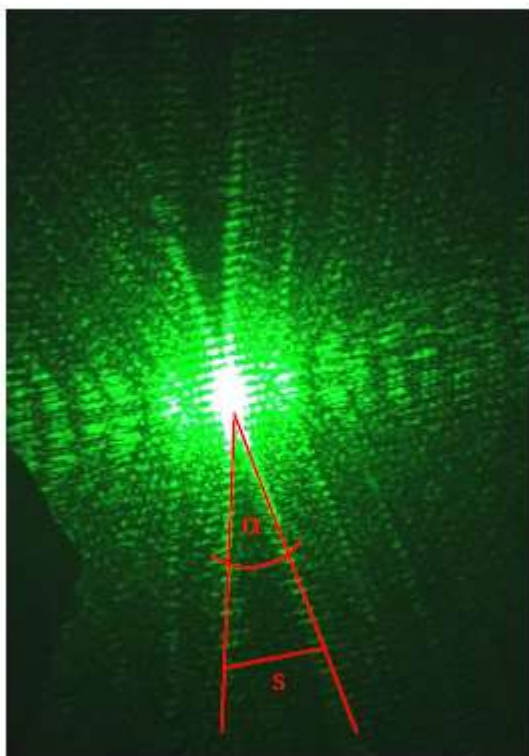
Tutaj wyliczyłeś/aś, jaka jest odległość (s) między kolejnymi powtórzeniami kształtu w sprężynie (rys. 9). W następnym kroku, używając kąta α wyznaczysz średnicę sprężyny (d).



Rys. 9. Skok sprężyny (s)

Wyznaczenie średnicy sprężyny

Tutaj przychodzi nam z pomocą podstawowa trygonometria. Zmierz



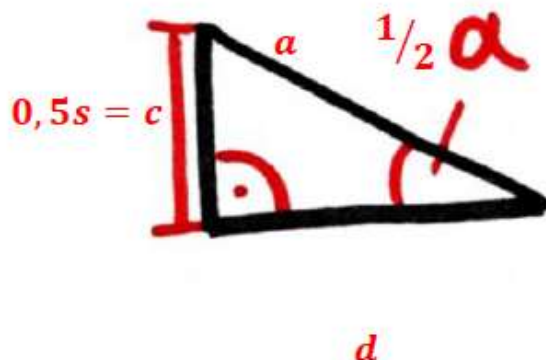
Rys. 10. Kąt, który należy zmierzyć.

kąt, jaki tworzą ramiona X (tak jak na rysunku 10). Zaznaczony trójkąt o podstawie s (rys. 9 i 10) nie jest trójkątem prostokątnym, więc mielibyśmy problem, żeby wyznaczyć jakiegokolwiek innego jego parametru. Natomiast, bardzo prosto możemy z niego zrobić trójkąt prostokątny. Mianowicie, wystarczy go przeciąć na pół wzdłuż wysokości. W praktyce, sprowadza się to do podzielenia uzyskanego kąta na pół. Mamy pierwszą informację, która jest wymagana do policzenia średnicy. Drugą daną, której potrzebujemy, jest długość jednego z boków trójkąta, ale to również mamy. W poprzednim kroku zmierzyłeś/aś

skok naszej sprężyny (s). To jest podstawa naszego trójkąta. Jednak nie znamy długości pozostałych dwóch boków. Jeżeli podzielimy uzyskaną długość s przez 2, będziemy mogli uzyskać brakujące informacje (patrz rysunek poniżej). Korzystając z własności trójkąta prostokątnego i funkcji trygonometrycznej możemy wyznaczyć długość kolejnego ramienia, która w tym wypadku będzie odpowiadała średnicy sprężyny (czyli d , z rysunku

$$\sin(\alpha) = \frac{c}{a} \rightarrow \frac{c}{\sin(\alpha)} = a$$

$$\cos(\alpha) = \frac{d}{a} \rightarrow \cos(\alpha) * a = d$$



poniżej).

Wartość dla a pozwoli skontrolować poprawność Twoich obliczeń. Nasza sprężynka ma bardzo mały kąt nachylenia, więc a i d powinny mieć zbliżoną wartość. Jeżeli tak faktycznie jest oznacza to, że Twoje wyniki mogą być bliskie rzeczywistym!

Voilà! Tak samo jak Rosalind Franklin, która wyznaczyła strukturę DNA, udało Ci się wyznaczyć wymiary sprężyny, korzystając jedynie z wzoru dyfrakcyjnego i potęgi matematyki!

Gorąco zachęcamy, abyś powtórzył/a sobie ten eksperyment, ale z innymi próbkami. Oczywiście zawsze należy pamiętać o czymś, co pozwoli nam wyznaczyć punkt odniesienia.

Bibliografia:

<https://www.biophysics.org/education-careers/education-resources/Lesson-Plans-Experiments/replicating-x-ray-of-dna>

The structure of sodium thymonucleate fibers, R. E. Franklin, R. G. Gosling, *Acta Crystallographica* (1953). 6, 673

Rosalind Franklin's X-ray photo of DNA as an undergraduate optical diffraction experiment, J. Thompson, G. Braun, D. Tierney, L. Wessels, and H. Schmitzer, *American Journal of Physics* 86:2, 95-104